

**KARIŞIK ENDÜSTRİYEL ATIKSULARIN
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITIMI**

Seçil GÜREL
Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliğı Anabilim Dalı
Temmuz-2013

JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seçil Gürel’in “Karışık Endüstriyel Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımı” başlıklı **Çevre Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 02.07.2013 tarihinde, aşağıdaki juri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN	
Üye	: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ	
Üye	: Prof. Dr. A. Savaş KOPARAL	
Üye	: Prof. Dr. Ferdi GERÇEL	
Üye	: Doç. Dr. Yeşim GÜÇBİLMEZ	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
.....tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KARIŞIK ENDÜSTRİYEL ATIKSULARIN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITIMI

Seçil GÜREL

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

İkinci Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

2013, 109 sayfa

Bu çalışmada, Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtım Tesisi girişinden alınan karışık ham endüstriyel atıksuyun elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliği araştırılmış; tesisten temin edilen ham atıksuya, demir ve alüminyum elektrot kullanılarak elektro-pıhtılaştırma ve elmas elektrotla elektro-yükseltgeme uygulanmıştır. Deneylerde temel kirlilik parametresi olarak seçilen “Kimyasal Oksijen İhtiyacı” analizleri, TS 2789 ISO 6060/ Nisan 2000 “Su Kalitesi – Kimyasal Oksijen İhtiyacının Tayini” standart metoduna göre yapılmıştır. Ham atıksuya farklı derişimlerde destek elektrolit ekleyerek; farklı akım yoğunluklarında, akış hızlarında ve pH değerlerinde belirli zaman aralıklarında numune alınarak yürütülen deneylerde, Kimyasal Oksijen İhtiyacı giderim verimleri hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmada paralel plakalar şeklindeki çözünebilir demir ve alüminyum elektrotlar ile atıksuya; elektro-pıhtılaştırma yöntemi uygulandığında; en uygun koşullarda; KOİ giderim veriminin yükseldiği ve % 90 civarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Elmas paralel plaka elektrotla elektro-yükseltgeme yapıldığında ise en uygun koşullarda verim yaklaşık % 93’e ulaşmıştır.

Böylece karışık endüstriyel atıksuların haliyle; elektro-pıhtılaştırma ve elektro-yükseltgeme yöntemleriyle doğrudan arıtılabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karışık Endüstriyel Atıksu, Demir, Alüminyum, Elmas, Elektrokimyasal Arıtım, Elektro-pıhtılaştırma

ABSTRACT
Master of Science Thesis
TREATMENT OF MIXED INDUSTRIAL
WASTEWATER BY ELECTROCHEMICAL METHODS
Seçil GÜREL
Anadolu University
Graduate School of Sciences
Environmental Engineering Program
Supervisor: Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
Co-Supervisor: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ
2013, 109 pages

In this study, the treatability of mixed raw industrial wastewater taken from the inlet of the Eskişehir Organized Industrial District Wastewater Treatment Plant by electrochemical methods was investigated. The raw wastewater was treated by electrocoagulation using soluble iron and aluminum electrodes and electrooxidation using diamond electrodes. COD analyses were conducted according to Turkish Standard Method TS 2789 ISO 6060/ April 2000 “Water Quality – Determination of The Chemical Oxygen Demand”. The effects of different concentrations of supporting electrolyte, current densities, flow rates and pH values were investigated.

In experimental study; soluble iron and aluminum parallel plate electrodes were used for electro-coagulation, COD removal efficiency was significantly increased to 90%. By electro-oxidation using boron doped diamond parallel plate electrodes; the efficiency was approximately 93 % in optimum conditions.

As a result; it was concluded that mixed industrial raw wastewater can be directly treated by both electro-coagulation and electro-oxidation.

Keywords: Mixed Industrial Wastewater, Iron, Aluminum, Diamond, Electrochemical Treatment, Electrocoagulation

TEŞEKKÜR

Disiplinin ve gayretin, en doğruya ulaşmanın tek yolu olduğunu daima ifade ederek, bana olan güvenini hissettiren ve beni gayretlendiren; çalışmam süresince, bilgi, hoşgörü, anlayış ve desteğini esirgemeyen; her zaman yanımda olan değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN' e,

Değerli bilgi, görüş ve önerileriyle çalışmama yön vererek katkıda bulunan hocam Sn. Prof. Dr. Yusuf YAVUZ' a,

Öğretim Görevlisi Sn. Emine Esra GEREK'e; Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi personellerinden Sn. Emel ÇELİKEL ve Sevgi DURAN DUMAN' a; ayrıca arkadaşım Aylin KARAKAŞ' a;

Çalışmam boyunca gösterdikleri yoğun ilgi, destek ve anlayış için Başkanım Sn. Ziya SARICI' ya; Müdürüm Sn. Sevim TANYEL' e; Müdür Yardımcım Sn. Aylin ÖZALTAN' a ve tüm mesai arkadaşlarıma,

Beni hayata hazırlayan; maddi manevi desteklerini esirgemeyen, hep yanımda olan biricik anneme, kardeşim Sarper' e ve tüm aileme,

en içten teşekkürlerimi sunar; merhum babamı şükranla anarım.

Seçil GÜREL

Ağustos, 2013

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. KARIŞIK ENDÜSTRİYEL (OSB) ATIKSULAR	2
2.1. Kaynakları ve Özellikleri	2
2.2. Arıtım Yöntemleri	4
2.3. Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi (EOSB).....	6
2.3.1. Atıksu kaynakları ve özellikleri.....	6
2.3.2. Mevcut arıtma tesisi ve özellikleri.....	6
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ	8
3.1. Elektrokoagülasyon (Elektro-Pıhtılaştırma).....	10
3.1.1. Elektro-pıhtılaştırmayı etkileyen faktörler.....	13
3.1.2. Tasarım.....	18
3.1.3. Elektro-pıhtılaştırma süreciyle arıtılmış atıksular.....	20
3.2. Elektro-Yükseltgeme.....	21
3.2.1. Dolaylı elektro-yükseltgeme.....	22
3.2.2. Doğrudan anodik yükseltgeme.....	23
3.2.3. Anotta doğrudan yükseltgenmeyi etkileyen faktörler.....	24
3.2.4. Tasarım.....	29
3.3. Elektro-Yüzdürme.....	31
4. MATERYAL VE METOT	32
4.1. Deney.....	32

4.1.1.Kimyasal oksijen ihtiyacı analizi.....	32
4.2. Atıksuda Yapılan Diğer Analizler.....	34
4.3. Deney Sonuçlarının Hesaplanması.....	35
4.4.Paralel Plaka Elektrotlar Kullanılarak Yapılan Çalışma.....	36
4.4.1. Demir ve alüminyum elektrotlar.....	36
4.4.1.1. Deneyin amacı ve deney düzeneği.....	36
4.4.1.2 Deney.....	38
4.4.2. Elmas paralel plakalı reaktörde elektro-yükseltgeme.....	39
4.4.2.1. Deneyin amacı ve deney düzeneği.....	39
4.4.2.2. Deney.....	39
4.4.2. Hesaplamalar.....	40
5. DENEYSEL SONUÇLAR	42
5.1. Demir Paralel Plaka Elektrotlarla Elektro-Pıhtılaştırma Deney Sonuçları.....	42
5.2. Alüminyum Paralel Plaka Elektrotlarla Elektro-Pıhtılaştırma Deney Sonuçları.....	60
5.3. Elmas Paralel Plaka Elektrotlarla Elektro-Yükseltgeme Deney Sonuçları.....	75
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	102
KAYNAKLAR	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

3.1. Elektro-pıhtılaştırma birimi (a) çoklu kanal ve (b) tek kanal.....	19
3.2. Silindirik elektrotlu elektro-pıhtılaştırma birimi (a) üstten ve (b) yandan görünüş.....	19
3.3. Silindirik elektrolitik pıhtılaştırma biriminde çubuk elektrotlar	20
3.4. Silindirik elektrotlu reaktör.....	29
3.5. Sıkıştırılmış yataklı elektrokimyasal reaktör.....	30
3.6. İki kutuplu damlatmalı kule reaktör.....	30
4.1. KOİ analizinde kullanılan termo-reaktör (a) ve cam tüpler (b).....	32
4.2. Paralel plaka elektrot.....	36
4.3. Deney düzeneği.....	37
4.4. Elmas paralel plaka elektrot.....	39
5.1. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V=500 mL).....	46
5.2. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	46
5.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	47
5.4. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	49
5.5. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	49
5.6. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	49
5.7. KOİ' nin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	52
5.8. KOİ gideriminin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	52
5.9. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM	

Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	52
5.10. KOİ' nin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal V= 500 mL).....	56
5.11. KOİ gideriminin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal V= 500 mL).....	57
5.12. Enerji tüketiminin H ₂ O ₂ derişimi ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	57
5.13. KOİ' nin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	58
5.14. KOİ gideriminin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	59
5.15. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	59
5.16. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	63
5.17. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	63
5.18. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL).....	63
5.19. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	66
5.20. KOİ giderimin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	66
5.21. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL).....	66
5.22. KOİ'nin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	68
5.23. KOİ giderimin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	69
5.24. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	69

5.25. KOİ'nin PAC ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	71
5.26. KOİ gideriminin PAC ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	72
5.27. Enerji tüketiminin PAC ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	72
5.28. KOİ'nin Kerafloc ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	74
5.29. KOİ gideriminin Kerafloc ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	75
5.30. Enerji tüketiminin Kerafloc ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , V= 500 mL).....	75
5.31. KOİ' nin Na ₂ SO ₄ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	78
5.32. KOİ gideriminin Na ₂ SO ₄ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	78
5.33. Enerji tüketiminin Na ₂ SO ₄ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	78
5.34. KOİ' nin NaNO ₃ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	84
5.35. KOİ gideriminin NaNO ₃ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	85
5.36. Enerji tüketiminin NaNO ₃ ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , pH doğal, V= 250 mL).....	85
5.37. KOİ' nin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL).....	87
5.38. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL).....	88
5.39. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL).....	88

5.40. KOİ' nin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL).....	91
5.41. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL).....	91
5.42. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL).....	91
5.43. KOİ'nin pH ile değişimi (I=0,8 A, i=20 mA/cm ² , 10 mM Na ₂ SO ₄ , V= 250 mL).....	93
5.44. KOİ giderimin pH ile değişimi (I=0,8 A, i=20 mA/cm ² , 10 mM Na ₂ SO ₄ , V= 250 mL).....	94
5.45. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=0,8 A, i=20 mA/cm ² , 10 mM Na ₂ SO ₄ , V= 250 mL).....	94
5.46. KOİ'nin pH ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , 7mM NaNO ₃ , V= 250 mL).....	96
5.47. KOİ gideriminin pH ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , 7mM NaNO ₃ , V= 250 mL).....	97
5.48. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , 7mM NaNO ₃ , V= 250 mL).....	97
5.49. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	97
5.50. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	98
5.51. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	98
5.52. KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	98
5. 53. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	99
5.54. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm ² , V= 250 mL).....	99

5.55. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V=$ 250 mL).....	99
5.56. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V= 250$ mL).....	100
5.57. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V= 250$ mL).....	100
5.58. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V=$ 250 mL).....	100
5.59. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V= 250$ mL).....	101
5.60. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm ² , $V= 250$ mL).....	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Bazı endüstriyel atıkların kaynakları, özellikleri ve arıtma yöntemleri.....	3
2.2. Çeşitli endüstriyel atıksulardaki kirleticiler ve atıksulardaki tipik değerleri	4
2.3. Endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılan başlıca arıtım yöntemleri.....	5
3.1. Çeşitli kirleticiler için alüminyum ihtiyacı ve güç tüketimi.....	14
3.2. Çeşitli anotların oksijen oluşum gerilimleri.....	25
3.3. Aracı kimyasal maddelerin oluşum gerilimleri.....	25
3.4. Çeşitli anotların verim karşılaştırması.....	26
4.1. Deneysel çalışmada kullanılan analiz metodları.....	33
4.2. Atıksuda yapılan çeşitli analiz sonuçları.....	34
5.1. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $1 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	42
5.2. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	43
5.3. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	43
5.4. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	44
5.5. 1 A , $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	45
5.6. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	45
5.7. $I = 4 \text{ A}$, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	45
5.8. $I = 5 \text{ A}$, $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	46
5.9. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	47
5.10. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $7 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	48
5.11. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $1 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	48
5.12. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	50
5.13. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $7 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH= 5,36, $V = 500 \text{ mL}$	51
5.14. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $1 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH= 8,83, $V = 500 \text{ mL}$	51
5.15. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$	53
5.16. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $2000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal	53

V= 500 mL.....	
5.17. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 500mg/L H ₂ O ₂ , pH doğal V= 500 mL.....	54
5.18. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 1500mg/L H ₂ O ₂ , pH doğal V= 500 mL.....	55
5.19. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 3000mg/L H ₂ O ₂ , pH doğal V= 500 mL.....	56
5.20. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 1500mg/L H ₂ O ₂ , pH =4,16, V= 500 mL.....	57
5.21. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 1500mg/L H ₂ O ₂ , pH =8,81, V= 500 mL.....	58
5.22. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , 750+750mg/L H ₂ O ₂ , pH doğal, V= 500 mL.....	60
5.23. I =1 A, i = 10 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL.....	60
5.24. I =2 A, i = 20 mA/cm ² , pH doğal, V= 500 mL.....	61
5.25. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	61
5.26. I =4 A, i = 40 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	62
5.27. I =5 A, i = 50 mA/cm ² , 3 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	62
5.28. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	64
5.29. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 7 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	65
5.30. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 1 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 500 mL	65
5.31. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , pH =2,90, V= 500 mL	67
5.32. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , pH =5,28, V= 500 mL	67
5.33. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , pH =8,93, V= 500 mL	68
5.34. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 10 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL	70
5.35. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 20 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL	70

5.36. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 30 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL	71
5.37. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 10 mg/L KFloc, pH doğal, V= 500 mL	73
5.38. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 20 mg/L KFloc, pH doğal, V= 500 mL	73
5.39. I =3 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , 30 mg/L KFloc, pH doğal, V= 500 mL	74
5.40. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	76
5.41. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 7 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	76
5.42. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 10 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	77
5.43. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 15 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	77
5.44. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm ² , 10 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL ...	79
5.45. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm ² , 15 mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL ...	79
5.46. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm ² , 15 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL....	80
5.47. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 5 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL	81
5.48. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 7 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL	81
5.49. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 10 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL	82
5.50. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm ² , 10 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL ...	83
5.51. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm ² , 7 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL.....	83
5.52. I =1,2 A, i = 30 mA/cm ² , 15 mM NaNO ₃ , pH doğal, V= 250 mL.....	84
5.53. I =0,2 A, i = 5 mA/cm ² , 10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	85
5.54. I =0,4 A, i = 10 mA/cm ² , 10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	86
5.55. I =0,6 A, i = 15 mA/cm ² , 10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	86
5.56. I =0,8 A, i = 20 mA/cm ² , 10mM Na ₂ SO ₄ , pH doğal, V= 250 mL	87

5.57. $I = 0,2 \text{ A}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$	89
5.58. $I = 0,4 \text{ A}$, $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$	89
5.59. $I = 0,6 \text{ A}$, $i = 15 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$	90
5.60. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$	90
5.61. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, pH=4,07, $V = 250 \text{ mL}$	92
5.62. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, pH=7,95, $V = 250 \text{ mL}$	92
5.63. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, pH=10,12, $V = 250 \text{ mL}$	93
5.64. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH=3,88, $V = 250 \text{ mL}$	95
5.65. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH=8,33, $V = 250 \text{ mL}$	95
5.66. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH=10,20, $V = 250 \text{ mL}$	96

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

A.....	Amper
A/cm ²	amper/santimetrekare
A/m ²	amper/metrekar
AKM.....	Askıda Katı Madde
BOİ.....	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
°C.....	santigrat derece
cm ²	Santimetrekare
cm ³	Santimetreküp
E	Güç tüketimi
EOİ.....	Elektrokimyasal Yükseltgenabilirlik İndisi
EOSB.....	Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi
g/L.....	gram/litre
ICE.....	Anlık Akım Verimi
ISO.....	International Organization for Standardization
i.....	Akım yoğunluğu
kg/gün.....	kilogram/gün
KOİ.....	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
kWh/kg.....	kilowattsaat/kilogram
kWh/m ³	kilowattsaat/metreküp
L/dk.....	litre/dakika
M.....	Molar
m ³ /gün.....	metreküp/gün
mg/(A-saat).....	Elektrokimyasal kütle denkliği
mmol/L.....	milimol/litre
MW.....	Megawatt
µS/cm.....	mikrosiemens/santimetre
TS.....	Türk standardı
V.....	Volt

1. GİRİŞ

Dünyada artan endüstriyel faaliyetler, teknolojik gelişmeler ve hayat standartlarının yükselmesi sonucu her geçen gün daha fazla atık oluşmaktadır. Bu atıklardan en önemlisi atıksulardır. Çünkü insanların en büyük yaşam kaynağı sudur ve atıksular önlem alınmaması durumunda doğal su kaynaklarını kirletmekte ve dolayısıyla yaşamı tehdit etmektedir. Gelecekte hızlı nüfus artışı dolayısıyla su kaynakları daha da önem kazanacaktır. Doğal su kaynaklarının yoğun endüstriyel faaliyetler sonucu kirlenmesi ve iklim değişikliğinin bir sonucu olarak azalması, ülkemizde de suya erişimi olumsuz etkileyecektir.

Endüstriyel atıksular; büyük miktarlarda ve çok çeşitli olmaları nedeniyle alıcı ortamlarda, belirgin derecede kirliliğe yol açmaktadır. Bu kirlilik; alıcı ortamda Kimyasal Oksijen İhtiyacının artmasına ve bazı durumlarda renk değişimine neden olmaktadır [1].

Endüstrileşmenin her geçen gün arttığı içinde bulunduğumuz dönemde, çeşitli endüstrilerden çıkan atıksuların arıtımı; çevre kirliliğinin önlenmesi ve doğal kaynakların (yer altı suyu vb.) korunması açısından önem taşımaktadır.

2. KARIŞIK ENDÜSTRİYEL (OSB) ATIKSULAR

2.1. Kaynakları ve Özellikleri

Sanayi atıklarının arıtılmadan alıcı ortamlara ve genellikle suya verilmesi sonucunda kirlilik oluşur. Bazı endüstriyel atıksulardaki dayanıklı kirleticiler, alıcı su ortamında yoğunlaşma, canlıların dokularında birikme ve belli sınırlar üstünde canlılar üzerinde doğrudan zehir etkisi özelliklerine sahiptirler. Endüstriyel atıksuların sebep olduğu kirlenmede ekolojik dengenin bozulması ve bu bozulmanın çoğunlukla geri dönüşü olmaması beklenen bir sonuçtur[2].

Endüstriyel kaynaklı kirleticiler özelliklerine göre üç sınıfta toplanabilir.

Bozulmadan kalanlar: Klorür gibi inorganik bileşiklerde zamanla parçalanma görülmez. Derişimleri alıcı suda zamanla artarken yağmur suyu ile azalır.

Değişebilenler: Biyolojik olarak parçalanabilen organik kirleticilerdir. Mikroorganizmalar tarafından parçalanarak kararlı maddelere dönüşürler.

Kalıcılar: Zamanla biyolojik birikime yol açan civa, arsenik, kadmiyum, krom, kurşun, bakır gibi metaller, tarım ilaçları gibi organik maddeler ve uzun yarı ömürlü radyoaktif maddelerdir [2].

Çizelge 2.1 ‘de bazı endüstriyel atıkların kaynakları, özellikleri ve arıtma yöntemleri verilmiştir [2].

Çizelge2.1. Bazı Endüstriyel Atıkların Kaynakları, Özellikleri ve Arıtma Yöntemleri[2].

Endüstriler	Üretimde Atık Su Kaynakları	Atıkların Genel Özellikleri	Arıtma ve Bertaraf Yöntemi
Konserve	Meyve ve sebzelerikesme, istifleme, koparma, ayırma, presleme ve kabuğunu soyarak beyazlatma	Yüksek askıda ve katı madde, kolloidal ve çözünmüş organik madde	Izgara, elek, havuzlar, toprak absorpsiyonu veya püskürtmeli sulama
Süt ve ürünleri Üretimi	Sütün seyreltilmesi, ayrılmış süt, peynir suyu ve yayık ayrarı	Yüksek çözünmüş organik madde protein, yağ ve laktoz	Biyolojik arıtma, damlatmalı filtre, aktif çamur , yükseltgeme hendeği
Et ve kümes hayvanları ürünleri	Hayvan kesimi, yağ ve kemiklerin parçalanmasında yağ ve yıkama suyu	Yüksek çözünmüş ve askıda organik madde, proteinler ve yağlar	Izgara ve elekten geçirme, çöktirme ve yüzdürme damlatmalı filtrelerden geçirme
Şeker pancarından şeker üretimi	Pancarların taşınımı, yıkama ve preslenmesi sırasında oluşan sular, kireçlemeden sızan sular soğutmada yoğunlaşan su	Yüksek çözünmüş ve askıda organik madde, şeker ve protein	Atıkların yeniden kullanımı Pıhtılaştırma ve havuzlar
İlaç ve ecza ürünleri	Kullanılan süzölmüş madde ve yıkama suyu	Yüksek çözünmüş ve askıda organik madde, vitamin	Buharlaştırma ve kurutma, beslemede kullanma
Deri	Derinin kılının kazınması, ısıtılması, kirecini giderme, temizleme	Yüksek toplam katı madde, sertlik, tuz, sülfürler, krom, pH, BOİ ve çökelmiş kireç	Dengeleme, çöktirme ve biyolojik arıtma dengeleme ve kimyasal arıtma
Tekstil	Liflerin hazırlanması ve pişirilmesi, haşıl sökme sırasında oluşan atıklar	Yüksek derecede bazık, renkli, yüksek BOİ, yüksek askıda kolloidal ve çözünmüş katı madde	Nötrleştirme, kimyasal çöktirme, biyolojik arıtma, damlatmalı filtre, aktif çamur
Deterjan Üretimi	Deterjan ve sabunların temizleme ve yıkama suları	Yüksek BOİ ve sabun atıkları, yüzey aktif maddeler	Yüzdürme ve sıyırma, CaCl ₂ ile çöktirme
Kağıt Üretimi	Pişirme, temizleme, liflerin yıkanması, kağıt hamurunun süzülmesi	Yüksek veya düşük pH, renk, yüksek askıda kolloid ve çözünmüş katı maddeler, organik maddeler, fenol	Çöktirme, havuzlar, biyolojik arıtma, yan ürünlerin kazanılması
Çelik	Kömürün koklaşması, eritme fırının yıkanması, baca gazları ve çeliğin asit ile temizlenmesi	Düşük pH, asitler, fenol, maden filizi, kok, kireç taşı	Nötrleştirme, geri kazanma ve yeniden kullanma, kimyasal pıhtılaştırma

Bazı temel kirleticilerin çeşitli endüstriyel atıksulardaki değerleri, Çizelge 2.2’de verilmiştir [3].

Çizelge 2.2. Çeşitli endüstriyel atıksulardaki kirleticiler ve atıksulardaki tipik değerleri[3].

Parametre	Fenol Formaldehit Reçine Üretimi Endüstrisi	Petrol Rafinerisi	İlaç Endüstrisi
pH	6,15	9,2	10,7
İletkenlik(μ S/cm)	3320	1733	12840
Toplam Çözünmüş Katı Madde(mg/L)	2740	1333	9320
Klorür (mg/L)	524	112	3119
Sülfat(mg/L)	970	212	440
Fenolik Bileşikler (fenol cinsinden)(mg/L)	374	141	54
KOİ (mg/L)	1084	602	8877

2.2. Arıtım Yöntemleri

Endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılan başlıca arıtım yöntemleri, Çizelge 2.3’te verilmiştir[2].

Çizelge 2.3. Endüstriyel Atık Suların Arıtımında Kullanılan Başlıca Arıtım Yöntemleri[2].

GELENEKSEL YÖNTEMLER		
FİZİKSEL	KİMYASAL	BİYOLOJİK
Debi ölçümleri Izgaralar Öğütücüler Dengeleme Karıştırma Yumaklaştırma Çökeltme Yüzdürme Mikroelekler Gaz aktarımı Uçurma ve gaz ile sıyırma	Kimyasal çöktürme Adsorpsiyon (soğurma) Dezenfeksiyon Klor ile giderme Klor ile dezenfeksiyon Klordioksitle dezenfeksiyon Brom klorür ile dezenfeksiyon Ozon ile dezenfeksiyon	HAVALANDIRMALI SÜREÇLER • Askıda büyüyen süreçler • Yüzeyde büyüyen süreçler • Birleşik-askıda ve yüzeyde büyüyen süreçler OKSİJENSİZ SÜREÇLER • Askıda büyüyen süreçler • Yüzeyde büyüyen süreçler HAVASIZ SÜREÇLER • Askıda büyüyen süreçler • Yüzeyde büyüyen süreçler BİRLEŞİK HAVALANDIRMALI-OKSİJENSİZ VE HAVASIZ SÜREÇLER • Askıda büyüyen süreçler • Birleşik askıda ve yüzeyde büyüyen süreçler STABİLİZASYON (YÜKSELTGEME) HAVUZLARI
İLERİ YÖNTEMLER		
Mikroelekler Gaz aktarımı Uçurma ve gaz ile sıyırma Süzme Hava ile sıyırma Ultrafiltrasyon Ters osmoz İyon değiştirme Karbon adsorpsiyonu Elektro Pıhtılaştırma Elektro Yükseltgeme	Kimyasal yükseltgeme Morötesi ışık ile kimyasal yükseltgeme Kırılma noktası klorlaması Metal tuzları ile kimyasal çöktürme Kireç ile kimyasal çöktürme	Biyolojik nitratlaştırma Biyolojik nitratlaştırma/nitrat uzaklaştırma Biyolojik nitrat uzaklaştırma Biyolojik fosfor giderme Aktif çamur-toz aktif karbon

2.3.Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi (EOSB)

2.3.1. Atıksu kaynakları ve özellikleri

Eskişehir'de, sanayi yatırımlarının planlı bir şekilde gerçekleştirilmesi, çevre korunmasına verilen önem ve modern şehircilik anlayışının bir sonucu olarak, 1969 yılında Eskişehir Sanayi Odası'nın öncülüğünde bir Organize Sanayi Bölgesi kurulması çalışmalarına başlanmıştır. İlk aşamada 1 milyon metrekare olarak planlanan OSB alanı 1973 yılında yatırımcıların hizmetine sunulmuştur [4].

EOSB'nin alanı 1996 yılı sonunda 32 milyon m²'ye genişletilmiştir. Halen bu alanın 14,5 milyonm²'si yatırımcılara ayrılmıştır. Söz konusu alan içinde şu anda 345 kuruluş faaliyet göstermekte olup 2012 verilerine göre bunlardan 218'i üretimde, 56'sı inşaat, 71'i ise proje aşamasında bulunmaktadır.

2.3.2. Mevcut arıtma tesisi ve özellikleri

Alıcı su ortamlarında kirlenmenin önlenmesi için, bölgenin tüm atıksularını kapsayan Merkezi Atıksu Arıtma Tesisi Haziran 2008'de tamamlanarak işletmeye alınmıştır [5].

Merkezi atıksu arıtma tesisi 70.000 m² alanda kuruludur. Bölgede tehlikeli atık depolama ve bertaraf tesisleri bulunmamaktadır. Tehlikeli atıkları olan işletmeler, atıklarını T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan lisanslı geri kazanım/bertaraf tesislerine göndermektedir.

Atıksu bağlantı izin belgesinde belirtilen atıksu miktarının belirlenmesi için işletmelerin atıksu boşaltım noktasındaki debi ölçüm cihazları ile atıksuyun miktarı belirlenmektedir. EOSB'nin yağmur suyu ve atıksu hatları ayrıdır.

Tesis; Fiziksel – Kimyasal – Biyolojik Arıtma – Azot fosfor giderimi – Dezenfeksiyon – Kimyasal Hazırlama ve Çamur Susuzlaştırma birimlerinden oluşmaktadır

Proje; birinci etap 18.000 m³/gün, ikinci etapta 6.000 m³/gün ilave olmak üzere toplam 24.000 m³/gün kapasitelidir. Yaklaşık eşdeğer nüfus 200.000 kişi, kirlilik yükü 22.000 kg KOİ/gündür.

Tesisin özellikleri:

Kapasite	: 18.000 m ³ /gün
Saatlik ortalama debi	: 1125 m ³
Saatlik en yüksek debi	: 2250 m ³
Günlük ortalama debi	: 18.000 m ³

Proje değerleri (giriş):

AKM	: 800 mg/L
Yağ-Gres	: 500 mg/L
pH	: 6,5-10
KOİ	: 1200 mg/L
Toplam N	: 130 mg/L

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ

Su arıtımında elektrik, dünyada ilk kez Birleşik Krallık'ta 1889 yılında kullanılmıştır [6]. Elektroliz süreci ise ilk kez, 1904 yılında Elmore tarafından mineral kazanımı amacıyla uygulanmıştır [7]. Elektrik enerjisinin temininin pahalı olması nedeniyle, elektrokimyasal su ve atıksu teknolojileri dünya çapında yaygın olarak uygulanamamıştır. İçme suyu standartlarının yükseltilmesi ve atıksu deşarjında çevresel düzenlemelerin daha fazla bağlayıcı hale getirilmesiyle, elektrokimyasal yöntemler önem kazanmıştır. Metal geri kazanımı tesisleri, içme suyu arıtımı tesisleri; deri, elektro-kaplama, tekstil, petrol endüstrilerinden kaynaklanan atıksu arıtım tesislerinde elektrokimyasal süreçler uygulanabilmektedir. Bazı durumlarda, dayanıklı kirleticiler içeren atıksuların arıtımında, elektrokimyasal teknolojilerde seçenek olabilmektedir.

Elektrokimyasal atıksu arıtımı, elektrokimya ve elektrokimya mühendisliğinin temel ilkelerinin kullanıldığı arıtım yöntemidir. Elektrokimyasal yöntemde tepkimeyi yürüten elektrondur; bu nedenle temiz bir teknolojidir.

Bir elektrokimyasal reaktör, kimyasal reaktöre ek olarak elektrotlar içerir. Böyle bir sistemde elektrokimyasal tepkimeler elektrotlar arasında gerilim farkı oluşturularak gerçekleştirilir. Elektrokimyasal yöntemler temelde iki grupta incelenir. Genellikle, bir elektrokimyasal reaktörde, elektrolit çözeltisini oluşturan bileşenlerin elektrotlarda ayrışması söz konusudur. Bu tip elektrokimyasal reaktörlerde gerçekleşen elektrot tepkimeleri, katı-sıvı ara yüzeylerinde yer alan heterojen indirgeme ve yükseltgeme tepkimeleridir ve bunlar doğrudan elektrokimyasal yükseltgeme ya da indirgeme olarak adlandırılır. Elektrotlarda üretilen bir yükseltgenin çözeltideki bileşikleri yükseltgemesiyle uygulanan yöntemler de dolaylı elektrokimyasal yöntemlerdir. Elektrotların tepkimeye girdiği elektrokimyasal yöntemler (elektrokoagülasyon-elektrolitik pıhtılaştırma) ise son yıllarda yaygın bir şekilde uygulanmaya başlamıştır [7].

Doğrudan anotta yükseltgeme sürecinde kirleticiler, ilk olarak anot yüzeyinde soğurulurlar, sonra anotta elektron aktarım tepkimesiyle parçalanırlar. Dolaylı yükseltgeme sürecinde ise, hipoklorit/klorür, ozon, hidrojen peroksit gibi kuvvetli yükseltgenler üretilir. Daha sonra kirleticiler, üretilen yükseltgenlerin

yükseltgeme tepkimesiyle parçalanırlar. Tüm yükseltgenler, kullanıldıkları yerde üretilirler ve hemen kullanılırlar. Örneğin, klorür iyonu içeren bir çözeltide, elektrokimyasal yolla hipoklorit/klorür üretimi, (3.1), (3.2) ve (3.3) tepkimeleri ile gerçekleşir:



Çeşitli endüstriyel atıksulara, klorür/hipokloritin kullanıldığı dolaylı elektrokimyasal yükseltgeme sürecinin uygulandığı görülmektedir. Deri endüstrisi atıksularının arıtımında, Ti/Pt ve Ti/Pt/Ir ve grafit anotlarla dolaylı yükseltgeme yapılmıştır. 34mA/cm^2 , 120 dakika süren elektroliz sonunda, KOİ değeri 9600 mg/L ’den 59 mg/L ’ye düşürülmüştür. Vlyssides ve Israilides, tekstil endüstrisi atıksularını, Ti/Pt anot kullanarak elektro-indirgeme süreciyle arıtmıştır. 40 dakika süren elektroliz sonunda, KOİ giderimi için enerji tüketimi 44 kWh/kg olmuş; %92 giderim verimine ulaşılmıştır. BOİ %92; renk ise %94 oranında giderilmiştir. En iyi sonuçlar, klorürce zengin asidik ortamda, Ti/Pt-Ir anot kullanıldığında elde edilmiştir [8].

Düzenli depolama sızıntı sularının arıtımında, amonyağın tamamen; KOİ’nin ise; $\text{Ti/SnO}_2 - \text{PdO}_2 - \text{RuO}_2$ anot kullanılarak, $0,15\text{ A/dm}^2$ akım yoğunluğunda 240 dakika süren elektroliz sonunda %92 oranında giderildiği gözlenmiştir. Bu atıksuyun klorür derişimi 7500 mg/L ’dir [9]. Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun Ti/Pt elektrot kullanılarak arıtımında, $0,26\text{ A/cm}^2$ akım yoğunluğunda 10 saat süren elektrolizi sonunda %93 KOİ, %81,4 toplam organik karbon giderim verimine ulaşılmıştır [9]. Vlyssides, şeker pancarı melası atıksuyunun arıtımında, pH 9,5 ve klorür derişiminin % 4 olması halinde en yüksek KOİ giderim verimine ulaşıldığını; ideal şartlarda KOİ’nin 72.000 mg/L ’den 8000 mg/L ’ye kadar düştüğünü gözlemlemiştir [9].

Atıksuların dolaylı elektrokimyasal arıtımının uygulanabilirliğinin yanı sıra, klorürlü organik bileşiklerin oluşması olumsuz bir yöndür. Rezorsinol ve kresollerin elektrokimyasal indirgenmesi sürecinde, soğurulabilen organik

halojenler oluşur. Arıtılmış atıksuyun alıcı ortama verilmeden önce, içerisindeki klorürlü organik bileşiklerin aktif karbon yöntemiyle giderilmesi gerekir [9].

Elektrokimyasal reaktörlerde, elektro-pıhtılaştırma, elektro-yüzdürme, elektro-yükseltgeme, elektro-foto-yükseltgeme ve elektro-dezenfeksiyon gibi süreçler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerde, en çok kullanılan değişkenler, gerilim, akım ve akım yoğunluğudur [9].

3.1. Elektrokoagülasyon (Elektro-Pıhtılaştırma)

Elektro-pıhtılaştırma süreci, dünyada ilk kez 1909 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde, alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak uygulanmış ve patent alınmıştır. Bu süreç, 1946 yılında ilk kez içme suyuna uygulanmıştır [10,11].

Elektro-pıhtılaştırma; uygulanan gerilime bağlı olarak çözünen ve genellikle alüminyum ve demir iyonları gibi etkin pıhtılaştırıcı üreten anotların kullanıldığı yöntemdir. Bu elektrotlar ucuz, temini kolay ve etkisi kanıtlanmış elektrotlardır. Anotta pıhtılaştırıcı iyon üretilirken; katotta hidrojen gazı açığa çıkar. Pıhtılaştırıcı metal iyonları, atıksudaki kirleticileri iri yumaklar haline getirir; hidrojen gazı ise oluşan yumakları yüzdürür. İri yumakların oluşumu elektro-yumaklaşma olarak adlandırılır.

Elektrotlar, mono-polar (tek kutuplu) ya da bi-polar (çift kutuplu) olarak yerleştirilir. Alüminyum veya demir plaka şeklinde veya hurda metal olabilir. Anotta gerçekleşen kimyasal tepkimeler aşağıda verilmiştir.

Alüminyum anot için:



Bazık şartlarda;



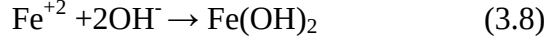
Asidik şartlarda;



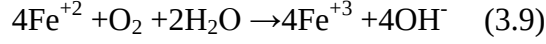
Demir anot için:



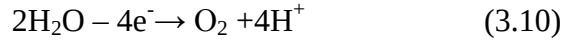
Bazık şartlarda;



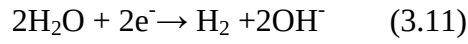
Asidik şartlarda;



Bu tepkimelere ek olarak; oksijen oluşum tepkimesi gerçekleşir:



Katot tepkimesi ise;

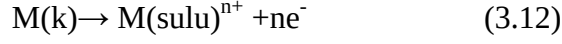


Genellikle alüminyum su arıtımında; demir ise atıksu arıtımında kullanılır. Elektro-pıhtılaştırmanın üstünlüğü; tanecik giderim veriminin yüksek, arıtım düzeneğinin küçük ve basit olması; düşük maliyetli ve tam otomasyona uygun olmasıdır.

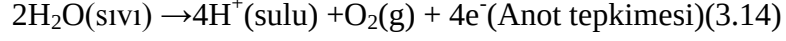
Elektrolitik pıhtılaştırma sürecinde, başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu ve uygulama süresi arıtım verimini etkileyen faktörlerdir. Bu faktörlerin iyileştirilmesi, arıtım verimini de arttıracaktır [12]. Son yıllarda, atıksularda Cr (VI) giderimi[13], biyodizel atıksularının arıtımı[14] ve asit kırmızı 14 boya giderimi[15] gibi birçok süreçte başarıyla uygulanmaktadır. Elektrolitik pıhtılaştırma süreciyle, alüminyum veya demir elektrot kullanılarak, endüstriyel atıksulardan, KOİ, toplam katı madde ve bulanıklık giderilmektedir. Bu tür süreçlerde, çamur çökme hızı ile ölçülebilir değişkenler olan başlangıç pH'ı, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi arasındaki bağıntılar da belirlenebilir[16].

Elektrolitik pıhtılaştırma süreci, birçok kimyasal ve fiziksel mekanizma içerir[17]. Anodunyükseltgenmesi ile alüminyum veya demir çözünür. Oluşan pıhtılaştırıcı iyon ve hidroksitler, askıda katı maddelerin kararlılıklarını bozup, pıhtılaştırırlar. Çözünmüş kirleticileri ise soğururlar[18]. Elektro- pıhtılaştırma sürecinde, başlıca üç aşama olduğu kabul edilmektedir[17].

- i. Elektro-yükseltgeme süreciyle pıhtılaştırıcı iyon oluşumu
Anotta gerçekleşen ana tepkime çözünme tepkimesidir.



Bu tepkimeye ek olarak, katot ve anotta suyun elektrolizi gerçekleşir.



ii. Kirleticilerin parçalanması, askıda tanecikler ve asıtların kararlılıklarının bozulması

Katot yüzeyinde metal katyonların doğrudan elektrokimyasal indirgenmesi



Ayrıca, katotta oluşan hidroksit iyonları, atıksuyun pH'ını yükseltir ve böylece metal iyonlarının hidroksitleri şeklinde çökmesi kolaylaşır.



iii. Parçalanmış fazdan yumak oluşumu

Elektrot yüzeylerinde oluşan metal ve hidroksit iyonları, atıksularda çeşitli hidroksitlerin ve polimerlerin yani yumakların oluşumunu sağlar.

Bunlara ek olarak; elektro-pıhtılaştırma biriminde fiziko-kimyasal tepkimeler de gerçekleşir[18]; atıksudaki kirleticilerin katotta indirgenmesi, kolloidal taneciklerin pıhtılaşması ve uzaklaştırılması, çözeltideki iyonların elektroforetik göçü, pıhtılaşan taneciklerin, elektrotlarda üretilen H_2 ve O_2 baloncukları yardımıyla yüzdürülmesi, katotta metal iyonlarının indirgenmesi ve diğer elektrokimyasal ve kimyasal süreçler bu tür tepkimelerdir.

Demir elektrotlar kullanıldığında oluşan Fe^{+3} iyonları kısa sürede kendiliğinden gerçekleşen hidroksit ve/veya polihidroksit oluşum tepkimelerine girer. Hidroliz son ürünleri, monomerik iyonlar $[Fe(OH)_3]$ oluşturur veya ortamın pH'ına bağlı olarak, polimerik hidroksi bileşikler oluşturur [19]

3.1.1. Elektro-pıhtılaştırmayı etkileyen faktörler

Akım yoğunluğu ve elektrik yükü

Elektrolitik pıhtılaştırma için gereken akımı, elektrotlardan ayrılan Al^{+3} ve Fe^{+2} iyon derişimi belirler. Alüminyum için, elektrokimyasal kütle denkliği 335,6 mg/(A-saat); demir için ise 1041 mg/(A-saat)'tir. Yüksek akım; daha küçük elektro-pıhtılaştırma birimi anlamına gelir. Yüksek akım uygulandığında, su kendiliğinden ısınacağından; elektrik enerjisinden tasarruf edilir. Ancak, akım yoğunluğunun çok yüksek olması durumunda, akım veriminde belirgin bir düşüş olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Elektro- pıhtılaştırma düzeneğinin, bakım gerektirmeden uzun süre çalıştırılabilmesi için, akım yoğunluğunun 20-25 A/m² arasında olması önerilir. Aksi halde, elektrot yüzeylerinin belirli aralıklarla temizlenmesi gerekir. Akım yoğunluğu seçimi, pH, sıcaklık ve debi gibi parametrelere göre yapılmalıdır. Böylece, yüksek akım verimlerine ulaşılabilir. Akım verimi, alüminyum elektrot için %100-120 arası; demir elektrot için %100 civarındadır [20].

Akım verimi, akım yoğunluğuna ve kullanılan anot tipine bağlı olarak da değişir. Demir elektrotlara düşük frekanslı ses dalgaları uygulandığında, akım verimi %160'lara kadar çıkabilir [20].

Arıtılmış suyun kalitesi ise, üretilen iyon miktarına (mg) veya elektrik yüküne; uygulanan akımla üretilen ürüne ve zamana (A-saat) bağlı olarak değişir. Çeşitli kirleticilerin arıtımı için gerekli Al^{+3} miktarları Çizelge 3.1'de verilmiştir[21]. Akım yoğunluğu veya elektrik yükü; daha önceden belirlenmiş bir değer yoksa, deneysel çalışmalarla belirlenir. Elektrik yükü kritik noktaya geldiğinde, akım artışı olmayacağı gibi; çıkış suyu kalitesinde daha fazla iyileşme olmaz[22].

Çizelge 3.1. Çeşitli kirleticiler için alüminyum ihtiyacı ve güç tüketimi [21]

Kirletici	Birim Miktar	Ön Arıtım		Arıtım	
		Al ⁺³ (mg)	E (Wsaat/m ³)	Al ⁺³ (mg)	E (W-saat/m ³)
Bulanıklık	1 mg	0,04-0,06	5-10	0,15-0,2	20-40
Renk	1 birim	0,04-0,1	10-40	0,1-0,2	40-80
Silikat	1 mg/SiO ₂	0,2-0,3	20-60	1-2	100-200
Demir	1 mg Fe	0,3-0,4	30-80	1-1,5	100-200
Oksijen	1 mg O ₂	0,5-1	40-200	2-5	80-800
Alg	1000	0,006-0,025	5-10	0,02-0,03	10-20
Bakteri	1000	0,01-0,04	5-20	0,15-0,2	40-80

NaCl varlığı

Suyun veya arıtılacak atıksuyun iletkenliğini arttırmak için genellikle sofra tuzu kullanılır. Elektrik yükü iletiminde sofra tuzunun iyonik katkısının yanı sıra; klorür iyonlarının, HCO₃⁻ ve SO₄⁻² gibi anyonların ters etkilerini belirgin bir şekilde azalttığı gözlemlenmiştir. Karbonat veya sülfat iyonlarının varlığı, elektrot yüzeylerinde yalıtkan bir katman oluşturan Ca⁺² veya Mg⁺² iyonlarının çökmesine neden olur. Yalıtkan katman, elektrotlar arasındaki gerilim farkını hızla artırır. Bu durum, akım veriminde belirgin bir düşüşe neden olur. Bundan dolayı, atıksu arıtımında, elektro-pıhtılaştırma biriminin normal şartlarda çalıştırılabilmesi için %20’lik Cl⁻ seçilmesi önerilir. NaCl ilavesi iletkenliği arttıracığından, daha az güç tüketimi olur. Elektrokimyasal yolla oluşturulan klorun, dezenfektan olarak da etkili olduğu gözlemlenmiştir[23].

pH etkisi

Su veya atıksuların elektro-pıhtılaştırma sürecinde pH’ın etkisi; metal hidroksitlerin çözünürlüğü ve akım verimindeki değişimlerle anlaşılır. Ortamda klorür iyonları varsa klor oluşumu etkilenecektir. Genellikle, alüminyum elektrotlarda asidik veya bazik şartlarda akım verimlerinin; nötr şartlardaki verime göre daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Arıtım verimi, kirleticinin yapısına bağlı olarak değişir. En yüksek kirletici giderim verimine; pH 7 civarında iken

ulaşılır. Nötr pH değerinde, güç tüketimi de yüksektir. pH etkisi ise iletkenliğe bağlı olarak değişir. İletkenlik yüksek ise pH'ın etkisi azdır [24].

Ham atıksu asidik ise, elektro-pıhtılaştırma sürecinden çıkan suyun pH'ı yükselir. Öte yandan, ham atıksu bazik ise; çıkış suyu pH'ı düşer. Asidik koşullarda pH'ın yükselmesi; katotta hidrojen ve hidroksil iyonu oluşumuna dayanır.

Hidrojen oluşumunun yanı sıra anot çevresinde Al(OH)_3 oluşumu sonucu H^+ açığa çıkması pH'ı düşürür. Oksijen oluşum tepkimesi de pH' ın düşmesine neden olur.

Bundan dolayı, hidrojen oluşumuna bağlı pH artışı yukarıda verilen H^+ açığa çıkaran tepkimelerle hemen hemen dengelenir.

Bazik şartlarda pH düşüşünün nedenleri ise; katyonlarla hidroksit çökmesi veya $\text{Al(OH)}_3 + \text{OH}^- \rightarrow \text{Al(OH)}_4^-$ tepkimesiyle Al(OH)_4^- oluşmasıdır [24].

Nötr pH'da alüminyum elektrot kullanılarak yüksek kirletici giderim verimleri elde edilmektedir. Demir elektrotların tekstil veya boya endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılması durumunda arıtılmış atıksu bazik ise boya ve KOİ büyük oranda giderilmektedir [24].

Sıcaklık

Elektro-pıhtılaştırma süreci, yüz yılı aşkın bir süredir kullanılıyor olmasına rağmen, sıcaklığın bu teknolojiye etkisi tam olarak araştırılamamıştır. Atıksu arıtımı için bazı kaynaklarda[25], alüminyumun akım veriminin 60°C sıcaklığa kadar doğru orantılı olarak arttığı ve en yüksek akım verimine ulaşıldığı belirtilmektedir. Sıcaklık 60°C 'nin de üzerine çıktığında, akım veriminin düşmeye başladığı gözlenmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak akım veriminin artması; elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit film tabakasının parçalanmasına dayanır. Sıcaklık çok yüksek olduğunda, jelimsi Al(OH)_3 küçük yumaklar şeklinde elektrot

yüzeyinde tutunur. Yağ içeren atıksuların arıtımında, 35⁰C gibi düşük sıcaklıklarda güç tüketimi de en yüksek değere ulaşır[26].

Güç

Akım elektrokimyasal reaktörden geçerken; denge gerilimi dengesini, anot ve katot aşırı gerilimlerini, çözeltinin omik gerilim düşüşünü yenmelidir[27]. Anot aşırı gerilimi, aktivasyon ve derişim aşırı gerilimlerini; aynı zamanda anot yüzeyinde oluşabilecek pasif film tabakasından kaynaklanacak aşırı gerilimleri de kapsar. Diğer taraftan, katot aşırı gerilimi ise, sadece aktivasyon ve derişim aşırı gerilimlerinden oluşur. Böylece;

$$U_0 = E_{eq} + \eta_{a,a} + \eta_{a,c} + \eta_{a,p} + |\eta_{c,a}| + |\eta_{c,c}| + (d/k)i \quad (3.17)$$

U_0 : Elektrotlar arasındaki elektroliz gerilimi (V)

E_{eq} : Anot ve katot arasındaki denge gerilim farkı (V)

$\eta_{a,a}$: Anot aktivasyon aşırıgerilimi (V)

$\eta_{a,c}$: Katot aktivasyon aşırıgerilimi (V)

$\eta_{a,p}$: Anot pasif aşırıgerilimi (V)

$\eta_{c,a}$: Anot derişim aşırı gerilimi (V)

$\eta_{c,c}$: Katot derişim aşırı gerilimi (V)

d : Elektrotlar arasındaki mesafe (m)

k : Arıtılacak atıksuyun iletkenliği (S/m)

i : Akım yoğunluğu (A/m²)

Pasif aşırı gerilimi, elektrot yüzeyinin durumuna bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Pasifleşmemiş yeni elektrotlar için pasif aşırı gerilim ihmal edilebilir ve (2.17) eşitliği;

$$U_0 = E + (d/k)i + K_1 \ln i \quad \text{şeklini alır.} \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'de E ve K_1 sabitlerdir.

Pasif elektrotlar için;

$$U_0 = E + (d/k)i + K_1 \ln i + (K_2 i^n / k^m) \quad (3.19)$$

Denklem (3.18) ve (3.19)'un sağ taraflarındaki K_1 ve K_2 sabittir.

E , Al^{+3} ve OH^- 'in taşıma sayılarıyla bağlantılıdır, ancak elektrolitik pıhtılaştırma sürecinde, iletkenlik (k) çok yüksek olduğunda sabit olarak alınır. Denklem (3.18) ve (3.19); U_0 'ın pH'tan bağımsız olduğunu; debiden belirgin bir şekilde etkilenmediğini gösterir. Yeni alüminyum elektrotlar için; $E = -0,76$, $K_1 = 0,20$; pasifleşmiş alüminyum elektrotlar için $E = -0,43$, $K_1 = 0,20$ $K_2 = 0,016$ ve $m = 0,47$, $n = 0,75$ 'dir.

U_0 değerininde elde edilmesiyle, elektrolitik pıhtılaştırma süreci için gereken toplam gerilim kolaylıkla hesaplanabilir. Tek kutuplu (mono-polar) durum için gereken toplam gerilim, elektrotlar arası elektroliz gerilimi ile aynıdır.

$$U = U_0 \quad (3.20)$$

Çift kutuplu (bi-polar) durum için, gerekli toplam gerilim, U_0 'ın, elektrot sayısının 1 eksiğı ile çarpılmasıyla hesaplanır. Yani;

$$U = (N-1) U_0 \quad (3.21)$$

N : Elektro-pıhtılaştırma birimindeki toplam elektrot sayısı

N , her bir elektrot plakası için yüksek akım verimi elde etmek amacıyla genellikle 8'den küçük olur. Çoğunlukla doğru akımlı güç kaynağı kullanılır. Elektrot yüzeyinin yükseltgenmesi veya pasifleşmesi ihtimalini en aza indirmek için güç kaynağının yönü, belirli zaman aralıklarıyla değiştirilir [28].

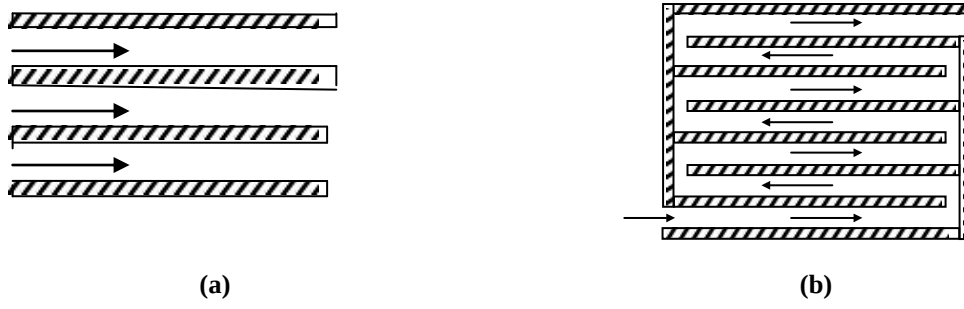
Elektrot malzemesi

Elektro-pıhtılaştırma sürecinde genellikle alüminyum veya demir malzeme kullanılmaktadır. Elektrotlar, alüminyum veya demir plakalardan, doğramalardan yapılır. Atık malzeme kullanıldığında, elektrot destekleri dayanıklı malzemeden yapılmalıdır. Donanımın arasındaki çamur kalıntıları iyice temizlenmelidir. Elektrotların da düzenli olarak sudan geçirilmesi gerekir. Çünkü belirli miktarda kirleticiyi gidermek için belirli miktarda metal iyonuna ihtiyaç vardır. Bu metal iyonları genellikle atıksu arıtımında demirden; su arıtımında alüminyumdan sağlanır. Bunun nedeni, demirin, alüminyuma göre daha ucuz

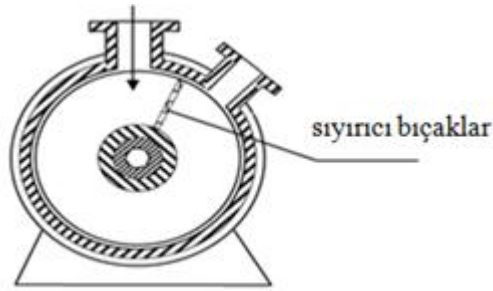
olmasıdır. Atıksu arıtımında alüminyum plakaların tek başına veya demir plakalarla birlikte kullanıldığı da görülür. Demir plakalarla birlikte kullanılmasının amacı, Al^{+3} 'ün pıhtılaştırma verimini yükseltmektir. Suda belirli bir derişimde Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonu varsa, katodun paslanmaz çelikten olması önerilir[28].

3.1.2. Tasarım

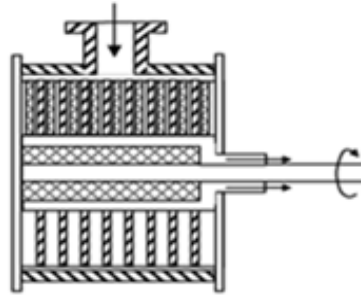
Elektro-pıhtılaştırma birimini basit hale getirmek için elektrotlar genellikle çift kutuplu bağlanır. Atıksuyun plakalar arasındaki boşluktan akışı, tek bir kanaldan ya da birkaç kanaldan gerçekleşir (Şekil 3.1a ve b) [29].



Şekil 3.1.Elektro-pıhtılaştırma birimi (a) çoklu kanal ve (b) tek kanal [29]



(a)



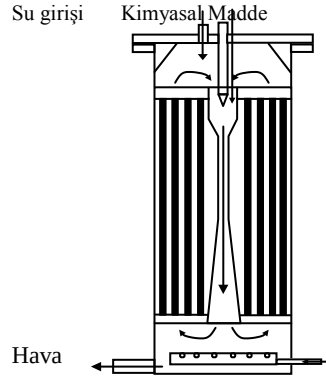
(b)

Şekil 3.2. Silindirik elektrotlu elektro-pıhtılaştırma birimi (a) üstten ve (b) yandan görünüş[29]

Akışın düzenlenmesinde birden fazla kanal oluşturmak basittir ancak kanal başına düşen debi düşük olur. Elektrot yüzeyinin pasifleşme ihtimalinin en aza indirilememesi durumunda, tek kanal kullanılarak debinin artırılması önerilir.

Su arıtımında, elektro-pıhtılaştırma süreci için Şekil 3.3'te görüldüğü gibi silindirik bir yapı kullanılabilir. Bu yapı, sudan askıda katı maddeyi ayırmada oldukça etkilidir.

Tıkanmayı önlemek için silindirin içine sıyrıcı bıçaklar yerleştirilir. Elektrotlar, tarağın dışlarının aralarına sabitlenir. Bir başka silindirik tasarım seçeneği ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Silindirik elektrolitik pıhtılaştırma biriminde çubuk elektrotlar [29]

Şekil 3.3'te gösterilen tasarımda, iyi bir karışma sağlamak için silindirin merkezine venturi yerleştirilmiştir. Elektro-pıhtılaştırma reaktörü sürekli veya kesikli çalıştırılabilir. Az miktardaki atıksuların arıtımında (çamaşırhane atıksuları, inşaat sahalarına su temini vb.) reaktörün kesikli çalıştırılması daha uygundur. Bu durumda otomasyon önem kazanmaktadır. Elektro-pıhtılaştırma süreci sonrasında çamur giderimi süreci uygulanmalıdır. Bu amaçla, bir çöktürme veya yüzdürme birimi yerleştirilmelidir [29].

3.1.3. Elektro-pıhtılaştırma süreciyle arıtılmış atıksular

Elektro-pıhtılaştırma, yağ ve gres gideriminde etkili olduğu gibi askıda katı madde gideriminde de etkilidir. Bu süreç, küçük veya orta büyüklükte nüfusa sahip yerleşim yerlerinin içme suyu arıtımında, deniz suyunda ve büyük arıtım tesislerinin ekonomik ve gerekli olmadığı endüstrilerde buhar kazanı suyu temininde uygulanmaktadır. Doğal kaynak sularında bulunan koloidal maddelerin pıhtılaştırılmasında oldukça etkili olduğundan, bulanıklığı ve rengi azaltır. Aynı zamanda, alg ve mikroorganizmaların parçalanmasında; demir, silikat, humus, çözünmüş oksijen gideriminde de uygulanabilmektedir [29].

Elektro-pıhtılaştırma, tekstil, yiyecek-içecek, petrol, katranlı kum ve bitümlü ist, halı boyama atıksularının arıtımında; kanalizasyon sularının arıtımında da uygulanabilir. Sentetik elyaf etimi atıksularında, yağ-su emülsiyonlarında, yağlı atıksularda, kil asıltılarında, nitrit ve boyar maddelerin atıksulardan ayrılmasında kullanılabilir. Bakırın indirgenmesi, pıhtılaştırma ve ayrıştırma süreçlerinin de verimli olduğu gözlemlenmiştir.

Elektro-pıhtılaştırma sürecinin; fenolik bileşiklerin gideriminde, reaktif boya çözeltilerinin renksizleştirilmesinde, askıda katı madde içeren kil çözeltilerinin berraklaştırılmasında, tekstil atıksularının arıtımında ve ağır metal gideriminde uygulamaları başarılı olmuştur. Elektro-pıhtılaştırma; özellikle, yüzeysel suların, kentsel atıksuların, koloidal madde içeren atıksuların, gıda sektörü ve metal kaplama endüstrisi atıksularının arıtımında da etkilidir. Tam otomasyonlu elektro-pıhtılaştırma süreci, diğer arıtım yöntemlerine göre daha düşük maliyetlidir [28].

Bu tür yöntemlerin; geleneksel kimyasal arıtım yöntemlerine kıyasla daha az pıhtılaştırıcı iyon ihtiyacı ve daha az çamur oluşumu gibi iki temel üstünlüğü vardır. Ancak, elektro-pıhtılaştırma sürecinin bu iki temel üstünlüğe ek olarak, aynı zamanda düşük maliyetli olması, diğer elektrokimyasal yöntemlerden daha fazla tercih edilmesine neden olmaktadır.

3.2. Elektro-Yükseltgeme

Atıksu arıtımında elektro-yükseltgeme süreci üzerinde çalışmalar, siyanürün elektrokimyasal yolla parçalanması konulu araştırmaların yapıldığı 19. yüzyıla dayanır [30]. Çeşitli elektrotların, çeşitli kirleticiler üzerindeki etkinliğini belirlemek, elektrot malzemelerinin elektrokimyasal dayanıklılığını ve elektro-katalitik etkinliğini geliştirmek, süreç verimini etkileyen faktörleri belirlemek, kirleticilerin parçalanma kinetiğini özömlmek amacıyla deneysel çalışmalar sürdürölmektedir. Deneysel alışmalar, çoğunlukla anodik malzemelerin davranışı üzerinde yoğunlaşmış; katodik malzemelerle ilgili daha az çalışma yapılmıştır.

3.2.1. Dolaylı elektro-yükseltgeme

Biyolojik parçalanmaya dayanıklı organik bileşiklerin gideriminde uygulanabilirliği yüksek elektrokimyasal yöntemlerden biri olan elektro-yükseltgemedeki değişik yöntemler uygulanabilir. Örneğin, dolaylı elektro-yükseltgeme sürecinde, organik kirleticilerin parçalanması için anotta üretilen klor ve hipoklorit iyonu kullanılır. Bu süreçte, klorür derişiminin yüksek olması durumunda (3g/L'nin üzerinde), birçok organik veya inorganik kirletici etkin bir şekilde yükseltgenir. Ancak bu süreçte, klorlu organik bileşiklerin ara veya son ürün olarak ortaya çıkması, bu tekniğin yaygın olarak kullanımını engeller. Ham atıksuda klorür derişimi düşük ise süreç verimini arttırmak için tuz ilave edilmelidir [31].

Kirleticiler, elektrokimyasal yolla üretilen hidrojen peroksit yardımıyla da parçalanabilir. Bu sistemde, katot malzemesi olarak gözenekli karbon-politetrafloretlen (PTFE) kullanılmakta ve sisteme oksijen beslenmektedir. Anot malzemesi olarak Pb/PbO₂, Ti/Pt/PbO₂ veya Pt kullanılır. Atıksuya Fe⁺² tuzu ilave edilebilir veya elektro-Fenton tepkimesi oluşturmak için çözünen demir anottan Fe⁺² iyonu elde edilebilir. Mor ötesi ışınlar uygulandığında anilin, %95 oranında parçalanmaktadır. Çözeltiye geçen oksijen, sisteme elektrik verildiğinde anilinin giderimini kolaylaştırır.

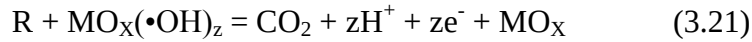
Elektrokimyasal olarak üretilen ozonun atıksu arıtımında kullanımı ile ilgili kaynaklar bulunmaktadır[32].

Bir başka elektro-yükseltgeme yöntemi, genellikle karışık endüstriyel ve tehlikeli atıksuların arıtımında uygulanan aracılı elektro-yükseltgeme sürecidir. Bu süreçte, metal iyonları aracı olarak adlandırılır ve anot üzerinde, dayanıklı, düşük değerlikli durumdan, yüksek değerlikli şekle yükseltgenir; daha sonra doğrudan organik kirleticilere yönelirler. Organik kirleticilerin parçalanmasını kolaylaştıracak hidroksilsiz radikaller üretirler. Daha sonra, aracı metal iyonları anotta yeniden üretilirler; bu kapalı bir döngüdür. Tipik araçılardan bazıları, Ag⁺², Co⁺³, Fe⁺³, Ce⁺⁴ ve Ni⁺²'dir. Aracılı elektrolitik yükseltgeme çok asidik ortam

gerektirir. Ayrıca, ortama ilave edilen ağır metallere ikincil kirleticiler oluşur; bu sürecin uygulamasını sınırlayan bir olumsuzluktur [33].

3.2.2. Doğrudan anodik yükseltgeme

Kirleticilerin anotta doğrudan yükseltgenmesi, anotta fiziksel olarak soğurulan “aktif oksijen” (soğurulan hidroksil radikalleri, $\bullet\text{OH}$) veya kimyasal olarak soğurulan “aktif oksijen” (oksit kafeste bulunan oksijen, MO_{x+1}) ile gerçekleşebilir. Bu süreç, anodik veya doğrudan yükseltgeme olarak adlandırılmaktadır. Fiziksel olarak soğurulan “aktif oksijen” ($\bullet\text{OH}$), organik bileşiklerin tümüyle yükseltgenmesini sağlar; kimyasal olarak soğurulan “aktif oksijen” ise (MO_{x+1}); yükseltgeme ürününe dönüşerek çöker.



Genelde, $\bullet\text{OH}$, kirleticilerin yükseltgenmesinde MO_{x+1} ’deki oksijenden daha etkilidir. Çünkü oksijen oluşumu anotta da gerçekleşebilir. Oksijen oluşumunda, yukarıda verilen iki tepkimenin gerçekleşebilmesi için yüksek akım yoğunluğu ve yüksek aşırı gerilim gerekir. Aksi halde, akımın çoğu suyun ayrışması için harcanır.

Anotta doğrudan yükseltgenme, ilave kimyasal madde veya katoda oksijen beslemesi gerektirmez, ikincil kirletici oluşturmaz ve karmaşık bir donanımı yoktur [34].

Bu üstünlükler, anotta yükseltgemeyi, diğer elektro-yükseltgeme süreçlerinden daha fazla tercih edilebilir hale getirir. Anotta yükseltgeme sürecinin en önemli kısmı, anot malzemesi seçimidir. Anot malzemesi olarak çoğunlukla, camsı karbon, Ti/RuO₂, Ti/Pt-Ir, MnO₂, Pt-siyah karbon, gözenekli karbon keçe, karbon kumaş ve paslanmaz çelik kullanılmaktadır. Ancak hiçbiri yeteri kadar aktif olmayıp; dayanıklılıkları birbirlerinden farklıdır. Son yıllarda elmas kaplı elektrotlar da başarıyla kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan anot malzemeleri; grafit, Pt, PbO₂, IrO₂, TiO₂, SnO₂ ve elmadır [34].

3.2.3. Anotta doğrudan yükseltgenmeyi etkileyen faktörler

Oksijen aşırı gerilimi

Anodun etkinliği oksijen aşırı gerilim değerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. En çok kullanılan anot malzemelerinin karşılaştırması Çizelge 3.2’de verilmiştir. Anotların veriminin daha iyi anlaşılabilmesi için geleneksel yükseltgenlerin oluşum gerilimleri de Çizelge 3.3’te verilmiştir. Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi; IrO_2 , Pt ve grafit anotların oksijen aşırı gerilimleri, diğer anotlara kıyasla oldukça düşüktür. Bu demektir ki; bu anotlar üzerinde kirleticilerin etkin bir şekilde yükseltgenmesi, çok düşük akım yoğunluklarında; yüksek derişimde klor ve aracı metal iyonu varlığında gerçekleşir. Akım yoğunluğu yüksek olduğunda, oksijen üretiminden dolayı akım veriminde belirgin bir düşüş meydana gelir. Titanyum üzerinde bor katkılı elmas film tabakası veya DiaChem tipi elektrotlarda [35], oksijen aşırı gerilimi en yüksek düzeydedir. Bu nedenle anotta yükseltgenme, yüksek akım yoğunluğunda düşük oksijen üretimiyle gerçekleşir. Böylece süreç etkili ve verimli hale gelir. Bu anotları, çeşitli kirleticilerin yükseltgemesinde en etkin anotlar olduğu belirlenmiştir [35].

Çizelge 3.2. Çeşitli anotların oksijen oluşum gerilimleri [35]

Anot	Değer (V)	Şartlar
Pt	1,3	0,5 M H ₂ SO ₄
IrO ₂	1,6	0,5 M H ₂ SO ₄
Grafit	1,7	0,5 M H ₂ SO ₄
PbO ₂	1,9	1 M HClO ₄
SnO ₂	1,9	0,5 M H ₂ SO ₄
Pb-Sn (93:7)	2,5	0,5 M H ₂ SO ₄
Titanyum Oksitler	2,2	1 M H ₂ SO ₄
Si/BDD	2,3	0,5 M H ₂ SO ₄
Ti/BDD	2,7	0,5 M H ₂ SO ₄
DiaChem	2,8	0,5 M H ₂ SO ₄

Çizelge 3.3. Aracı kimyasal maddelerin oluşum gerilimleri [35]

Yükseltgeyiciler	Oluşum Gerilimleri (Volt)
H ₂ O/•OH (hidroksil radikal)	2,80
O ₂ /O ₃ (ozon)	2,07
SO ₄ ⁻² /S ₂ O ₈ ⁻² (peroksodisülfat)	2,01
MnO ₂ /MnO ₄ ⁻² (permanganat iyonu)	1,77
H ₂ O/H ₂ O ₂ (hidrojen peroksit)	1,77
Cl ⁻ /ClO ₂ ⁻ (klor dioksit)	1,57
Ag ⁺ /Ag ⁺² (gümüş(II) iyonu)	1,5
Cl ⁻ /Cl ₂ (klor)	1,36
Cr ⁺³ /Cr ₂ O ₇ ⁻² (dikromat)	1,23
H ₂ O/O ₂ (oksijen)	1,23

Anotta yükseltgemenin etkinliği

Çizelge 3.4’te, çeşitli anotların, çeşitli koşullar altında, farklı kirleticileri parçalama verimleri karşılaştırılmıştır. Özellikle dikkate alınan parametrelerden biri akım yoğunluğu, diğeri akım verimidir.

Çizelge 3.4. Çeşitli anotların verim karşılaştırması [36]

Anot	Kirletici	Akım Yoğunluğu (A/m ²)	Akım Verimi (%)	Giderim Verimi	Yorum
Grafit Tanecikleri	Fenol	0,03- 0,32	70	%70- %50 mineralleşme	5 ay süreli kararlı çalışma
Grafit Plaka	Fenol	10- 100	24,6- 63,5	% 6-17, KOİ	Elektrolit:NaOH
Pt veya Ti/Pt	Fenol	300		%30,Toplam Organik Karbon	pH 12, ilk derişim 1000mg/L, 0,25M Na ₂ SO ₄ ’te
	Amonyak	8,5	53	95%	pH 8,2, fosfat tampon çözeltisi, organik maddeler için düşük verim.
	Glikoz	100-900	15-20	%30	1M H ₂ SO ₄
PbO ₂	Anilin	I=2A	15-40	1 saatte >%90	pH 2, ilk derişim 2,7mM. Sıkıştırılmış PbO ₂ yatak.
	Fenol	I=1,2,3A		%46-80	Anodik hücre: ilk derişim 14-56 mM. 1 M sülfürik asitte. Sıkıştırılmış PbO ₂ yatak.
Ti/PbO ₂	Fenol	300		%40,Toplam Organik Karbon	pH 12, ilk derişim 1000mg/L. 0,25M Na ₂ SO ₄
	Sızıntı suları	50-150	KOİ %30, NH ₄ ⁺ -N %10	KOİ için %90, NH ₄ ⁺ -N için %100	

Çizelge 3.4. (Devam)Çeşitli anotların verim karşılaştırması [36]

	Glikoz	100-900	30-40	100%	1M H ₂ SO ₄
	2-Klorofenol	80-160	35-40	%80-95, KOİ	Pb ⁺² oluşumu; ilk KOİ derişimi 1000mg/L, 25 ⁰ C
IrO ₂	1,4-Benzokinon	Düşük	17		Sadece halkaların kırılması
	Klorlu Fenoller	0,6-50	54-1,8		Na ₂ SO ₄
Ti/SnO ₂ -Sb ₂ O ₅	2-Klorofenol	80-160	35-40	%80-95, KOİ	Aracı olarak oksalik asit
	Glikoz	100-900	<20	30%	1M H ₂ SO ₄
	Fenol	300		100%	pH 12, ilk derişim 1000mg/L. 0,25M Na ₂ SO ₄
	Sızıntı Suyu				PbO ₂ 'ye benzer.
Ebonex	Trikloroetilen	Sabit gerilim 2,5-4,3V	<32	%10-70	Sucul ortamda kararlı, Ti ₄ O ₇ 'den TiO ₂ 'ye.

Comninellis ve Plattner [36], değişik elektrotların etkinliğini belirlemek için “Elektrokimyasal Yükseltgenebilirlik İndisi”ni (EOI) öngörmüşlerdir. Elektrokimyasal Yükseltgenebilirlik İndisi, kirleticinin ilk derişiminden itibaren sıfırlanıncaya kadar geçen süre(τ) içinde ortalama akım verimidir [36]. Bu değeri hesaplamak için, elektro-yükseltgeme sürecinin herhangi bir anındaki akım verimi yani anlık akım verimi (ICE)’nin bilinmesi gerekir.

$$EOI = \left(\int_0^{\tau} ICE dt / \tau \right) \quad (3.23)$$

Elektrokimyasal yükseltgenebilirlik indisinin hesaplanmasında, anlık akım veriminin katkısı ancak kirletici derişiminin çok az olduğu uzun tepkime sürelerinde ve sürecin kütle aktarımından çok, elektrokimyasal kinetik tarafından kontrol edilmesi durumunda gözlemlenebilir. Bu nedenle, hesaplanan elektrokimyasal yükseltgenebilirlik indisi çok düşüktür. Şöyle ki; benzen

türevlerinin Pt anot üzerinde elektrokimyasal olarak parçalanması sürecinde 0,05'ten düşük ve en yüksek 0,58'e kadar çıkabilir[36].

EOI'nin kullanılması durumunda τ , kütle aktarım kontrolünün başladığı an temel alınarak seçilmelidir. Kütle aktarım kontrolünün başladığı andaki anlık akım verimi değerinin bilinmemesi durumunda, sürecin başlangıcı ve sonundaki akım verimlerinin ortalaması alınarak kıyaslama yapılır.

Grafit elektrotlar için, 0,03-0,32 A/m² gibi çok düşük akım yoğunluklarında en yüksek akım verimi %70 olur. Akım yoğunluğunun 10-100 A/m²'ye çıkarılması durumunda akım verimi %6-17 arasındadır. Çok düşük akım yoğunluklarında basit inorganik kirleticilerin yükseltgenmesinde elde edilen tatmin edici sonuçlara rağmen Pt elektrotlar, organik bileşiklerin anodik yükseltgenmesinde düşük verimlidirler. Siyah karbon ilavesi, sulu fenolün Ti/Pt elektrotla anotta yükseltgenmesinin verimini belirgin bir oranda artırır. O₂ üretiminde IrO₂'nin elektro-katalizör olarak kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Bu tip çalışmalarda akım veriminin düşük olması beklenir. Bu anodun, 1,4-benzokinonun yükseltgenmesindeki etkinliğinin düşük olması, düşük akım uygulanmasından kaynaklanabilir [37].

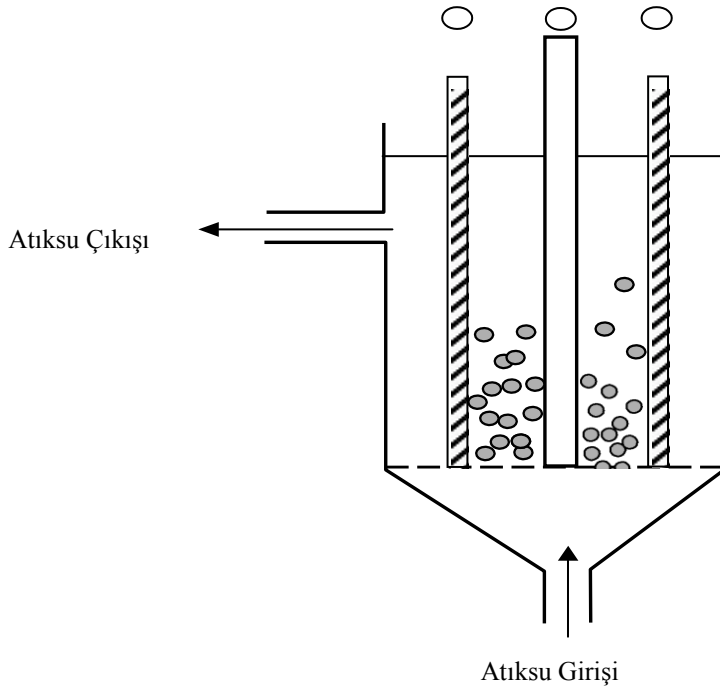
PbO₂, elektro-yükseltgeme sürecinde en çok kullanılan anot malzemesidir. Genellikle PbO₂ elektrotlar, H₂SO₄ çözeltisi içinde kurşunun anodik kutuplaşmasıyla veya titanyumun elektrokimyasal olarak PbO₂ kaplanmasıyla hazırlanır. Elektrot etkinliğini arttırmak için, PbO₂'ye bazen Bi, Fe, Ag katkısı yapılır. Anilin gibi organik kirleticilerin yükseltgenmesi sürecinde, akım veriminin de uygun olduğu durumda PbO₂ anodun verimi çok yüksektir. Aynı zamanda, 80-160 A/m² arasında uygun bir akım yoğunluğunda çalışılmalıdır.

PbO₂ elektrotlar, diğerlerine göre daha ucuz ve kirletici yükseltgemesinde daha verimlidir. Bu elektrodun tek olumsuz yönü, elektrokimyasal aşınma nedeniyle Pb⁺² iyonlarının açığa çıkmasıdır [37].

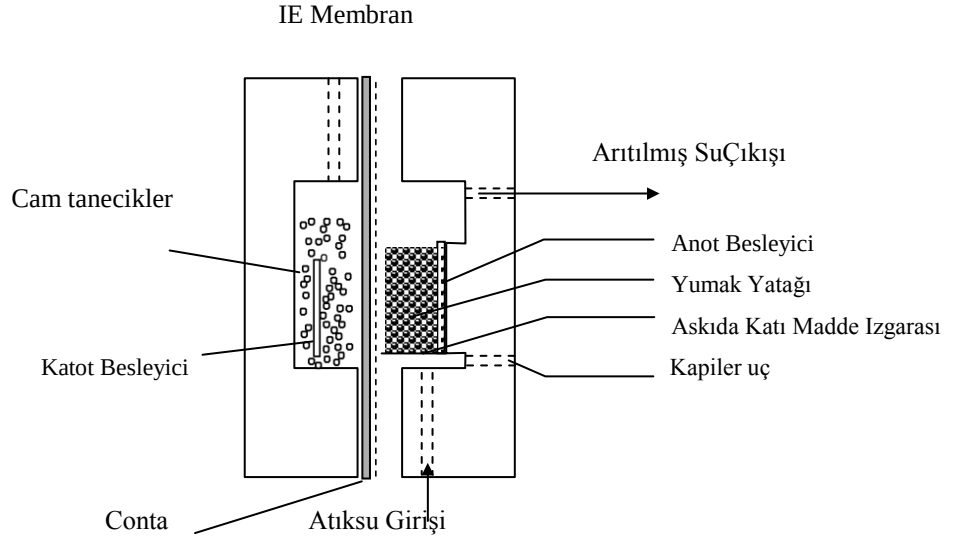
3.2.4. Tasarım

Elektro-yükseltgemedeki kullanılan reaktörlerin tasarımında, hem akım verimi; hem de hacim-zaman verimi parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır. Tasarımı en kolay elektro-yükseltgeme reaktörü, çift kutuplu olandır.

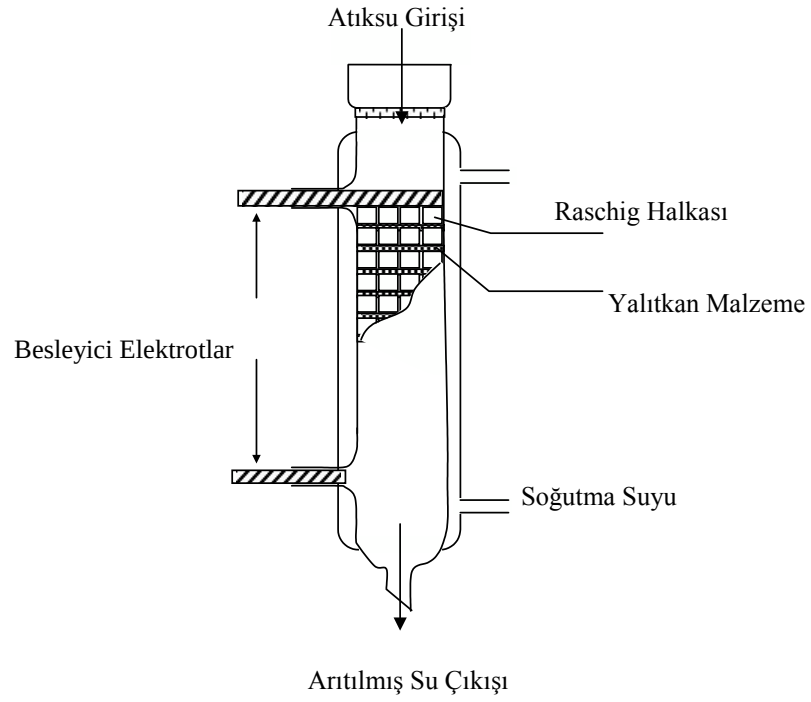
Plaka şeklindeki elektrotlar, silindirik elektrotlarla birlikte de kullanılabilir (Şekil 3.4) [38]. Silindirik anodun içinde, iki-kutuplu elektrot görevi yapan bor katkılı elmas kaplı küresel tanecikler vardır. 1mm çaplı yumaklar halinde uygun anot malzemesinden yapılmış sıkıştırılmış yataklar da kullanılabilir. Şekil 3.5 ve 3.6; yalıtkan malzeme ile bölünmüş bitişik katmanlı iki kutuplu damlatmalı kule reaktörleri şematik olarak göstermektedir [38].



Şekil 3.4. Silindirik elektrotlu reaktör [36]



Şekil 3.5. Sıkıştırılmış yataklı elektrokimyasal reaktör [38]



Şekil 3.6. İki kutuplu damlatmalı kule reaktör [39]

3.3. Elektro-Yüzdürme

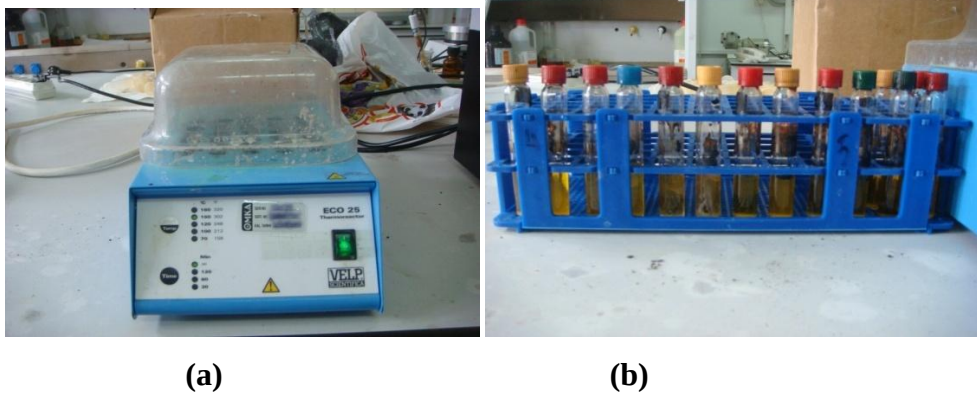
Elektro-yüzdürme yöntemi endüstriyel atıksuların arıtımı yanında evsel atıksuların arıtımında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu süreçte sıvı ortamdan elektriksel akım geçirilmekte ve elektrotlarda oluşan hidrojen ve oksijen gazları kolloidlere yapışarak onları sıvı yüzeyine doğru çıkarmaktadır. Yüzeydeki köpük, köpük sıyrıcılar vasıtasıyla alınabilmektedir. Elektro-yüzdürmede de, elektro-pıhtılaştırmadaki gibi demir ve alüminyum elektrotlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu süreçte; katot ve anotta sırasıyla hidrojen ve oksijen oluşum tepkimeleri gerçekleşir [40].

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Deney

4.1.1. Kimyasal oksijen ihtiyacı analizi

Kimyasal oksijen ihtiyacı analizi için kullanılan termo-reaktör ve cam tüpler Şekil 4.1’te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. KOİ analizinde kullanılan termo-reaktör (a) ve cam tüpler (b)

a. Kullanılan kimyasal maddeler

- Potasyum Dikromat (KCr_2O_7) Çözeltisi
- Amonyum Demir (II) Sülfat, Standart Çözeltisi
 $c[(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}] \approx 0,12 \text{ mol/L}$
- Gümüş Sülfat (Ag_2SO_4) – Sülfürik Asit Çözeltisi
- Ferroin İndikatör Çözeltisi
- Sülfürik Asit, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 4 \text{ mol/L}$
- Standart çözelti (500 mg/L KOİ)

b. Analiz

Deneysel çalışmada uygulanan analiz yöntemleri Çizelge 4.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan analiz metotları

Parametre	Ham Atıksu
Askıda Katı Madde, mg/L	TS EN 872 “Su Kalitesi –Askıda Katı Maddelerin Tayini-Camyünü süzgeçten süzme metodu” Gravimetrik yöntem
Elektriksel İletkenlik, mS/cm	Standard Methods 2510B Laboratory Method
Toplam Çözünmüş Katı Madde, mg/L	İletkenlik ölçülürken, toplam çözünmüş katı madde miktarı da ölçüldü.
SO ₄ ⁻² , mg/L	EN ISO 10304-1 method
NH ₄ -N, mg/L	DIN 38406-E5
NO ₃ -N, mg/L	DIN 38405 D9-2
PO ₄ -P, mg/L	Spektrofotometrik yöntem
Sertlik, mg/L	Standard Methods 2340 Hardness-EDTA Titrimetric Method
CN-, mg/L	Spektrofotometrik yöntem
Klorür, mg/L	EN ISO 10304-1 method
Ağır Metaller	EPA 200.7
Toplam Koliform	Standard Methods 9221B-C

TS 2789 ISO 6060 Su Kalitesi- Kimyasal Oksijen İhtiyacının Tayini standardına uygun olarak; numunelerle aynı anda; saf su ve standart çözelti de KOİ analizi için hazırlandı [41].

Cam tüpler KOİ analizi için hazır hale getirildi.

Her bir numuneden analiz için ikişer adet örnek alındı. Toplam on adet örnekle KOİ analizi yapıldı.

4.2. Atıksuda Yapılan Diğer Analizler

EOSB ham atıksuyunda ve paralel plaka elektrotlarla en iyi deney koşullarındaçıkış suyunda yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Atıksuda yapılan çeşitli analiz sonuçları

		Elektrokimyasal Arıtım Sonrası		
	Ham Atıksu	Demir Elektrot	Alüminyum Elektrot	Elmas Elektrot
Askıda Katı Madde, mg/L	2560	12,7	53,7	327,2
Elektriksel İletkenlik, mS/cm	2,3	2,43	2,46	4,82
Toplam Çözünmüş Katı Madde, mg/L	2710	2840	2840	6450
SO ₄ ⁻² , mg/L	137	183	195	2310
NH ₄ -N, mg/L	3,86	11,55	13,6	2,39
NO ₃ -N, mg/L	0,5025	0,2795	0,197	10,25
PO ₄ -P, mg/L	3,43	0,055	0,056	3,78
Sertlik, mg/L	837,2	364,32	182,16	721,96
CN ⁻ , mg/L	0,0115	0,001	0,0035	0,034
Klorür, mg/L	46,15	114,5	671	80,6
Bor, mg/L	0,893	0,3695	0,3754	0,5444
Cd, mg/L	1,78x10 ⁻⁴	0,62 x10 ⁻⁴	1,53 x10 ⁻⁴	1,153 x10 ⁻⁴
Cr, mg/L	0,107	0	0	0,0583
Cu, mg/L	0,0044	0	0,0002	0,0511
Fe, mg/L	2,508	0,364	0,1818	0,5881
Mg, mg/L	14,99	11,58	5,94	11,69
Mn, mg/L	0,253	0,078	0,0037	0,124
Ni, mg/L	0,172	0,03	0,026	0,2
Pb, mg/L	9,18x10 ⁻⁴	7,2x10 ⁻⁴	6,3x10 ⁻⁴	18,3x10 ⁻⁴
Zn, mg/L	0,099	0,026	0,0064	4,14
Al, mg/L	0,036		0,27	
Hg, mg/L	0,099			0,093
Toplam Koliform	>1600	>1600	>1600	<2

4.3. Deney Sonuçlarının Hesaplanması

$$KOİ \text{ (mg O}_2\text{/L)} = (4.1)$$

Burada;

C: Amonyum demir (II) sülfatın hesaplanmış derişimi, (mol/L) (Günlük olarak kontrol edilmelidir)

V: Deney numune hacmi (mL)

V₁: Tanık deneyde titrasyonda kullanılan amonyum demir (II) sülfatın hacmi (mL)

V₂: Deney çözeltisinin titrasyonunda kullanılan amonyum demir (II) sülfatın hacmi (mL)

8000: Sonucu mg O₂/L cinsinden ifade edebilmek için dönüştürme faktörüdür.

C'nin hesaplanması:

Potasyum dikromat çözeltisinin 10 mL' si H₂SO₄ çözeltisi ile yaklaşık 100 mL' ye seyreltilir. Bu çözelti, amonyum demir (II) sülfatla, üzerine 2 veya 3 damla ferroin indikatörü kullanılarak ayarlanır.

Amonyum demir (II) sülfatın derişimi C (mol/L) aşağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$C = \frac{10,0 \times 0,040 \times 6}{V} = \frac{2,4}{V} \quad (4.2)$$

Burada;

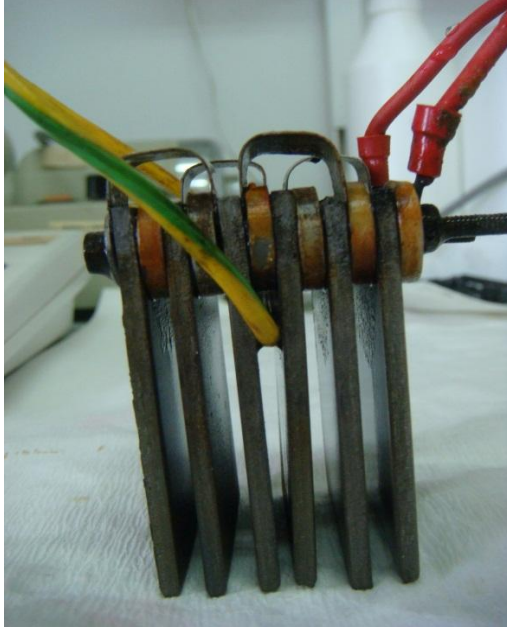
V: Harcanan amonyum demir (II) sülfat çözeltisinin mL cinsinden hacmidir[41].

4.4.Paralel Plaka Elektrotlar Kullanılarak Yapılan Çalışma

4.4.1. Demir ve alüminyum elektrotlar

4.4.1.1. Deneyin amacı ve deney düzeneği

Bu çalışmada, her biri 100 cm² toplam yüzey alanlı paralel plakalar şeklindeki çözünebilir demir ve alüminyum elektrotlar ve kutup değiştirici cihaz kullanılarak; EOSB karışık endüstriyel atıksuyunda elektro-pıhtılaştırma süreciyle KOİ giderimi için en uygun koşullar araştırılmıştır (Şekil 4.2). Kesikli çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde; başlangıç ve bitiş pH ve sıcaklıkları (laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen çalışmalarda, atıksu sıcaklığı deney başlangıcında 10-15⁰C arasında olup; elektroliz süreci boyunca artmış ve deney sonunda 20-45⁰C arasında değişen değerlere ulaşmıştır), akım yoğunluğu, pH, başlangıç KOİ değeri, destek elektrolit (Na₂SO₄) derişimi ve H₂O₂ derişiminin KOİ giderim verimine etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.2. Paralel plaka demir elektrot

Deneysel çalışmalarda; EOSB Atıksu Arıtım Tesisi girişi öncesinden alınan karışık endüstriyel atıksu kullanılmıştır. Atıksuyun başlangıç KOİ değeri 800 - 1400 mg/L arasında olup, atıksu iletkenliği 2 - 3,5mS/cm ve pH'ı 5 - 7 arasındadır. Deneysel çalışma kesikli olarak; sabit akımda gerçekleştirilmiş; ham atıksu, 500 mL'lik bir behere alınarak, içerisine demir ve alüminyum paralel plaka

elektrot yerleştirilmiştir. Atıksu içerisindeki katı taneciklerin çökmesini önlemek için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Düzeneğe kutup değiştirici bağlanmış ve birer dakika aralıklarla anot ve katodu değiştirecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi 60 dakika olup; başlangıç anında, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45 ve 60. dakikalarda alınan numuneler, santrifüj cihazında 7000 devir/dk hızda 5 dakika süreyle santrifüjlendikten sonra KOİ analizleri yapılmıştır.

Deney düzeneği (Şekil 4.3);

- 100 cm² toplam yüzey alanlı paralel plakalardan oluşan elektrot
- 500 mL'lik beher
- Kutup değiştirici
- Güç kaynağı
- Manyetik karıştırıcıdan oluşmaktadır.



Şekil 4.3. Deney düzeneği

4.4.1.2. Deney

İlk aşamada, endüstriyel ham atıksu 500 mL'lik behere alındı. Deneye başlamadan önce atıksuyun başlangıç pH ve sıcaklık değerleri ölçüldü. Deneyin amacı pH değişiminin arıtım verimi üzerine etkilerini belirlemek ise, NaOH ve H₂SO₄ çözeltileri kullanılarak atıksuyun pH'ı istenen değere ayarlandı. İçerisine belirli derişimlerde destek elektrolit eklendi. Deneyde H₂O₂ kullanılacaksa belirli derişimde H₂O₂ de atıksuya eklendi. Kutup değıştirici güç kaynağına bağlandı. Toplam 100 cm² yüzey alanlı paralel plakalar behere yerleştirildi ve en son olarak kutup değıştirici plakalara bağlanarak düzenek tamamlandı.

Güç kaynağı çalışılacak akım yoğunluğuna ayarlandı ve deneye başlandı. Deney süresince gerilim değerleri de gözlemlendi ve kaydedildi. 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45 ve 60. dakikalarda beherdeki atıksuyun orta kısmından 5'er mL numune plastik tüplere alındı ve 30 dakika dinlendirildikten sonra santrifüj cihazında 7000 devir/dk hızda ve 5 dakika süreyle santrifüjlendi. Deney sonunda pH ve sıcaklık tekrar ölçüldü ve değışim gözlemlendi.

TS 2789 ISO 6060 Su Kalitesi- Kimyasal Oksijen İhtiyacının Tayini standardına uygun olarak; numunelerle aynı anda; saf su ve standart çözelti de KOİ analizi için hazırlandı. Her bir numuneden deney için 2'şer adet örnek alındı, ilgili standarda göre KOİ analizi yapıldı [41].

Deney sonunda beherde kalan çamur; 105⁰C sıcaklıktaki etüvde 120 dakika bekletilerek kurutuldu. Kurutma işleminden sonra; desikatörde soğutulularak tartıldı. Oluşan çamur miktarları hesaplandı. pH değerleri ise 6 - 9 arasında ölçüldü.

4.4.2. Elmas paralel plakalı reaktörde elektro-yükseltgeme

4.4.2.1. Deneyin amacı ve deney düzeneği

Bu çalışmada, 40 cm² toplam anot yüzey alanına sahip paralel plaka şeklinde elmas elektrot ve kutup değiştirici kullanılarak; EOSB karışık endüstriyel atıksuyunda elektro-yükseltgeme süreci ile KOİ giderimi için en uygun koşullar araştırılmıştır. Kesikli çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde; akım yoğunluğu, pH, destek elektrolit (Na₂SO₄ ve NaNO₃) derişiminin KOİ giderim verimine etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.4. Elmas paralel plaka elektrot

Deneysel çalışmalarda; EOSB Atıksu Arıtım Tesisi girişi öncesinden alınan karışık endüstriyel atıksu kullanılmıştır. Atıksuyun başlangıç KOİ değeri 900 - 1000 mg/L arasında olup, atıksu iletkenliği 2,2mS/cm ve pH' ı 5 - 7 arasındadır. Deneysel çalışma kesikli olarak sabit akımda gerçekleştirilmiş; ham atıksu, 250 mL'lik bir behere alınarak, içerisine elmas paralel plaka elektrot yerleştirilmiştir. Atıksu içerisindeki katı taneciklerin çökmesini önlemek için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Düzeneğe kutup değiştirici bağlanmış ve birer dakika aralıklarla anot ve katodu değiştirecek şekilde ayarlanmıştır.

4.4.2.2 Deney

İlk aşamada, endüstriyel ham atıksu 250 mL'lik behere alındı. Deneye başlamadan önce atıksuyun başlangıç pH ve sıcaklık değerleri ölçüldü. Deneyin amacı pH değişiminin arıtım verimi üzerine etkilerini belirlemek ise, NaOH ve H₂SO₄ çözeltileri kullanılarak atıksuyun pH'ı istenen değere ayarlandı. İçerisine belirli derişimlerde destek elektrolit eklendi. Kutup değıştirici güç kaynağına bağlandı. Toplam 40 cm² anot yüzey alanlı paralel plaka elektrot behere yerleştirildi ve en son olarak kutup değıştirici plakalara bağlanarak düzenek tamamlandı.

Güç kaynağı çalışılacak akım yoğunluğuna ayarlandı ve deneye başlandı. Deney süresince gerilim değerleri de gözlemlendi ve kaydedildi. 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 ve 90. dakikalarda beherdeki atıksuyun orta kısmından 5 mL numune plastik tüplere alındı ve 30 dakika dinlendirildikten sonra santrifüj cihazında 7000 devir/dk hızda ve 5 dakika süreyle santrifüjlendi. Deney sonunda pH ve sıcaklık tekrar ölçüldü ve değışim gözlemlendi. Böylece, KOİ'nin zamanla değışimi gözlemlenmiştir. Deney düzeneğı, demir ve alüminyum elektrotlarla yapılan deneylerin düzeneğı ile aynıdır.

4.4.3. Hesaplamalar

Örneklerde KOİ analizi ilgili standarda göre hesaplandı.

KOİ % Giderim;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(KOİ)_0 - (KOİ)_t}{(KOİ)_0} (4.3)$$

$(KOİ)_0$: Başlangıç derişimi (mg/L)

$(KOİ)_t$: Son derişim (mg/L)

Enerji tüketimi;

$$\text{Enerji tüketimi (kWhm}^{-3}) = \frac{I.V.t}{v_{\text{çözelti}}} (4.4)$$

I : akım (A)

V : gerilim (volt)

t : saat

$v_{\text{çözelti}}$: çözelti hacmi (m³)

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1.Demir Paralel Plaka Elektrotlarla Elektro-Pıhtılaştırma Deney Sonuçları

Deney 1: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; 1mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,2 sıcaklık 16,4⁰C iken deney sonundapH8,4 , sıcaklık 24,2⁰C olarak ölçüldü. 2,36 g çamur oluştu.

Çizelge 5.1. I = 2 A, i = 20 mA/cm², 1 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	6,2	1607	0	0,000
1	6,1	1607	0	0,407
3	5,8	1407	12,50	1,180
5	6,0	1206	25,00	1,980
20	7,2	1273	20,83	8,947
30	6,3	1206	25	13,147
45	5,3	1206	25	18,447
60	5,1	1273	20,83	23,547

Deney 2: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; destek elektrolit kullanılmadan çalışıldı. Başlangıçta pH 6,1, sıcaklık 16,9⁰C iken deney sonunda,pH 8,15, sıcaklık 26,1⁰C olarak ölçüldü. 3,23 g çamur oluştu.

Çizelge 5.2. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	6,6	1786	0	0,000
1	4,8	1473	18	0,320
3	4,8	1407	21,25	0,960
10	6,1	1340	25,00	3,633
20	5,8	1273	28,75	7,400
45	5,2	1340	25	16,467
60	5,0	1206	32,50	21,467

Deney 3: 20 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,25, sıcaklık $13,5^\circ\text{C}$ iken deney sonunda, pH 8,51, sıcaklık $28,4^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 2,82 g çamur oluştu.

Çizelge 5.3. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	5,3	1518	0	0,000
1	4,8	1407	7	0,320
3	4,9	1139	25,00	0,973
20	6,1	1206	20,59	7,413
60	5,0	1206	20,59	22,013

Deney 4: 20 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,49, sıcaklık $15,2^\circ\text{C}$ iken deney sonunda, pH 8,03, sıcaklık $23,7^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 3,36 g çamur oluştu.

Çizelge 5.4. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	4,9	1965	0	0,000
1	4,8	1540	22	0,320
10	4,7	1540	21,59	3,140
15	4,8	1273	35,23	4,740
30	4,5	1407	28	9,307
45	4,3	1407	28	13,607
60	4,3	1206	38,64	17,907

Deney 5: 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,5, sıcaklık $12,9^\circ\text{C}$ iken deney sonunda, pH 7,84, sıcaklık 22°C olarak ölçüldü. 2,51 g çamur oluştu.

Çizelge 5.5. $I = 1 \text{ A}$, $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	5,0	1429	0	0,000
1	4,9	1407	2	0,163
5	5,0	1206	15,63	0,837
15	5,1	1273	10,94	2,553
30	5,2	1273	11	5,170
45	5,3	1273	11	7,820
60	5,2	938	34,38	10,420

Deney 6: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,39, sıcaklık 16°C iken deney sonunda, pH 7,02, sıcaklık $39,1^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 3,01 g çamur oluştu.

Çizelge 5.6. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	8,2	1875	0	0,000
1	8,1	1540	18	0,810
10	8,8	1607	14,29	8,510
15	9,6	1273	32,14	13,310
20	10,9	1273	32,14	18,760
30	10,8	1407	25	29,560
45	10,8	1139	39	45,760
60	10,0	1005	46,43	60,760

Deney 7: 40 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,5, sıcaklık $12,9^\circ\text{C}$ iken deney sonunda, pH 7,23, sıcaklık $39,4^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 3,89 g çamur oluştu.

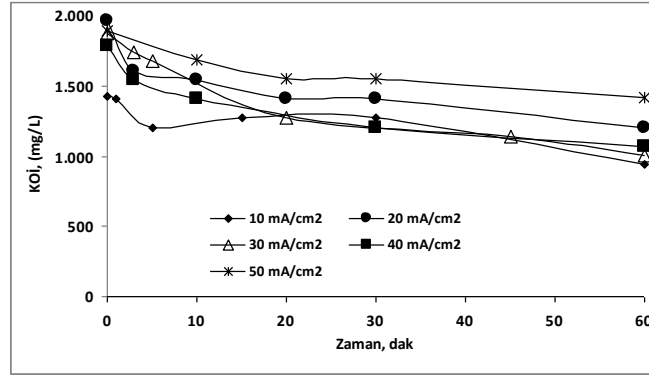
Çizelge 5.7. $I = 4 \text{ A}$, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	8,8	1786	0	0,000
1	8,5	1473	18	1,133
10	8,4	1407	21,25	11,107
30	7,7	1206	33	32,307
45	7,9	1407	21	48,107
60	8,1	1072	40,00	64,307

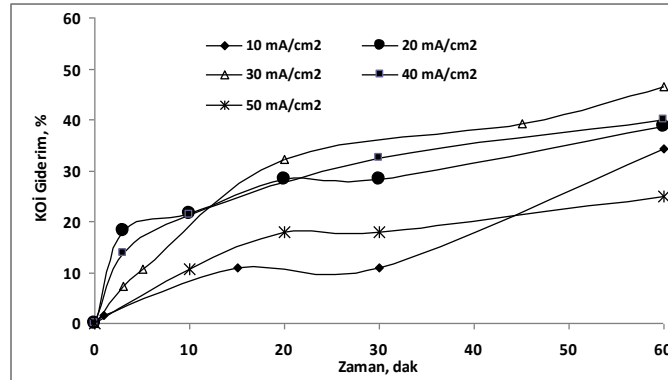
Deney 8: 50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,70, sıcaklık $14,8^\circ\text{C}$ iken; deney sonunda, pH 7,22, sıcaklık $45,4^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 4,97 g çamur oluştu.

Çizelge 5.8. $I = 5 \text{ A}$, $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

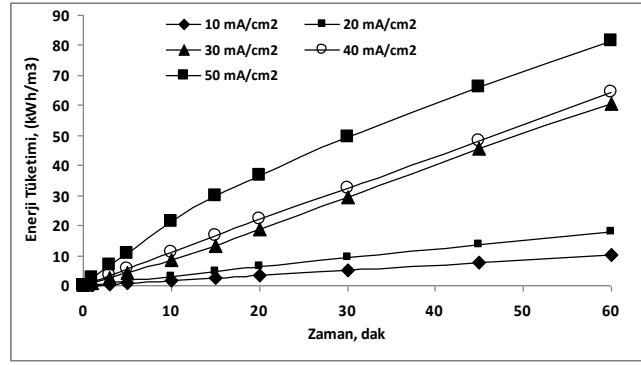
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,5	1893	0	0,000
1	15,0	1420	25	2,500
5	12,3	1487	21,43	10,800
20	8,3	1555	17,86	36,800
30	7,6	1555	18	49,467
45	6,6	1623	14	65,967
60	6,2	1420	25,00	81,467



Şekil 5.1. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.2. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL)

Deney 9: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,95, sıcaklık 11,4⁰C iken; deney sonunda, pH 7,53, sıcaklık 31,3⁰C olarak ölçüldü. 2,59 g çamur oluştu.

Çizelge 5.9. I =3 A, i = 30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,2	2163	0	0,000
1	9,3	1555	28	0,930
3	9,2	1352	37,50	2,770
5	8,1	1285	40,63	4,390
10	7,6	1420	34,38	8,190
15	8,0	1352	37,50	12,190
20	7,5	1352	37,50	15,940
30	7,3	1420	34	23,240
45	6,7	1149	47	33,290
60	6,1	811	62,50	42,440

Deney 10: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,02, sıcaklık 11,4⁰C iken; deney sonunda, pH 7,70, sıcaklık 30,1⁰C olarak ölçüldü. 3,31 g çamur oluştu.

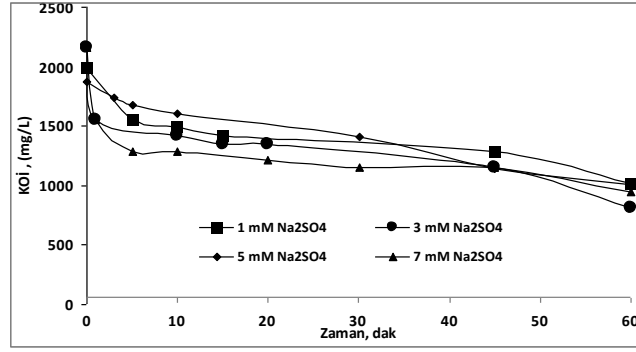
Çizelge 5.10. I =3 A, i = 30 mA/cm², 7 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,3	2163	0	0,000
1	8,3	1555	28	0,830
3	7,4	1285	40,63	2,310
5	7,3	1285	40,63	3,770
10	7,3	1285	40,63	7,420
15	7,2	1082	50,00	11,020
20	6,7	1217	43,75	14,370
30	6,5	1149	47	20,870
45	6,1	1149	47	30,020
60	6,0	946	56,25	39,020

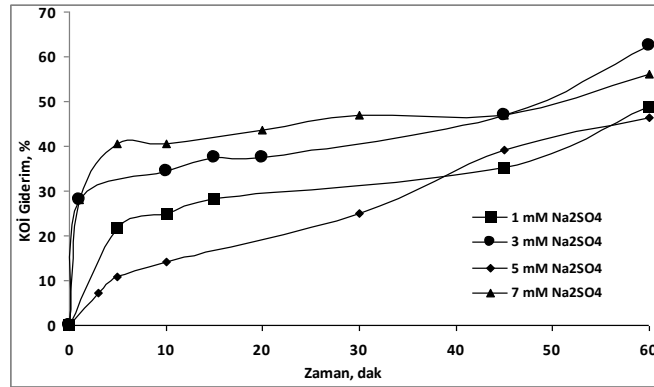
Deney 11: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 1mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,95, sıcaklık 11,6⁰C iken; deney sonunda, pH 6,86, sıcaklık 38,4⁰C olarak ölçüldü. 2,96 g çamur oluştu.

Çizelge 5.11. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 1 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

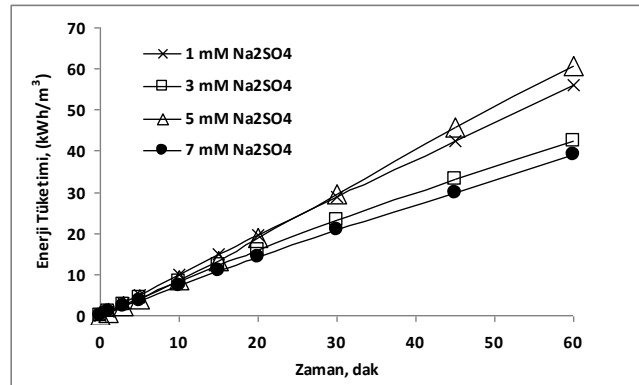
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,1	1983	0	0,000
1	10,4	1420	28	1,040
3	10,0	1285	35,23	3,040
10	9,7	1487	25,00	9,830
15	9,9	1420	28,41	14,780
20	9,5	1555	21,59	19,530
30	9,3	1487	25	28,830
45	9,2	1285	35	42,630
60	9,0	1014	48,86	56,130



Şekil 5.4. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², pH doğal, $V= 500$ mL)



Şekil 5.5. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², pH doğal, $V= 500$ mL)



Şekil 5.6. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², pH doğal, $V= 500$ mL)

Deney 12: Alınan yeni atıksuyun iletkenliği, 21,5⁰C sıcaklıkta, 1,552mS/cm olarak ölçüldü. 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 3,12'ye ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 7,09, sıcaklık 16,6⁰C iken; deney sonunda, pH 7,45, sıcaklık 32,2⁰C olarak ölçüldü. 1,84 g çamur oluştu.

Çizelge 5.12. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $\text{pH} = 3,12$, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,5	1124	0	0,000
1	10,0	983	13	1,000
3	9,6	913	18,75	2,920
5	9,2	702	37,50	4,760
15	8,0	562	50,00	13,060
20	8,3	632	43,75	17,210
30	8,0	632	44	25,210
45	8,2	562	50	37,510
60	7,0	281	75,00	48,010

Deney 13: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak ve $\text{pH } 5,36$ 'ya ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal $\text{pH } 6,90$, sıcaklık $13,1^\circ\text{C}$ iken; deney sonunda, $\text{pH } 8,01$, sıcaklık $42,7^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. $2,05 \text{ g}$ çamur oluştu.

Çizelge 5.13. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $\text{pH} = 5,36$, $V = 500 \text{ mL}$

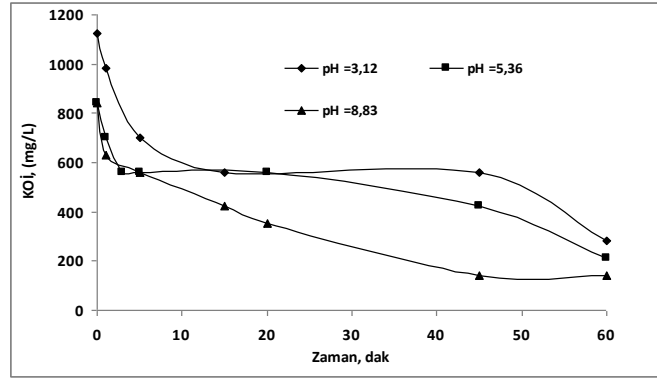
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi,	Enerji Tüketimi,
---------------	---------------	--------------	------------------	---------------------

			%	kWh/m ³
0	19,3	843	0	0,000
1	17,2	702	17	1,720
3	15,6	562	33,33	4,840
5	15,3	562	33,33	7,900
10	15,2	632	25,00	15,500
15	14,5	632	25,00	22,750
20	14,1	562	33,33	29,800
30	13,6	562	33	43,400
45	11,7	421	50	60,950
60	11,6	211	75,00	78,350

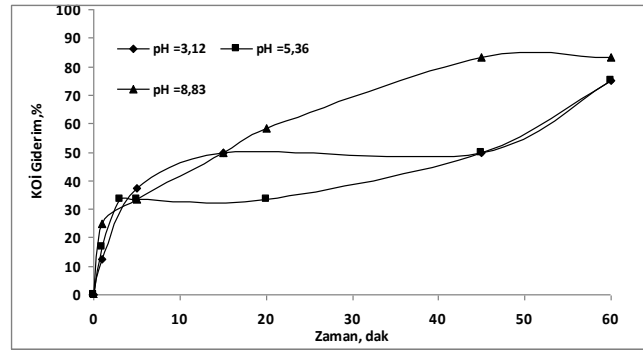
Deney 14: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 8,83'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,65, sıcaklık 17⁰C iken; deney sonunda, pH 8,73, sıcaklık 47,7⁰C olarak ölçüldü. 2,03 g çamur oluştu.

Çizelge 5.14. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, pH = 8,83, V = 500 mL

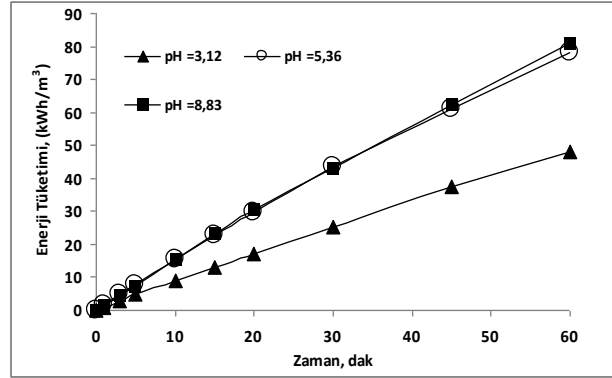
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,5	843	0	0,000
1	14,5	632	25	1,450
3	14,4	632	25,00	4,330
5	14,8	562	33,33	7,290
10	16,5	562	33,33	15,540
15	15,7	421	50,00	23,390
20	14,3	351	58,33	30,540
30	12,6	351	58	43,140
45	12,9	140	83	62,490
60	12,5	140	83,33	81,240



Şekil 5.7.KOİ'nin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.8.KOİ gideriminin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.9.Enerji tüketiminin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)

Deney 15: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak; 1000mg/L H₂O₂ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta pH 6,40, sıcaklık 13,6⁰C iken; deney sonunda, pH 8,02, sıcaklık 43,2⁰C olarak ölçüldü. 4,04 g çamur oluştu.

Çizelge 5.15. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	17,8	873	0	0,000
1	16,7	655	25	1,670
3	14,5	655	25,00	4,570
5	14,0	509	41,67	7,370
10	12,2	509	41,67	13,470
15	13,8	509	41,67	20,370
20	13,5	436	50,00	27,120
30	11,3	364	58	38,420
45	10,6	364	58	54,320
60	10,6	218	75,00	70,220

Deney 16: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak; $2000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta pH 6,51, sıcaklık $12,2^\circ\text{C}$ iken; deney sonunda, pH 7,83, sıcaklık $37,3^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 4,26 g çamur oluştu.

Çizelge 5.16. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $2000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	19,4	873	0	0,000
1	17,4	655	25	1,740
3	15,2	582	33,33	4,780
5	15,3	509	41,67	7,840
10	14,6	509	41,67	15,140
15	14,6	509	41,67	22,440
20	11,1	291	66,67	27,990
30	11,2	218	75	39,190
45	9,8	218	75	53,890
60	9,4	145	83,33	67,990

Deney 17: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak; 500mg/L H₂O₂ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta pH 6,74, sıcaklık 12,2⁰C iken; deney sonunda, pH 7,65, sıcaklık 46,1⁰C olarak ölçüldü. 3,57 g çamur oluştu.

Çizelge 5.17. I =3 A, i = 30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, 500mg/L H₂O₂, pH doğal V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	20,6	873	0	0,000
1	18,1	727	17	1,810
3	16,6	655	25,00	5,130
5	15,6	582	33,33	8,250
10	14,8	582	33,33	15,650
15	13,1	582	33,33	22,200
20	13,3	436	50,00	28,850
30	13,0	509	42	41,850
45	10,9	364	58	58,200
60	10,4	218	75,00	73,800

Deney 18: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak; 1500mg/L H₂O₂ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta pH 6,78, sıcaklık 11,8⁰C iken; deney sonunda, pH 8,31, sıcaklık 41,5⁰C olarak ölçüldü. 4,36 g çamur oluştu.

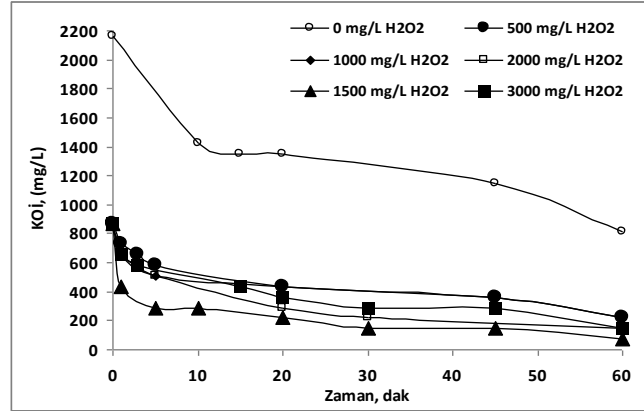
Çizelge 5.18. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $1500 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	19,2	873	0	0,000
1	17,0	436	50	1,700
3	15,2	436	50,00	4,740
5	14,8	291	66,67	7,700
10	14,2	291	66,67	14,800
15	13,7	291	66,67	21,650
20	14,3	218	75,00	28,800
30	12,5	145	83	41,300
45	11,0	145	83	57,800
60	12,0	73	91,67	75,800

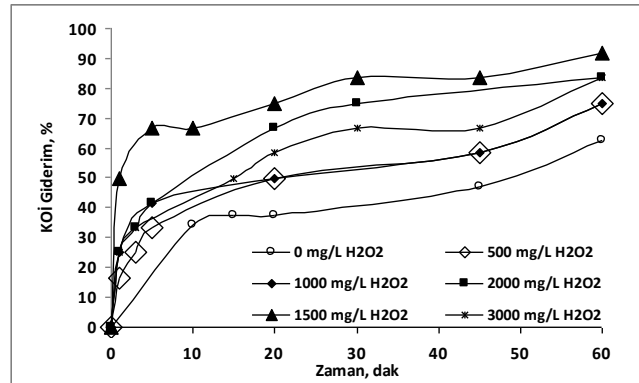
Deney 19: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak; $3000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta pH 6,93, sıcaklık $11,1^\circ\text{C}$ iken; deney sonunda, pH 8,36, sıcaklık $44,5^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. 4,09 g çamur oluştu.

Çizelge 5.19. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $3000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, pH doğal $V = 500 \text{ mL}$

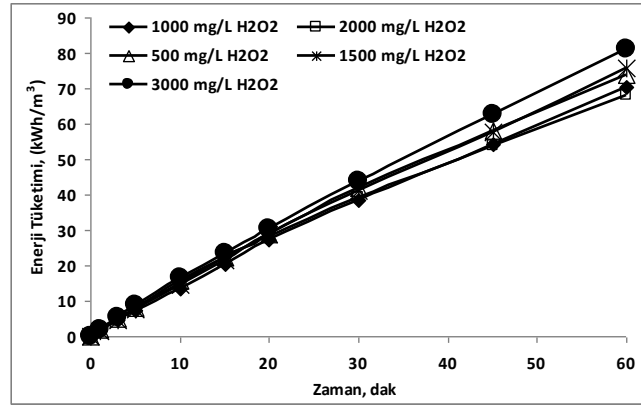
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	21,4	873	0	0,000
1	19,5	655	25	1,950
3	17,6	582	33,33	5,470
5	17,0	582	33,33	8,870
10	15,6	582	33,33	16,670
15	13,5	436	50,00	23,420
20	13,9	364	58,33	30,370
30	13,3	291	67	43,670
45	12,8	291	67	62,870
60	12,1	145	83,33	81,020



Şekil 5.10. KOI' nin H_2O_2 derişimi ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.11. KOI gideriminin H_2O_2 derişimi ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.12. Enerji tüketiminin H₂O₂ derişimi ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL)

Deney 20: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 4,16'ya ayarlanarak; 1500mg/L H₂O₂ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,68, sıcaklık 13,4⁰C iken; deney sonunda, pH 7,23, sıcaklık 37,3⁰C olarak ölçüldü. 3,62 g çamur oluştu.

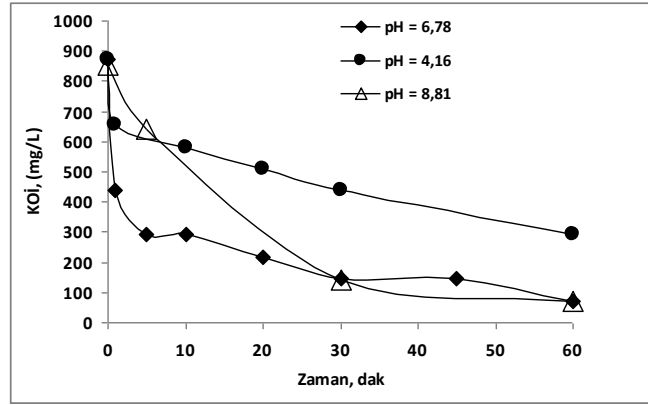
Çizelge 5.20. I =3 A, i = 30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, 1500mg/L H₂O₂, pH =4,16, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,9	873	0	0,000
1	16,7	655	25	1,670
3	15,3	655	25,00	4,730
5	14,7	509	41,67	7,670
20	11,4	509	41,67	26,220
30	11,4	436	50	37,620
45	10,2	436	50	52,920
60	10,5	291	66,67	68,670

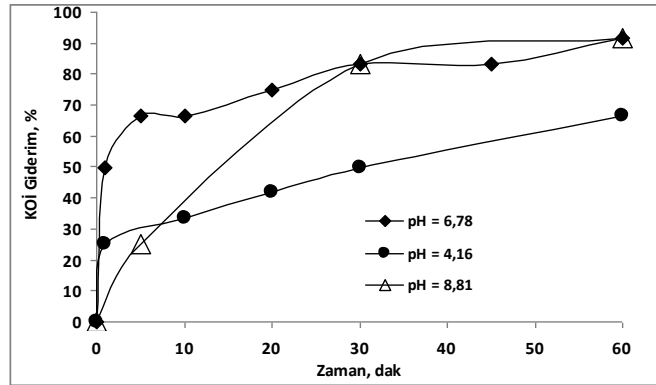
Deney 21: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 8,81'e ayarlanarak; 1500mg/L H₂O₂ derişiminde çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,69, sıcaklık 13⁰C iken; deney sonunda, pH 6,99, sıcaklık 39,2⁰C olarak ölçüldü. 2,55 g çamur oluştu.

Çizelge 5.21. I =3 A, i = 30 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, 1500mg/L H₂O₂, pH =8,81, V= 500 mL

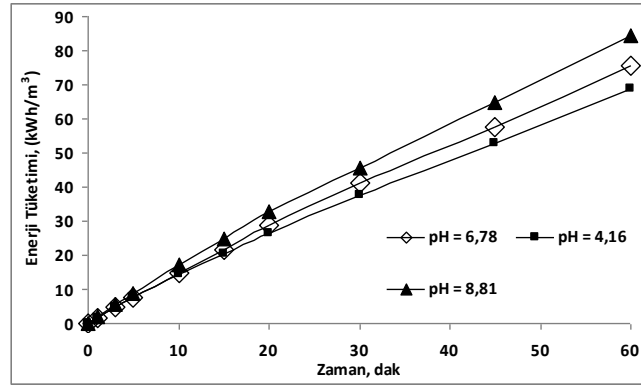
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	20,5	853	0	0,000
1	18,4	569	33	1,840
3	18,0	498	41,67	5,440
15	15,8	711	16,67	24,940
20	15,4	569	33,33	32,640
30	13,1	142	83	45,740
45	12,6	71	92	64,640
60	13,1	71	91,67	84,290



Şekil 5.13.KOİ' nin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.14.KOİ gideriminin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.15. Enerji tüketiminin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)

Deney 22: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak; 0 anında 750mg/L; 30. dakikada 750mg/L derişimlerinde H₂O₂ eklenerek çalışıldı. Başlangıçta pH 6,79, sıcaklık 14,3⁰C iken; deney sonunda, pH 6,78, sıcaklık 48,5⁰C olarak ölçüldü. 4,18 g çamur oluştu.

Çizelge 5.22. $I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, 750+750mg/L H₂O₂, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	21,3	853	0	0,000
1	20,8	711	17	2,080
3	19,3	711	16,67	5,940
5	19,3	569	33,33	9,800
10	17,5	427	50,00	18,550
15	16,9	427	50,00	27,000
45	13,0	71	92	68,650
60	12,7	71	91,67	87,700

5.2.Alüminyum Paralel PlakaElektrotlarla Elektro-Pıhtılaştırma Deney Sonuçları

Deney 1:Yeni alınan atıksuyun iletkenliği, 22⁰C’de 2,04mS/cm olarak ölçüldü. 10 mA/cm² akım yoğunluğunda; 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,66, iken; deney sonunda, pH 8,39 olarak ölçüldü. 2,48 g çamur oluştu.

Çizelge 5.23. I =1 A, i = 10 mA/cm², 3 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	5,9	823	0	0,000
1	5,1	617	25,00	0,170
3	3,9	549	33,33	0,430
10	4,1	617	25,00	1,380
20	4,7	617	25,00	2,830
30	4,1	617	25,00	4,197
45	4,0	480	41,67	6,197
60	3,6	480	41,67	7,997

Deney 2: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; yine 3mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,09, iken; deney sonunda, pH 7,56 olarak ölçüldü. 3,5 g çamur oluştu.

Çizelge 5.24. $I = 2 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	6,2	823	0	0,000
1	6,0	754	8,33	0,400
3	5,7	754	8,33	1,160
5	5,7	617	25,00	1,920
10	5,5	549	33,33	3,753
15	5,4	549	33,33	5,553
20	5,4	549	33,33	7,353
30	5,3	480	41,67	10,887
45	5,2	480	41,67	16,087
60	5,0	343	58,33	21,087

Deney 3: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,25, iken; deney sonunda, pH 7,71 olarak ölçüldü. 5,47 g çamur oluştu.

Çizelge 5.25. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,4	823	0	0,000
1	15,5	617	25,00	1,550
3	15,5	343	58,33	4,650
10	14,4	343	58,33	14,850
15	14,9	411	50,00	22,300
20	12,9	343	58,33	28,750
30	12,7	343	58,33	41,450
45	12,3	274	66,67	59,900
60	12,2	206	75,00	78,200

Deney 4: 40 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,20, iken; deney sonunda, pH 7,36 olarak ölçüldü. 7,67 g çamur oluştu.

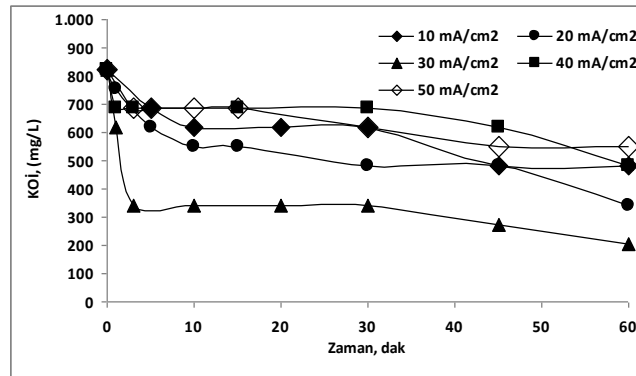
Çizelge 5.26. $I = 4 \text{ A}$, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	22,0	823	0	0,000
1	21,8	686	16,67	2,907
3	20,0	686	16,67	8,240
15	17,2	686	16,67	37,133
30	16,7	686	16,67	70,933
45	15,5	617	25,00	101,933
60	15,5	480	41,67	132,933

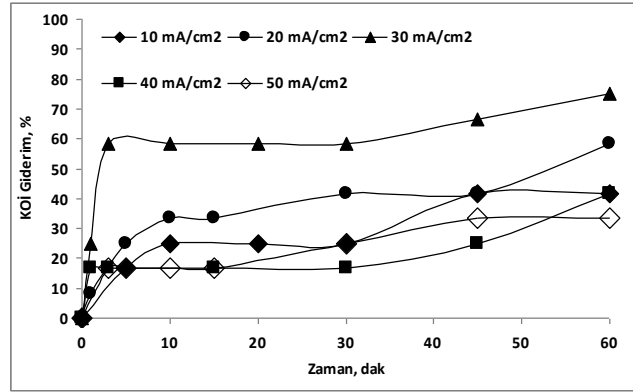
Deney 5: 50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,18,iken; deney sonunda, pH 7,49 olarak ölçüldü. 7,74 g çamur oluştu.

Çizelge 5.27. $I = 5 \text{ A}$, $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

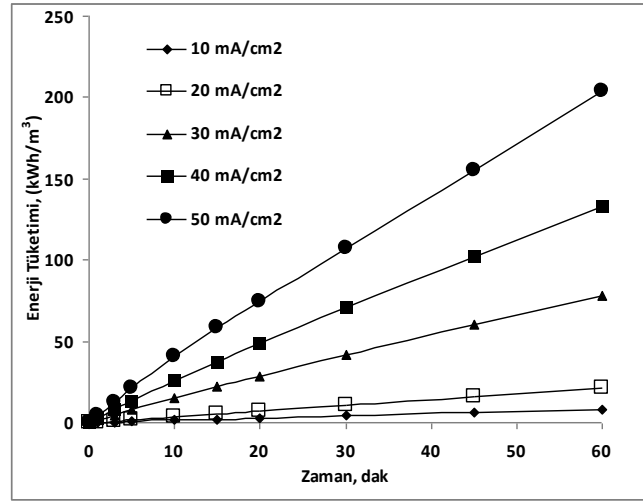
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	28,4	823	0	0,000
1	26,2	617	25,00	4,367
30	19,6	617	25,00	107,083
45	19,4	549	33,33	155,583
60	19,5	549	33,33	204,333



Şekil 5.16.KOI'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.17.KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 5.18.Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL)

Deney 6: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,85, sıcaklık 20,2⁰C iken; deney sonunda, pH 9,03, sıcaklık 34,7⁰C olarak ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 20,9⁰C’de 2,65mS/cm iken; deney sonunda 36,4⁰C’de 2,20mS/cm olarak ölçüldü. 5,36 g çamur oluştu.

Çizelge 5.28. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	9,1	853	0	0,000
1	7,6	640	25,00	0,760
3	6,4	576	40,00	2,040
5	5,8	576	40,00	3,200
10	5,5	384	47,50	5,950
15	5,6	320	47,50	8,750
20	5,4	256	47,50	11,450
30	5,3	256	70,00	16,750
45	5,3	192	85,00	24,700
60	5,3	128	85,00	32,650

Deney 7:30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,14, sıcaklık 16,8⁰C iken; deney sonunda, pH 8,10 , sıcaklık 47,7⁰C olarak ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 17,3⁰C’de 3,26mS/cm iken; deney sonunda 25,1⁰C’de 2,94mS/cm olarak ölçüldü. 6,47 g çamur oluştu.

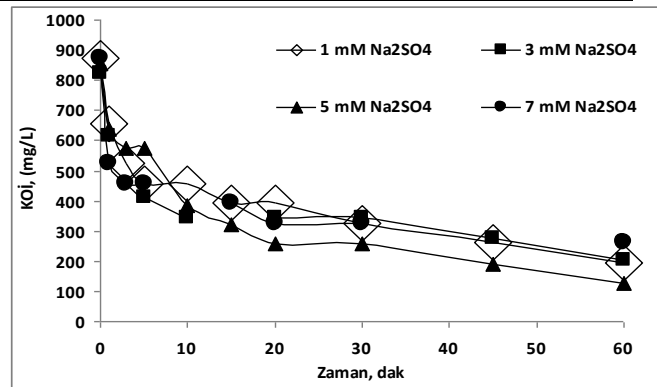
Çizelge 5.29. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 7 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,0	873	0	0,000
1	9,8	524	40,00	0,980
3	9,4	458	47,50	2,860
5	9,7	458	47,50	4,800
10	10,3	458	47,50	9,950
15	10,1	393	55,00	15,000
20	10,8	327	62,50	20,400
30	12,5	327	62,50	32,900
45	13,9	327	62,50	53,750
60	14,5	262	70,00	75,500

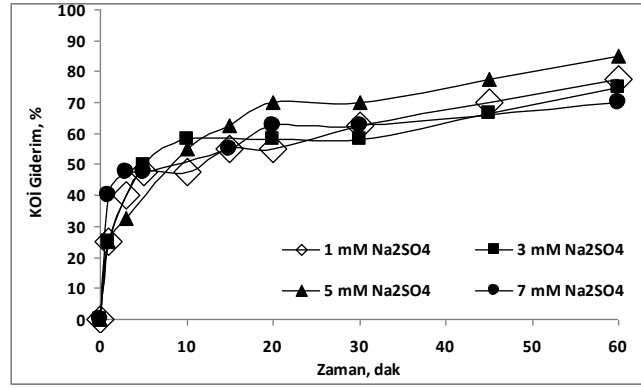
Deney 8: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 1mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,30, sıcaklık 13⁰C iken; deney sonunda, pH 7,46, sıcaklık 65,2⁰C olarak ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 11,7⁰C’de 2,84mS/cm iken; deney sonunda 42,7⁰C’de 2,46mS/cm olarak ölçüldü. 6,79 g çamur oluştu.

Çizelge 5.30. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 1 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 500 mL

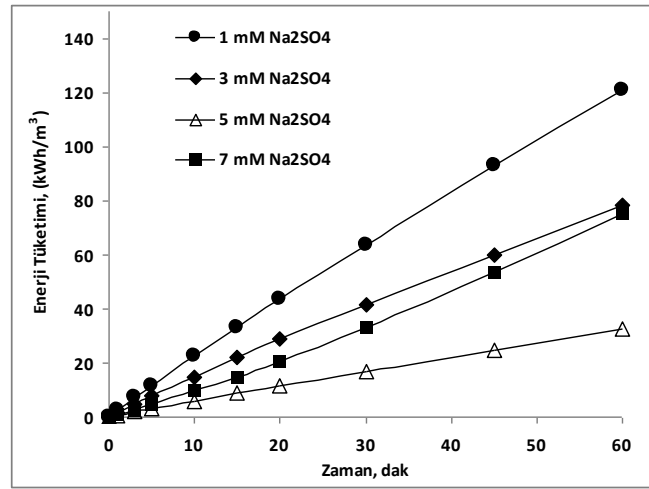
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	23,5	873	0	0,000
1	24,0	655	25,00	2,400
3	23,9	524	40,00	7,180
5	23,2	458	47,50	11,820
10	21,8	458	47,50	22,720
15	21,2	393	55,00	33,320
20	20,4	393	55,00	43,520
30	20,4	327	62,50	63,920
45	19,4	262	70,00	93,020
60	18,8	196	77,50	121,220



Şekil 5.19. KOİ’ nin destek elektrolit ile değişimi (I=3 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 5.20.KOİ giderimin destek elektrolit ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², pH doğal, V=500mL)



Şekil 5.21.Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², pH doğal, V=500mL)

Deney 9:30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 2,90'a ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,18, sıcaklık 11,7⁰C iken; deney sonunda, pH 8,07 , sıcaklık 34,1⁰C olarak ölçüldü.6,26 g çamur oluştu.

Çizelge 5.31. $I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, pH =2,90, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,2	853	0	0,000
1	5,4	640	25,00	0,540
3	5,2	576	32,50	1,580
10	5,0	576	32,50	5,060
15	4,8	576	32,50	7,460
20	4,8	576	32,50	9,860
30	4,4	512	40,00	14,260
45	4,8	448	47,50	21,460
60	5,0	384	55,00	28,960

Deney 10: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 5,28'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,16, sıcaklık 12,4⁰C iken; deney sonunda, pH 7,50, sıcaklık 48,9⁰C olarak ölçüldü. 5,43 g çamur oluştu.

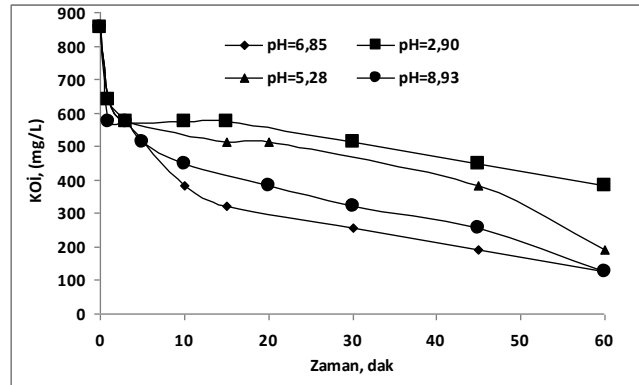
Çizelge 5.32. I = 3 A, i = 30 mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, pH = 5,28, V = 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	12,2	853	0	0,000
1	11,5	640	25,00	1,150
3	11,4	576	32,50	3,430
15	10,0	512	40,00	16,120
20	10,1	512	40,00	21,170
30	9,9	512	40,00	31,070
45	9,7	384	55,00	45,620
60	9,2	192	77,50	59,420

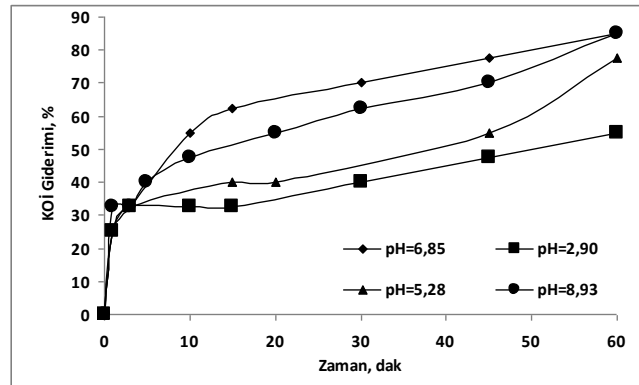
Deney 11: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 8,93'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 6,08, sıcaklık 18,9⁰C iken; deney sonunda, pH 9,59, sıcaklık 40,1⁰C olarak ölçüldü. 7,44 g çamur oluştu.

Çizelge 5.33. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $\text{pH} = 8,93$, $V = 500 \text{ mL}$

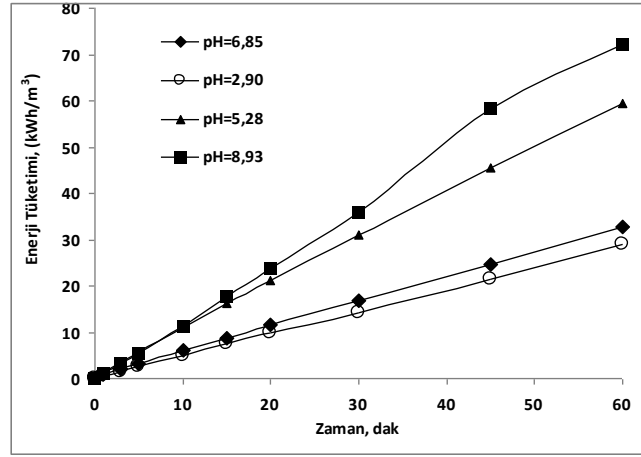
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,2	853	0	0,000
1	10,3	576	32,50	1,030
3	10,9	576	32,50	3,210
5	11,1	512	40,00	5,430
10	11,8	448	47,50	11,330
15	12,5	384	55,00	17,580
20	12,3	384	55,00	23,730
30	12,3	320	62,50	36,030
45	14,8	256	70,00	58,230
60	13,2	128	85,00	72,030



Şekil 5.22. KOİ'nin pH ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.23. KOİ giderimin pH ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.24. Enerji tüketiminin pH ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)

Deney 12: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit ve 10 mg/L derişimde polialüminyum klorür (PAC) kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,33, sıcaklık 12⁰C iken; deney sonunda, pH 7,5, sıcaklık 64,4⁰C olarak ölçüldü. 6,71 g çamur oluştu.

Çizelge 5.34. $I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, 10 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	22,0	873	0	0,000
1	19,9	589	32,50	1,990
3	19,6	458	47,50	5,910
5	19,8	393	55,00	9,870
10	18,2	327	62,50	18,970
15	17,6	262	70,00	27,770
20	17,3	262	70,00	36,420
30	17,2	196	77,50	53,620
45	15,7	196	77,50	77,170
60	15,6	196	77,50	100,570

Deney 13: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit ve 20 mg/L derişimde polialüminyum klorür (PAC) kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,50, sıcaklık 12,7⁰C iken; deney sonunda, pH 7,58, sıcaklık 66,2⁰C olarak ölçüldü. 5,6 g çamur oluştu.

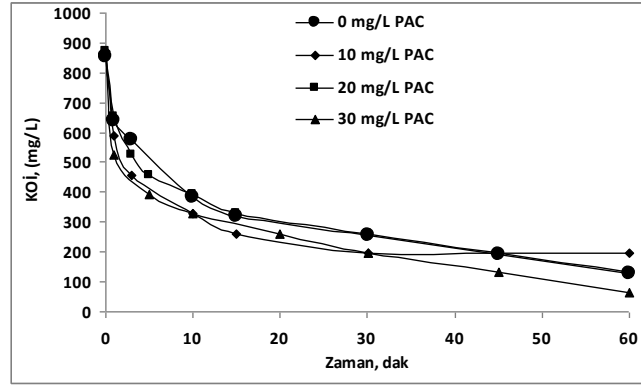
Çizelge 5.35. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, 20 mg/L PAC , pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	23,6	873	0	0,000
1	21,2	655	25,00	2,120
3	19,7	524	40,00	6,060
5	19,7	458	47,50	10,000
10	18,9	393	55,00	19,450
15	18,7	327	62,50	28,800
20	18,0	327	62,50	37,800
30	18,0	262	70,00	55,800
45	17,7	262	70,00	82,350
60	17,6	131	85,00	108,750

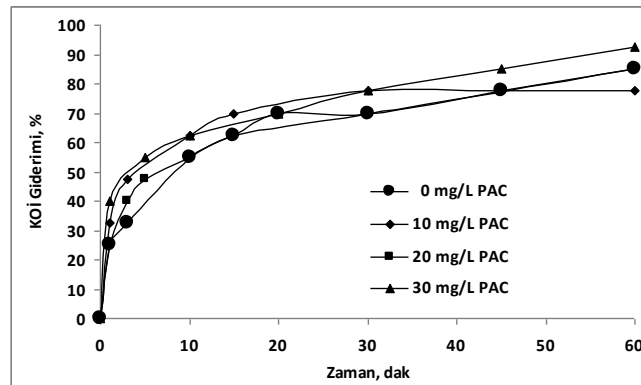
Deney 14:30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit ve 30 mg/L derişimde polialüminyum klorür (PAC) kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,46, sıcaklık $11,4^\circ\text{C}$ iken; deney sonunda, pH 7,56, sıcaklık $67,2^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. $5,75 \text{ g}$ çamur oluştu.

Çizelge 5.36. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, 30 mg/L PAC , pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

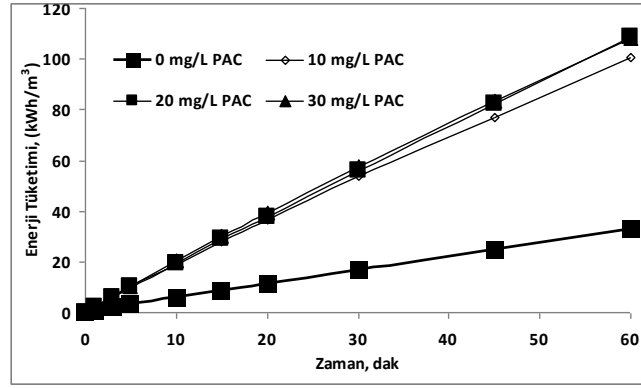
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	22,7	873	0	0,000
1	22,0	524	40,00	2,200
3	20,8	393	55,00	6,360
5	20,1	393	55,00	10,380
10	19,8	327	62,50	20,280
15	19,6	327	62,50	30,080
20	18,9	262	70,00	39,530
30	18,0	196	77,50	57,530
45	17,3	131	85,00	83,480
60	16,5	65	92,50	108,230



Şekil 5.25.KOI'nin PACile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.26.KOI gideriminin PAC ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)



Şekil 5.27. Enerji tüketiminin PAC ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)

Deney 15: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit ve 10 mg/L derişimde Kerafloc kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,48, sıcaklık 14,8⁰C iken; deney sonunda, pH 7,43, sıcaklık 65,4⁰C olarak ölçüldü. 5,77 g çamur oluştu.

Çizelge 5.37. $I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, 10 mg/L KFloc, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	23,2	873	0	0,000
1	20,7	655	25,00	2,070
3	19,8	589	32,50	6,030
5	19,7	589	32,50	9,970
10	19,0	524	40,00	19,470
15	18,3	524	40,00	28,620
20	17,7	458	47,50	37,470
30	17,5	458	47,50	54,970
45	16,8	393	55,00	80,170
60	16,4	262	70,00	104,770

Deney 16: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit ve 20 mg/L derişimde Kerafloc kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,11, sıcaklık 11,4⁰C iken; deney sonunda, pH 8,11, sıcaklık 49,8⁰C olarak

ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 15,3⁰C’de 2,87mS/cm iken; deney sonunda 36,4⁰C’de 2,61mS/cm olarak ölçüldü. 5,01g çamur oluştu.

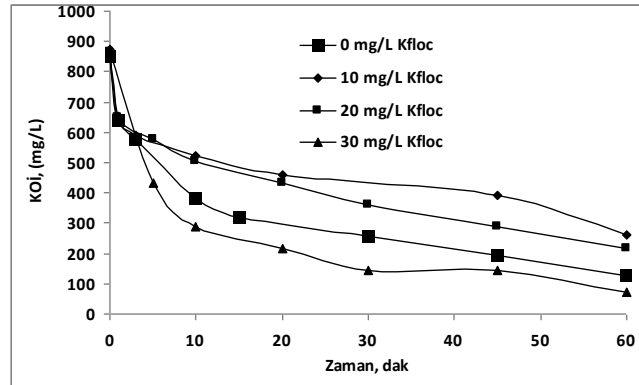
Çizelge 5.38. I =3 A, i = 30 mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, 20 mg/L KFloc, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	9,9	864	0	0,000
1	7,4	648	25,00	0,740
3	9,0	648	25,00	2,540
5	8,6	576	33,33	4,260
10	8,4	504	41,67	8,460
15	9,8	504	41,67	13,360
20	9,4	432	50,00	18,060
30	11,0	360	58,33	29,060
45	9,1	288	66,67	42,710
60	11,7	216	75,00	60,260

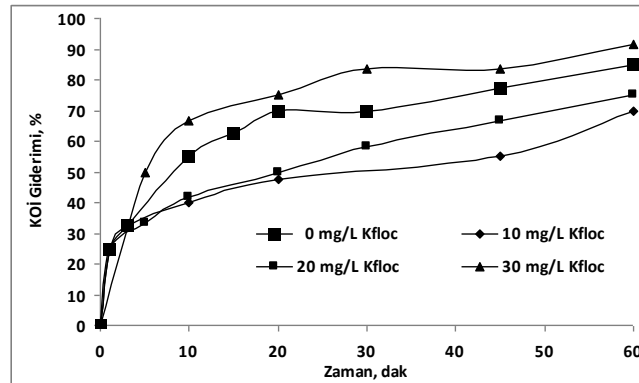
Deney 17: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit ve 30 mg/L derişimde Kerafloc kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,05, sıcaklık 15,5⁰C iken; deney sonunda, pH 8,78, sıcaklık 47,5⁰C olarak ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 18,3⁰C’de 2,86mS/cm iken; deney sonunda 25,3⁰C’de 2,40mS/cm olarak ölçüldü. 5,03g çamur oluştu.

Çizelge 5.39. $I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, 30 mg/L Kfloc , pH doğal, $V = 500 \text{ mL}$

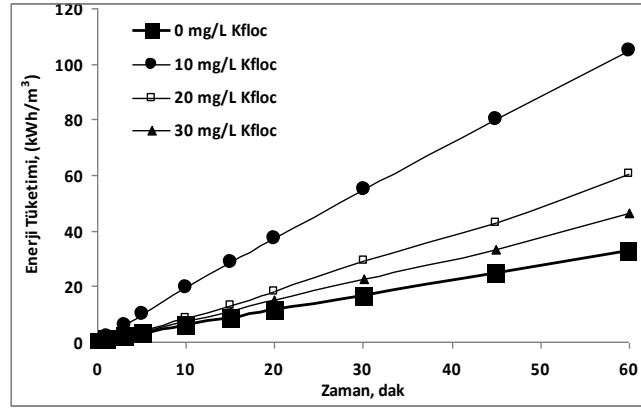
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	8,4	864	0	0,000
1	7,4	504	41,67	0,740
3	7,8	504	41,67	2,300
5	7,7	432	50,00	3,840
10	7,4	288	66,67	7,540
15	7,6	288	66,67	11,340
20	7,6	216	75,00	15,140
30	7,8	144	83,33	22,940
45	7,0	144	83,33	33,440
60	8,5	72	91,67	46,190



Şekil 5.28. KOİ'nin Kerafloc ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.29. KOİ gideriminin Kerafloc ile değişimi ($I = 3 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$)



Şekil 5.30. Enerji tüketiminin Kerafloc ile değişimi ($I=3$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, V= 500 mL)

5.3. Elmas Paralel Plaka Elektrotlarla Elektro-Yükseltgeme Deney Sonuçları

Deney 1: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,17 iken; deney sonunda, pH 5,50 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.40. $I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², 5 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	13,9	955	0,00	0,000
5	13,3	716	25,00	5,320
10	12,6	716	25,00	10,360
20	12,4	645	32,50	20,280
30	12,2	573	40,00	30,040
40	12,2	501	47,50	39,800
50	11,9	501	47,50	49,320
60	11,7	430	55,00	58,680
75	11,8	358	62,50	72,840
90	12,3	358	62,50	87,600

Deney 2: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,93, iken; deney sonunda, pH 6,62 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.41. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $7 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	13,5	914	0,00	0,000
5	13,0	754	17,50	5,200
10	12,2	754	17,50	10,080
20	11,4	754	17,50	19,200
30	11,2	754	17,50	28,160
40	10,8	686	25,00	36,800
50	10,7	617	32,50	45,360
60	10,4	480	47,50	53,680
75	10,8	411	55,00	66,640
90	11,0	343	62,50	79,840

Deney 3: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $10 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,93, iken; deney sonunda, pH 6,48 olarak ölçüldü.

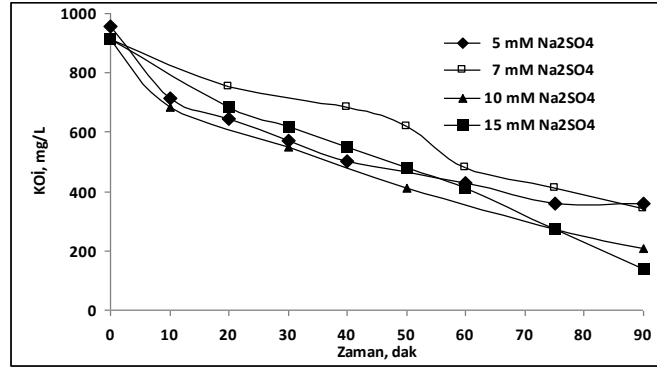
Çizelge 5.42. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $10 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,4	914	0,00	0,000
5	11,5	686	25,00	4,600
10	10,8	686	25,00	8,920
20	10,0	686	25,00	16,920
30	9,8	549	40,00	24,760
40	9,8	549	40,00	32,600
50	9,7	411	55,00	40,360
60	9,8	274	70,00	48,200
75	9,3	274	70,00	59,360
90	9,8	206	77,5	71,120

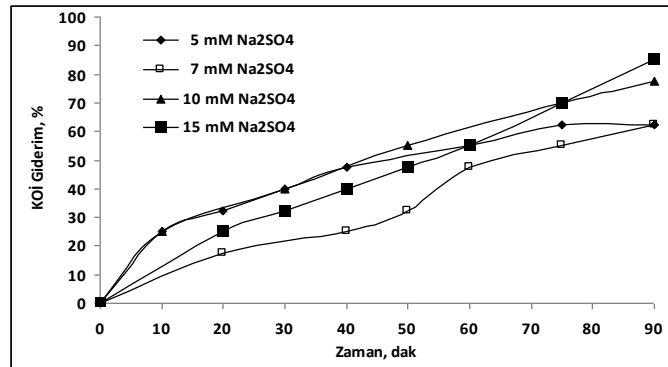
Deney 4: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $15 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,60, iken; deney sonunda, pH 6,67 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.43. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, $15 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

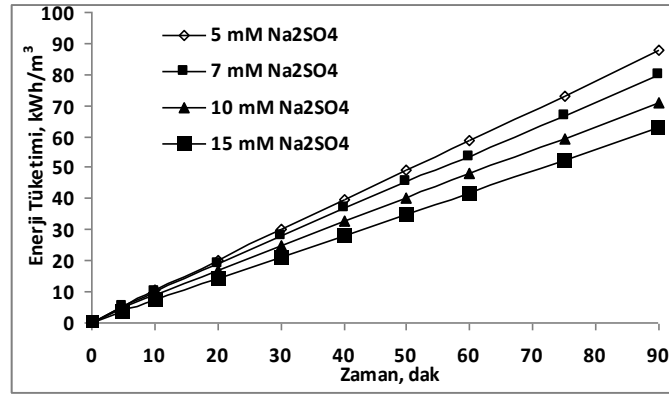
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	9,6	914	0,00	0,000
5	9,5	686	25,00	3,800
10	9,2	686	25,00	7,480
20	8,6	686	25,00	14,360
30	8,6	617	32,50	21,240
40	8,5	549	40,00	28,040
50	8,8	480	47,50	35,080
60	8,7	411	55,00	42,040
75	8,5	274	70,00	52,240
90	8,8	137	85,00	62,800



Şekil 5.31. KOİ' nin Na₂SO₄ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250 mL)



Şekil 5.32. KOİ giderimin Na₂SO₄ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250mL)



Şekil 5.33. Enerji tüketiminin Na₂SO₄ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250mL)

Deney 5: 37,5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 4,96, iken; deney sonunda, pH 6,55 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.44. I = 1,5 A, i = 37,5 mA/cm², 10 mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,3	914	0,00	0,000
5	13,4	617	32,50	6,700
10	12,3	617	32,50	12,850
20	11,5	617	32,50	24,350
30	11,2	617	32,50	35,550
40	11,0	617	32,50	46,550
50	10,6	480	47,50	57,150
60	10,5	343	62,50	67,650
75	10,8	206	77,50	83,850
90	11,0	206	77,50	100,350

Deney 6: 37,5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 15mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 4,98, iken; deney sonunda pH 6,96 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.45. $I = 1,5 \text{ A}$, $i = 37,5 \text{ mA/cm}^2$, $15 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	13,2	914	0,00	0,000
5	11,8	686	25,00	5,900
10	11,2	617	32,50	11,500
20	10,5	617	32,50	22,000
30	10,3	617	32,50	32,300
40	10,0	549	40,00	42,300
50	9,9	549	40,00	52,200
60	9,9	343	62,50	62,100
75	9,6	206	77,50	76,500
90	9,8	137	85,00	91,200

Deney 7: $37,5 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda; 15 mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 4,98, iken; deney sonunda, pH 7,64 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.46. $I = 1,5 \text{ A}$, $i = 37,5 \text{ mA/cm}^2$, 15 mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,8	914	0,00	0,000
5	15,4	686	25,00	7,700
10	13,8	617	32,50	14,600
20	13,1	549	40,00	27,700
30	12,8	480	47,50	40,500
40	12,2	480	47,50	52,700
50	11,8	343	62,50	64,500
60	11,7	343	62,50	76,200
75	12,0	274	70,00	94,200
90	12,5	206	77,50	112,950

Deney 8: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; 5 mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 4,93, iken; deney sonunda, pH 7,12, olarak

ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 16,8⁰C’de 1,549mS/cm iken; deney sonunda 37,2⁰C’de 1,541mS/cm olarak ölçüldü.

Çizelge 5.47. I =1,2 A, i = 30 mA/cm², 5 mM NaNO₃, pH doğal, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,5	955	0,00	0,000
5	15,5	716	25,00	6,200
10	14,3	716	25,00	11,920
20	14,1	573	40,00	23,200
30	12,9	573	40,00	33,520
40	12,7	501	47,50	43,680
50	12,6	430	55,00	53,760
60	12,7	287	70,00	63,920
75	12,4	287	70,00	78,800
90	11,9	143	85,00	93,080

Deney 9: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 4,99, iken; deney sonunda, pH 6,96, olarak ölçüldü. Destek elektrolit ilavesinden sonra iletkenlik, 15⁰C’de 1,607mS/cm iken; deney sonunda 25⁰C’de 1,624mS/cm olarak ölçüldü.

Çizelge 5.48. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 7 mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,5	955	0,00	0,000
5	14,1	716	25,00	5,640
10	13,7	573	40,00	11,120
20	12,7	358	62,50	21,280
30	12,2	358	62,50	31,040
40	12,3	358	62,50	40,880
50	12,2	287	70,00	50,640
60	11,9	143	85,00	60,160
75	11,7	143	85,00	74,200
90	11,7	72	92,50	88,240

Deney 10: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; 10 mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,05, iken; deney sonunda, pH 7,29, olarak ölçüldü.

Çizelge 5.49. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 10 mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	16,5	955	0,00	0,000
5	15,4	716	25,00	6,160
10	14,1	645	32,50	11,800
20	13,0	645	32,50	22,200
30	12,8	501	47,50	32,440
40	12,5	430	55,00	42,440
50	12,2	358	62,50	52,200
60	12,0	287	70,00	61,800
75	12,1	215	77,50	76,320
90	12,2	72	92,50	90,960

Deney 11: 37,5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,08, iken; deney sonunda, pH 8,29, olarak ölçüldü.

Çizelge 5.50. I =1,5 A, i = 37,5 mA/cm², 10 mM NaNO₃, pH doğal, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m³
0	17,7	955	0,00	0,000
5	15,7	645	32,50	7,850
10	15,0	573	40,00	15,350
20	13,0	430	55,00	28,350
30	13,1	358	62,50	41,450
40	12,4	287	70,00	53,850
50	12,1	215	77,50	65,950
60	11,9	143	85,00	77,850
75	12,4	72	92,50	96,450
90	12,2	72	92,50	114,750

Deney 12: 37,5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,19, iken; deney sonunda, pH 8,26, olarak ölçüldü.

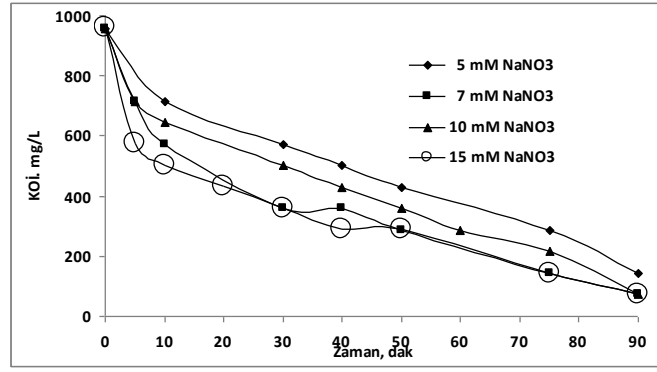
Çizelge 5.51. $I = 1,5 \text{ A}$, $i = 37,5 \text{ mA/cm}^2$, 7 mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	19,1	955	0,00	0,000
5	17,4	645	32,50	8,700
10	16,2	501	47,50	16,800
20	14,0	430	55,00	30,800
30	14,1	358	62,50	44,900
40	13,7	358	62,50	58,600
50	13,4	287	70,00	72,000
60	13,6	143	85,00	85,600
75	14,1	72	92,50	106,750
90	14,8	72	92,50	128,950

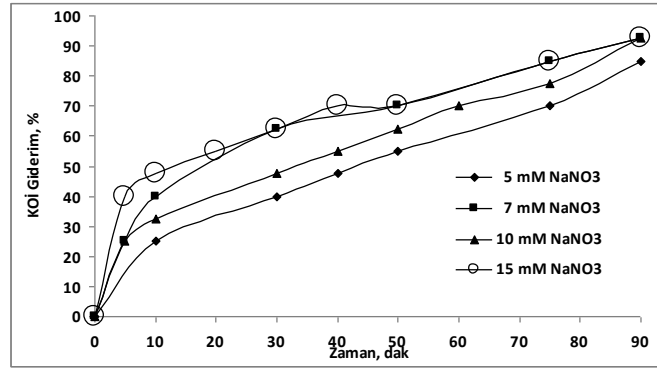
Deney 13: 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; 15 mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 5,13, iken; deney sonunda, pH 8,84, olarak ölçüldü.

Çizelge 5.52. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 15 mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

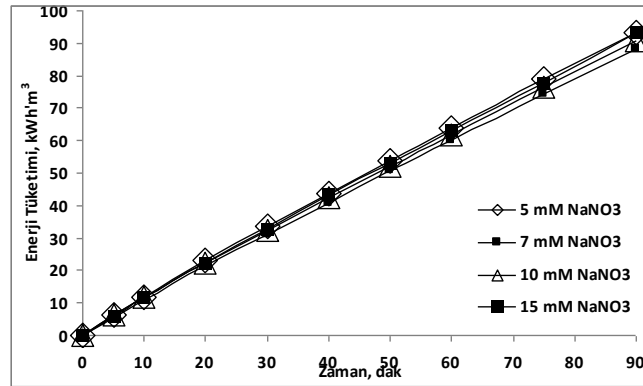
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	18,3	960	0,00	0,000
5	15,2	576	40,00	6,080
10	14,3	504	47,50	11,800
20	13,2	432	55,00	22,360
30	12,9	360	62,50	32,680
40	13,1	288	70,00	43,160
50	12,4	288	70,00	53,080
60	12,3	144	85,00	62,920
75	12,2	144	85,00	77,560
90	13,0	72	92,50	93,160



Şekil 5.34. KOİ' nin NaNO₃ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250 mL)



Şekil 5.35. KOİ gideriminin NaNO₃ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250mL)



Şekil 5.36. Enerji tüketiminin NaNO₃ ile değişimi (I=1,2 A, i=30 mA/cm², pH doğal, V= 250mL)

Deney 14: 5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,25, iken; deney sonunda, pH 6,99 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.53. $I = 0,2 \text{ A}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	6,1	960	0,00	0,000
5	5,7	720	25,00	0,380
10	5,6	720	25,00	0,753
20	5,7	648	32,50	1,513
30	5,9	648	32,50	2,300
40	5,5	648	32,50	3,033
50	5,4	648	32,50	3,753
60	5,6	576	40,00	4,500
75	5,8	504	47,50	5,660
90	5,9	432	55,00	6,840

Deney 15: 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,26, iken; deney sonunda, pH 7,07 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.54. $I = 0,4 \text{ A}$, $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	8,7	960	0,00	0,000
5	7,9	720	25,00	1,053
10	7,6	720	25,00	2,067
20	7,5	648	32,50	4,067
30	7,2	648	32,50	5,987
40	7,1	648	32,50	7,880
50	7,2	576	40,00	9,800
60	7,0	504	47,50	11,667
75	7,1	432	55,00	14,507
90	7,2	360	62,50	17,387

Deney 16: 15 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,34, iken; deney sonunda, pH 7,35 olarak ölçüldü.

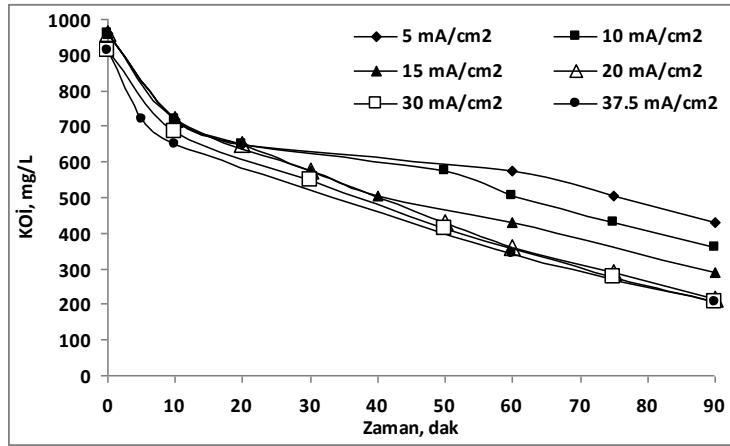
Çizelge 5.55. I =0,6 A, i = 15 mA/cm², 10mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	8,8	960	0,00	0,000
5	8,6	720	25,00	1,720
10	8,4	576	40,00	3,400
20	8,3	576	40,00	6,720
30	8,0	576	40,00	9,920
40	8,0	504	47,50	13,120
50	7,8	504	47,50	16,240
60	7,8	432	55,00	19,360
75	8,0	288	70,00	24,160
90	7,9	288	70,00	28,900

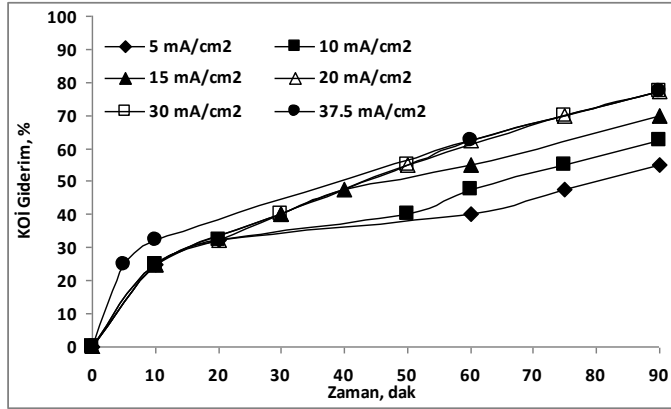
Deney 17: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,34, iken; deney sonunda, pH 7,58 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.56. I =0,8 A, i = 20 mA/cm², 10mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250 mL

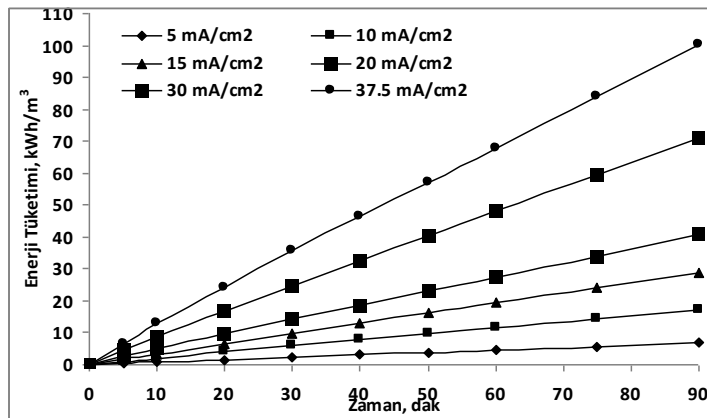
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,0	960	0,00	0,000
5	9,8	720	25,00	2,613
10	9,4	720	25,00	5,120
20	8,8	648	32,50	9,813
30	8,2	576	40,00	14,187
40	8,4	576	40,00	18,667
50	8,4	432	55,00	23,147
60	8,3	360	62,50	27,573
75	8,1	360	62,50	34,053
90	8,2	216	77,50	40,613



Şekil 5.37. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250 mL)



Şekil 5.38. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250mL)



Şekil 5.39. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (10mM Na₂SO₄, pH doğal, V= 250mL)

Deney 18: 5 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,4, iken; deney sonunda, pH 7,02 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.57. $I = 0,2 \text{ A}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m³
0	5,9	937	0,00	0,000
5	5,7	843	10,00	0,380
10	5,5	843	10,00	0,747
20	5,7	773	17,50	1,507
30	5,5	773	17,50	2,240
40	5,6	702	25,00	2,987
50	5,5	632	32,50	3,720
60	5,4	562	40,00	4,440
75	5,5	492	47,50	5,540
90	5,3	421	55,00	6,600

Deney 19: 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; 7mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,48, iken; deney sonunda, pH 7,04 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.58. $I = 0,4 \text{ A}$, $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	7,1	937	0,00	0,000
5	7,0	702	25,00	0,933
10	7,0	632	32,50	1,867
20	6,6	632	32,50	3,627
30	6,5	562	40,00	5,360
40	6,4	421	55,00	7,067
50	6,3	351	62,50	8,747
60	6,4	351	62,50	10,453
75	6,3	281	70,00	12,973
90	6,4	281	70,00	15,533

Deney 20: 15 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; 7mM NaNO_3 destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,35, iken; deney sonunda, pH 7,38 olarak ölçüldü.

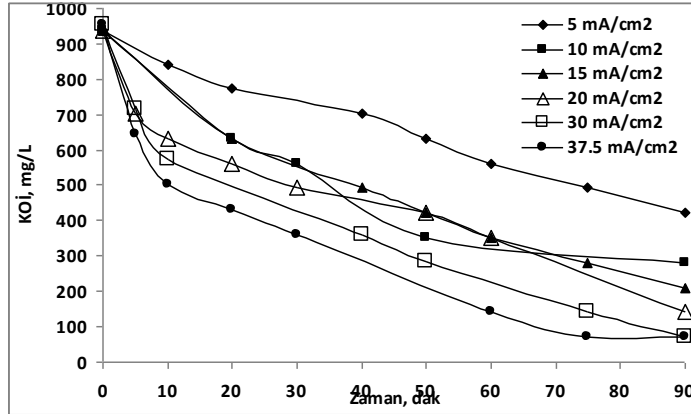
Çizelge 5.59. $I = 0,6 \text{ A}$, $i = 15 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , pH doğal, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	9,1	937	0,00	0,000
5	8,7	702	25,00	1,740
10	8,7	632	32,50	3,480
20	8,4	632	32,50	6,840
30	7,8	562	40,00	9,960
40	7,8	492	47,50	13,080
50	7,7	421	55,00	16,160
60	7,6	351	62,50	19,200
75	7,5	281	70,00	23,700
90	7,6	211	77,50	28,260

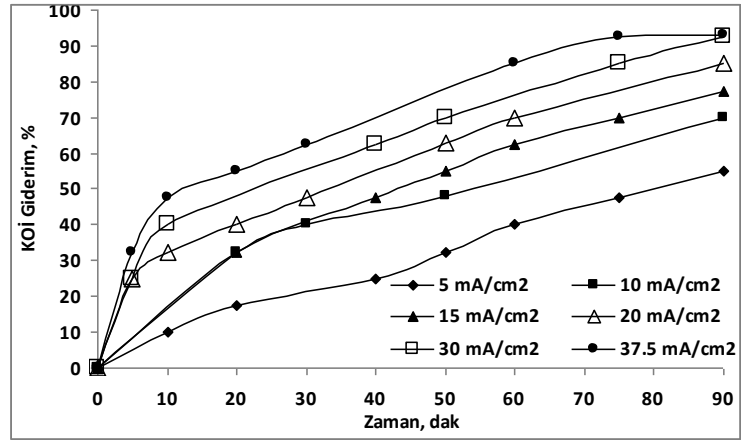
Deney 21: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak çalışıldı. Başlangıçta pH 6,42, iken; deney sonunda, pH 6,60 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.60. I = 0,8 A, i = 20 mA/cm², 7mM NaNO₃, pH doğal, V= 250 mL

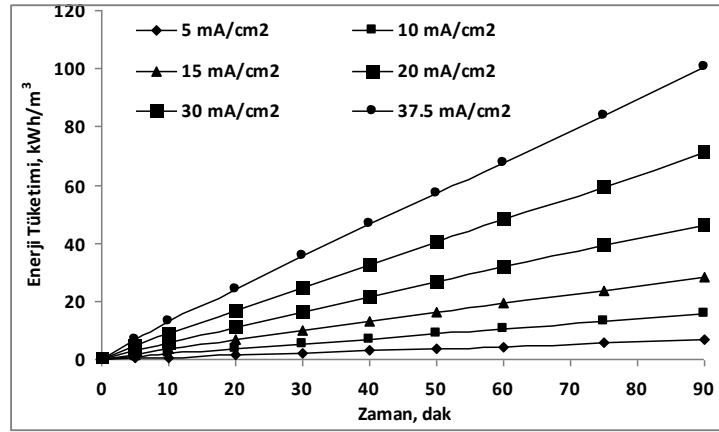
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	11,1	937	0,00	0,000
5	10,9	702	25,00	2,907
10	10,7	632	32,50	5,760
20	10,0	562	40,00	11,093
30	9,8	492	47,50	16,320
40	9,9	492	47,50	21,600
50	9,7	421	55,00	26,773
60	9,6	351	62,50	31,893
75	9,0	281	70,00	39,093
90	8,9	140	85,00	46,213



Şekil 5.40. KOİ' nin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO₃, pH doğal, V= 250 mL)



Şekil 5.41.KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO₃, pH doğal, V= 250mL)



Şekil 5.42.Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (7mM NaNO₃, pH doğal, V= 250mL)

Deney 22: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 4,07'ye ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 5,53, iken; deney sonunda, pH 4,33 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.61. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, $\text{pH}=4,07$, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	9,8	960	0,00	0,000
5	8,9	720	25,00	2,373
10	9,0	648	32,50	4,773
20	8,2	648	32,50	9,147
30	7,5	576	40,00	13,147
40	7,2	504	47,50	16,987
50	7,4	504	47,50	20,933
60	7,2	432	55,00	24,773
75	7,4	216	77,50	30,693
90	7,1	72	92,50	36,373

Deney 23: 20 mA/cm^2 akım yoğunluğunda; $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$ destek elektrolit kullanılarak ve $\text{pH } 7,95$ 'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal $\text{pH } 5,42$, iken; deney sonunda, $\text{pH } 8,15$ olarak ölçüldü.

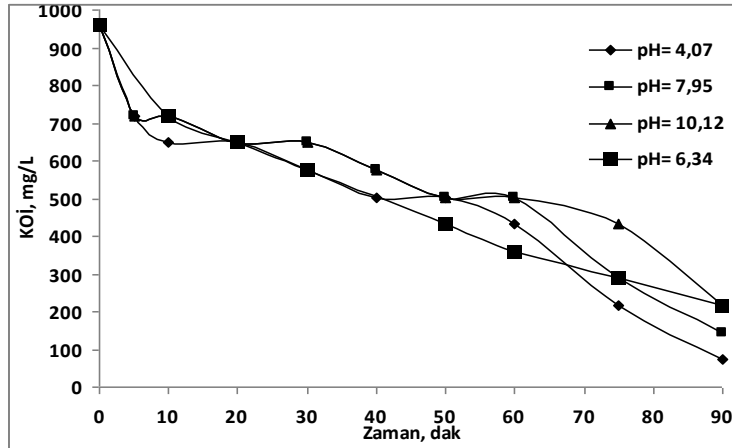
Çizelge 5.62. $I = 0,8 \text{ A}$, $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, $10\text{mM Na}_2\text{SO}_4$, $\text{pH}=7,95$, $V = 250 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,1	960	0,00	0,000
5	9,4	720	25,00	2,507
10	9,6	720	25,00	5,067
20	9,0	648	32,50	9,867
30	8,5	648	32,50	14,400
40	7,7	576	40,00	18,507
50	8,0	504	47,50	22,773
60	8,2	504	47,50	27,147
75	8,1	288	70,00	33,627
90	8,3	144	85,00	40,267

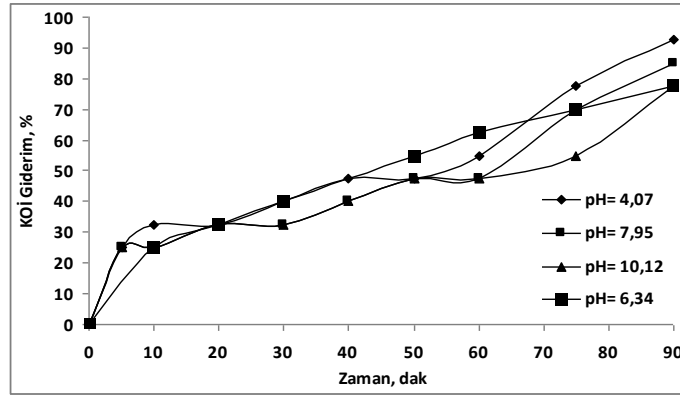
Deney 24: 20 mA/cm² akım yoğunluğunda; 10mM Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılarak ve pH 10,12'ye ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 5,46, iken; deney sonunda, pH 8,46 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.63. I =0,8 A, i = 20 mA/cm², 10mM Na₂SO₄, pH=10,12, V= 250 mL

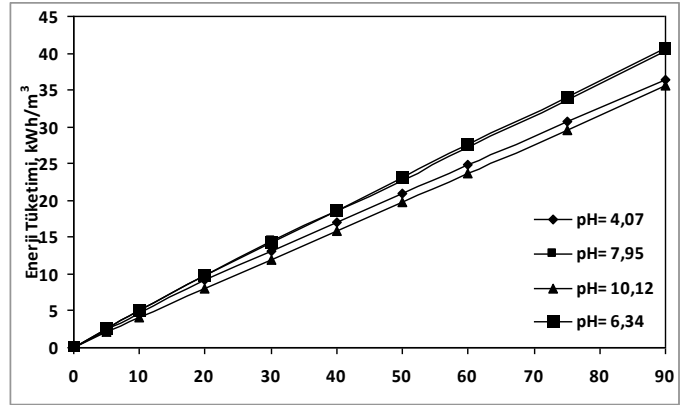
Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	10,0	960	0,00	0,000
5	8,0	720	25,00	2,133
10	7,6	720	25,00	4,160
20	7,3	648	32,50	8,053
30	7,3	648	32,50	11,947
40	7,2	576	40,00	15,787
50	7,4	504	47,50	19,733
60	7,3	504	47,50	23,627
75	7,5	432	55,00	29,627
90	7,4	216	77,50	35,547



Şekil 5.43. KOİ'nin pH ile değişimi (I=0,8 A, i=20 mA/cm², 10 mM Na₂SO₄, V= 250 mL)



Şekil 5.44.KOİ gideriminin pH ile değişimi(I=0,8 A, i=20 mA/cm², 10 mM Na₂SO₄,V= 250 mL)



Şekil 5.45.Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=0,8 A, i=20 mA/cm², 10 mM Na₂SO₄,V= 250 mL)

Deney 25: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak ve pH 3,88'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 5,50, iken; deney sonunda, pH 3,72 olarak ölçüldü.

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,7	960	0,00	0,000
5	14,3	648	32,50	5,720
10	13,8	648	32,50	11,240
20	12,6	576	40,00	21,320
30	12,1	504	47,50	31,000
40	12,2	432	55,00	40,760
50	12,3	360	62,50	50,600
60	12,0	360	62,50	60,200
75	11,9	144	85,00	74,480
90	11,8	72	92,50	88,640

Deney 26: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak ve pH 8,33'e ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 5,52, iken; deney sonunda, pH 7,92 olarak ölçüldü.

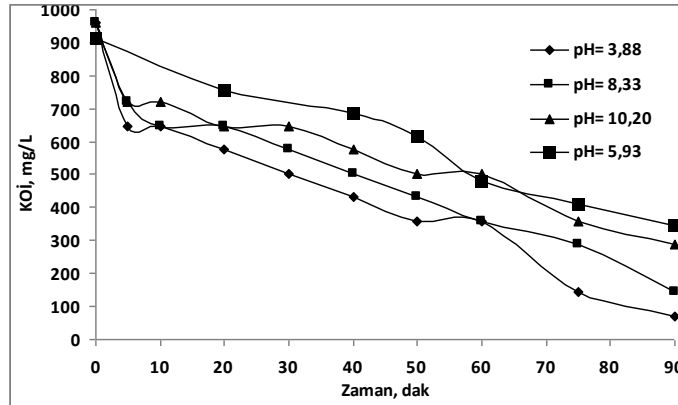
Çizelge 5.65. I =1,2 A, i = 30 mA/cm², 7mM NaNO₃, pH=8,33, V= 250 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOİ, mg/L	KOİ Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,9	960	0,00	0,000
5	14,5	720	25,00	5,800
10	13,9	648	32,50	11,360
20	12,8	648	32,50	21,600
30	12,3	576	40,00	31,440
40	12,1	504	47,50	41,120
50	12,2	432	55,00	50,880
60	12,0	360	62,50	60,480
75	11,8	288	70,00	74,640
90	11,6	144	85,00	88,560

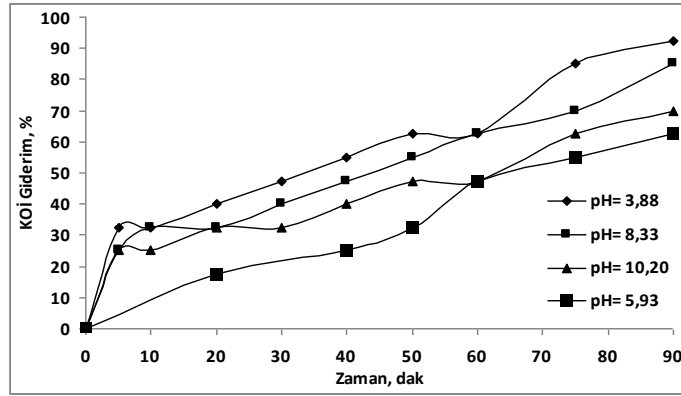
Deney 27: 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 7mM NaNO₃ destek elektrolit kullanılarak ve pH 10,20'ye ayarlanarak çalışıldı. Başlangıçta doğal pH 5,47, iken; deney sonunda, pH 8,76 olarak ölçüldü.

Çizelge 5.66. $I = 1,2 \text{ A}$, $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , $\text{pH}=10,20$, $V= 250 \text{ mL}$

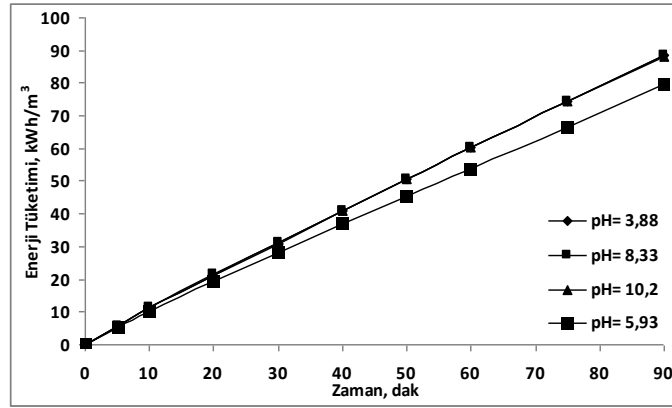
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI Giderimi, %	Enerji Tüketimi, kWh/m ³
0	15,8	960	0,00	0,000
5	14,4	720	25,00	5,760
10	13,8	720	25,00	11,280
20	12,6	648	32,50	21,360
30	12,4	648	32,50	31,280
40	12,2	576	40,00	41,040
50	12,1	504	47,50	50,720
60	12,1	504	47,50	60,400
75	11,7	360	62,50	74,440
90	11,5	288	70,00	88,240



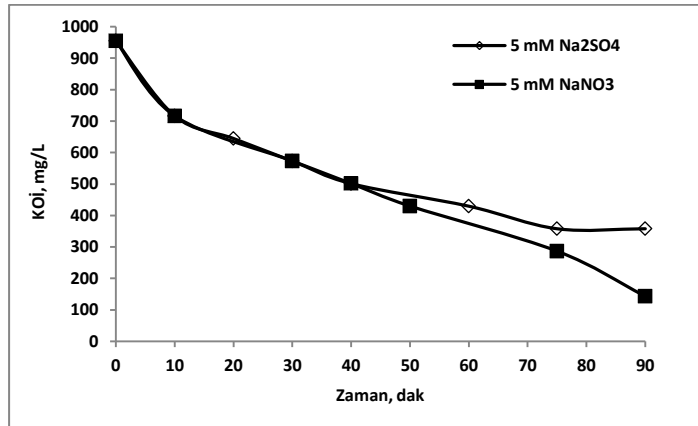
Şekil 5.46.KOI'nin pH ile değişimi ($I=1,2 \text{ A}$, $i=30 \text{ mA/cm}^2$, 7mM NaNO_3 , $V= 250 \text{ mL}$)



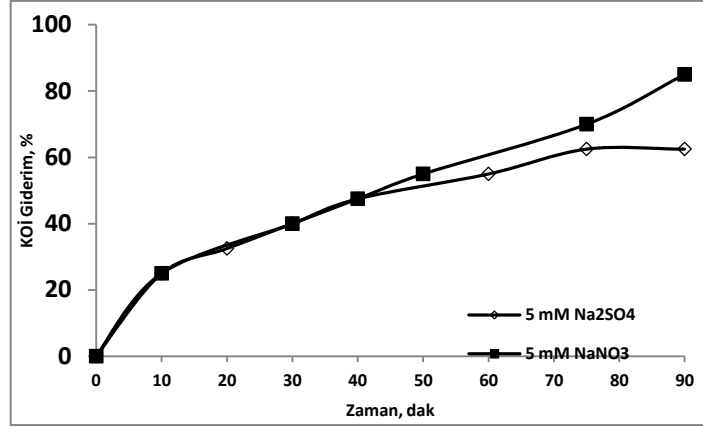
Şekil 5.47.KOI gideriminin pH ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², 7mM NaNO₃,V= 250 mL)



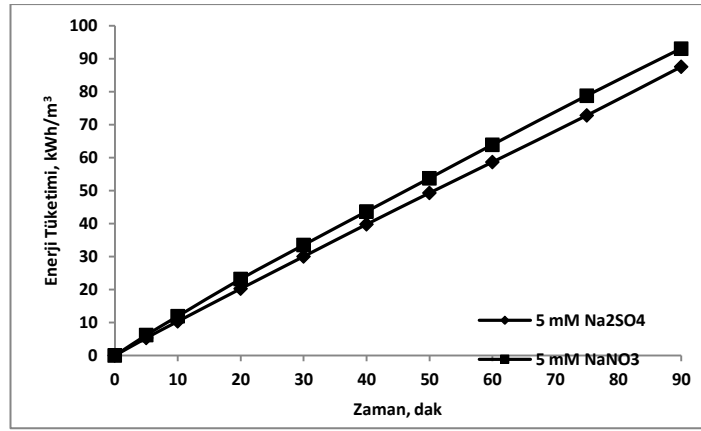
Şekil 5.48.Enerji tüketiminin pH ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², 7mM NaNO₃,V= 250 mL)



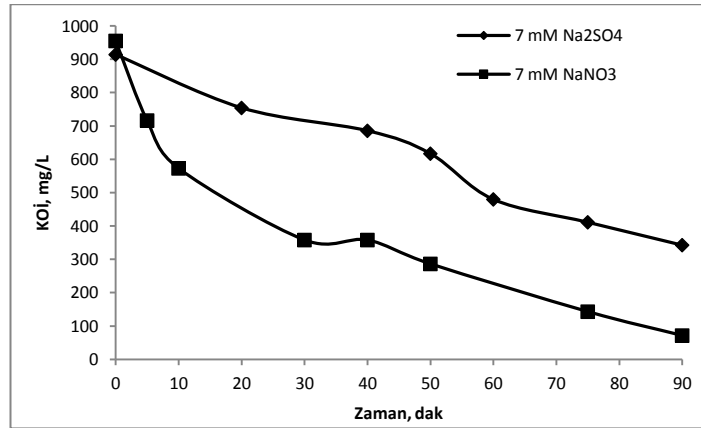
Şekil 5.49.KOI' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm²,V= 250 mL)



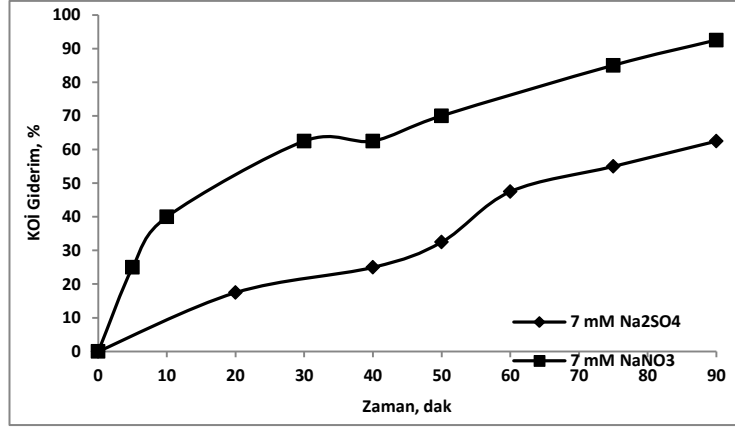
Şekil 5.50.KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



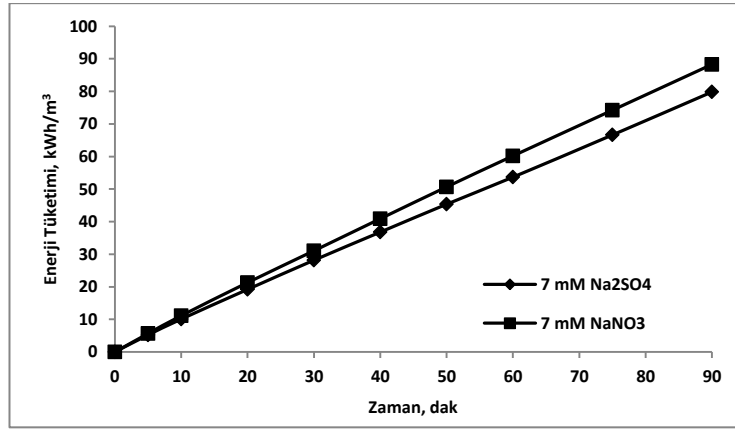
Şekil 5.51.Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



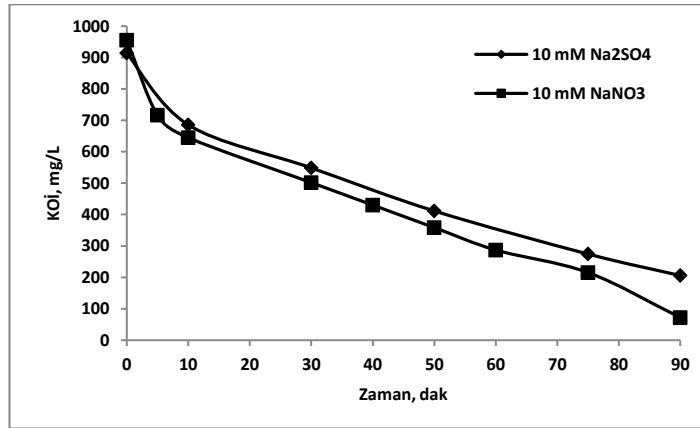
Şekil 5.52.KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



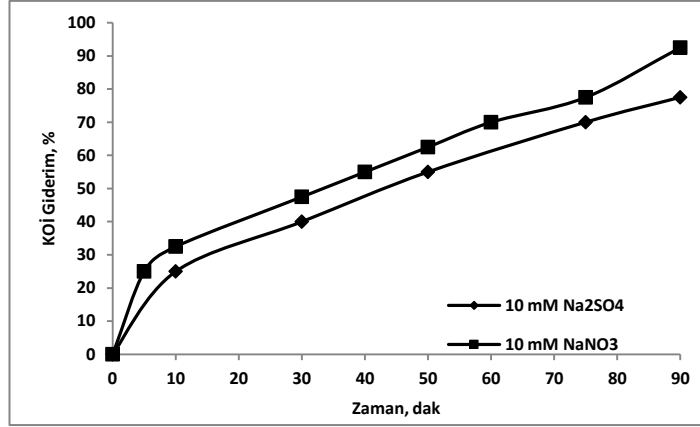
Şekil 5.53.KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



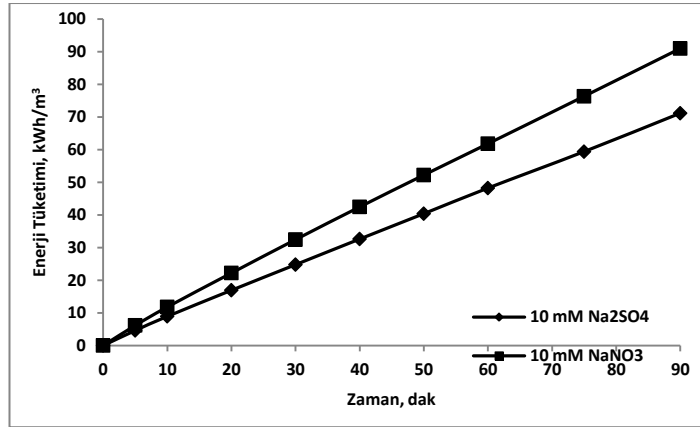
Şekil 5.54.Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



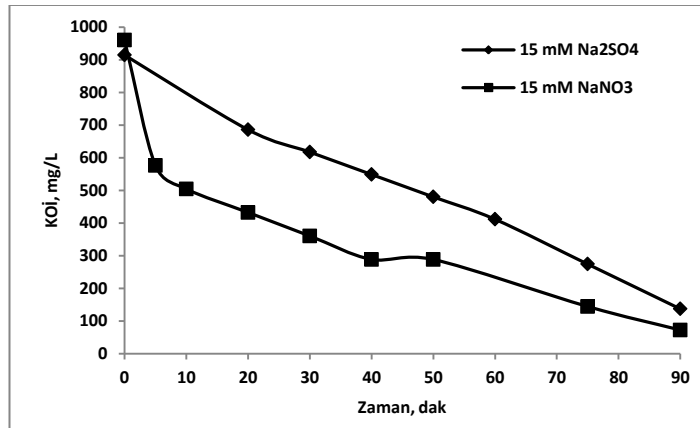
Şekil 5.55.KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



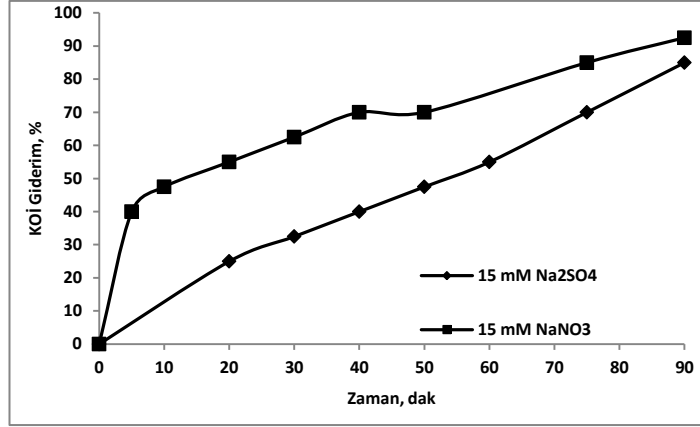
Şekil 5.56.KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



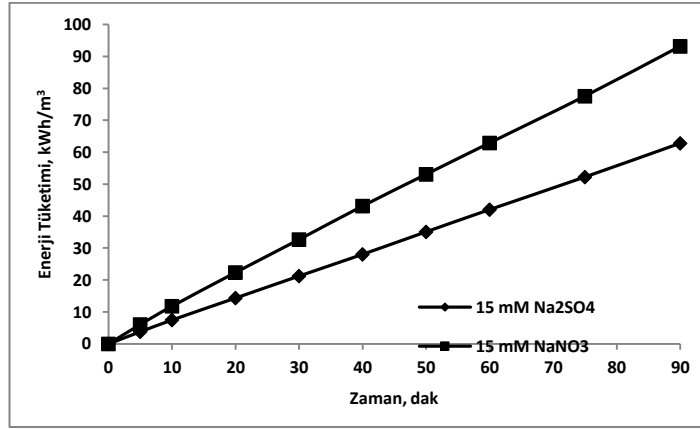
Şekil 5.57.Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



Şekil 5.58.KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



Şekil 5.59.KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)



Şekil 5.60.Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ($I=1,2$ A, $i=30$ mA/cm², $V= 250$ mL)

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Demir paralel plaka elektrot kullanılarak yapılan deneylerde, atıksuyun doğal pH değeri değiştirilmeden ve destek elektrolit olarak kullanılan Na_2SO_4 derişimi 5 mM’da sabit tutularak; 10, 20, 30, 40 ve 50 mA/cm^2 akım yoğunluklarında çalışıldığında, en yüksek arıtım verimi, 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, % 46 olarak gerçekleşti. Böylece, deneysel çalışma için en uygun akım yoğunluğunun 30 mA/cm^2 olduğu kanaatine varıldı ve deneysel çalışma bu yönde sürdürüldü. Ayrıca, akım yoğunluğu arttıkça, enerji tüketiminin de arttığı gözlemlendi.

Daha sonra, en uygun akım yoğunluğunda, yani 30 mA/cm^2 ’de; farklı destek elektrolit derişimlerinde çalışıldı. 1, 3, 5 ve 7 mM Na_2SO_4 derişimleri denendiğinde, en yüksek verime (%62,5) 3mM Na_2SO_4 ’de ulaşıldı.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişimi sabit tutularak; yani 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve 3 mM Na_2SO_4 derişiminde, pH değerleri 3,12; 5,36 ve 8,83’e ayarlanarak değişik pH değerlerinde çalışıldı. En yüksek KOİ giderim verimine (%83), pH 8,83’te ulaşıldı.

Yine akım yoğunluğu (30 mA/cm^2) ve destek elektrolit (3 mM Na_2SO_4) derişimi sabit tutularak; 500, 1000, 1500, 2000 ve 3000 mg/L H_2O_2 derişimlerinde çalışıldı. En yüksek KOİ giderim verimi (%92) 1500 mg/L H_2O_2 derişiminde elde edildi.

Belirlenen en uygun tüm koşulların birlikte uygulandığı durumda; yani, 30 mA/cm^2 akım yoğunluğu, 3 mM Na_2SO_4 , 1500 mg/L H_2O_2 derişiminde, 4,16; 6,78 ve 8,81 olmak üzere, üç farklı pH değerinde çalışıldı, en yüksek KOİ giderim verimine (%92) pH 6,78 ve 8,81’de ulaşıldı.

Böylece, EOSB ham endüstriyel atıksuyunun, demir paralel plaka elektrot kullanarak elektro-pıhtılaştırma yöntemiyle arıtılabilirliğinin yüksek olduğu gözlemlendi.

Alüminyum paralel plaka elektrot kullanılarak yapılan deneylerde, atıksuyun doğal pH değeri değiştirilmeden ve destek elektrolit olarak kullanılan Na_2SO_4 derişimi 3 mM’ da sabit tutularak; 10, 20, 30, 40 ve 50 mA/cm^2 akım yoğunluklarında çalışıldığında en yüksek arıtım verimi, yine 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda % 75 olarak gerçekleşti. Böylece, deneysel çalışma için en uygun akım yoğunluğunun 30 mA/cm^2 olduğu sonucuna ulaşılarak deneysel çalışma bu

yönde sürdürüldü. Ayrıca, akım yoğunluğu arttıkça enerji tüketiminin de arttığı gözlemlendi.

Diğer deney koşulları değiştirilmeden, akım yoğunluğunun 10, 20, 30, 40 ve 50 mA/cm² olduğu durumda ise, sırasıyla 2,5, 3,5, 5,5, 7,6 ve 7,7 g. çamur oluştu. Böylece, akım yoğunluğu arttıkça çamur oluşumunun da arttığı gözlemlendi.

Daha sonra, en uygun akım yoğunluğunda(30 mA/cm²) farklı destek elektrolit derişimlerinde çalışıldı. 1, 3, 5 ve 7 mM Na₂SO₄ derişimleri denendiğinde, en yüksek verime (%85) 5mM Na₂SO₄'de ulaşıldı.

Akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişimi sabit tutularak; yani 30 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 5 mM Na₂SO₄ derişiminde, pH değerleri 2,90; 5,28 ve 8,93'e ayarlanarak farklı pH değerlerinde çalışıldı. Atıksuyun doğal pH değerinde ve pH 8,83'e ayarlandığında aynı KOİ giderim verimi (%85) elde edildiğinden, pH değışiminin gerekli olmadığı sonucuna varıldı.

Yine akım yoğunluğu(30 mA/cm²) ve destek elektrolit (5 mM Na₂SO₄) derişimi sabit tutularak 10, 20 ve 30 mg/L polielektrolit derişimlerinde çalışıldı. Polielektrolit olarak polialüminyum klorür (PAC) kullanıldı ve en yüksek KOİ giderim verimi (%93) 30 mg/L PAC derişiminde elde edildi.

Aynı koşullarda; polielektrolit olarak 10, 20 ve 30 mg/L derişimlerinde Kerafloc denendiğinde ise en yüksek verime (%92) 30mg/L Kerafloc derişiminde ulaşıldı.

20mA/cm² akım yoğunluğunda, 3 mM Na₂SO₄ derişiminde ve doğal pH değerinde; demir paralel plaka elektrotla çalışıldığında; başlangıçta pH6,25, deney sonunda pH 8,51 iken; alüminyum elektrotla çalışıldığında, başlangıçta pH 6,09, deney sonunda pH 7,56 oldu. Çamur oluşumunun alüminyum elektrot kullanıldığında daha fazla olduğu görüldü. Bu koşullarda demir elektrot ile KOİ giderim verimi %21 iken; alüminyum elektrot ile %58'e yükseldi.

30mA/cm² akım yoğunluğunda, 3 mM Na₂SO₄ derişiminde ve doğal pH değerinde; demir paralel plaka elektrotla çalışıldığında; başlangıçta pH 5,95deney sonunda pH 7,53 iken; alüminyum elektrotla çalışıldığında, başlangıçta pH 6,25, deney sonunda pH 7,71 oldu. Demir elektrotla 2,6g çamur oluşurken, alüminyum elektrotla 5,5g çamur oluştu. Bu koşullarda demir elektrot ile KOİ giderim verimi %63 iken; alüminyum elektrot ile %75'e yükseldi.

30mA/cm² akım yoğunluğunda, 5 mM Na₂SO₄ derişiminde ve doğal pH değerinde demir paralel plaka elektrotla çalışıldığında; başlangıçta pH 5,39, sıcaklık 16⁰C; deney sonunda pH 7,02, sıcaklık 39,1⁰C iken, alüminyum elektrotla çalışıldığında; başlangıçta pH 6,85, sıcaklık 20,2⁰C, deney sonunda pH 9,03, sıcaklık 34,7⁰C oldu. Demir elektrotla 3g çamur oluşurken, alüminyum elektrotla 5,36g çamur oluştu. Bu koşullarda demir elektrot kullanıldığında KOİ giderim verimi %46 olurken; alüminyum elektrot kullanıldığında verim %85'e yükseldi.

30mA/cm² akım yoğunluğunda, 7 mM Na₂SO₄ derişiminde ve doğal pH değerinde; demir paralel plaka elektrotla çalışıldığında, başlangıçta pH 6,02, sıcaklık 11,4⁰C, deney sonunda pH 7,70, sıcaklık 30,1⁰C iken; alüminyum elektrotla çalışıldığında; başlangıçta pH 6,14, sıcaklık 16,8⁰C, deney sonunda pH 8,10, sıcaklık 47,7⁰C oldu. Demir elektrotla 3,3g çamur oluşurken, alüminyum elektrotla 6,47g çamur oluştu. Bu koşullarda demir elektrot ile KOİ giderim verimi %56 iken; alüminyum elektrot kullanıldığında verim %70'e yükseldi.

30mA/cm² akım yoğunluğunda, 1 mM Na₂SO₄ derişiminde ve doğal pH değerinde; demir paralel plaka elektrotla çalışıldığında, başlangıçta pH 5,95, sıcaklık 11,6⁰C, deney sonunda pH 6,86, sıcaklık 38,4⁰C iken; alüminyum elektrotla çalışıldığında, başlangıçta pH 6,30, sıcaklık 13⁰C, deney sonunda pH 7,46, sıcaklık 65,2⁰C oldu. Demir elektrotla 2,96g çamur oluşurken, alüminyum elektrotla 6,79g çamur oluştu. Bu koşullarda demir elektrot ile KOİ giderim verimi %49 olurken; alüminyum elektrot kullanıldığında verim %78'e yükseldi.

Elmas paralel plaka elektrot kullanılarak yapılan elektro-yükseltgeme deneylerinde, atıksuyun doğal pH değeri değiştirilmeden ve 30 mA/cm² akım yoğunluğunda; 5, 7, 10 ve 15 mM gibi farklı destek elektrolit derişimlerinde (Na₂SO₄ ve NaNO₃) çalışıldığında, giderim verimleri; 15 mM Na₂SO₄ derişiminde % 85; 7, 10 ve 15mM NaNO₃ derişimlerinde % 93 olarak gerçekleşti. Deneysel çalışma, 10 mM Na₂SO₄ ve 7mM NaNO₃ destek elektrolit derişimleriyle sürdürüldü.

Daha sonra, bu derişimlerde, 5, 10, 15, 20, 30 ve 37,5 mA/cm² gibi farklı akım yoğunluklarında çalışıldı. 30 ve 37,5 mA/cm² akım yoğunluklarında yüksek verimler (%78 ve %93) elde edildi. Destek elektrolit olarak NaNO₃ kullanıldığında; Na₂SO₄ 'a göre daha yüksek KOİ giderim verimine ulaşıldı.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, akım yoğunluğu ve destek elektrolit derişimi sabit tutularak; yani Na_2SO_4 için 20; NaNO_3 için 30 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve 10 mM Na_2SO_4 , 7mM NaNO_3 derişiminde, pH değerleri 4,07; 3,88, 7,95, 8,33, 10,12 ve 10,20'ye ayarlanarak farklı pH değerlerinde çalışıldı. En yüksek KOİ giderim verimine (%93), pH 3,88 civarında ulaşıldı.

Yine akım yoğunluğu (30 mA/cm^2) ve destek elektrolit (3 mM Na_2SO_4) derişimi sabit tutularak; 500, 1000, 1500, 2000 ve 3000 mg/L H_2O_2 derişimlerinde çalışıldı. En yüksek KOİ giderim verimi (%92) 1500 mg/L H_2O_2 derişiminde elde edildi.

Belirlenen en uygun tüm koşulların birlikte uygulandığı durumda; yani, 30 mA/cm^2 akım yoğunluğu; 3 mM Na_2SO_4 ; 1500 mg/L H_2O_2 derişimlerinde, 4,16; 6,78 ve 8,81 olmak üzere, üç farklı pH değerinde çalışıldı; en yüksek KOİ giderim verimine (%92) pH 6,78 ve 8,81'de ulaşıldı.

Böylece, EOSB ham endüstriyel atıksuyunun, elmas paralel plaka elektrot kullanarak elektro-yükseltgeme yöntemiyle arıtılabilirliğinin yüksek olduğu gözlemlendi.

Tüm bu deneysel çalışma bulguları; karışık endüstriyel atıksu niteliğindeki Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi atıksuyunun, elektrokimyasal yöntemlerden elektro-pıhtılaştırma ve elektro-yükseltgeme süreçleriyle arıtılabildiğini göstermiştir. Hatta bu süreçte alüminyum elektrotların, demir elektrotlara göre daha verimli olduğu anlaşılmış, alüminyum ve elmas elektrot kullanıldığında, KOİ giderim veriminin %90'ın üzerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, polialüminyum klorür ve Kerafloc gibi polielektrolitlerin de arıtım veriminin yükselmesinde oldukça etkili olduğu ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] S. Zodi, O. Potier, F. Lapique, J.P. Leclerc, Treatment of the industrial wastewaters by electrocoagulation: Optimization of coupled electrochemical and sedimentation processes, *Desalination* 261 (2010) 186 – 190.
- [2] Koçhisar, N. (1989), Endüstriyel atıksulardan fenol giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.
- [3] R.A. Conway, R.D. Ross, Hand Book of Industrial Waste Disposal, Litton Educational Publishing Inc., New York, 1980.
- [4] Eskişehir Sanayi Odası Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü, 2007, <http://www.eosb.org.tr/>
- [5] Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisi, 2008, <http://www.eosb.org.tr/aritma/index.php>
- [6] P.P. Strokach, *Electrochem. Ind. Process. Bio.* 55 (1975) 375.
- [7] F.E. Elmore, A process for separating certain constituents of subdividedores and like substances, and apparatus therefor, Br. Patent 13,578 (1905).
- [8] L. Szpyrkowics, J. Naumczyk, F. Zilio-Grandi, Application of electrochemical processes for tannery wastewater treatment, *Toxicol. Environ. Chem.* 44 (1994) 189 –202.
- [9] A.G. Vlyssides, C.J. Israilides, M. Loizidou, G. Karvouni, V. Mourafeti, Electrochemical treatment of vinasse from beet molasses, *Water Sci. Technol.* 36 (2–3) 1997 271–278.
- [10] F.E. Stuart, Electronic water purification progress report on the electroniccoagulator—a new device which gives promise of unusually speedy and effectiveresults, *Water Sewage* 84 (1946) 24–26.
- [11] C.F. Bonilla, Possibilities of the electronic coagulator for water treatment, *Water Sewage*, 85 (1947) 21, 22, 44, 45.
- [12] K. Ravikumar, B. Deebika, K. Balu, Decolourization of aqueous dye solutions by a novel adsorbent: application of statistical designs and surface plots for the optimization and regression analysis, *Journal of Hazardous Materials* 22 (2005) 75–83.

- [13] M.S. Bhatti, A.S. Reddy, A.K. Thukral, Electrocoagulation removal of Cr (VI) from simulated wastewater using response surface methodology, *Journal of Hazardous Materials* 172 (2009) 839–846.
- [14] O. Chavalparit, M. Ongwandee, Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology, *Journal of Environmental Sciences* 21 (2009) 1491–1496.
- [15] A. Aleboyeh, N. Daneshvar, M.B. Kasiri, Optimization of C.I. Acid Red 14 azo dye removal by electrocoagulation batch process with response surface methodology, *Chemical Engineering and Processing* 47 (2008) 827–832.
- [16] I. Zongo, A. Maïga, J. Wéthé, G. Valentin, G. Paternotte, J.-P. Leclerc, F. Lapique, Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: compared variations of COD levels, turbidity and absorbance, *Journal of Hazardous material* 169 (2009) 70–76.
- [17] M.Y.A. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, D.L. Cocke, Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *J. Hazard. Mater. B* 114 (2004) 199–210.
- [18] A.B. Paul, Proceedings of the 22nd WEDC Conference on Water Quality and Supply, New Delhi, India, 1996, p. 286.
- [19] P.N. Johnson, A. Amirtharajah, Ferric chloride and alum as single and dual coagulants, *JAWWA* 75 (1983) 232–239.
- [20] V.K. Kovatchva, M.D. Parlapanski, Sono-electrocoagulation of iron hydroxides, *Colloids Surf.* 149 (1999) 603–608.
- [21] L.A. Kul'skii, P.P. Strokach, V.A. Slipchenko, E.I. Saigak, *Water Purification by Electrocoagulation*, Kiev, Budivel'nik, 1978.
- [22] X. Chen, G.H. Chen, P.L. Yue, Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation, *Sep. Purif. Technol.* 19 (2000) 65–76.
- [23] H.M. Wong, C. Shang, Y.K. Cheung, G. Chen, Chloride Assisted Electrochemical Disinfection, in: *Proceedings of the Eighth Mainland-Taiwan Environmental Protection Conference*, Tsin Chu, Taiwan, 2002.
- [24] F. Li, S. Li, C. Zhang, H. Zhao, Application of corrosive cell process in treatment of printing and dyeing wastewater, *Chem. Eng. Environ. Protect.* 15 (1995) 157–161.

- [25] M. Qiu, in: L.A. Kul'skii, P.P. Strokach, V.A. Slipchenko, E.I. Saigak (Eds.), *Water Purification by Electrocoagulation*, Shanghai Jiaotong University Press, 1988 (Chinese Translation from Russian of the Book, Kiev, Budivel'nik, 1978).
- [26] T.Ya. Pazenko, T.I. Khalturina, A.F. Kolova, I.S. Rubailo, Electrocoagulation treatment of oil-containing wastewaters, *J. Appl. USSR* 58 (1985) 2383–2387.
- [27] K. Scott, *Electrochemical Processes for Clean Technology*, The Royal Society of Chemistry, London, 1995.
- [28] V.A. Matveevich, Electrochemical methods of natural and waste water purifying, *Elektronnaya Obrabotka Materialov* 5 (2000) 1030114.
- [29] L.A. Kul'skii, P.P. Strokach, V.A. Slipchenko, E.I. Saigak, *Water Purification by Electrocoagulation*, Kiev, Budivel'nik, 1978.
- [30] A.T. Kuhn, Electrolytic decomposition of cyanides, phenols and thiocyanates in effluents streams—a literature review, *J. Appl. Chem. Biotechnol.* 21 (1971) 29–34.
- [31] S.H. Lin, C.L. Wu, Electrochemical nitrite and ammonia oxidation in sea water, *J. Environ. Sci. Health A* 32 (1997) 2125–2138.
- [32] S. Stucki, H. Baumann, H.J. Christen, R. Kotz, Performance of a pressurized electrochemical ozone generator, *J. Appl. Electrochem.* 17 (4) (1987) 773–778.
- [33] J.C. Farmer, F.T. Wang, R.A. Hawley-Fedder, P.R. Lewis, L.J. Summers, L. Foiles, Electrochemical treatment of mixed and hazardous wastes: oxidation of ethylene glycol and benzene by silver(II), *J. Electrochem. Soc.* 139 (1992) 654–662.
- [34] Ch. Comninellis, Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment, *Electrochim. Acta* 39 (1994) 1857–1862.
- [35] I. Troster, L. Schafer, M. Fryda, Recent developments in production and application of DiaChem-electrodes for wastewater treatment, *New Diam. Front. C. Technol.* 12 (2) (2002) 89–97.
- [36] C. Comninellis, E. Plattner, Electrochemical wastewater treatment, *Chimia* 42 (7–8) (1988) 250–252.

- [37]Ch. Comninellis, Electrochemical treatment of wastewater containing phenol, Trans. IChemE B 70 (1992) 219–224.
- [38]S. Wodiunig, F. Bokeloh, Ch. Comninellis, Electrochemical promotion of bipolar electrodes: an estimation of the current bypass, Electrochim. Acta 46 (2000) 357–363.
- [39]Yavuz, Y. (2004), Fenolün elektrokimyasal yöntemlerle sudan giderimi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [40]G.B. Raju, Khangaonkar, Electroflotation—A Critical Review, Trans. Indian Inst. Met. 37 (1) (1984) 59–66.
- [41]TS 2789 ISO 6060 Su Kalitesi- Kimyasal Oksijen İhtiyacının Tayini, 2000