

**MODEL SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN  
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILMASI**

Aylin KARAKAŞ  
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı  
Mart-2013

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Aylin Karakaş' ın “Model Süt Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması” başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 05.02.2013 tarihinde, aşağıdaki juri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Doç. Dr. Yusuf YAVUZ	.....
Üye	: Prof. Dr. A.Savaş KOPARAL	.....
Üye	: Yard. Doç. Dr. Yeşim GÜÇBİLMEZ	.....

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

Enstitü Müdürü



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MODEL SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE ARITILMASI

Aylin KARAKAŞ

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf YAVUZ  
2013, 117 sayfa

Süt endüstrisinden kaynaklanan atıksuların karakterizasyonu Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ile belirlenir. Süt atıksuyunda proteinler, karbonhidratlar ve yağlar gibi kirleticiler bulunur. Bu çalışmada, süt endüstrisi model atıksuyunun elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı araştırılmıştır. Akım yoğunluğu, destek elektrolit, pH ve polielektrolit gibi bazı önemli deneysel parametrelerin KOİ giderimine etkileri incelenmiştir.

Demir elektrotlarla yapılan çalışmalarda en iyi sonuçlar şu şekilde belirlenmiştir; hem  $i = 15 \text{ mA/cm}^2$  de, 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'ta, hem de 2000 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'te pH= 4,06'da % 78 giderim gerçekleşmiştir. Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmalarda ise şu şekilde belirlenmiştir;  $i = 25 \text{ mA/cm}^2$ 'de, 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 40 mg/L Kerafloc ilavesi ile hazırlanan çalışmada % 80 giderim verimi elde edilmiştir. Demir ve elmas elektrotları ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal yükseltgeme süreçlerindeki KOİ verimi % 92,5, alüminyum ve elmas elektrotlarında ise KOİ verimi % 89 olmuştur.

Çalışmalar sonucunda süt endüstrisi atıksularının arıtımında, verimli, kolay ve ekonomik olması nedeniyle elektrokimyasal yöntemlerin kullanılması başarılı bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Elektrokoagülasyon, Süt Endüstrisi Model Atıksuyu, KOİ, Demir, Alüminyum.

## ABSTARCT

Master of Sience Thesis

### MODEL WASTEWATER OF DAIRY INDUSTRY TREATMENT WITH ELECTROCHEMICAL METHODS

Aylin KARAKAŞ

Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Environmental Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Doc. Yusuf YAVUZ  
2013, 117 pages

Characterization of wastewater from dairy industry is determined by Biological Oxygen Demand (BOD) and Chemical Oxygen Demand (COD). Pollutants such as proteins, carbohydrates and fats are from dairy industry wastewater. High organic pollution load of these pollutants cause a problem in the environment. In this study, treatment of model of the dairy industry wastewater was investigated by methods of electrochemical. Some important experimental parameters which are Current density, support electrolyte and pH effect on COD removal were researched.

During these studies of iron electrodes, the best conditions were determined as follows; on  $i = 15 \text{ mA/cm}^2$  and  $\text{pH} = 4.06$ , by the addition of 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and 2000 mg / L  $\text{H}_2\text{O}_2$ , removal was 78 %. Throughout experimental studies by using aluminum electrodes, the best conditions were determined as follows; on  $i = 15 \text{ mA/cm}^2$ , by the addition of 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and 40 mg / L Kerafloc polyelectrolyte, prepared study was at 80 % removal efficiency has been obtained. While the COD removal efficiency of electrocoagulation and electrooxidation processes by iron and diamond electrodes was 92,5, The COD removal efficiency of electrocoagulation and electrooxidation processes by aluminium and diamond electrodes was 89 %.

As a result of experimental studies, the dairy industry wastewater treatment by using of electrochemical methods were successful because of efficient, easy and economical behaviours.

**Key words:** Electrocoagulation, Dairy Industry Model wastewater, COD, Iron, Aluminum.



## TEŞEKKÜR

Öncelikle alıŐma boyunca yardımlarını eksik etmeyen danışman hocam Doç. Dr. YUSUF YAVUZ' a ve eğitim hayatım boyunca üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman yanımda olup benden desteğini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

AYLİN KARAKAŞ  
Mart 2013

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b>	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b>	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b>	<b>xii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. SÜT ENDÜSTRİSİ</b>	<b>2</b>
<b>3. SÜT ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU İLİŞKİSİ</b>	<b>5</b>
3.1. Süreç.....	5
3.2. Atıksu Kaynakları .....	5
3.3. Atıksu Karakterizasyonu .....	6
<b>4. SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ARITIMI</b>	<b>8</b>
4.1. Atıksu Arıtım Yöntemleri.....	10
4.1.1. Fiziksel Yöntemler.....	10
4.1.2. Kimyasal Yöntemler.....	10
4.1.3. Biyolojik Yöntemler.....	12
4.1.4. Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri.....	15
4.1.4.1. Elektrokimyasal Arıtımın Türleri.....	18
4.1.4.2. Elektrokimyasal Arıtımın Uygulama Alanları.....	40
<b>5. MATERYAL METOD</b>	<b>42</b>
5.1. Deney düzeneği .....	42
5.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ).....	43
5.2.1. Kullanılan Reaktifler.....	43
5.2.2. Standart Çözeltinin hazırlanması.....	44
5.2.3. Deney Süreci.....	45

5.2.4. Hesaplama.....	46
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>48</b>
6.1. Demir Elektrotları Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	48
6.2. Alüminyum Elektrotları Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar..	69
<b>7. SONUÇLAR</b>	<b>112</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>114</b>
<b>EKLER</b>	<b>117</b>
Ek 1. Yüzde Giderim Hesabı.....	117
Ek 2. Enerji Tüketimi Hesabı.....	117

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
4.1. Paralel bağlı monopolar EC reaktörü.....	20
4.2. Seri bağlı monopolar EC reaktörü.....	21
4.3. Paralel bağlı bipolar EC reaktörü.....	22
4.4. Elektrokoagülasyon üniteleri, yatay ve dikey akışlar.....	23
5.1. Deney düzeneği.....	42
5.2. KOİ reaktörü.....	45
5.3. KOİ tüpleri.....	45
6.1. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	52
6.2. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	52
6.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	53
6.4. KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	56
6.5. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	56
6.6. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	56
6.7. KOİ'nin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	59
6.8. KOİ gideriminin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	60
6.9. Enerji tüketiminin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	60
6.10. KOİ'nin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 2000 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	61
6.11. KOİ gideriminin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 2000 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL).....	61
6.12. Enerji tüketiminin destek elektrolit ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A,	





$i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 2000 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	62
6.13. KOİ' nin $\text{H}_2\text{O}_2$ ve pH ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 2000 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	64
6.14. KOİ gideriminin $\text{H}_2\text{O}_2$ ve pH ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 2000 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	64
6.15. Enerji tüketiminin $\text{H}_2\text{O}_2$ ve pH ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , 2000 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	65
6.16. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) KOİ' nin zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	67
6.17. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) KOİ gideriminin zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	67
6.18. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) enerji tüketiminin zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	67
6.19. TOK' nun zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	68
6.20. TOK gideriminin zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ , $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , $V= 500 \text{ mL}$ ).....	69
6.21. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2 \text{ A}$ , $i=20 \text{ mA/cm}^2$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	71
6.22. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi( $I=2 \text{ A}$ , $i=20 \text{ mA/cm}^2$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	71
6.23. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2 \text{ A}$ , $i=20 \text{ mA/cm}^2$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	72
6.24. KOİ' nin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	75
6.25. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	75
6.26. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal, $V= 500 \text{ mL}$ ).....	75
6.27. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5 \text{ A}$ , $i=25 \text{ mA/cm}^2$ , pH	

doğal, V= 500 mL).....	77
6.28. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	77
6.29. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	78
6.30. KOİ' nin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	80
6.31. KOİ gideriminin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	80
6.32. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	80
6.33. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	81
6.34. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	82
6.35. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	82
6.36. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	83
6.37. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	83
6.38. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	84
6.39. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	85
6.40. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	85
6.41. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	85
6.42. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	86
6.43. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25	

mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	86
6.44. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , pH doğal, V= 500 mL).....	86
6.45. KOİ' nin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	88
6.46. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	88
6.47. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	89
6.48. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	92
6.49. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	93
6.50. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL).....	93
6.51. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	96
6.52. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	96
6.53. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	97
6.54. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	97
6.55. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	97
6.56. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	98
6.57. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	98
6.58. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	98
6.59. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH	

doğal V= 500 mL ).....	99
6.60. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	99
6.61. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	99
6.62. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	100
6.63. KOİ' nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	100
6.64. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	100
6.65. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal V= 500 mL ).....	101
6.66. KOİ' nin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	104
6.67. KOİ gideriminin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	104
6.68. Enerji tüketiminin pH ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	105
6.69. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) KOİ' nin zamanla değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	107
6.70. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) KOİ gideriminin zamanla değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	107
6.71. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) enerji tüketiminin zamanla değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	107
6.72. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) KOİ' nin zamanla değişiminin karşılaştırılması.....	108
6.73. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) KOİ gideriminin karşılaştırılması.....	108

6.74. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) enerji tüketiminin karşılaştırılması.....	109
6.75. TOK' un zamanla değişimi ( $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	110
6.76. TOK gideriminin zamanla değişimi ( $I=1,5$ A, $i=15$ mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , V= 500 mL).....	110
6.77. Demir ve Alüminyum elektrotları kullanılarak yapılan deneylerin TOK değerlerinin karşılaştırılması.....	110
6.78. Demir ve Alüminyum elektrotları kullanılarak yapılan deneylerin TOK gideriminin karşılaştırılması.....	111

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1. Peynir altı suyunun genel karakteristik özellikleri.....	3
2.2. Gıda sanayii (süt ve süt ürünleri).....	4
3.1. Ham atıksu karakterleri.....	7
4.1. Kesikli ve sürekli sistemler arasındaki temel farklar.....	23
4.2. Bazı anot elektrotların renk ve KOİ giderim sonuçları.....	34
4.3. Elektrooksidasyon avantajları ve dezavantajları.....	36
6.1. I=1A, i=10 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500mL.....	48
6.2. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	49
6.3. I=2 A, i=20 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	50
6.4. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	50
6.5. I=3 A, i=30 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	51
6.6. I=3,5 A, i=35 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	52
6.7. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 1 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	53
6.8. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	54
6.9. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 7 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	55
6.10. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 10 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	55
6.11. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	57
6.12. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	58
6.13. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 3000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	58
6.14. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 4000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	59
6.15. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 1 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	61
6.16. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH = 4,06, V= 500 mL.....	62
6.17. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2000 mg/ L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH = 6,08,	



V= 500 mL.....	63
6.18. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2000 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH= 10,02, V= 500 mL.....	64
6.19. Demir elektrotlarla 30 dakika elektrokoagülasyon ve elmas elektrotlarla 90 dakika elektrokimyasal yükseltgeme sonun elde edilen deneysel çalışma sonuçları. (Elektrokoagülasyonda I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ;Elektrokimyasal yükseltgemedede I=3A, i=75 mA/cm <sup>2</sup> ).....	66
6.20. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	68
6.21. I=2 A, i=20 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	70
6.22. I=2 A, i=20 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	70
6.23. I=2 A, i=20 mA/cm <sup>2</sup> , 7 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	71
6.24. I=1 A, i=10 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	73
6.25. I=1,5 A, i=15 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	73
6.26. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	74
6.27. I=3 A, i=30 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	74
6.28. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	76
6.29. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 7 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	77
6.30. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH= 3,01, V= 500 mL.....	78
6.31. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH= 6,01, V= 500 mL.....	79
6.32. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH= 10,05 V= 500 mL.....	79
6.33. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 3 mM NaNO <sub>3</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	81
6.34. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM NaNO <sub>3</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	83
6.35. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 7 mM NaNO <sub>3</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	84
6.36. I=3 A, i=30 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	87
6.37. I=3,5 A, i=35 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	88
6.38. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 10 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL.....	90
6.39. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL.....	91
6.40. I=2,5 A, i=25 mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 30 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL.....	91

6.41. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL.....	92
6.42. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 10 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL.....	94
6.43. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL.....	94
6.44. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 30 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL.....	95
6.45. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 40 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL.....	96
6.46. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH = 4, V= 500 mL.....	101
6.47. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH = 6, V= 500 mL.....	102
6.48. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH = 8, V= 500 mL.....	103
6.49. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH = 10, V= 500 mL.....	104
6.50. Alüminyum elektrotlarla 30 dakika elektrokoagülasyon ve elmas elektrotlarla 90 dakika elektrokimyasal yükseltgeme sonun elde edilen deneysel çalışma sonuçları. (Elektrokoagülasyonda $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ; Elektrokimyasal yükseltgemedede $I=2,5$ A, $i=62,5$ mA/cm <sup>2</sup> ).....	106
6.51. $I=2,5$ A, $i=25$ mA/cm <sup>2</sup> , 5 mM Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , pH doğal, V= 500 mL.....	109



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
mg/L	: Miligram/Litre
%	: Yüzde
kg/ton	: Kilogram /ton
kg KOİ	: Kilogram Kimyasal Oksijen İhtiyacı
PAS	: Peynir Altı Suları
pH	: Power of Hydrogen
AKM	: Askıda Katı Madde
UAKM	: Uçucu Askıda Katı Madde
P	: Fosfor
N	: Azot
µS/cm	: Mikrosiemens/santimetre
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
vb.	: Ve benzeri
EC	: Elektrokoagülasyon
mg/(Ah)	: Mg/Amper saat
DC	: Doğru Akım
g/L	: Gram/Litre
kWsaat/kg KOİ	: Kilowatt saat / Kilogram Kimyasal Oksijen İhtiyacı
PAC	: Polialüminyum Klorür
A/m <sup>2</sup>	: Amper /Metrekare
µohm/cm	: mikroohm / metrekare
kWsaat/m <sup>3</sup>	: Kilowatt saat / metreküp
A/dm <sup>2</sup>	: Amper /Desimetrekare
ppm	: Parts Per Million
mL/dak	: Mililitre/Dakika
mA/cm <sup>2</sup>	: Miliamper /santimetrekare
TOK	: Toplam Organik Karbon

## 1. GİRİŞ

Yeryüzünde mevcut bulunan su kaynakları hava, karalar, okyanuslar ve göller olarak tanımlarsak bu kaynakların yaklaşık %96,5 denizler ve %3,5 civarında karalardaki tatlı su kaynakları oluşturmaktadır. Dünya oluşumundan bugüne kadar su miktarının artmamasına rağmen insanoğlunun suya olan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır Aynı zamanda canlı yaşamının vazgeçilmez unsuru olarak su yalnızca insan gereksinimlerinin değil, çevre dengesinin korunması ve canlı türlerinin yaşamsal faaliyetlerinin sürdürülmesi için de son derece önemlidir.

Artan dünya nüfusu ile birlikte endüstriyel taleplerin gerçekleştirilmesi, çevrenin korunması ve gelecek nesillere aktarılması önemli bir konu hale gelmiştir. Gelişen teknoloji ve hızlı sanayileşme, çok büyük ve çözülmesi giderek zorlaşan bir problemi, çevre kirliliğini de beraberinde getirmiştir. Bugün bu kirlilik doğanın dengesini bozar duruma gelmiş ve insan yaşamını tehdit eden boyutlara ulaşmıştır. Su kirliliği ise çevre kirliliğinin önemli bir boyutunu oluşturmaktadır.

Konutlar, sanayi-endüstri kuruluşları, enerji santralleri, tarım ve hayvancılık uygulamaları sonucu açığa çıkan ve içinde sağlığa zararlı biyolojik ve kimyasal maddeleri barındıran sular atıksu olarak tanımlanır. Kentleşme ve teknolojideki bu hızlı gelişmelere bağlı olarak endüstriyel, tarımsal ve diğer atıksular en yakın alıcı ortamlara verilmektedir. Genel olarak bu ortamlar en yakında bulunan deniz, göl, ırmaklar gibi ortamlar olup, burada yaşayan organizmalar ve diğer canlı türleri için çok önemli bir problem haline gelmektedir. Bu açıdan atıksu kontrolü ve çevreye etkileri çok önemli bir konudur [1].

## 2. SÜT ENDÜSTRİSİ

Çevreyi, özellikle alıcı su ortamlarını kirleten ve ülkemizde de önem arz eden endüstrilerden biri de süt ürünleri sanayisidir [2]. Süt endüstrisi atıksuları diğer tüm tarım endüstrilerinde olduğu gibi yüksek organik içeriğinden dolayı, yüksek derişimlerde biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) sahiptirler. Ayrıca, Avrupa 'da endüstriyel kirlilik açısından en geniş etkilere sahip sanayi sektörlerinden biridir [3].

Birçok ülkede süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları, doğal su ortamlarının önemli ölçüde kirlenmesine neden olan kaynaklar arasında gösterilmektedir [4]. Bunun yanında atıksu debisinin saatlik, günlük ve mevsimsel değişiklikler göstermesi nedeniyle arıtma işlemi karmaşık bir hal almaktadır [5].

Süt ve süt ürünleri işleyen işletmelerden kaynaklanan atıksular, kirlenmiş sular ve kirli sular olmak üzere iki gruba ayrılabilir. İşletmelerin genelde toplam atıksu hacminin % 60-98 'ini soğutma suları oluştururlar. Süt mamullerinin eldesin de kullanılan tüm cihazlar ve tanklar işlenmiş süt ve süt ürünlerini içerdiklerinden dolayı sistemde oluşan soğutma suları ile soğutulurlar. İkinci gruptaki atıksular, üretim işlemlerinden gelip, özellikleri çok değişikdir. Bir tesisten diğerine kullanılan yöntemlere göre farklılık gösterirler

Süt endüstrisi genellikle kesikli çalışan sistemlerdir. Dolayısıyla süt endüstrisi atıksularının karakteristiği de mevsimsel çalışma dolayısıyla geniş bir aralıkta olmaktadır. Genellikle kirlilik değerleri yaz aylarında yüksek, kış aylarında ise düşük olmaktadır [3].

Süt, süt yağı, protein, laktoz ve laktik asit, bunların yanında sodyum, potasyum, kalsiyum ve klorür içeren karmaşık bir biyolojik akışkandır. Süt ürünleri, yapısına ve üretim şekline göre süt bileşenlerinin hepsini ya da bazılarını içerir. Ayrıca şeker, tuz, aroma düzenleyici ve dengeleyiciler de süt ürünlerinde mevcut olabilir. Dolayısıyla bu atıklar çözülmüş şeker, protein, yağ ve katkı maddeleri ile daha az etkili olan sodyum, potasyum, kalsiyum ve klorür içerir.

Süt endüstrisi atıksuyunun karakteri BOİ veya KOİ ölçümü ile belirlenir. Kaymak, yağ, peynir ve peynir suyundan oluşan atıksular BOİ kaynaklarıdır. Bu BOİ değeri derişim bakımından 0,8 - 2,5 kg/ton arasında değişirken, KOİ değeri

genellikle BOİ değerinin 1,5 katıdır. Fosfor, 10- 100 mg/L aralığındadır ve azot, BOİ seviyesinin yaklaşık % 6 'sı kadardır.

Bir birim sütün bileşimi kirlilik yükü olarak şöyle verilebilir [6]:

1 kg sütün yağı = 3 kg KOİ

1 kg laktoz = 1,13 kg KOİ

1 kg protein = 1,36 kg KOİ

Sütün endüstrisinden kaynaklanan atıksularda, en büyük kirlenici kaynağı, peynir üretimi sonucu oluşan ve kirlenici vasfı yüksek olan peynir altı suları (PAS) oluşturmaktadır. PAS sürece giren sütün yaklaşık % 80-90 'ını oluşturmakta ve ham sütün içindeki katı maddelerin yarısından fazlasını içermektedir. Yine ham sütün içerdiği proteinin % 20 'si, laktozun büyük çoğunluğu, mineraller ve çözülmüş vitaminler peynir altı suyu içersinde yer almaktadır. Üretilen bir birim ağırlığındaki peynir için 5-10 birim PAS oluşmaktadır ve yüksek organik madde içeriği nedeniyle alıcı ortamlara deşarjı büyük sorun yaratmaktadır. PAS asit ve yağ oranı yüksek bir malzeme olması nedeniyle arıtılması da pahalı olmaktadır.

Yağı alınmış sütün üretilen PAS 'ın pH 'ı 4-5 civarında asidik karakterdedir.

Çizelge 2.1 'de PAS 'ın genel karakteristik özellikleri verilmektedir [3].

**Çizelge 2.1.** Peynir altı suyunun genel karakteristik özellikleri [3]

Parametre	Birim	Değeri
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	73000-86000
pH	-	4,3-8,7
Toplam Azot	mg/L	897-1200
Fosfat	mg/L	420-540

Sütün atıksularında azot genellikle sütün proteinlerinden kaynaklanır ve değişik şekillerde bulunur; ya organik asit olarak (protein, üre, nitrik asitler) ya da  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  ve  $NO_3^-$  gibi iyonlar halinde bulunur.

Fosfor ise çoğunlukla ortofosfat ( $PO_4^{-3}$ ) ve polifosfat ( $P_2O_7^{-4}$ ) gibi inorganik tuzlar ekinde bulunur.

Atıksuyun kuvveti ve arıtılabilirliğini değerlendirebilmek için askıda katı (AKM) ya da uçucu askıda katı (UAK) derişimleri kullanılır [6].

Süt ve süt endüstrisi atıksularının alıcı ortama deşarjı için Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği 'nde Çizelge 2.2 'de belirtilen esaslara uyulması gerekmektedir [7]. Bu endüstriden kaynaklanan atıksuların alıcı ortama deşarj standartlarını sağlayabilmesi için birkaç kademe arıtmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

**Çizelge2.2.** Gıda sanayii (süt ve süt ürünleri) [7]

Parametre	Birim	Kompozit Numune 2 Saatlik	Kompozit Numune 24 Saatlik
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	170	160
Yağ Ve Gres	(mg/L)	60	30
pH	-	6-9	6-9

### 3. SÜT ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU İLİŞKİSİ

#### 3.1. Süreç

Süt endüstrisinde şu işlemler gerçekleştirilir; hammaddelerin alınması ve depolanması, işlenen hammaddelerin son ürünlere dönüşmesi, paketleme ve son ürünlerin depolanması ve maddelerin işlenmesinde yalnızca dolaylı olarak yer alan bir grup yardımcı işlemler (örneğin, ısı aktarımı ve yıkama işlemleri)

Durultma, ayırma ve pastörizasyon gibi birincil işlemler birçok tesiste ve ürünlerde yaygın olarak kullanılır. Durultma (askıdaki maddelerin uzaklaştırılması) ve ayırma işlemi (kaymağın uzaklaştırılması) genellikle özel olarak tasarlanan büyük santrifüjler tarafından gerçekleştirilir.

Durultma ve ayırmayı takip eden süreç pastörizasyondur. Pastörizasyon, bazı eski tesislerde bir teknede uzun süre ısıya maruz bırakılarak gerçekleştirilirken, çoğu tesiste önce hızlı bir şekilde ısıtılarak ve sonra hızlı bir şekilde soğutulur (ısıtılmış ve soğutulmuş plakalara ya da tüplere temas ettirilerek) gerçekleştirilir (HTST pastörizasyon, kısa sürede yüksek sıcaklık uygulama).

Birincil işlemlerden sonra, süreçler ve donanım üretilen ürüne bağlıdır. Çeşitli ürünlerin üretimi için gerçekleştirilen süreçler, çalkalama, homojenleştirme, aşılama, yoğunlaştırma ve kurutmadır. Daha sonra, son ürünler paketlenir, kutulanır ve nakliye edilir.

Tesisin, ürün üretimi ve paketleme kısmı başlıca atıksuyu kaynaklarıdır. Bu atıksular, dökülme ve sızıntılar, süttten yapılan ürünlerin atıksuları (peynirden kaynaklanan peynir suyu gibi), ürün değişimi esnasında boruların temizlenmesi, ürünün yıkanması ve donanımın yıkanması sonucu oluşur [8].

#### 3.2. Atıksu Kaynakları

Süt ve süt ürünleri endüstrisinde başlıca ham madde olarak süt kullanılmaktadır. Ancak üretimde sağlığa uygunluğu sağlamak amacıyla bütün süreçlerde su kullanılması gerekmektedir. Hijyen sağlamak amacıyla kullanılan



bu sular daha sonra atıksu olarak çıkmaktadır. Başlıca atıksu kaynakları aşağıda belirtilmektedir:

- Süt alımı sırasında doğrudan süt dökülmesi, tanklardan taşmalar, işletme esnasında sütün veya süt ürünlerinin dökülmesi, boru hatları, pompalar ve süreç ünitelerinde sızıntılardan meydana gelen atıksular,
- Süt taşıyan tankerlerin yıkanması, şişe temizlenmesi, işlemde sonra tanklarda kalan süt ve süt ürünleri kalıntılarında kaynaklanan atıksular,
- Süreç donanımlarının yıkanmasından doğan atıksular,
- Soğutma suları dolayısıyla oluşan atıksular,
- Bozulan ürünler, geri dönenler ürünler, ya da peynir altı suyu gibi yan ürün atıkları,
- Fabrikanın genel temizliği, yıkamada kullanılan deterjanlar, diğer bileşikler ve atık olarak deşarj edilen sağlığa uygunluk sağlayan çözeltiler,
- Evsel nitelikli atıksular [5,8].

### 3.3. Atıksu Karakterizasyonu

Dünyada ve ülkemizde süt endüstrisi atıksularının kirlilik derecesi çok fazla değişiklik göstermektedir. Üretim sürecine göre süt endüstrisi atıksularının karakteristiği de değişir.

Çizelge 3.1 'de bir süt endüstrisinin tipik ham atıksu karakterleri görülmektedir.

**Çizelge 3.1.** Ham atıksu karakterleri [8]

Parametre	Değişim Aralığı
Debi	Kesikli
BOİ (mg/L)	40-10,000 (1,000-4,000)
Toplam askıda katı (mg/L)	400-2,000
KOİ (mg/L)	400-1,500
pH	4-11 (7.8)
Fosfor (mg/L PO <sub>4</sub> )	9-210 (35)
Amonyak azotu (mg/L)	1-13 (5.5)
Toplam azot (mg/L)	1-115 (64)
Klor (mg/L)	45-2000 (483)
Renk	Yüksek
Koliform	Mevcut



#### 4. SÜT ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ARITIMI

Birçok ülkede süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksuları doğal su ortamlarının önemli ölçüde kirlenmesine neden olan kaynaklar arasında gösterilmektedir. Bu atıksuların olumsuz etkilerinin azaltılması için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır [5].

Süt ve süt ürünleri üreten işletmelerde atıksu arıtımından önce katı atıkların ayrılması, atıkların, yan ürünlerin ve kullanılan fazla suyun tekrar kullanımı gibi önlemler alınabilir. Atıksu miktarını ve kirlilik yükünü azaltmak üzere süt sanayinde alınacak önlemler şöyle sıralanabilir [8,9]:

- Yüksek kirlilik içeren atıkların az kirli atıklardan ayrılması,
- Taşma ve kazalardan ileri gelen hammadde ve ürün kayıplarının en aza indirilmesi,
- Yıkama sularının toplanması,
- Süt işleme süreçlerinde ileri yöntemlerin kullanılması,
- Dikkatli ve kontrollü çalışma

Süt ve süt ürünleri atıksularının arıtılması amacıyla çok farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Atıksuyun karakteri, maliyet, sermaye, işletme için uygun personelin varlığı ve yönetmeliklerin sağlanması için gerekli arıtma ihtiyacı gibi faktörler sistemin seçiminde dikkate alınmaktadır [5]. Süt endüstrisi atıksuları yüksek organik madde içeriğine sahiptir ve alıcı ortama verildiğinde alglerin fazla miktarda oksijen tüketmesine neden olur. Geleneksel yöntemlerle bu yükün üstesinden gelmek, tesis yeterliliği ve ekonomisi açısından oldukça zordur. [9].

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının yüksek miktarda organik madde içermesi nedeniyle uygulanan teknolojilerin büyük bir kısmı biyolojik arıtma esasına dayanmaktadır [5]. Süt endüstrisi atıksuları çok büyük oranda organik besin çözeltilerinden oluşması nedeniyle aerobik süreçlerle arıtılmaları oldukça kolaydır. Uzun havalandırılmalı aktif çamur sistemleri, havalandırılmalı lagünler, damlatılmalı filtreler en sık rastlanan arıtma teknolojileridir [9]. Aerobik ve anaerobik biyolojik arıtma sistemleri en sık kullanılan teknolojiler olarak



görülmektedirler. Bu sistemler tek başına kullanıldığı gibi her iki arıtmanın birlikte kullanılması gereken durumlara da rastlanmaktadır [5]. Bununla birlikte son yıllarda gelişen teknoloji ve yapılan çalışmalarda ki artışla birlikte süt endüstrisi atıksularının arıtımında anaerobik sistemlere de çokça rastlanmaktadır [9].

Süt endüstrisinde kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ) önemli şekilde değişim göstermesi nedeniyle anaerobik arıtma bu atıksular için ideal bir yöntemdir. Bunun dışında süt endüstrisi atıksuları her iki yöntem (aerobik-anaerobik) kombine edilerek de arıtılabilmektedir [3]. Türkiye 'de bu endüstriden kaynaklanan atıksuların aerobik ve anaerobik biyolojik arıtılabilirliğine ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Anaerobik arıtma sistemlerinin dünyanın çeşitli noktalarında uygulandığı görülmektedir.

Biyolojik arıtma dışında; arazide arıtma, membran teknolojileri ve kimyasal arıtma uygulamalarına da rastlanmaktadır [9]. Ters ozmos veya ultrafiltrasyon gibi diğer yöntemler de düşük etkinlik ve yüksek işletme maliyeti gibi dezavantajlara sahiptir [10].

Atıksu miktarı ve karakterinde görünen büyük değişiklikler, bu endüstriden kaynaklanan atıksuların biyolojik olarak arıtılmasını zorlaştırmaktadır. Bu faktörlerin düşük sıcaklık ile birleşmesi kararlı bir biyolojik arıtma uygulanmasında zorluklara neden olmaktadır [5]. Biyolojik parçalanmaya dayanıklı organik maddelerin arıtılması için ileri arıtım yöntemlerinden biri olan elektrokimyasal arıtım yöntemlerinin kullanılması önem kazanmaya başlamıştır.

Çıkış suyunun ön arıtımı; ızgaralara akışının dengelenmesi, etkisizleştirme ve hava flotasyonundan (yağ ve katıları gidermek için) oluşur. Bunu biyolojik arıtım takip eder. Eğer yeterli alan mevcutsa; havuz sistemleri en iyi sonucu veren yöntemlerdir. Diğer biyolojik arıtım sistemleri ise damlatmalı filtreler ve aktif çamur sistemidir. Arıtılan süt endüstrisi atıksuları Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği 'nde verilen değerleri sağlıyorsa kanalizasyon hattına verilir.

#### 4.1. Atıksu Arıtma Yöntemleri

Süt endüstrisi atıksuları, fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri kullanılarak arıtılmaktadırlar. Süt endüstrisi atıksularına genellikle uygulanan arıtma yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

##### 4.1.1. Fiziksel yöntemler

Süt endüstrisi atıksuları, evsel atıksularla birlikte karışık arıtılıyor ise manüel veya otomatik ızgaralardan geçirilmelidir. Büyük parçaların sistemdeki diğer donanımların mekanik aksamına zarar vermemesi için sepet tipi ızgaralar tercih edilebilir. Izgaralardan büyük katı parçalardan arınmış olarak geçen atıksular dengeleme havuzuna alınır. Dengeleme havuzunda, düzensiz zaman ve debide gelen atıksuyun dengelenmesi, atıksuyun homojenize edilmesi ve bu sayede atıksu arıtma sistemine sabit debi ve homojen özellikte atıksu verilmesi sağlanır. Böylece arıtma tesisine anlık olarak gelecek yüksek derişimlerdeki toksik maddelerin tesise girmesi önlenerek, inhibisyon etkisi yaratan maddelerin derişimi düşürülür.

##### 4.1.2. Kimyasal yöntemler

Koagülasyon ve flokülasyon, su ve atıksu ortamında askıda ve koloidal haldeki maddelerin yumaklar haline getirilmesi anlamına gelmektedir. Oluşan bu yumaklar, daha sonra çökeltme ile sudan uzaklaştırılmakta ve sudaki koloidal ve askıdaki kirlilikler giderilmektedir. Koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme, kimyasal maddeler yardımıyla sağlanır ve  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$  ve kireç en çok kullanılan kimyasallar arasında sayılabilir. Kimyasal arıtma kesikli olarak tasarlanır ise koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme işlemler itek bir sistemin içerisinde meydana gelir. Kimyasal arıtma sürekli olarak çalışacak şekilde tasarlanır ise koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme işlemleri ayrı havuzlarda gerçekleştirilir.

Kimyasal arıtmayı oluşturan üniteler ya betonarme yapılardan ya da çelik yapıdan yapılabilir. Betonarme inşaat yapılan üniteler, sektörde havuz olarak tanımlanırken, çelik yapıdan imal edilen üniteler ise tank olarak tanımlanır. Yer sorunu olan firmalar, atıksu arıtma tesisi tasarımlarının özellikle tank olarak yapılmasını tercih etmektedirler.

Kimyasal arıtmanın bölümleri aşağıda açıklanmıştır:

○ **Hızlı karıştırma (Koagülasyon)**

Kimyasal arıtmanın ilk aşamasında atıksu içine yük dengesini bozmak ve pıhtı oluşturmak amacıyla karıştırılacak koagülant kimyasal çözeltilerinin ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeSO}_4$  vb.) atıksu ile etkin şekilde karışımı, havuz içerisinde bulunan karıştırıcı ile sağlanır. Kimyasal çözelti hazırlama tanklarında istenen derişimde hazırlanan çözeltiler bu havuza dozaj pompaları vasıtasıyla otomatik olarak ilave edilir. Dozaj pompası ile basılan kimyasal çözeltilerin, literatür bilgileri göz önünde bulundurularak, seçilen 5 dakikalık bir süre boyunca atıksu ile karışımı sağlanır. Bu havuza aynı zamanda pH metre kontrolünde kireç+kostik ilavesi yapılarak koagülant ilavesi ile pH 'ı düşen atıksuyun pH 'ı uygun seviyelere getirilir.

○ **Yavaş karıştırma (Flokülasyon)**

Hızlı karıştırma havuzundan sonra atıksu, kimyasal arıtmanın ikinci aşaması olan yavaş karıştırma havuzuna geçer. Bu havuzda, hızlı karıştırma havuzunda oluşturulan pıhtıların yumaklaşması amacıyla ilave edilecek flokülant kimyasal çözeltilerinin (polielektrolit) atıksu ile etkin şekilde karışımı sağlanır. Karışımın sağlanması için havuz içinde karıştırıcı bulunmalıdır. Çözelti tanklarında istenen derişimde hazırlanacak polielektrolit çözeltisi, bu havuza debi ayarlı dozaj pompaları vasıtasıyla otomatik olarak ilave edilir ve 20 dakika süreyle havuz karıştırılır.

#### o **Çöktürme havuzu**

Yavaş karıştırma havuzundan çıkan atıksu, kimyasal arıtmanın son aşaması olan çöktürme havuzuna girer. Çöktürme havuzu genellikle konik tabanlı tasarlanır. Çöktürme, özgül ağırlığı sudan daha fazla olan, floklar haline getirilmiş kirlilik oluşturan maddelerin, sudan ayrılması işlemidir. Bu işlem, özgül ağırlık farkından yararlanılması ile havuzun geometrik yapısı gereği flokların havuz tabanına çökmesinin sağlanması şeklinde yapılır. Bu işlem sonunda kirlilik oluşturan maddeler, floklar halinde havuz tabanında toplanırken, kimyasal olarak arıtılmış olan atıksu ise çıkış yapısından savaklanır. Arıtılmış atıksu tasarım gereği ya alıcı ortama deşarj edilir ya da biyolojik arıtmaya alınarak arıtma sürecine devam edilir.

Kimyasal arıtma işlemi tamamlandıktan sonra, çökme için gerekli süre sonunda altta toplanan çamur, yoğunlaştırma ve susuzlaştırma işlemi gerçekleştirilmek üzere uzaklaştırılır.

#### **4.1.3. Biyolojik yöntemler**

Biyolojik arıtmanın amacı, çözünmüş ve kolloid halde kirletici maddelerin aerobik ve anaerobik şartlarda giderilmesi ve organik maddenin daha kararlı ve zararsız formlara dönüştürülmesidir. Biyolojik arıtmada mikroorganizma hücrelerine dönüşen organik maddelerin çökerek atıksudan ayrılması amaçlanmaktadır. Biyolojik arıtma yöntemlerinde, mikroorganizmaların yaşamlarını etkileyen faktörlerin dikkate alınması ve öngörülen sınır değerlerin aşılmaması gerekir.

Süt endüstrisi atıksularının arıtılması için, yaygın olarak kullanılan biyolojik arıtma sistemleri arasında yükseltgeme havuzu, damlatmalı filtre, birleşik damlatmalı filtre, aktif çamur sistemleri ve anaerobik arıtma yer almaktadır.

Biyolojik arıtma sistemleri, aerobik ve anaerobik olmak üzere ikiye ayrılır:

## a. Aerobik arıtma

Süt atıksularının arıtılmasında özellikle de küçük debili işletmeler için, ardışık kesikli aktif çamur tesisleri sıkça kullanılmaktadır ama yüksek enerji sarfiyatı bu sürecin önemli bir dezavantajını oluşturmaktadır.

Aktif çamur sistemleri, yüksek organik madde giderim veriminden dolayı, süt endüstrisi atıksularının arıtılmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak yüksek miktarda enerji sarfiyatına yol açması, yüksek miktarlarda oluşan biyolojik çamur ve büyük hacim kaplayan havuzlar sistemin dezavantajları arasındadır.

### • Ardışık kesikli aktif çamur sistemi

Kırsal alanlarda küçük hacimli işletmeler için ardışık kesikli aktif çamur sistemi, biyolojik arıtma sistemleri içinde biyolojik yükseltgeme ve çöktürme işlemlerinin aynı tank içerisinde gerçekleştirilmesinden dolayı daha kolay işletilebilmesi ve emniyetli sonuç vermesi açısından sıklıkla tercih edilmektedir. Ardışık kesikli reaktör sistemi doldurma, reaksiyon, çöktürme, boşaltma ve hazırlık basamaklarını içeren bir ardışık işletmeyi içerir.

Ardışık kesikli aktif çamur süreci olarak işletilen biyolojik reaktör havuzunda, aktif çamur ile temas eden atıksu içinde bulunan organik maddeler, aktif çamur tarafından su, karbondioksit ve yeni hücrelere dönüştürülür. Aktif çamurun ihtiyacı olan oksijen, genellikle havuz tabanına döşenen difüzörler vasıtasıyla blower tarafından üretilen hava ile sisteme verilmekte olup, bu havalandırma, difüzörlerin uygun yerleştirilmesi ile aynı zamanda aktif çamurun çökmemesi için gerekli tam karışımı da sağlamış olur. Biyolojik reaktörde, yeterli süre blowerin kapatılması ve karışımın kesilmesi ile yeterli süre beklenmesi sonucu biyokütlenin çöktürme işlemi gerçekleştirilir. Biyolojik reaktör bu tür tasarımlarda aynı zamanda çamur yatağı olarak kullanılmaktadır. Difüzörlerde herhangi bir tıkanma olmaması için difüzörler biyolojik reaktör havuzu tabanından 20-30 cm yüksekte döşenirler.

Ardışık kesikli aktif çamur sistemi, süt sektörü içinde üretim açısından küçük işletmeler yani mandıralar için atıksu karakteristiği de göz önünde

bulundurularak büyük oranda uygulanan yöntemler arasındadır. Ardışık kesikli reaktör sistemleri, nitrifikasyon ve denitrifikasyon yöntemleri ile azot bileşiklerini azaltma yeteneğine sahip olmasından dolayı, süt endüstrisi atıksularının arıtılması için uygun olabilir.

- **Klasik aktif çamur sistemi**

Büyük debiye sahip atıksuların arıtılmasında ise klasik aktif çamur sistemi kullanılabilir. Klasik aktif çamur sisteminde süreç, havalandırma havuzu ve son çöktürme havuzu olarak tasarlanır.

Aktif çamur sürecinde, hücre büyümesi için gerekli olan karbon kaynağı organik madde, son ürünlere dönüştürülür. Arıtma sonrası arıtılmış su içerisindeki askıda katı maddenin uzaklaştırılması için en yaygın olarak kullanılan yöntem, çöktürme yöntemidir. Çıkış suyu kalitesinin iyi olması için son çöktürme havuzunun iyi tasarlanması gerekir. Arıtılmış su içerisindeki BOI değerini oluşturan en önemli bileşen, sistemden kaçan AKM 'dir. Bu nedenle son çöktürme havuzu aktif çamur süreci ile ele alınması gereken önemli bir ünedir.

## **b. Anaerobik arıtma**

Süt endüstrisi atıksularının arıtımı için arıtılacak süreç atıksuyunun AKM derişimi düşük ise, biyolojik arıtma için havasız filtre reaktörler uygundur. Özellikle 1990 yılından itibaren süt endüstrisi atıksularının havasız filtre reaktörler ile arıtımını konu alan çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır. Süt atıksuyunun KOI derişimleri önemli derecede değişkenlik gösterir. Ayrıca süt atıksuyunun ılık ve dayanaklı olması, anaerobik arıtma için ideal bir ortam yaratır.

Havasız arıtma süreçleri, gerek süt endüstrisi atıksularının arıtılmasında gerekse yüksek organik madde içeren tarım endüstrisi atıksularının arıtımında, aerobik süreçlere göre önemli avantajlara sahiptir.

Anaerobik arıtma, aerobik süreçlerle karşılaştırıldığında, anaerobik arıtmada havalandırma ihtiyacının olmaması, fazla çamurun düşük miktarda

oluşması ve alan ihtiyacının az olması gibi sebepler anaerobik arıtmayı avantajlı kılmaktadır.

Süt endüstrisi atıksularından biyogaz üretimi de bu süreci, aerobik arıtma süreçlerine göre çok daha cazip kılmaktadır [11].

#### 4.1.4. Elektrokimyasal arıtım

Atıksu arıtımında sermaye yatırımı ve elektrokimyasal arıtımın elektrik maliyetleri yüksek olmuştur. Günümüzde, elektrokimyasal arıtım masrafları diğer teknolojiler ile kıyaslandığında elektrokimyasal arıtım diğer teknolojilere göre daha verimli ve daha etkili olabilir. Elektrokimyasal teknolojiler verimli, işletmesi kolay ve etkin bir biçimde tasarlanmıştır [12].

Elektrokimyasal arıtım süreçlerinin genel mekanizmasında koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon süreçleri bulunur, Son yıllarda elektrokimyasal arıtım süreci çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım süreci olmasından dolayı atıksu arıtımında oldukça dikkat çekmektedir. Elektrokimyasal süreçlerin en önemli farklılıkları sürecin şekli ve yapısıdır (Elektrot tipi, uygulanan akım, elektriksel gerilim ve sürecin tipi). Özellikle elektrot tipi sistemin elektrokoagülasyonu mu yoksa elektrooksidasyonu mu tetikleyeceğini belirleyen unsurların başında gelmektedir [13].

Elektrokimyasal yöntem gaz, sıvı ve katıların bulunduğu ortamlara kolaylıkla uygulanabilmekte ve endüstriyel süreçlerde kirlilik problemlerinin giderilmesi için yeni ufuklar açmaktadır. Birçok avantajından dolayı elektrokimyasal süreç, farklı endüstriyel ve çeşitli kaynaklı atıksuların arıtılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu yöntemin avantajları; ana reaktifin elektron olması, elektrokimyasal işlem sonucunda yeni ürünlerin geliştirilmesi veya mevcut atıkların daha az zararlı hale getirilmesini sağlayarak çevre dengesini bozmamasıdır [1].

Elektrokimyasal süreçleri çevre kirlilik problemlerini önlemede ve çözümede ön plana çıkaran esas kriterleri aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz



**Çok yönlülük:** Elektrokimyasal süreçler birçok çevre probleminin çözümünde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme sonucu, çözeltilerin deriştirilmesi veya seyreltilmesi yani faz ayırmaları gerçekleştirilir. Sonuç olarak, birçok kirleticinin ve maddenin çok düşük derişimlerde bile ayrılması söz konusudur.

**Enerji verimliliği:** Elektrokimyasal süreçler, klasik süreçlere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadırlar (termal yanma gibi). Düşük elektriksel akım dağılımları, voltaj düşmeleri ve yan reaksiyonlardan dolayı oluşan güç kayıplarını minimize etmek için uygun elektrot ve hücre tasarımları ile enerji verimleri artırılabilir. Böylece enerji, klasik sistemlere göre daha az tüketilmiş olacaktır.

**Otomasyona uyma kabiliyeti:** Elektrokimyasal süreçlerde elektriksel değişkenler (voltaj ve akım gibi) genellikle veri elde etmeyi kolaylaştırma, süreç kontrolü ve otomasyonu için uygun özelliktedir.

**Çevresel uyum:** Elektrokimyasal süreçlerde ana reaktif elektrot olup, temiz bir reaktiftir. Süreçte genellikle çok fazla ekstra reaktifler gerekmemektedir. İlave olarak bu süreçlerin birçoğunun yüksek seçicilik özelliğinden dolayı ikincil ürünlerin oluşumu gözlenmemektedir.

**Maliyet:** Elektrokimyasal donanım üretimi, işletilmesi ve kontrolünün tasarlanması basit ve ucuzdur. Birçok donanıma göre çok az bir alan işgal etmektedir [14,15].

### **Elektrokimyasal arıtımın avantajları ve dezavantajları**

Elektrokimyasal arıtım yöntemlerinin diğer arıtım yöntemlerine oranla bazı önemli avantajları vardır. Bu avantajlar genel olarak burada verilmiştir;

- a) Basit araç gereç gerekmektedir. Ayrıca basit işletme parametreleri ile iyi bir verim elde edilebilmektedir.

- b) Atıksuların elektrokimyasal arıtım yöntemleriyle arıtılmasıyla iyi derecede renk ve koku giderim sağlanır.
- c) Elektrokimyasal arıtım yöntemleriyle birçok kirletici bir arada giderilebilir. Yani elektrokimyasal süreçlerde kirleticiler tek bir süreçle giderebilmektedir.
- d) Elektrokimyasal arıtım süreçleri düşük bakım maliyeti ve iş gücü gerektirir.
- e) Düşük enerji ihtiyacından dolayı gereken enerji kolayca karşılanabilir.
- f) Yüksek sıcaklıklar herhangi bir problem oluşturmamaktadır,
- g) Daha az kimyasal madde kullanılır,
- h) Elektrokoagülasyonun flok formları kimyasal floklara benzemesine rağmen elektrokoagülasyon flokları daha büyük olur ve daha kararlıdır. Ayrıca bu floklar filtrasyonla daha kolay ayrışabilirler.
- i) Elektrokoagülasyon sonucu oluşan çamur formu çoğunlukla metal hidroksitler şeklindedir.
- j) Elektrokoagülasyon sonucu oluşan toplam çözünmüş katıların içeriği kimyasal arıtıma oranla daha düşüktür. Eğer bir su yeniden kullanılacaksa toplam çözünmüş katının az olması maliyetin daha az olmasına tercih edilmelidir.
- k) Elektrokoagülasyon süreci küçük koloidal parçacıklara karşı kimyasal arıtıma oranla daha etkilidir.
- l) Elektrokoagülasyon sürecinde kimyasal madde kullanılmazken, çöktürme işlemi nötralizasyon esasına göre olmaktadır. Ancak yüksek kirletici derişimlerinde kimyasal madde ilavesi yapılabilmektedir.
- m) Elektroflotasyonda gaz kabarcıkları elektroliz süresince kirleticileri taşıyarak daha küçük kirletici derişimlerini bile flotasyon mekanizmasıyla giderebilmektedir.
- n) Elektroflotasyonda kabarcık sayısının ve boyutunu kontrol etmek için bir parametre olarak akım yoğunluğu kontrol edilir.
- o) Özellikle elektrooksidasyon sonucu oluşan anodik klor, dezenfektan gibi davranır.

Dezavantajları ise aşağıdaki gibidir;

- a) Elektrot, atıksu içindeki çözülmüş maddelerin yükseltgemesi sonucu oksitlenebilir.
- b) Birçok yerde elektrik maliyeti yüksektir.
- c) Atıksudaki askıda maddelerin yüksek iletkenliğe sahip olması istenir.
- d) Bazı çalışmalarda çözünebilir maddeler hidroksit şeklinde çökebilir [13].

#### 4.1.4.1. Elektrokimyasal arıtımın türleri

##### a) Elektrokoagülasyon (EC)

Elektrokoagülasyon, elektrokimyasal yöntemlerle koagülant oluşturulması işlemidir. En yaygın olarak kullanılan elektrokimyasal süreç elektrokoagülasyondur [13]. Elektrokoagülasyonda hidrojen gazı katotta açığa çıkar.

Elektrokoagülasyonun oluşumu ve hızını etkileyen faktörler; akım yoğunluğu ve potansiyel farkı, elektrolit miktarı, pH derecesi, sıcaklık ve kaynağın gücüdür [14]. Bir elektrokimyasal süreçte en önemli şartlardan biri elektrot cinsidir [13]. Elektrokoagülasyon yönteminde elektrot malzemesi olarak genellikle alüminyum veya demir kullanılır [13,14]. Bunun nedeni metalik iyonların adsorpsiyon kapasitesi yüksek olduğu için iyi bir koagülant olmasından kaynaklanmaktadır. Bu elektrotların sürecin işletme aşamasında suyla reaksiyona girerek  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$  ve  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Sistemde arıtım metal hidroksitlerin oluşmasıyla başlamaktadır [13]. Ancak çözelti içinde çok yoğun miktarda magnezyum veya kalsiyum iyonlarının bulunduğu durumlarda paslanmaz çeliğin de elektrot malzemesi olarak işlev gördüğü ispatlanmıştır [14].

Adsorpsiyon kapasitesi çok yüksek olan metal hidroksitlerin sudaki değişik kirletici parametreleri adsorbe ederek çökelti yoluyla sudan uzaklaştırma prensibine dayanan bu arıtım metodu günümüzde birçok yerde kullanım alanı bulmaktadır. Bu işlem esnasında elektrotlarda oluşan elektrokimyasal işlemler

sonucu sudan çıkan küçük gaz kabarcıklarının elektroflotasyonun temelini oluşturduğunu düşünürsek bazı kirleticilerde elektrokoagülasyon esnasında elektroflotasyon yöntemiyle sudan uzaklaştırılacağı söylenebilir. Belirli ölçüde elektroflotasyon da olduğundan dolayı kirletici giderim verimi yüksektir. Bu verim çeşitli işletme şartlarının optimizasyonu ile daha da arttırılabilir. Elektrokoagülasyonla askıda katı maddeler ve koloidal maddeler kararlı hale getirilir. Bu yüzden elektriksel uygulamalarda elektrotlarla partiküller uygun şekilde temas ettirildiğinde parçacıklar nötralize olmakta ve farklı partiküller kombine olarak büyük floklar oluşturmaktadır.

Elektrokoagülasyonda genellikle 3 temel işlem söz konusudur:

- a) Elektrotların yüzeyinde oluşan elektrolitik reaksiyonlar
- b) Sıvı fazda koagülantların (metalik iyonların) oluşumu
- c) Çözünabilir ya da koloidal kirleticilerin adsorpsiyon, koagülant, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilmesi

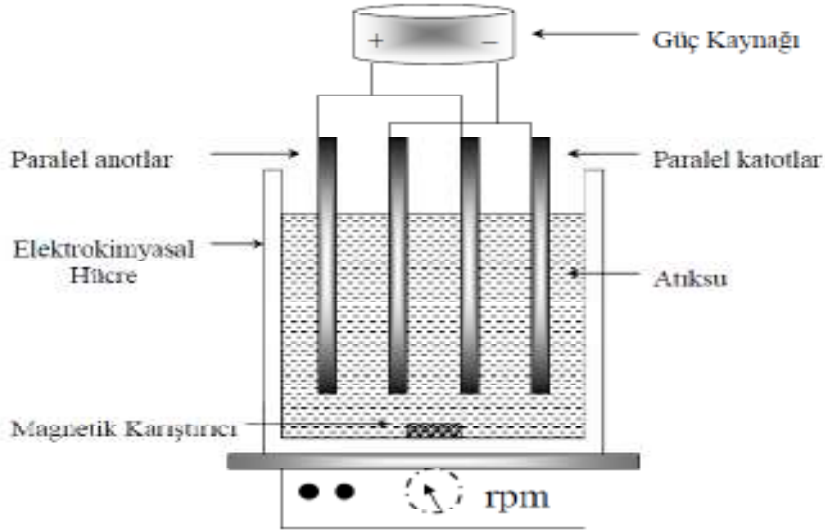
Elektrokoagülasyon yöntemi öncelikle petrol ve yağ gibi yüksek oranda askıda katı içeren maddelerin temizlenmesinde veya askıda maddelerin ayırımı ve kazanımda etkili bir metottur [14]. Elektrokoagülasyon ile sudan askıda katı madde, ağır metaller, boyalar, organik madde, yağlar ve gresler, iyonları ve radyoaktif maddeleri giderebiliriz. Elektrokoagülasyon süreci içinde muhtemel kirletici madde arıtım mekanizması, çok geniş biryelpazede bulunmaktadır. Kirleticilerin özellikleri ve etkileşimleri elektrokimyasal hücrede arıtım yolunu etkiler [12]. Küçük ve orta çaplı işletmelerin (denizaltı vb) atıksu arıtımında kullanılır. Ancak daha geniş çaplı uygulamalarda verimli ve ucuz bir alternatif değildir. Alg ve mikroorganizmaların yok edilmesinde, bulanıklık ve renk gideriminde çok verimli bir metot olan bu yöntem çözelti içindeki demir, silikatlar, humus gibi maddelerin uzaklaştırılmasında en verimli alternatiflerden biridir.

Atıksu arıtımında elektrokoagülasyon yöntemi üzerine yapılan araştırmalar bu metodun; tekstil, deri, petrol ve türevleri, kürk, kimyasal fiber, benzin-su

emülsiyonu, boya ve nitrit sanayilerine ait atıksuların arıtımında verimli bir metot olduğunu ortaya koymuştur [14].

### Elektrokoagülasyonun teknolojisi

En basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Çözünen anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Bu durumda anotta yükseltgeme olacağından anot materyali elektrokimyasal olarak çözünecektir. Bu arada katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Fakat bu durum atıksu arıtımı için uygun değildir; çünkü metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir. Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (mono polar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Çift anot ve katottan ibaret paralel bağlı bir mono polar elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 4.1 'de görülmektedir.

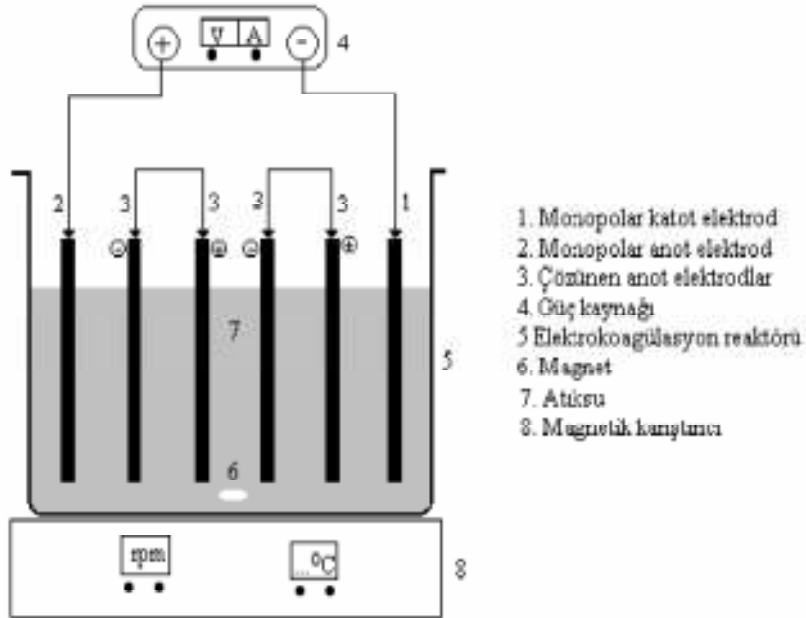


Şekil 4.1. Paralel bağlı monopolar EC reaktörü

Şekil 4.1 'de görülebileceği gibi dört adet paralel iletken metal plaka paralel elektrotları oluşturmaktadır. Bu elektrotlar bir güç kaynağına bağlanmaktadır. Bu güç kaynağı üzerinden elektrokoagülasyon reaktöründeki

akım ve voltaj değeri ayarlanır ve dijital olarak okunmaktadır. Elektrokoagülasyon reaktörlerindeki iletken metal plakalar ‘tükenen elektrotlar’ olarak bilinmektedir. Anot elektrotların çözünmesi veya tükenmesi anodun çözünme potansiyeli düşmesine neden olmaktadır. Çözünen anot tipleri Fe, Al gibi çeşitli metallere yapılabilir [15,16].

Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 4.2 'de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır. Her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Diğer taraftan ise monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır.



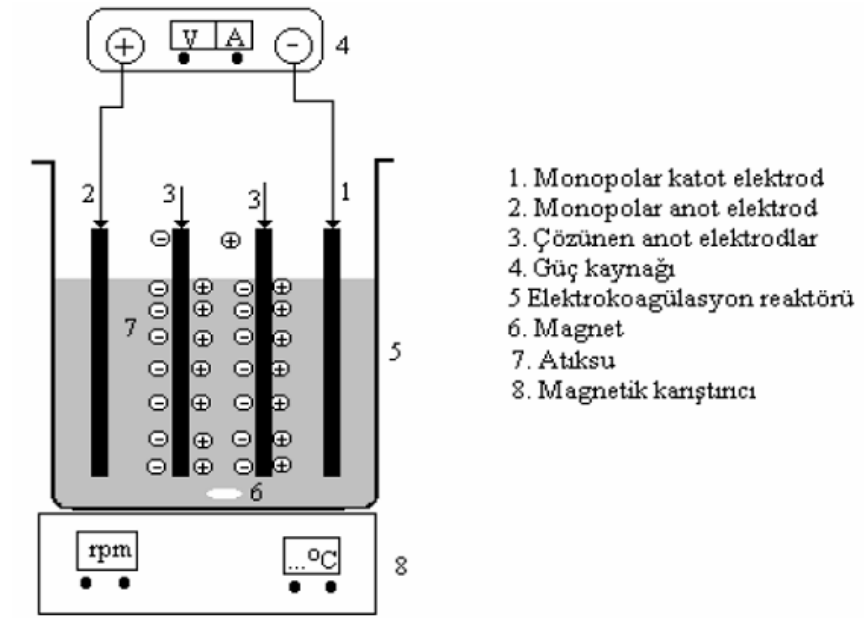
Şekil 4.2. Seri bağlı monopolar EC reaktörü

Seri bağlı EC 'de ortama verilecek akımın geçmesi için daha yüksek bir potansiyel fark uygulamak gerekmektedir. Çünkü seri bağlı EC reaktörlerinde direnç daha yüksektir. Bu yüzden reaktör içinde her yerde akım aynı değerdedir.

Bir diğer EC reaktöründe ise elektrotlar paralel çift kutuplu (bipolar) olarak bağlanmaktadır (Şekil 4.3). Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar

yerleştirilmiştir. Bu EC reaktör sekli, sürecin kullanım ve işletim kolaylığı amacıyla düzenlenmiştir. EC reaktöründeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır [16]. Böylece elektrokimyasal arıtım esnasında elektrotların pozitif tarafında anodik, negatif tarafında ise katodik reaksiyonlar oluşacaktır. Çözünen elektrotların iyon oluşturduğu sistemde demir ve alüminyum gibi çözünen metal levhalar kullanılabilir.

Ortama verilen bu iyonlar, yüklenmiş parçacıkları nötralize ederek koagülasyon işleminin başlamasını sağlamaktadır. Elektrotlardan çözünen iyonlar; kimyasal reaksiyon ile çöktürme veya koloidal maddelerle birleşip elektroflotasyonla reaktör yüzeyine çıkan floklar oluşmaktadır. Ayrıca, elektriksel alandan dolayı sudaki koloidal parçacıklar, yağlar veya diğer bileşiklerin ayrılması da sağlanmaktadır. EC 'de anot ve katot reaksiyonları ve ortamda oluşacak serbest radikal türleri, reaktör içindeki su ve bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Tüm bu karmaşık elektrokoagülasyon işleminde kirleticiler atıksulardan uzaklaştırılarak arıtım yapılmış olunur [15,16].



Şekil 4.3. Paralel bağlı bipolar EC reaktörü

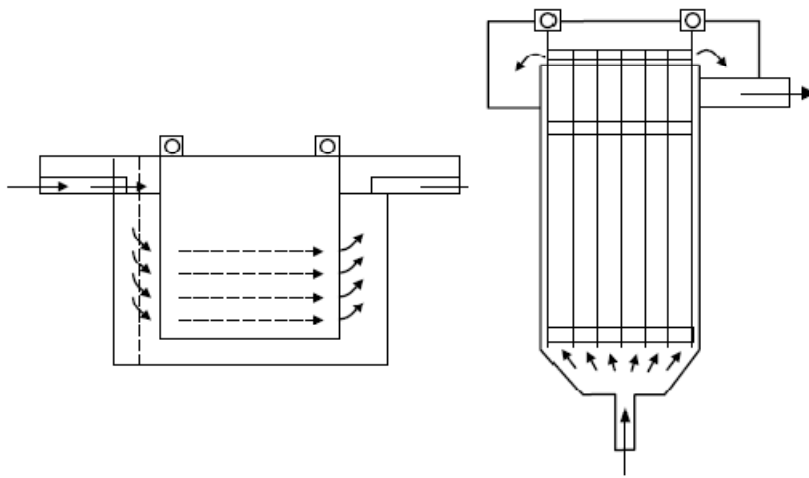
Elektrokoagülasyon sürecinin temel bileşenleri koagülantlar, kirleticiler ve kabarcıklardır. Bu bileşenler arasındaki etkileşimler çok önemlidir ve bileşenler birbirleriyle temas kurmalıdır. Bu bileşenlerin teması reaktör tasarımının temelini oluşturur. Temas reaktörde kütle yayılımı, taşıma mekanizmaları ve akışkan rejimine bağlıdır. Karıştırma modelleri ve reaksiyon kinetiği reaktör tasarımının temel işleyiş parametreleridir.

Elektrokoagülasyon elektrokimya, koagülasyon ve flotasyon üzerine kurulmuştur. Bu etkileşimlerde reaktör tasarımı ve işletilmesi çok önemlidir. Literatürde bildirilen reaktörlerin çoğu sürekli dir. Sürekli sistemler genellikle büyük ölçekli arıtma süreçlerine daha uygundur ve genellikle kesikli sistemlerden daha ekonomiktir.

Kesikli ve sürekli sistemler arasındaki temel farklar Çizelge 4.1 'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Kesikli ve sürekli sistemler arasındaki temel farklar

Kesikli Sistem	Sürekli Sistem
Besleme akış hızı-sabit hacim yoktur.	Sabit akış hızı vardır.
İç derişimleri zamanla değişebilir	İç derişimleri sabittir.
Performans reaksiyon süresi ile ilişkilidir	Performans reaktörde kalma süresi ile ilgilidir
Doğası gereği dinamik çalışma vardır	Kararlı durum çalışması vardır.



**Şekil 4.4.** Elektrokoagülasyon üniteleri, yatay ve dikey akışlar [12]



## Elektrokoagülasyon yönteminde gerçekleşen reaksiyonlar

EC reaktöründe elektrotlara doğru akım güç kaynağı ile akım verildiğinde anot elektrot elektron vererek yükseltgenir, katot elektrot ise elektron alarak indirgenir [15].

### Alüminyum elektrotu kullanımı ile gerçekleşen reaksiyonlar:

Alüminyum elektrot kullanılarak atıksuların elektrokoagülasyonu birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Alüminyum anotun düşük pH 'da elektrolitik çözünmesi ile  $Al^{3+}$  ve  $Al(OH)^{2+}$  gibi katyonik türler oluşur. Aşağıda belirtilen tepkimeler uyarınca, uygun pH değerlerinde alüminyum elektrot önce  $Al(OH)_3$  'e dönüşür sonra da ürün olarak  $Al_n(OH)_{3n}$  'e polimerize olur.



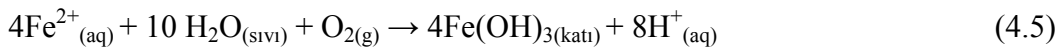
Ayrıca sucul ortam yapısına bağlı olarak  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_2(OH)_2^{4+}$  ve  $Al(OH)_4^{-}$  gibi diğer iyonik türler de sistemde bulunabilir.

### Demir elektrotu kullanımı ile gerçekleşen reaksiyonlar:

Demirin elektrolitik sistemde yükseltgemesi ile demir hidroksit,  $Fe(OH)_n$  ( $n=2$  yada  $3$ ) oluşur. Demir hidroksit oluşumunda iki mekanizma önerilmiştir.

1. Mekanizma;

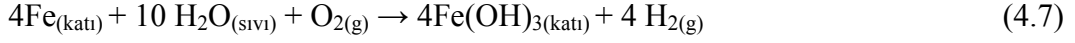
Anot:



Katot:



Tüm tepkime:



2. Mekanizma;

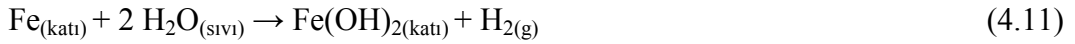
Anot:



Katot:



Tüm tepkime:



Oluşan  $\text{Fe}(\text{OH})_{n(\text{kati})}$  çözeltisi içerisinde jelatinimsi yumak olarak kalır ve atıksudan kirletici kompleksleşme ya da elektrostatik çekim ile giderir. Redoks tepkimeleri sonucu üretilen  $\text{H}_2$ , çözünmüş organikleri ya da askıda katıları yüzdürme ile giderebilir [17].

### **Elektrokoagülasyona etki eden parametreler**

Elektrokoagülasyon süreci, ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki koloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin derişimi gibi özellikler de elektrokoagülasyon süreci üzerine etki eden diğer parametrelerdir. Elektrokoagülasyona etki eden parametreleri şöyle özetleyebiliriz:

**Akım yoğunluğu ve şarj yükü:** Elektrokoagülasyon sisteminde akım miktarı, elektrotlardan salınan  $\text{Al}^{3+}$  ve  $\text{Fe}^{2+}$  miktarını belirler. Alüminyum için

elektrokimyasal eşdeğer kütle 335,6 mg/(Ah) 'tır. Demir için bu değer 1041 mg/(Ah) 'tır. Büyük akım, küçük elektrokoagülasyon birimi demektir. Fakat fazla büyük akım elektrik enerjisinin israf edilmesi demektir. Daha önemlisi; fazla akım yoğunluğu, akım verimindeki önemli azalma ile sonuçlanabilir. Devamlılık arz etmeyen uzun zaman periyodu için elektrokoagülasyon sistemlerinde akım yoğunluğunun 20-25 A/m<sup>2</sup>olacağı ileri sürülür. Akım yoğunluğu seçimi yüksek akım verimliliğini başarmak için pH, sıcaklık ve akış hızı gibi diğer işletme parametreleri ile yapılmalıdır. Akım verimi demir için yaklaşık %100 iken; alüminyum için % 120–140 olabilir. Akım verimi hem akım yoğunluğuna hem de anyonların türüne bağlıdır.

Arıtılmış suyun kalitesi, üretilen iyonların miktarına (mg) veya şarj yüklemesine, akım ürününe ve zamana (Ah) bağlıdır. Eğer herhangi bir bildirilmiş değer mevcut değilse; işletim akım yoğunluğu veya şarj yüklemesi deneysel olarak saptanabilir. Gerekli bir kritik şarj yüklemesi vardır. Şarj yüklemesi kritik değere ulaşır ulaşmaz daha fazla akım artışı, çıkış atıksuyu kalitesi önemli düzelme göstermez.

**NaCl 'nin varlığı:** Çoğunlukla maden tuzu arıtılan su veya atıksuyun iletkenliğini artırmak için kullanılır. Klorür iyonlarının elektrik yükü taşımada iyonik katkısının yanı sıra HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> gibi diğer iyonların ters etkisini önemli bir şekilde azaltabileceği bulunmuştur. Karbonat veya sülfat iyonlarının varlığı elektrotların yüzeyi üzerinde yalıtım tabakasını oluşturan Ca<sup>2+</sup> ve Mg<sup>2+</sup> iyonlarının çökmesine yol açacaktır. Bu yalıtım tabakası, elektrotlar arasındaki potansiyeli artıracak ve akım veriminde önemli bir azalışla sonuçlanacaktır. Bu nedenle mevcut anyonlar içinde elektrokoagülasyonun normal çalışmasını sağlayacak % 20 klor olması tavsiye edilir. Aynı zamanda NaCl ilavesi iletkenliği artırarak elektrik tüketiminde azalmaya yol açacaktır. Dahası elektrokimyasal olarak üretilen klorun su dezenfeksiyonunda etkili olduğu bilinmektedir.

**pH etkisi:** Elektrokoagülasyon üzerine su veya atıksu pH 'ın etkileri hem akım verimi hem de metal hidroksitlerin çözünürlüğü ile yansır. Çoğunlukla; alüminyum akım verimleri ya asidik ya da alkali şartlarda nötral durumdan daha

yüksek olduğu bilinmektedir. Arıtma verimi, nötr pH 'a yakın değerlerde bulunan kirlilik giderimi ile kirletici tabiatına bağlıdır. Fakat güç sarfıyatı, iletkenliğin değişiminden dolayı nötr pH 'ta daha yüksektir. İletkenlik yüksek olduğunda pH etkisi önemli değildir.

Litereatürde alüminyum elektrotlar kullanarak kirleticilerin giderim verimlerinin en iyi nötr pH 'a yakın olduğu bildirilmektedir.

**Sıcaklık:** Literatür, alüminyum akım veriminin yaklaşık 60 °C 'e kadar sıcaklıkla arttığını göstermektedir. Sıcaklıkta daha fazla artış elektrokogülasyonda bir düşüşle sonuçlanır. Sıcaklıkla elektrokogülasyon artışı, elektrot yüzeyinde alüminyumoksit filminin yok edilmesinin artan etkinliğine bağlanmaktadır.

**Güç kaynağı:** Elektrokimyasal reaktöre akım nüfuz ettiğinde; denge potansiyel farkının, anot aşın potansiyelinin, katot aşın potansiyelinin ve çözeltinin ohm potansiyel düşüşünün üstesinden gelinmelidir. Katot aşın potansiyeli prensip olarak aktivasyon aşın potansiyelinden ve derişim aşın potansiyelinden oluşurken anot aşın potansiyeli hem aktivasyon aşın potansiyeli ve derişim aşın potansiyelini hem de anot yüzeyinde pasif filmden meydana gelen olası pasif aşın potansiyelini de kapsar. Pasif aşın potansiyelinin son derece elektrot yüzey durumuna bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Yeni pasifleşmemiş elektrotlar için pasif aşın potansiyel ihmal edilebilir[18].

### **Elektrokogülasyonun avantaj ve dezavantajları**

Elektrokogülasyonun avantajları aşağıda sıralanmaktadır;

- Basit donanım ve işletme şartları gerektirir.
- Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
- Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.

- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı içerir.

- EC süreçleri, en küçük koloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.

- EC 'de, kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek derişimdeki kimyasal maddenin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olur.

- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözeltili yüzeyine taşıyabilir, böylece daha kolay ayrılmaları sağlanır.

- EC hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.

- EC süreci için, kırsal alanlarda elektrik güneş panellerinden temin edilebilir.

Elektrokoagülasyonun dezavantajları şu şekildedir;

- Çözünen 'harcanan elektrot' ların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.

- Bazı yerlerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.

- Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu sürecin verimliliğini düşürebilir.

- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir [15,16].

### **Elektrokoagülasyon uygulamaları**

Elektrokoagülasyon yeni bir teknoloji değildir. EC ile atıksu arıtımı ilk olarak 1889 'da İngiltere 'de önerilmiştir [14]. 20 yüzyılda İngiltere 'de çok sayıda atıksu arıtımında bu teknoloji kullanılmıştır [10]. Daha sonra ABD 'de 1909 'da demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile atıksuların arıtımı ile ilgili bir patent alınmıştır [10,14]. Büyük ölçekte EC ile içme sularının arıtımı 1946 'da ABD 'de ilk olarak uygulanmıştır. Bu metotta alüminyum anotlar kullanılarak elektrokimyasal hidrolize ile alüminyum hidroksit flokları oluşturulur. Elektroliz ile oluşan flokların çökmesi veya sedimantasyonu hızlıdır. İçme sularından renk giderimi gerçekleştirilmiş olur. Aynı sistem ile

demir elektrotlar kullanılarak 1956 'da İngiltere 'de nehir suları arıtılmıştır. 1946 ve 1956 yıllarında yapılan iki araştırmada renk ve türbidite gideriminde yüksek kaliteye artılmış suyun elde edilmesi sonuçların ümit verici olduğunu göstermiştir. Kimyasal koagülasyon süreci ile karşılaştırıldığında yüksek başlangıç yatırım maliyetinden dolayı o yıllarda pek kabul görmemiştir.

Son zamanlarda, atıksu arıtım deşarj çıkışlarına getirilen sınırlamalardan dolayı EC yeniden gündeme gelmiştir. 1972 'de EC ile gıda endüstrisi atıksuları arıtılmıştır. Bu çalışmada; EC çözülmüş hava flotasyonu ile yapılan kimyasal dozlama ile karşılaştırılmıştır. Her iki süreçte de flok oluşumu söz konusu olup, EC 'de daha hızlı yoğun bir floklaşma gözlenmektedir. EC 'deki düşünce kültürlerden mikroorganizmaların ve atıksudan çözülmüş maddeler ve protein giderimine uygulanmıştır. 1980 'de Rus bilim adamları atıksuların farklı metotlar ile arıtımını inceleyerek EC ile bu konudaki düşüncelere yeni bakış açıları getirmişler ve yağ-su karışımlarından yağı gidermişlerdir. Alüminyum elektrotlar kullanıldığında istenmeyen çökeltilerin oluşumu yukarıdaki çalışmaların ortak görüsüdür. EC esnasında meydana gelen çökeltiler genellikle çok fazla metal hidroksit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu hidroksitler çözünen elektrot malzemesinden ileri gelmektedir. Eğer alüminyum elektrotlar kullanılıyorsa, sonuçta oluşacak çökeltiler çöp sahalarına boşaltılacaktır. EC 'de bundan dolayı demir elektrotlar daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü çöp deponi alanlarında ağır metal kirliliği ortaya çıkabilir. EC demir elektrot kullanması halinde Al elektrot kullanıldığı sistem kadar renk açısından bir şeffaflık sağlanamamaktadır. Çok az miktarda da olsa çözülmüş demir iyonları suda renk oluşumuna yol açmaktadır.

EC süreçlerinde genellikle doğru akım (DC) ve doğru akım güç sağlayıcıları kullanılmaktadır. 1980 'li yılların başında alternatif akım kullanan EC sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Özellikle maden endüstrisinde oluşan kömür parçacıkları ve süspanse killerin kararlılığının kırılmasında alternatif akımlı EC sistemi kullanılmıştır.

20. yüzyılda atıksuların arıtımında EC sürecinin kullanım düşüncesi sınırlı iken, özellikle son 20 yıl içerisinde yaygınlığı ve etkinliği özellikle Avrupa ve Güney Amerika ülkelerinde kullanımının arttığını görmekteyiz. Kağıt ve kağıt

hamuru endüstrisinde, maden ve metal süreç endüstrisinde kullanılmıştır. Ayrıca gıda, yağ, boya, maden sanayi atıksuları, organik madde içeren sızıntı suları, lokanta, flor giderimi, tekstil, sentetik deterjan ve maden üretim işlemleri atıksularının arıtımında kullanılır.

EC 'de anot olarak çözünen demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünerek çözeltiliye  $Al^{3+}$  ve  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünen  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_2$  ve  $Fe(OH)_3$  gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal hidroksit parçacıkların adsorbsiyon özellikleri çok yüksektir.

EC sürecinin daha iyi anlaşılması amacıyla voltaj ve diğer parametreler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Model sabitleri tespit edilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar; su pH 'sı ve akış hızının geniş bir ölçekte EC voltajı üzerine çok az etkisinin olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan elektrotlar arası mesafe, iletkenlik, akım yoğunluğu ve elektrot yüzeyinin durumuna birinci derecede bağlı olduğu sonucuna varılmıştır [16].

### **Elektrokoagülasyon yöntemi ile ilgili örnek uygulamalar**

Meyvesuyu sanayi atıksularının elektrokimyasal olarak arıtılmasının araştırılması ile ilgili bir tez çalışmasında Ön deneyler sonucunda kullanılan karbon, paslanmaz çelik ve demir elektrotların tamamının meyve suyu atıksuyunun arıtılmasında işlevli olduğu ortaya çıkmıştır. KOİ giderimi diğer sınıanan sanayi tipi elektrotlara göre daha yüksek olan demir elektrot deneyler aşamasında kullanılmıştır.

Atıksu, öncelikle KOİ olmak üzere bulanıklık ve pH değerleri esas alınarak meyve suyu fabrikasından temin edilen orijinal atıksuyun karakterizasyona uygun olarak piyasada satılan kayısı sularının saf su ile seyreltilmesi ile model atıksu elde edilmiştir.

Yüzey-cevap istatistiksel yöntemini kullanan Design-Expert 6.0 bilgisayar programı aracılığıyla optimizasyon için 20 deneylik merkezi bir set planlanmış ve bu deneyler sonucunda optimum koşullar ve ayrıca maksimum arıtım verimleri tespit edilmiştir. Buna göre optimum koşullar 25 °C 'de % 100 kirlilik yükü

(orijinal atıksu kirliliği), 12 V potansiyel farkı ve 5,95 g/L elektrolit derişimi olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda teorik arıtım verimi %28.578, pratik olarak ise % 25,43 olarak gerçekleşmektedir. Deneyle esnasında ulaşılan en yüksek arıtım verimi ise % 64,50 'dir (25 °C, % 100 kirlilik yükü, 12 V potansiyel farkı ve 50 g/L elektrolit derişimi).

Çalışmada optimum reaksiyon koşullarındaki (25 °C 'de orijinal atıksu kirliliği olan % 100 kirlilik yükü, 12 V potansiyel farkı ve 5,95 g/L elektrolit derişimi) sistemin enerji giderimi deneysel olarak 33.64 kWh/kgKOİ giderim olarak hesaplanmıştır [14].

Boyama ve apre imalatı atıksularından demir elektrotlar ile EC süreci üzerine atıksu iletkenliği, pH, enerji tüketimi ve polielektrolit miktarı etkileri araştırılmıştır. Boyama ve apre imalathanelerinden toplanan atıksuların çoğunda iletkenlik optimum işletme aralığı içinde olduğundan dolayı iletkenliğin ayarlanmasına gerek olmadığı, atıksu pH 5-10 arasında arıtma verimini etkilemediği görülmüştür. 40 mg/L 'lik polialüminyum klorür 'ün (PAC) arıtma verimini önemli derecede arttırdığı ve enerji tüketimini %30 azalttığı tespit edilmiştir. 92,5 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda %51 civarında KOİ giderimi gerçekleştirilmiştir.

Koagüle edilen parçacıkları atıksularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorbe etmektedir. Oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Bu yöntem renk, KOİ, toplam organik karbon, askıda madde ve ağır metallerin tekstil atıksularından giderilmesinde kullanılmaktadır.

Katot olarak bakır plaka ve anot olarak ise alüminyum veya demir plaka kullanıldığı elektrokoagülasyon sistemi ile çöp sahası sızıntı suları arıtılmıştır. Çöp sahası sızıntı suları pH: 8,2-8,5, KOİ: 1127-7200 mg/L, TOC: 293-2250 mg/L ve iletkenlik: 18600-26000 µohm/cm olup %30-50 arası bir KOİ giderimi elde edilmiştir [16].

Yağ ve gres içerikli restaurant atıksuları için etkisi incelenmiştir. Elektrokoagülasyon işletme parametreleri atıksu karakterine göre 1,67-9,95 F/m<sup>3</sup> ve 30-80 A/m<sup>2</sup> alınmıştır. Alüminyum tüketimi 17,7-106,4 g/m<sup>3</sup> arasında



değişmekte ve güç gereksinimi genellikle 1,5 kWsaat/m<sup>3</sup> 'ten küçüktür. Bu çalışmada yağ ve gres gideriminde % 94 'ün üzerinde verim elde edilmiştir [19].

Toplam etkili yüzey alanı 148,5 cm<sup>2</sup> sahip üç çift demir elektrotlar kullanılarak KOİ: 80-190 mg/L, SS: 45-85 mg/L, türbidite: 7,5-18,5 NTU, iletkenlik:1150-1750, sertlik:165-185 mg/L CaCO<sub>3</sub>, alkalinite: 350-460 mg/L içeriğine sahip büyük bir kimyasal fiber tesisi atıksuları arıtılmıştır. EC ile KOİ giderimi %70-85 arasında aynı atıksu kimyasal koagülasyon ile %20-30 arası KOİ giderimi gerçekleşmiştir. EC süreç çıkış atıksuyunun iletkenlik değeri ve derişimi bir miktar artmıştır. EC süreç çıkış suları iyon değıştirici sistemkullanılarak deşarj standartları sağlanmıştır.

EC ile fosfat gideriminin çok etkili olduğu bulunmuştur. Alüminyum koagülasyonu ile fosfor gideriminden daha etkili bir giderim elde edilmiş olup bunun sebebinin EC ile oluşan komplekslerin daha etkili fosfat giderimi sağladığı ifade edilmiştir. Bipolar Al elektrotlar kullanılarak Kuzey Afrika Sahra sularından flor giderimi gerçekleştirilmiştir. EC üzerine pH, elektrotlar arası mesafe flor derişimi ve sıcaklık etkileri incelenmiştir. Oluşan Al<sup>+3</sup> iyonlarıNa<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> çözünmeyen bileşığı sekline dönüşmektedir. EC sonunda flor derişimi 0,5 mg/L 'ye düşmüştür.

Endüstriyel atıksulardan arsenik giderimi, 0,5 ve 1,25 A/dm<sup>2</sup> akım yoğunluklarında 25-100 ppm arsenik derişimde gerçekleştirilmiştir. Demir elektrotların kullanıldığı EC sisteminde asidik şartlarda FeAsO<sub>4</sub> oluştuğu yaklaşık 6 saatte giderme verimi % 95 'in üzerinde gerçekleşmiştir.

İçme suyu olarak kullanılan Norveç Oslo 'da bulunan göl suları, 10 L/dk. ve 40x30x0,3 cm dört alüminyum elektrot içeren bir pilot sistem ile arıtılmıştır. Klasik koagülasyon ve EC 'den 6 mg/L Al kullanılmakta olup, EC 'de pH ayarlamasına gerek yoktur. En iyi giderim sorunları pH: 6 'da gerçekleşmiştir. Ayrıca sülfat, iletkenlik derişiminin EC 'de artması gibi bir durumda olmadığı belirtilmiştir.

İçme sularının arıtımında etkili yeni bir süreç olarak tanımlanan EC ileayrıca maden ve çöp sızıntı atıksuları da arıtılmıştır. E-coli gideriminin oldukça iyi olduğu ifade edilmiştir. Maden sızıntı sularından kobalt 9,95 mg/L 'den 0,006

mg/L 'ye düşürülmüştür. Ayrıca sızıntı sularından ise demir 130 mg/L 'den 0,015 mg/L 'ye indirilmiştir. Atıksu akış hızı 225000 mL/dak. ' dır [16].

Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyonla arıtılabilirliğinin incelendiği bir tez çalışmasında Dispersol Red C-4G 150 boyasının elektrokoagülasyon çalışmalarında başlangıç pH 'ı 3 için %99,72 boya giderme verimi elde edilirken, pH 12 için %30 elde edilmektedir. Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotlar kullanıldığında pH 'ı etkileyen önemli iki mekanizma; katotta oluşan OH<sup>-</sup> iyonları ile pH ta artışa ve pH 9 'un üstündeki pH değerlerinde Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> üretimi için OH<sup>-</sup> iyonlarının tüketilmesi pH 'ta azalışa neden olmaktadır. Böylece reaksiyon süresi boyunca artan veya azalan bir pH aralığı söz konusu olmaktadır. Boya giderme verimi açısından alüminyumun monomerik türlerinin çökeltme aralığı pH 4-5 ve polimerik türlerinin çökeltme aralığı pH 5-6 aralığını kapsayacak pH 3-6 aralığının giderme verimi açısından en iyi pH aralığı olduğu görülmektedir. Fakat maliyetler bakımından ve atıksu pH değerine yakın olduğundan pH 6 tercih edilebilir. pH 3-6 aralığında giderimin % 99-98 olduğu belirlenmiştir.

İletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalması sonucu anodik yükseltgeme azalmakta ve boya giderme veriminde düşüş gözlenmektedir. En iyi verim 1,2-1,6 mS/cm aralığında sağlanmıştır.

Akım yoğunluğu çalışmalarında akım yoğunluğunu arttırmanın verimi arttırdığı fakat bir noktadan sonra bunun bir dengeye ulaştığı görülmüştür. 20-80 A/m<sup>2</sup> aralığında çalışıldığında %92-97 giderim verimi elde edilmekte ve toplam maliyet 0.34\$/m<sup>3</sup> olmaktadır. Akım yoğunluğunun enerji tüketimi ve işletme maliyetine etkisinden dolayı zaman denemesinde 60 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğu yeterli görülmüştür.

EC süresi için ise t = 15-25 dakika yeterli olacağı, verimin %97 civarında olduğu bulunmuştur.

Boya giderme verimi boya derişimi arttıkça düşmektedir [20].

## b) Elektrokimyasal Yükseltme

Elektrokimyasal yükseltme ilk olarak ortaya çıkan elektrokimyasal arıtım sürecidir. 19. yüzyılda siyanürün parçalanması üzerine yapılan çalışmalar ile başlamıştır. İletken çözelti ortamına iki metalik iletken yerleştirilerek doğru akım kaynağı sayesinde elektrik akımı yaratmak ve geçen akım sayesinde elektrokimyasal reaksiyonları başlatmak ve hızlandırmak bu işlemin temel prensibidir [14].

Elektrokimyasal yükseltme yönteminde ana prensip çözünmeyen elektrotlar (Ti, Ru, Pt, paslanmaz çelik vb.) kullanılarak elektrotlar vasıtasıyla çıkan gazlar ( $O_2$  ve  $H_2$ ) ile istenilen yükseltgemenin sağlanmasıdır. Bu işlemle birlikte birçok madde yükseltmeye uğratılabilirken biyolojik olarak parçalanabilirliği zor olan bileşikler biyolojik olarak kolay parçalanabilir organik bileşiklere veya  $CO_2$  ve  $H_2O$  gibi son ürünlere dönüştürülmektedir [13].

Elektrokimyasal yükseltmede en iyi sonuçların metal oksit anotlarla alındığı belirtilmiştir.  $RuO_2$ ,  $Co_3O_4$  ve  $MnO_2$ , titanyum bazı üzerine tatbiki ile oluşturulan anodun diğer anotlara göre daha iyi katalitik aktivite göstermektedir. Bununla beraber, kurşun ve grafit anotların da çok iyi sonuçlar vermektedir [15]. Bazı anot elektrotların renk ve KOİ giderim verimleri Çizelge 4.2 'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Bazı anot elektrotların renk ve KOİ giderim sonuçları [21,22,23]

Anot materyali	Renk Giderimi (%)	KOİ Giderimi (%)	Kaynak
Ti/Pt	40	9	[21-22]
Ti/ $RuO_2$ - $TiO_2$	42	26	[21-22]
Ti/ $SnO_2$ - $SbO_5$	45	23	[21-22]
Ti/Pt- Ir	50	39	[21-22]
Ti/ $MnO_2$ - $PuO_2$	46	10	[21-22]
Ti/ $RhO_x$ - $TiO_2$	47	29	[21-22]
Ti/ $PdO$ - $Co_3O_4$	48	25	[21-22]
Ti/ $RuO_2$	99	90	[23]
Ti/Pt	99	99	[23]
Ti/Pt/Ir	99	82	[23]

## Doğrudan yükseltgeme

Birçok organik bileşiğin gideriminde uygulanan doğrudan anodik yükseltgeme elektrot yüzeyinde elektron alışverişi ile gerçekleşir. Suyun yükselgenmesiyle oluşan adsorplanmış OH<sup>·</sup> radikalleri ile organik maddenin parçalanması sağlanır.



Metal oksit, anotta (MO<sub>x</sub>)OH<sup>·</sup> radikallerinin oluşumu ve organiklerin parçalanması tepkimeleri aşağıda verilmiştir [8];



## Dolaylı yükseltgeme

Elektrooksidasyon sürecinde aktif rolü oynayan elektrot anottur. Bundan dolayı bu süreçte etkili olan parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelir. Ayrıca akım, sıcaklık, pH ve organik bileşiklerin ve diğer oksidantların difüzyon hızı da önemlidir [10].

Bu yöntem özellikle seyreltik atıksularla çalışılırken tercih edilir. Sodyum klorür ilavesi ile elektrokimyasal olarak üretilen klor veya hipoklorit kirleticilerinin dezenfeksiyonunda veya arıtımında kullanılabilir ve oluşan anot tepkimesi aşağıdaki gibidir.



Katot tepkimesi ise;



şeklindedir. Çözeltide gerçekleşen tüm tepkime,



şeklinde. Hipoklorit ve serbest klorun her ikisi de dezenfektandır ve yükseltgen özellik taşıyır [8].

Elektrooksidasyon süreçlerinde literatürde genellikle Ti/Pt-Ir, Ti/RhOx-TiO<sub>2</sub>, Ti/PdO-CO<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>/TiRuO<sub>2</sub>, Ti/Pt, PbO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub>, PbO<sub>2</sub>/Ti, SnO<sub>2</sub>, PbO<sub>2</sub>, BDD vb. anot elektrotlar kullanılmaktadır. Etkili giderim ve çamur oluşumunun çok az olması nedeniyle elektrokimyasal yöntemler arasında tercih edilen bir yöntem olarak yer almaktadır [13].

Çizelge 4.3 'te elektrooksidasyonun avantajları ve dezavantajları verilmiştir

**Çizelge 4.3.** Elektrooksidasyon avantajları ve dezavantajları [12]

Avantajları	Dezavantajları
Temiz reaktif kullanımı	Yüksek elektrik tüketimi
Kimyasal madde ilavesi yok (belki biraz)	Yüksek işletme maliyetleri
Basit donanım	Klorlu organik ya da başka yan ürünlerin oluşması ihtimali
Kolay kullanım	Atıksu iletken olmalı→Bir elektrolit ilavesi gerekebilir
Kısa alkoyma süresi	Elektrot kirlenmesi
Sağlamlık, hızlı bir şekilde başlatıp kapatabilme	Elektrotların düzenli olarak değiştirilmesi
Çok yönlülük, pek çok kirletici maddeyi ve miktarları ele alma	
Düşük sıcaklık ve basınçta çalışabilme	
Kolay otomatik hale getirebilme	
Yenilenebilir enerji kullanma olanağı	
Yükseltgemeye dayanıklı organik birikim yok	

### c) Elektroflotasyon

Atıksu arıtımında kullanım alanı bulan bir diğer elektrokimyasal arıtım yöntemi ise elektroflotasyondur. Genellikle tek başına değil de bir diğer

elektrokimyasal süreçle birlikte kullanılan bir yöntemdir [13]. Elektroflotasyon; suyun elektroliziyle beraber oluşan oksijen ve hidrojen gazı kabarcıklarının kirlilikleri ve küçük parçacıkları toplayarak yüzeye çıkarması sürecidir. Katotta ve anotta gerçekleşen olaylar elektrokimyasal olarak hidrojen ve oksijen gazı üretimidir. İlk olarak değerli minerallerin eldesi için üretilmiş bir yöntemdir [14]. Bu işlemin yapıldığı reaktörlere elektroflotatör adı verilmektedir [15]. Elektroflotasyonu etkileyen faktörler; pH, akım yoğunluğu, elektrot cinsi ve elektrotların konumudur. Bu tekniğin diğer flotasyon tekniklerine üstün yanı çok küçük ve düzgün gaz kabarcıklarının elde edilmesidir. Olabildiğince küçük kabarcıklar yüzey alanını artırmakta ve kirliliğin veya elde edilmesi hedeflenen materyallerin toplanıp yüzdürülmesini daha kolay ve verimli hale getirebilmektedir [14]. Elektroflotasyonda oluşan gaz kabarcıklarının boyutları çok küçük olmasına rağmen çok yüksek dispersiyona sahiptir. Bu süreçte gaz kabarcıklarının rolü çok büyüktür. Bu nedenle gaz kabarcıklarının optimum yoğunluğunu belirlemek amacıyla etkili olan parametreler üzerinde optimizasyon çalışmaları yapılması gerekir [13].

Elektrotlar ve bunların doğru olarak kullanılması elektroflotasyon tekniğinin en kritik basamağıdır. Demir, alüminyum ve paslanmaz çelik ucuz olmalarına karşın anodik olarak çözünür olduklarından elektroflotasyon yönteminde tercih edilmez. Anodik olarak çözünmeyen kurşun oksit ve grafit elektrotlar en yaygın kullanılan elektrotlardır. Ancak yüksek potansiyel değerleri ve dayanıklılıklarının düşük olması ucuz olmalarına karşın bu elektrotların yerine farklı elektrotların kullanılmasına neden olmuştur. Ayrıca kurşun oksit elektrotlar ortama yüksek kurşun kirliliği de vermektedir. Elektrokimyasal olarak en yüksek verim platin elektrotta sağlanmasına karşın platinin yüksek maliyeti onu sanayi uygulamalarında kullanılamaz kılmaktadır. Son yıllarda geliştirilen ve yüksek verimleri saptanan  $TiO_2-RuO_2$  ve  $Ti/IrOx-Sb_2O_5-SnO_2$  anotları sanayide elektroflotasyon uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan kurşun oksit ve grafit elektrotların yerini almaya başlamıştır. Petrol ve düşük yoğunluklu askıda kalabilen maddelerin ayrıştırılmasında elektroflotasyon en verimli elektrokimyasal ayrıştırma yöntemidir [14].

Elektroflotasyonda elektrotlarda oluşan reaksiyonlar (4.19) ve (4.20) reaksiyonlarında görülmektedir.



Atıksulardan elektroflotasyon yöntemiyle giderilen kirleticiler daha çok yağ ve emülsiyonlar gibi düşük yoğunluklu maddeler olabildiği gibi askıda katı maddeler de olabilmekte ve özellikle bazı tesislerde problem oluşturan giderilemeyen KOİ 'nin bir kısmı da bu yöntemle giderilebilmektedir. Bu gibi yararlı özelliklerinden dolayı elektroflotasyon çeşitli sanayilerde kullanılmaktadır [13].

#### **d) Elektroflokülasyon**

Elektroflokülasyon, elektroflotasyon ve elektrolitik çöktürmenin bir arada gerçekleştirildiği bir arıtım sürecidir. Anodik çözünmeyle oluşan metal iyonları ile katotta oluşan hidrojen gazının birleşmesi ile metal hidroksit kompleksleri oluşturulur ve bu kompleksler elektroflotasyon yönteminde olduğu gibi kirlilikleri toplayarak yüzeye çıkar.

Elektroflokülasyon yönteminde yaygın olarak, katotta paslanmaz çelik ve anotta ise alüminyum veya demir elektrotlar kullanılır. Elektrokoagülasyon yönteminin başarıyla uygulandığı birçok alanda elektroflokülasyon yönteminin de işlevli olacağını önermek kuramsal olarak doğru bir yaklaşımdır.

#### **e) Elektrostatik çöktürme**

Elektrostatik çöktürme yönteminde gazlar yüksek potansiyel farkının uygulandığı bir baca içerisinden geçirilir, gaz içinde bulunan kirlilikler elektriksel olarak yüklenerek baca duvarına yapışır ve periyodik olarak baca duvarından dibe çöktürülen bu kirlilikler gazın temizlenmesini sağlar. Bu yöntemle gazlar

içerisinde bulunan kirlilik özelliği taşıyan katı ve sıvı taneciklerin % 99 oranında giderimi sağlanmıştır.

#### **f) Elektrokimyasal sterilizasyon**

Elektrokimyasal sterilizasyon; iletkenliği yüksek çözeltilerin atıklara eklenmesi vedaha sonra atıksuların belirli süre elektrolizi işlemidir. Genellikle denize yakın kentlerde evsel atıkların maliyeti olmayan deniz atıksuyu ile karıştırılarak elektrolize edilerek denize deşarj edilmesinde kullanılır. Araştırmalarda 18-20 dakikalık bir elektroliz sonucunda % 99,5 üzerinde koliform yıkımı tespit edilmiştir.

#### **g) Elektrofiltrasyon**

Elektrofiltrasyon yöntemi filtrasyon sırasında uygulanan potansiyel farkı vasıtasıyla parçacıkların filtrelerden uzak tutulması işlemidir. Uygulanmasının temel nedeni filtrelerin verimini artırmak ve ömürlerini uzatmaktır. Bu yöntem diğer elektrokimyasal yöntemlerin yanında ilave bir metot olarak kullanılır.Sulu boya çamuru, kanalizasyon, liman sanayi ve kağıt sanayi atıksularının arıtımında kullanımları mevcuttur.

#### **h) Elektrodializ**

Elektrodializ yöntemi seçimli yarı geçirgen zarların kullanılması yoluyla elektrokimyasal olarak tetiklenen ve uygulanan potansiyel farkı yoluyla oluşan iyonların zar vasıtasıyla toplanması ve suyun arıtılması sürecidir. Elektrodializ metodu yaygın olarak deniz suyu ve daha farklı kirli sulardan içme suyu elde edilmesinde kullanılır. Ancak en önemli dezavantajı içme suyu üretim sürecinin çok sayıda aşamasından biri olması ve bu sistemin başlı başına yüksek maliyetli bir yatırım gerektirmesidir. Bunun haricinde tekstil sanayi atıksularının arıtımı üzerine de araştırmaları mevcuttur [14].



#### 4.1.4.2. Elektrokimyasal arıtımın uygulama alanları

Elektrokimyasal arıtma, birçok farklı içerikli su ve atıksuların arıtımında test edilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Yapılan çalışmalardan örnekler ağır metal iyonları içeren maden atıksularının arıtılması, koloidal parçacıklarının elektrokoagülasyonla giderimi, korozyon ürünlerinin elektrokoagülasyonla sudan uzaklaştırılması, yağlı atıksuların elektrokoagülasyonu, çok küçük parçacıkların elektrokoagülasyonla ayırımı, deri endüstri atıksularının elektrokimyasal yöntemle arıtılması, endüstri atıksularındaki sülfürün elektrokimyasal yükseltgemesi, elektro kaplama atıksuyundan  $Cr^{+6}$  elektrokimyasal çöktürümü, tuzlu suyun ön arıtımı, sızıntı sularından çözünmüş organik maddelerinin giderimi ve içme suyunun elektrokoagülasyonu şekilde sıralanabilir. Bu çalışmalara ek olarak, poliaromatik organik bileşenleri içeren atıksuların arıtımında elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile organik ve inorganik atıksuların arıtımında başarılı bir şekilde kullanılabilirdiği üzerinde çalışılmıştır. Bir diğer çalışmada elektrokoagülasyon ve elektroredüksiyon yöntemleri kullanılarak atıksularda nitrit ve nitratın belirgin oranda gidilebileceği rapor edilmektedir [1]. Elektrokimyasal yöntemin tekstil atıksularında, Şeker pancarı atıksuyunda, nükleer atıklar, sigara endüstrisi atıksuyunda, su bazlı boya sanayi atıksularında, kanalizasyon sularında, peynir altı atıksuyunda ve çamaşırhane atıksularında kullanılabilirliği ile ilgili de birçok çalışma mevcuttur [12]. Tekstil atıksuları genellikle yüksek pH ve renk içeriği, düşük biyolojik parçalanabilirlik gibi özellikleri ile kirli atıksular arasında yer almaktadır. Elektrokimyasal arıtım sürecinin kullanımı, kaplama endüstrisi atıksularından  $Cu^{+2}$ ,  $Cr^{+6}$  ve  $Ni^{+2}$  giderimleri üzerinde elektrokoagülasyon süreci, Ti/Pt elektrotlar kullanılarak evsel atıksuyun pH ile bağlantılı olarak elektrokimyasal arıtımı gibi çalışmaları da eklemek mümkündür [1].

Elektrokimyasal arıtım yoluyla parçalandığı kanıtlanmış kirletici, ve/veya zehirleyici organik ve kimyasallar ise şu şekildedir;

- a- Sülfidler
- b- 1,4-Benzokinon

- c- Lignin, Tannik asit, Klortetrasiklin, EDTA
- d- 4-Klorofenol e- Fenol, Kresol, Katekol, Kinon, Hidrokinon, Anilin, Okzalik asit ve Amaranat
- f- Fenol
- g- EDTA
- h- Trikloroetilen
- i- Şekerler
- j- Arsenik
- k- 1,2-difeniletan [14].

## 5. MATERYAL METOD

Deneysel çalışmalarda kullanılan süt endüstrisi model atıksuyu 4 gram süt tozunu 1L saf su içinde çözerek hazırlanmıştır [24]. Deneysel alışmalar 500 mL 'lik atıksu hacimlerinde gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon çalışmalarında ayrı ayrı 100 'er cm<sup>2</sup> toplam yüzey alanlı 6 adet paralel plaka şeklindeki çözünebilir demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Elektrokimyasal yükseltgeme çalışmalarında ise 40 'ar cm<sup>2</sup> toplam yüzey alanlı 2 adet paralel plaka şeklindeki çözünebilir elmas elektrotlar kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan süt endüstrisi model atıksuyunun başlangıç KOİ değeri ortalama 5000 mg/L olup, atıksu elektriksel iletkenliği 137,1 µS/cm, bulanıklığı 4104 NTU ve pH 'ı 7,35-8,40 civarındadır.

### 5.1. Deney Düzeneği

Deneysel alışma düzeneği şekil 5.1 'de görülmektedir. alışmalar sabit akım altında gerçekleştirilmiş, akım yoğunluğu, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH, destek elektrolit ve polielektrolit derişimleri gibi parametrelerin arıtma verimine etkileri incelenmiştir.



şekil 5.1. Deney düzeneği

Deney düzeneği 1 adet güç kaynağı, 1 adet 500 mL 'lik beher, 100 cm<sup>2</sup> toplam yüzey alanlı paralel plakalardan oluşan alüminyum ve demir elektrotları, 40 cm<sup>2</sup> toplam yüzey alanlı paralel plakalardan oluşan elmas elektrotları, 1 adet manyetik karıştırıcı ve 1 adet kutup değiştiriciden oluşmaktadır.

4 gram süt tozunu 1L saf su içinde çözerek hazırlanan süt endüstrisi model atıksu 500 mL behere alınır. İçerisine belirlenen miktarlarda destek elektrolit eklenir. Daha sonra kutup değiştirici, güç kaynağına bağlanır. 100 cm<sup>2</sup> toplam yüzey alanlı paralel plakalar behere yerleştirilir ve en son olarak kutup değiştirici plakalara bağlanarak düzenek tamamlanmış olur.

Hazırlanan bu düzenekte güç kaynağı açılıp akım yoğunluğu belirlenen değerlere ayarlanarak arıtma işlemi başlatılmıştır. Gerilimin zamanla değişimi çalışmalar sırasında izlenmiştir. Belirli zaman aralıklarında (1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40 ve 50. dk.) reaktörden numune alınmıştır. Bu numuneler 5 dakika boyunca 7000 devir/dakika hızındaki santrifüjden geçirilerek, KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir.

## 5.2. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)

### 5.2.1. Kullanılan reaktifler

#### a. Potasyum dikromat çözeltisi

(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> = 0,040 mol/L): Civa (II) sülfatın (HgSO<sub>4</sub>) 80 g 'ı 800 mL suda çözülür. Dikkatlice 100 mL sülfirikasit (ρ = 1,84 g/mL) ilave edilir. Soğuması için beklenir. 105 °C 'da 2 saat kurutulmuş 11,768 g K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> çözeltiye ilave edilir ve çözülür. Bu çözelti, 1000 mL' lik ölçülü balona aktarılır ve ölçü çizgisine kadar su ile tamamlanır. Bu çözelti en az bir ay kararlıdır.

**b. Amonyum demir (II) sülfat, standart çözeltisi c[ ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) ] ≈ 0,12 mol/L**

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O 47 g bir miktar saf suda çözülür. Üzerine 20 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ρ= 1,84 g/mL) ilave edilir. Soğutulur ve saf suyla 1000 mL 'ye tamamlanır.

**c. Ferroin indikatör çözeltisi**

Demir (II) sülfat heptahidrattan (FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O) 0,7 g veya amonyum demir (II) sülfat heksahidrattan 1 g alınarak suda çözülür. 1,10 – fenantrolin monohidrat (C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) 'dan 1,5 gramlık kısım suya ilave edilir ve çözününceye kadar karıştırılır. Su ile 100 mL 'ye tamamlanır. Bu çözelti karanlıkta muhafaza edilirse birkaç ay kararlıdır.

**d. Gümüş sülfat - sülfirik asit çözeltisi**

Gümüş Sülfatın (Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ) 10 g 'ı 35 mL saf suya ilave edilir. Üzerine 965 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ρ = 1,84 g / mL) ilave edilir. Bir veya iki gün çözünmesi için beklenir. Çözünme karıştırılarak hızlandırılır.

**e. Sülfirik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) = 4 mol/L**

Yaklaşık 500 mL suya 220 mL sülfirikasit (ρ = 1,84 g / mL) kısımlar halinde dikkatlice ilave edilir, soğutulur ve 100 mL 'ye seyreltilir.

**5.2.2. Standart çözeltinin hazırlanması**

Potasyum hidrojen ftalat 'ın 105 °C 'de kurutulmuş 0,4251 g 'ı suda çözünür ve 1000 mL 'ya suyla tamamlanır. Bu çözeltinin teorik KOİ değeri, 500 mg/L 'dir. Bu çözelti yaklaşık 4 °C 'de muhafaza edildiğinde en az bir hafta kararlıdır [25].

### 5.2.3. Deney süreci

Numuneler kirlilik oranına göre seyreltilir ve seyreltilen numuneden KOİ şişelerine 1 mL alınır. Bütün numunelerin üzerine 0,5 ml potasyum dikromat çözeltisi ilave edilir. 1,5 mL sülfürik asit - gümüş sülfat çözeltisi yavaşça ilave edilir. Aynı işlemler, kör için ve standard çözelti için de yapılır. Şişeler KOİ reaktörüne yerleştirilerek sıcaklık 150 °C 'ye ve zaman 2 saate ayarlanır. Bu sürenin sonunda, KOİ şişeleri soğutularak erlenlere boşaltılır. Üzerlerine 4,5 mL saf su ilave edilir. Daha sonra 1-2 damla Ferroin indikatör çözeltisi ilave edilerek amonyum demir (II) sülfat çözeltisi ile renk mavi-yeşil 'den, kırmızı-kahverengi' ye dönene kadar titre edilir.



Şekil 5.2. KOİ reaktörü



Şekil 5.3. KOİ tüpleri

#### 5.2.4. Hesaplama

$$KOİ \text{ (mg O}_2\text{/L)} = \frac{8000.C.(V_1 - V_2)}{V} \quad (5.1)$$

Burada;

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

$V_0$  =Deney numunesinin hacmi(mL)

$V_1$  = Tanık deneyde titrasyonda harcanan amonyum demir (II) sülfatın hacmi (mL)

$V_2$  = Deney çözeltilisinin titrasyonunda harcanan amonyum demir(II)sülfatın hacmi (mL)

8000 = Sonucu mg O<sub>2</sub>/L cinsinden ifade edebilmek için dönüştürme faktörü 'dür.

#### C 'nin hesabı;

Potasyum dikromat çözeltilisinin 10 mL 'si H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>çözeltilisi 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 ağıdaki bağıntı ile bulunur.

$$C = \frac{10.0 \times 0.040 \times 6}{V} = \frac{2.4}{V} \quad (5.2)$$

Burada;

V: Kullanılan amonyum demir (II) sülfat çözeltilisinin hacmi, mL 'dir [25].

#### KOİ % giderim;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(KOİ)_0 - (KOİ)_t}{(KOİ)_0} \times 100 \quad (5.3)$$



$(KOl)_0 = \text{Başlangıç derişimi (mg/L)}$

$(KOl)_t = \text{Son derişim (mg/L)}$

**Enerji tüketimi;**

$$\text{Enerji tüketimi (kWh/m}^3\text{)} = \frac{I.V.t}{\vartheta_{\text{çözelti}}} \quad (5.4)$$

$I = \text{akım (A)}$

$V = \text{gerilim (volt)}$

$t = \text{saat}$

$\vartheta_{\text{çözelti}} = \text{çözelti hacmi (L)}$



## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 6.1. Demir Elektrotları Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda demir elektrotları ile farklı akım yoğunlukları (10, 15, 20, 25,30 ve 35 mA/cm<sup>2</sup>), farklı destek elektrolit derişimleri (1, 3,5,7 ve 10 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> derişimleri (1000,2000,3000 ve 4000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve farklı pHdeğerleri (pH = 4,06, 6,08 ve 10,02) ile çalışılmıştır.

Doğal pH 'ta I=1A, i=10 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.1 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 74 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.1.** I=1A, i=10 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,4	5869	0,000	0,000
1	10,3	5217	11,111	0,343
3	9,0	3000	48,889	0,943
5	8,5	1847	68,518	1,509
10	8,1	2391	59,259	2,859
15	7,4	2065	64,815	4,092
20	7,9	2065	64,815	5,408
30	7,6	1739	70,370	6,674
40	7,3	1521	74,074	9,107
50	7,3	1521	74,074	11,540

Doğal pH 'ta I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.2 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 78 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.2.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,5	6956	0,000	0,000
1	14,1	5652	18,750	0,705
3	13,0	4565	34,375	2,005
5	13,5	2174	68,750	3,355
10	13,4	2174	68,750	6,705
15	12,4	1956	71,875	9,805
20	13,1	1522	78,125	13,080
30	14,1	1739	75,000	20,130
40	14,5	1848	73,437	27,380
50	12,2	1522	78,125	33,480

Doğal pH 'ta  $I=2$  A,  $i=20$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.3 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 71 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.3.**  $I=2$  A,  $i=20$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,3	5476	0,000	0,000
1	14,6	5238	4,3478	0,973
3	14,2	4714	13,913	2,866
5	15,0	2261	58,695	4,866
10	14,1	2142	60,869	9,566
15	14,0	1904	65,217	14,233
20	14,5	1547	71,739	19,066
30	15,3	1904	65,217	29,266
40	14,8	1785	67,391	39,133
50	13,7	1666	69,565	48,266

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.4 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 67,5 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.4.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	20,5	4347	0,000	0,000
1	18,2	3043	30,000	1,517
3	17,5	3000	31,000	4,433
5	18,5	1956	55,000	7,516
10	17,2	1956	55,000	14,683
15	18,1	1739	60,000	22,225
30	14,2	1630	62,500	41,142
40	14,0	1413	67,500	52,808
50	13,7	1521	65,000	64,225

Doğal pH 'ta  $I=3$  A,  $i=30$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.5 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 84 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

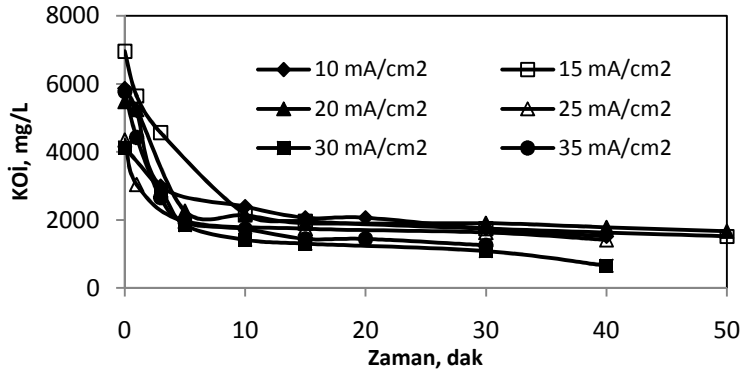
**Çizelge 6.5.**  $I=3$  A,  $i=30$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	23,4	4130	0,000	0,000
3	20,6	2869	30,526	6,180
5	21,1	1847	55,263	10,400
10	19,3	1413	65,789	20,050
15	17,1	1304	68,421	28,600
20	16,5	1304	68,421	36,850
30	15,7	1086	73,684	52,550
40	14,2	652	84,211	66,750
50	14,0	760	81,579	80,750

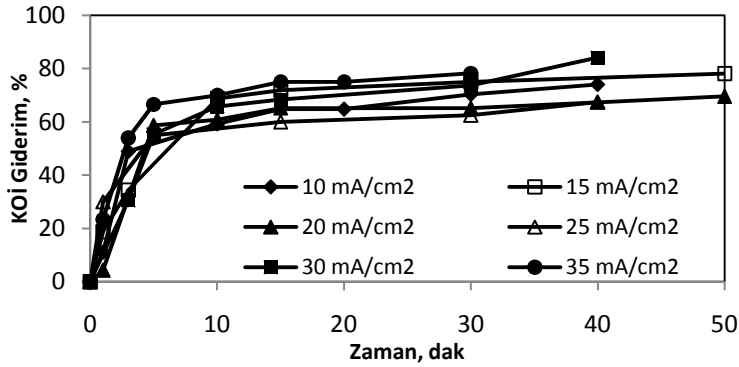
Doğal pH 'ta  $I=3,5$  A,  $i=35$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.6 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 78 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.6.  $I=3,5$  A,  $i=35$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	24,2	5769	0,000	0,000
1	23,5	4423	23,333	2,742
3	24,7	2653	54,000	8,505
5	23,6	1923	66,666	14,012
10	21,4	1730	70,000	26,495
15	19,5	1442	75,000	37,870
20	18,3	1442	75,000	48,545
30	15,6	1250	78,333	66,745
40	16,2	1442	75,000	85,645
50	15,2	1250	78,333	103,378

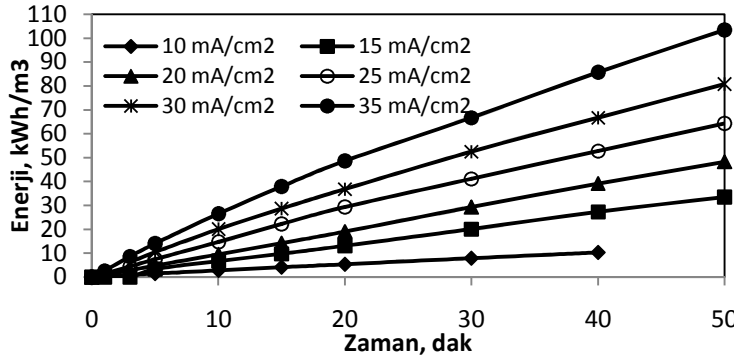


Şekil 6.1. KOİ 'nin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.2. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 'de  $i=30 \text{ mA/cm}^2$  de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 84 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Akım yoğunluğu uygulanan gerilimle yakından ilgilidir. Yüksek akım yoğunlukları ile çalışmak için elektrokimyasal reaktöre daha yüksek gerilim uygulanması gerekmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimi Şekil 6.3 'de görüldüğü üzere akım yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artış gösterecek şekilde değişmektedir

Doğal pH 'ta  $I=1,5\text{A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.7 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 75 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.7.  $I=1,5 \text{ A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$ , 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	21,0	5500	0,000	0,000
1	17,8	5000	9,091	0,890
5	21,3	3375	38,636	5,150
10	23,0	2125	61,363	10,900
15	26,8	2250	59,091	17,600
20	26,5	2125	61,363	24,225
30	20,6	2000	63,636	34,525
40	18,5	1625	70,454	43,775
50	13,6	1375	75,000	50,575

Doğal pH 'ta  $I=1,5A$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve  $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.8 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 67 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.8.**  $I=1,5 \text{ A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $5 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal,  $V= 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	9,2	5476	0,000	0,000
3	9,6	4857	11,304	1,440
5	9,9	2380	56,521	2,430
10	9,7	2500	54,348	4,855
15	10,8	2262	58,695	7,555
20	11,2	2023	63,043	10,355
30	13,0	2023	63,043	16,855
40	14,5	1904	65,217	24,105
50	14,8	1785	67,391	31,505

Doğal pH 'ta  $I=1,5A$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve  $7 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.9 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 76 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.9.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

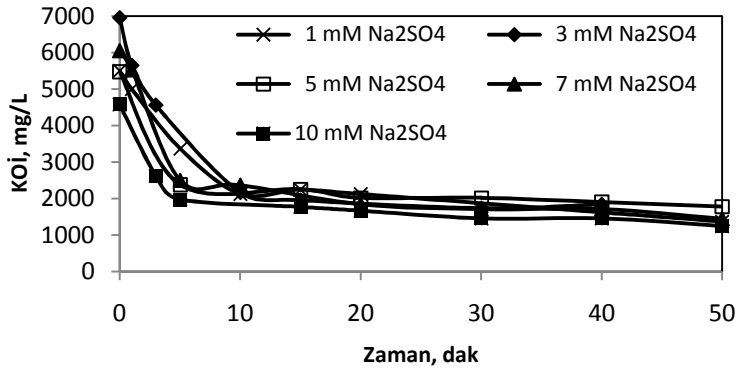
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	9,3	6052	0,000	0,000
1	8,4	5526	8,695	0,420
3	8,9	4894	19,131	1,310
5	8,6	2500	58,695	2,170
10	9,0	2368	60,869	4,420
15	8,7	2236	63,043	6,595
20	9,3	1842	69,565	8,920
30	10,2	1710	71,740	14,020
40	11,0	1710	71,740	19,520
50	12,1	1447	76,087	25,570

Doğal pH 'ta  $I=1,5$ A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup> ve 10 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.10 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 72 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

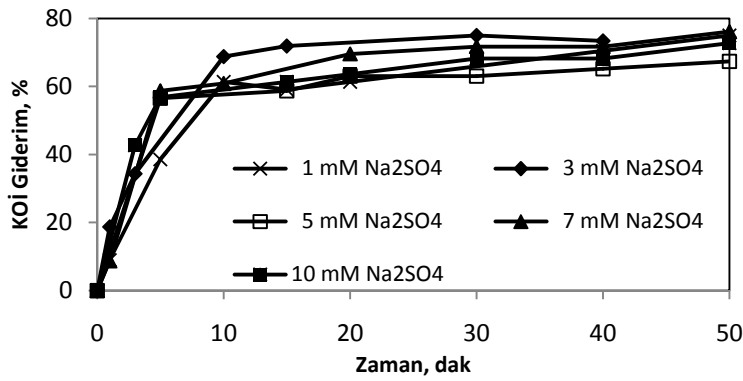
**Çizelge 6.10.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 10 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	7,3	4583	0,000	0,000
1	6,6	4583	0,000	0,330
3	7,1	2625	42,728	1,040
5	7,1	1979	56,818	1,750
10	7,3	2291	50,000	3,575
15	7,5	1770	61,363	5,450
20	7,7	1666	63,636	7,375
30	7,9	1458	68,182	11,325
40	8,5	1458	68,182	15,575
50	8,9	1250	72,723	20,025



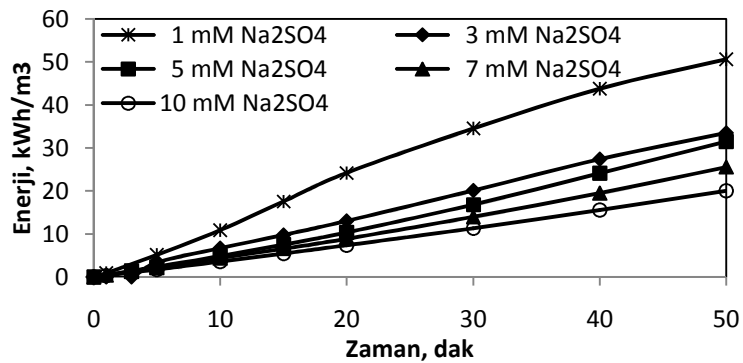


Şekil 6.4. KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.5. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.4 ve Şekil 6.5 'te 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta en yüksek arıtma veriminin % 78 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.6 'da görüldüğü üzere en çok 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolitle yapılan çalışmada gerçekleşmiştir.

Diğer parametreler en iyi şartlar olarak belirlenen  $I=1,5A$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri sabit tutularak gözlemlenmiştir.

Doğal pH 'ta  $1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$ ,  $I=1,5A$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.11 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 75 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.11.**  $I=1,5 \text{ A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ ,  $1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$ , pH doğal,  $V= 500 \text{ mL}$

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,8	4074	0,000	0,000
3	12,8	3555	12,727	1,920
5	12,6	2500	38,636	3,180
10	12,0	1574	61,363	6,180
15	10,3	1574	61,363	8,755
20	9,3	1666	59,091	11,080
30	10,8	1481	63,636	16,480
40	10,5	1203	70,454	21,730
50	9,4	1018	75,000	26,430

Doğal pH 'ta  $2000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2$ ,  $I=1,5A$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$  ve  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.12 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 75 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.12.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,0	6086	0,000	0,000
1	13,2	4782	21,428	0,660
3	13,0	2869	52,857	1,960
5	12,9	2608	57,142	3,250
10	11,5	2065	66,071	6,125
15	10,7	1847	69,642	8,800
20	10,8	1739	71,428	11,500
30	9,2	1739	71,428	16,100
40	9,0	1521	75,000	20,600

Doğal pH 'ta 3000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,  $I=1,5$ A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.13 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 68 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

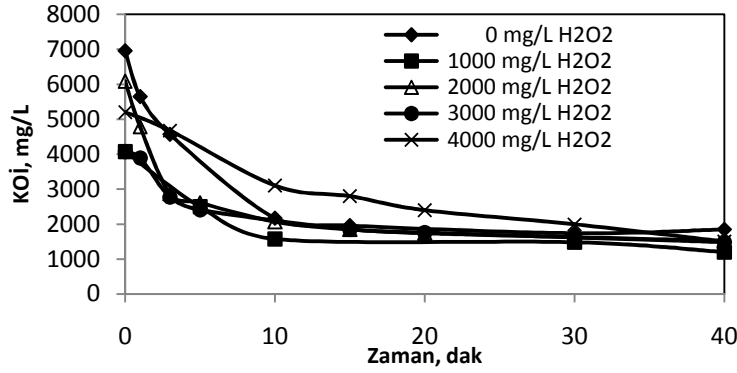
**Çizelge 6.13.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	14,0	4074	0,000	0,000
1	13,7	3888	4,545	0,685
3	13,5	2777	31,818	2,035
5	12,6	2407	40,909	3,295
10	11,5	2407	40,909	6,170
15	11,2	1851	54,545	8,970
20	11,0	1759	56,818	11,720
30	10,5	1388	65,909	16,970
40	9,3	1481	63,636	21,620
50	8,7	1296	68,181	25,970

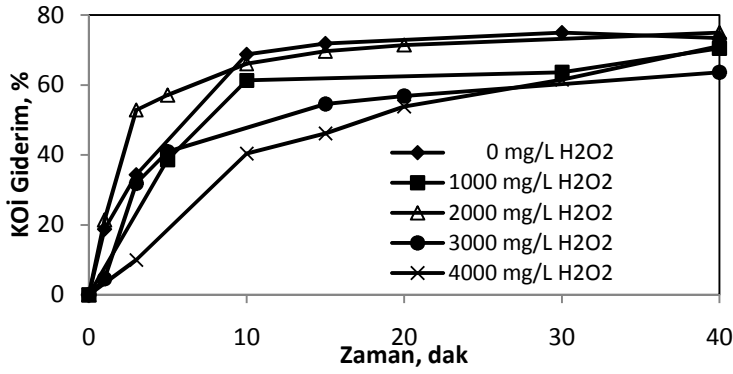
Doğal pH 'ta 4000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, I=1,5A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.14 'de verilmiştir. Çalışmada % 73 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.14.** I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 4000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,0	5200	0,000	0,000
3	13,1	4680	10,000	1,965
10	13,6	3100	40,384	6,725
15	12,5	2800	46,153	9,850
20	12,3	2400	53,846	12,925
30	10,4	2000	61,538	18,125
40	9,8	1500	71,153	23,025
50	9,7	1400	73,077	27,875

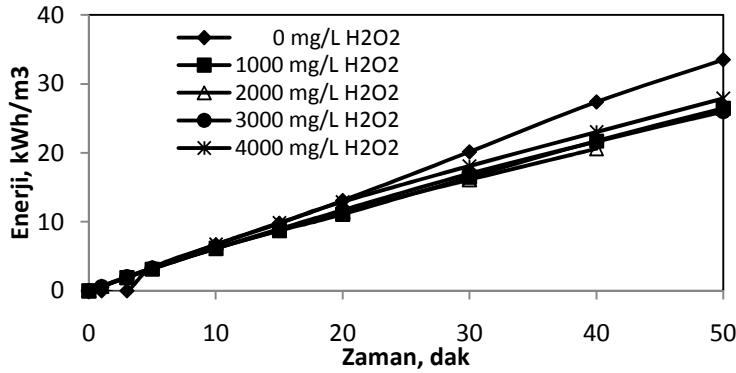


**Şekil 6.7.** KOİ 'nin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.8. KOİ gideriminin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8' de 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'siz yapılan çalışma ile 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'te yapılan çalışmanın arıtım verimleri birbirine yakın olup, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'siz çalışmanın veriminin % 78 olduğu görülmektedir.



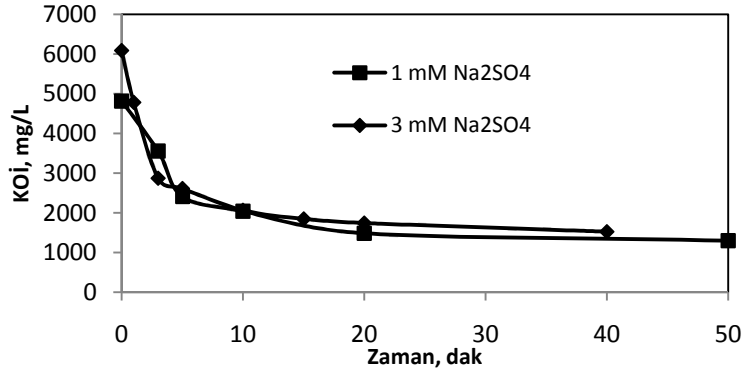
Şekil 6.9. Enerji tüketiminin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.9 'da görüldüğü üzere H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'siz 15 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolitle yapılan çalışmada en yüksek enerji tüketimi gerçekleşmiştir.

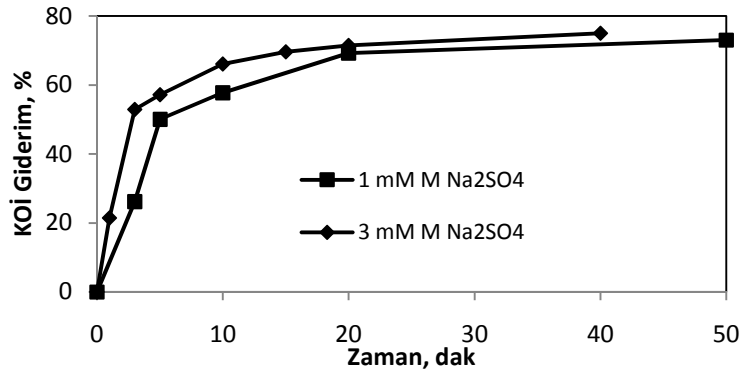
Doğal pH 'ta 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, I=1,5A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.15 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 73 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.15.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	22,7	4814	0,000	0,000
3	21,9	3555	26,153	3,285
5	22,2	2407	50,000	5,505
10	20,4	2037	57,692	10,605
15	18,3	2037	57,692	15,180
30	11,8	1574	67,307	24,030
40	10,1	1481	69,231	29,080
50	10,0	1296	73,077	34,080

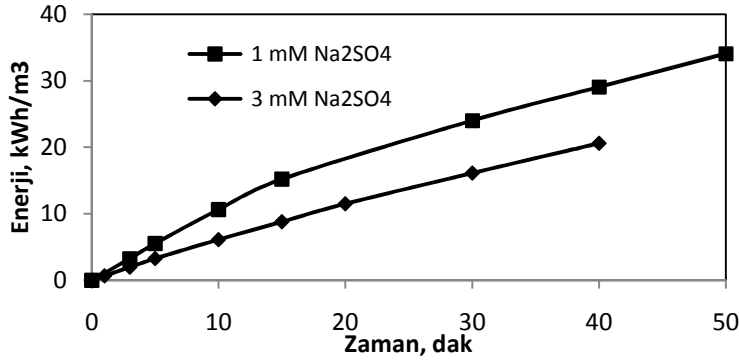


**Şekil 6.10.** KOİ 'nin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL)



**Şekil 6.11.** KOİ gideriminin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 'de 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'ta 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta en yüksek arıtma veriminin % 75 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12. Enerji tüketiminin destek elektrolit ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.12 'de görüldüğü üzere en yüksek 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 15 mA/cm<sup>2</sup> ve 1 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile yapılan çalışmada gerçekleşmiştir.

pH = 4,06, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, I=1,5A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.16 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 78 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.16. I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH =4,06, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	13,8	5227	0,000	0,000
1	12,5	3181	39,131	0,625
3	12,2	2181	58,261	1,845
5	13,1	1931	63,043	3,155
10	11,5	1590	69,565	6,030
15	10,7	1477	71,739	8,705
20	10,6	1704	67,391	11,355
30	8,1	1477	71,739	15,405
40	9,0	1363	73,913	19,905
50	8,6	1136	78,261	24,205

pH = 6,08, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, I=1,5A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.17 'de verilmiştir. Çalışmada % 65 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.17.** I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/ L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH = 6,08, V= 500 mL

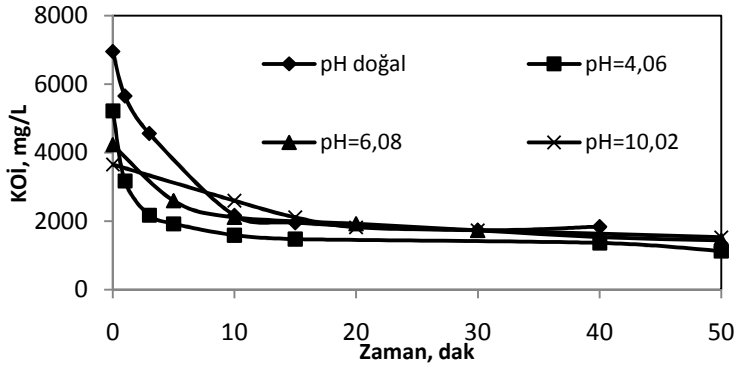
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	14,4	4230	0,000	0,000
3	13,1	3807	10,000	1,965
5	13,7	2596	38,636	3,335
10	13,4	2115	50,000	6,685
20	11,3	1923	54,545	12,335
30	9,6	1730	59,091	17,135
40	9,4	1538	63,636	21,835
50	9,8	1442	65,909	26,735

pH = 10,02, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, I=1,5A, i=15 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.18 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 57 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

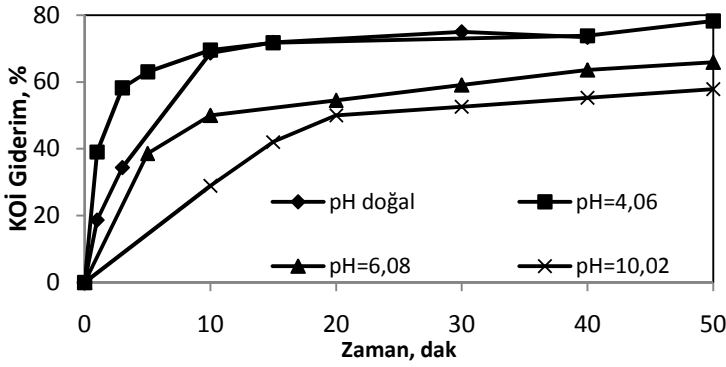


**Çizelge 6.18.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pH= 10,02, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	16,3	3653	0,000	0,000
10	13,3	2596	28,947	6,650
15	11,8	2115	42,105	9,600
20	11,2	1826	50,000	12,400
30	10,4	1730	52,631	17,600
40	10,1	1634	55,263	22,650
50	9,7	1538	57,894	27,500

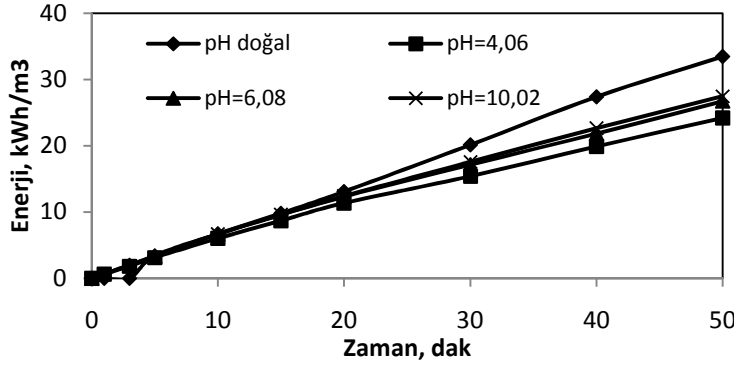


**Şekil 6.13.** KOİ 'nin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve pH ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, V= 500 mL)



**Şekil 6.14.** KOİ gideriminin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve pH ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 'de en yüksek arıtma veriminin hem 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta hem de 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH= 4,06 parametrelerinde aynı ve yaklaşık % 78 olduğu görülmektedir.



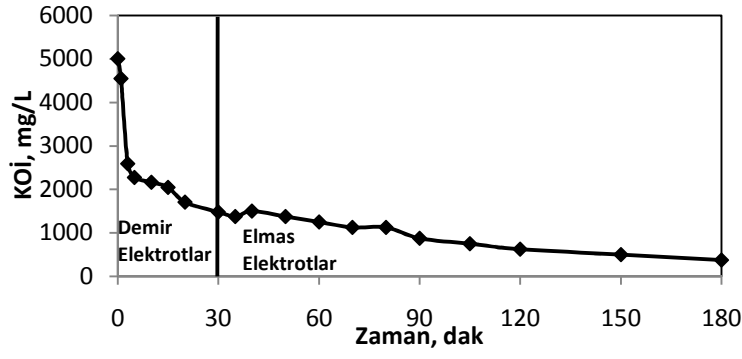
Şekil 6.15. Enerji tüketiminin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve pH ile değişimi (I=1,5 A, i=15 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2000 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.15 'de görüldüğü üzere en yüksek H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 'siz ve pH ayarlaması yapılmadan 15 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, destek elektrolitle yapılan çalışmada gerçekleşmiştir.

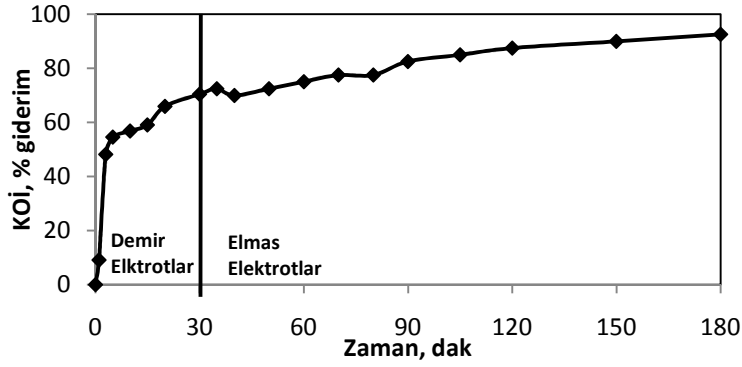
Önceki çalışmalarda, en iyi şartlar olarak belirlenen; 1,5 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit derişiminde 30 dakika boyunca demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon işlemi uygulanmıştır. Ardından elde ettiğimiz örnek ile elmas elektrot kullanılarak, 75 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 150 dakika sürede elektrokimyasal yükseltgeme gerçekleştirildiğinde Çizelge 6.48, Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 'de görüldüğü gibi elektrokoagülasyon sonucu arıtım verimi % 70 iken elektrokimyasal yükseltgeme ile arıtım verimi % 92,5 'e kadar çıkmıştır.

**Çizelge 6.19.** Demir elektrotlarla 30 dakika elektrokoagülasyon ve elmas elektrotlarla 150 dakika elektrokimyasal yükseltgeme sonun elde edilen deneysel çalışma sonuçları.  
(Elektrokoagülasyonda  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; Elektrokimyasal yükseltgemedede  $I=3$ A,  $i=75$  mA/cm<sup>2</sup>)

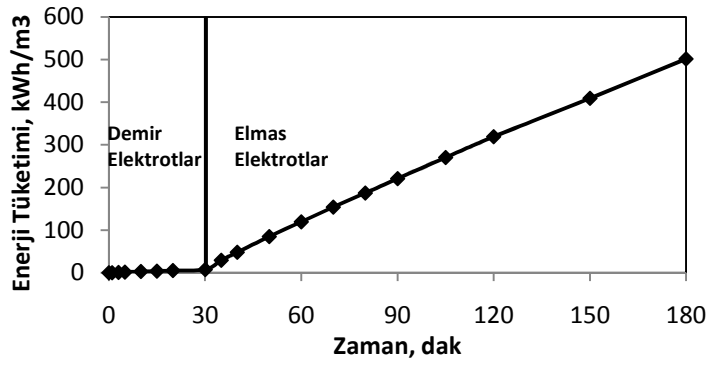
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	5,7	5000,000	0,000	0,000
1	5,5	4545,454	9,091	0,275
3	5,4	2590,900	48,182	0,815
5	5,4	2272,723	54,545	1,355
10	5,3	2159,091	56,820	2,680
15	4,9	2045,454	59,091	3,905
20	4,8	1704,545	65,910	5,105
30	4,8	1477,272	70,454	7,505
35	21,8	1375,000	72,500	29,305
40	19,1	1500,000	70,000	48,405
50	18,3	1375,000	72,500	85,005
60	17,2	1250,000	75,000	119,405
70	17,1	1125,000	77,500	153,605
80	16,8	1125,000	77,500	187,205
90	16,7	875,000	82,500	220,605
105	16,5	750,000	85,000	270,105
120	16,2	625,000	87,500	318,705
150	15,1	500,000	90,000	409,305
180	15,4	375,000	92,500	501,705



Şekil 6.16. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) KOİ'nin zaman ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)



Şekil 6.17. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) KOİ gideriminin zaman ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)



Şekil 6.18. Hibrit sistemde (Demir elektrot -Elmas elektrot) enerji tüketiminin zaman ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

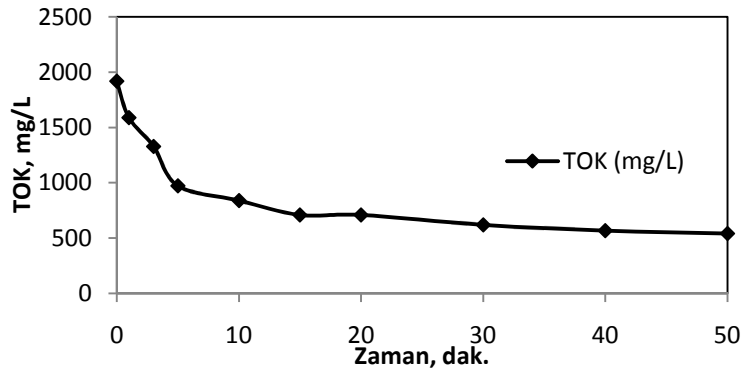
Şekil 6.18 'de elmas elektrotları ile elektrokimyasal yükseltgeme işleminde demir elektrotları ile elektrokoagülasyondan daha fazla enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

Demir elektrotları ile elektrokimyasal arıtım çalışmalarında TOK miktarları da tayin edilmiştir. Çalışmada Elementar Liqui TOC cihazı kullanılmıştır.

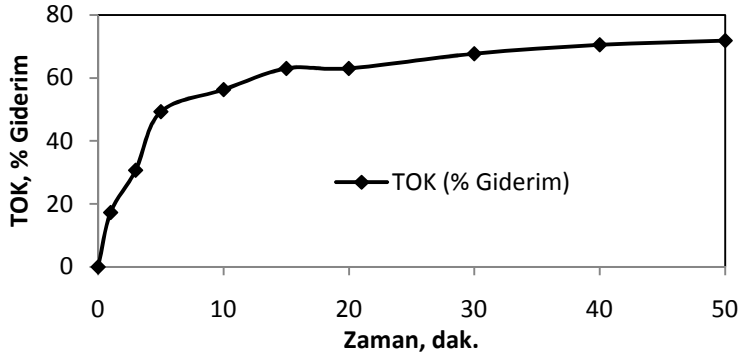
Buna göre en iyi şartlar olarak belirlenen  $1,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu ve  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$  destek elektrolit parametrelerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma esnasında alınan numunelerin TOK miktarı belirlenmiştir. Çizelge 6.20 'de elde edilen veriler görülmektedir.

**Çizelge 6.20.**  $I=1,5 \text{ A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal,  $V= 500 \text{ mL}$

Zaman	TOK, mg/L	TOK, % Giderim
0	1920,316	0,000
1	1589,146	17,245
3	1330,182	30,731
5	973,509	49,304
10	838,456	56,337
15	709,769	63,039
20	710,220	63,015
30	620,968	67,663
40	566,586	70,495
50	540,249	71,866



**Şekil 6.19.** TOK 'nun zaman ile değişimi ( $I=1,5 \text{ A}$ ,  $i=15 \text{ mA/cm}^2$ ,  $3 \text{ mM Na}_2\text{SO}_4$ ,  $V= 500 \text{ mL}$ )



Şekil 6.20. TOK gideriminin zaman ile değişimi ( $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 19 ve Şekil 6.20 'de, en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 71 olduğu görülmektedir.

## 6.2. Alüminyum Elektrotları Kullanılarak Yapılan Deneysel Çalışmalar

Alüminyum elektrotları ile ise farklı akım yoğunlukları (10, 15, 20, 25,30 ve mA/cm<sup>2</sup>), farklı destek elektrolit derişimleri (3,5 ve 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile 3,5 ve 7 mM NaNO<sub>3</sub>), farklı polielektrolit derişimlerde (10,20,30 ve 40 mg/L polialüminyum klorür-PAC ile Kerafloc ) vedeney boyunca farklı sabit pH değerlerinde ( pH = 4, pH = 6, pH = 8 ve pH = 10 ) çalışılmıştır

Doğal pH 'ta  $I=2$  A,  $i=2$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.21 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 57 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.21.** I=2 A, i=20 mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	10,4	3281	0,000	0,000
1	9,1	2343	28,571	0,606
5	9,3	2109	35,714	3,086
10	8,7	1953	40,476	5,986
20	9,8	1796	45,238	12,520
25	10,6	1406	57,142	16,053
30	8,2	1484	54,762	18,786

Doğal pH 'ta I=2 A, i=2 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.22 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 53 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

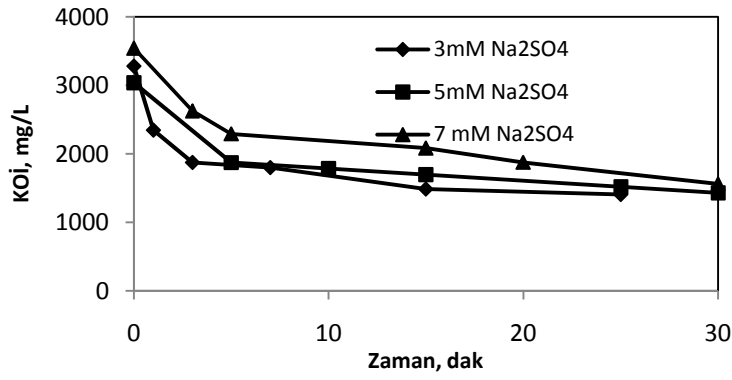
**Çizelge 6.22.** I=2 A, i=20 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	8,2	3035	0,000	0,000
5	8,4	1875	38,235	2,800
7	8,2	2053	32,352	3,893
10	8,1	1785	41,176	5,5133
15	7,7	1696	44,117	8,080
20	6,5	2053	32,352	10,246
25	6,6	1517	50,000	12,446
30	6,7	1428	53,000	14,680

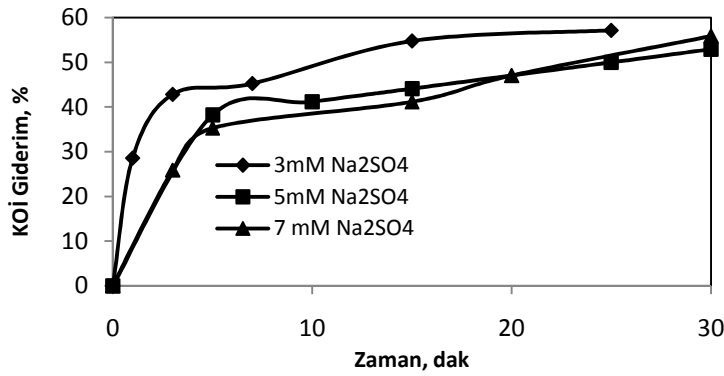
Doğal pH 'ta I=2 A, i=2 mA/cm<sup>2</sup> ve 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.23 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 56 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.23.  $I=2$  A,  $i=20$  mA/cm<sup>2</sup>, 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	11,9	3541	0,000	0,000
3	8,5	2625	25,882	1,700
5	8,9	2291	35,294	2,886
10	6,6	2604	26,470	5,086
15	6,2	2083	41,176	7,153
20	6,1	1875	47,058	9,186
30	6,2	1562	56,000	13,320
40	6,4	1666	52,941	17,586
50	6,4	1666	52,941	21,853



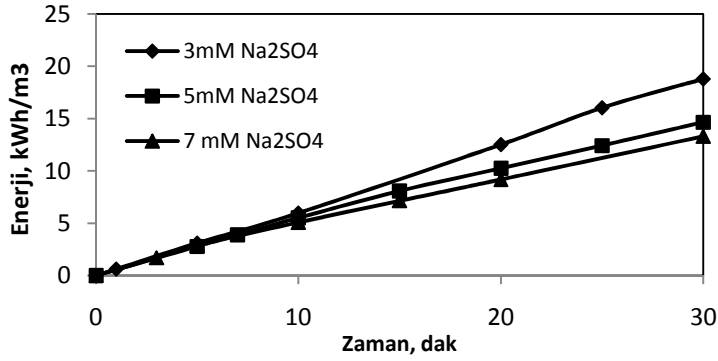
Şekil 6.21. KOİ 'nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2$  A,  $i=20$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.22. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2$  A,  $i=20$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 'de 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>' de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 57 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.23. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2 A, i=20 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Akım yoğunluğu uygulanan gerilimle yakından ilgilidir. Yüksek akım yoğunlukları ile çalışmak için elektrokimyasal reaktöre daha yüksek gerilim uygulanması gerekmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimi Şekil 6.23 'de görüldüğü üzere akım yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artış gösterecek şekilde değişmektedir.

Doğal pH 'ta I=1 A, i=10 mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.24 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 58 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.24.**  $I=1$  A,  $i=10$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	9,1	4800	0,000	0,000
3	7,9	3720	22,500	0,790
5	7,5	3600	25,000	1,290
10	7,6	2500	47,916	2,556
15	6,5	2200	54,166	3,640
20	6,5	2100	56,250	4,723
30	7,0	2200	54,166	7,056
40	6,1	2000	58,333	9,090
50	6,4	2000	58,333	11,223

Doğal pH 'ta  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.25 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 62,5 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.25.**  $I=1,5$  A,  $i=15$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,2	4000	0,000	0,000
1	11,9	4000	0,000	0,595
5	10,2	3400	15,000	2,635
10	12,2	2400	40,000	5,685
15	10,2	2300	42,500	8,235
20	10,0	2200	45,000	10,735
30	9,6	2200	45,000	15,535
40	10,3	1800	55,000	20,685
50	10,1	1500	62,500	25,735

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.26 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 71 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

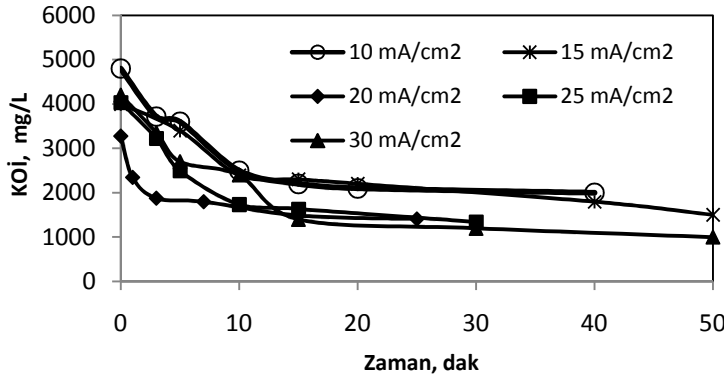
**Çizelge 6.26.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,8	4038	0,000	0,000
3	13,6	3230	20,000	3,400
5	14,5	2500	38,095	5,816
15	13,7	1730	57,143	17,233
20	15,1	1634	59,524	23,525
30	9,9	1153	71,428	31,775
40	8,6	1153	71,428	38,941

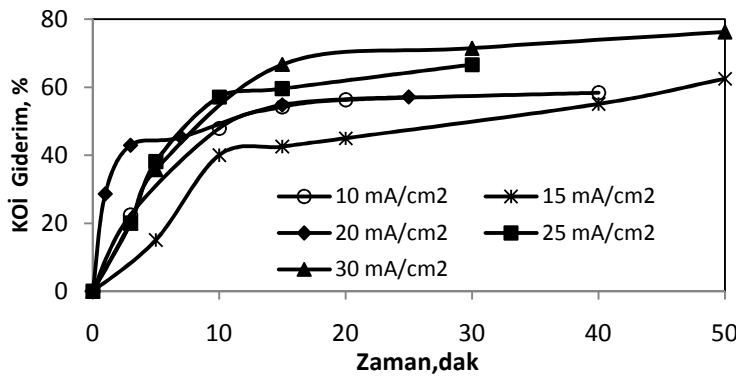
Doğal pH 'ta  $I=3$  A,  $i=30$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.27 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 76 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.27.**  $I=3$  A,  $i=30$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	19,0	4200	0,000	0,000
3	17,2	2260	20,000	5,160
5	18,1	2700	35,714	8,780
10	16,6	2400	42,857	17,080
15	17,1	1400	66,666	25,630
20	17,5	1400	66,666	34,380
30	10,7	1200	71,428	45,080
40	10,8	1200	71,428	55,880
50	10,7	1000	76,190	66,580

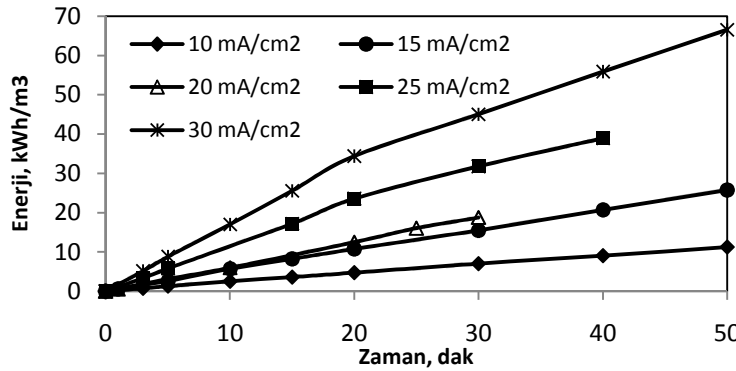


Şekil 6.24. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.25. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.24 ve Şekil 6.25 'de  $i=30 \text{ mA/cm}^2$  'de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 76 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.26. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.26 'de görüldüğü üzere akım yoğunluğu ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir ve  $I = 3 \text{ A}$ ,  $i=30 \text{ mA/cm}^2$  ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta yapılan çalışmada enerji sarfiyatı en yüksektir.

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.28 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 77 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

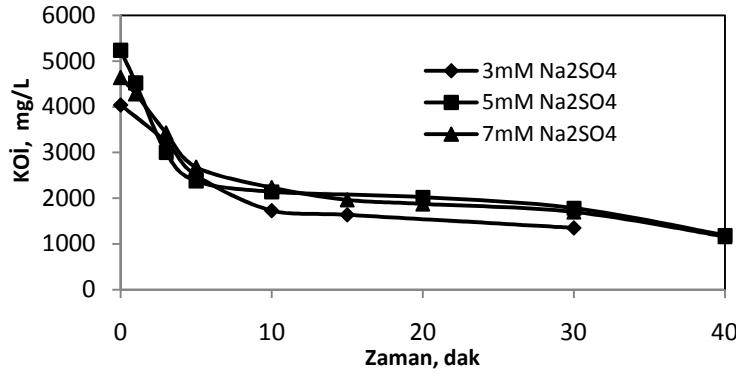
**Çizelge 6.28.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	13,8	5238	0,000	0,000
1	11,5	4523	13,636	0,958
3	11,6	3000	42,727	2,892
5	11,2	2380	54,545	4,758
10	9,6	2142	59,091	8,758
20	9,7	2023	61,363	16,841
30	10,6	1785	65,909	25,675
40	9,6	1190	77,272	33,675
50	7,9	1309	75,000	40,258

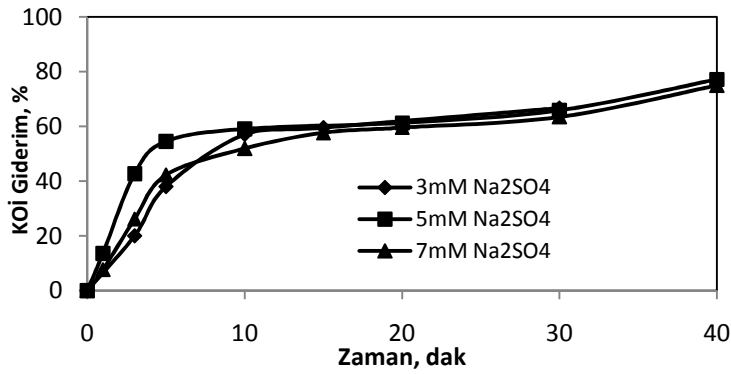
Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.29 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 75 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.29.  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	22,3	4642	0,000	0,000
1	15,2	4285	7,692	1,266
3	11,6	3428	26,154	3,200
5	24,3	2678	42,307	7,250
10	11,4	2232	51,923	12,000
15	10,2	1964	57,692	16,250
20	8,0	1875	59,6153	19,583
30	7,5	1696	63,461	25,833
40	8,2	1160	75,000	32,666
50	8,6	1160	75,000	39,833

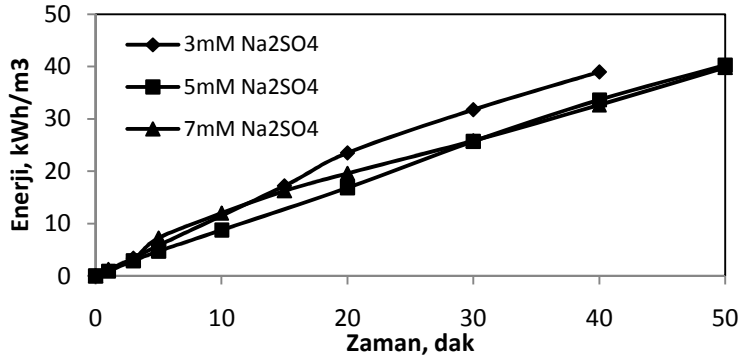


Şekil 6.27. KOİ 'nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.28. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.27 ve Şekil 6.28 'de 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta en yüksek arıtma verimi yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.29. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.29 'da görüldüğü gibi I = 2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta yapılan çalışmada enerji sarfiyatı en yüksektir.

pH= 3,01 'de I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.30 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 69 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.30. I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH= 3,01, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	18,0	5000	0,000	0,000
1	12,9	3461	30,770	1,075
10	10,1	2500	50,000	8,650
15	9,3	2307	53,846	12,525
20	9,1	1923	61,538	16,317
30	11,0	1730	65,384	25,483
40	12,2	1538	69,231	35,650
50	8,7	1634	67,307	42,900

pH= 6,01 'de I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.31 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 63 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.31.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH= 6,01, V= 500 mL

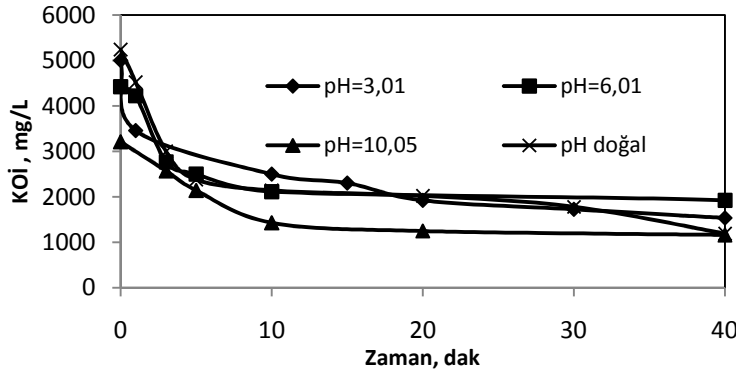
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	18,0	4423	0,000	0,000
1	12,8	4230	4,347	1,066
3	11,5	2769	37,391	2,983
5	11,2	2500	43,478	4,850
10	10,5	2115	52,174	9,225
20	8,5	2115	52,174	16,308
40	9,2	1923	56,521	31,641
50	8,9	1634	63,043	39,058

pH= 10,05 'de  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.32 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 63 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

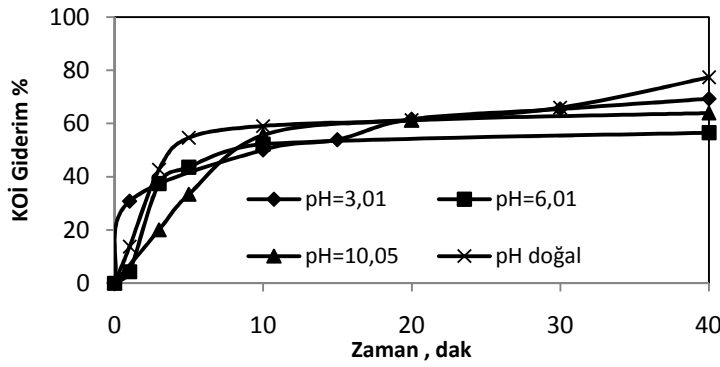
**Çizelge 6.32.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH= 10,05 V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,2	3214	0,000	0,000
3	11,7	2571	20,000	2,925
5	10,6	2142	33,333	4,692
10	11,6	1428	55,555	9,525
20	11,2	1250	61,111	18,858
40	9,2	1160	63,888	34,191
50	8,4	1160	63,888	41,191



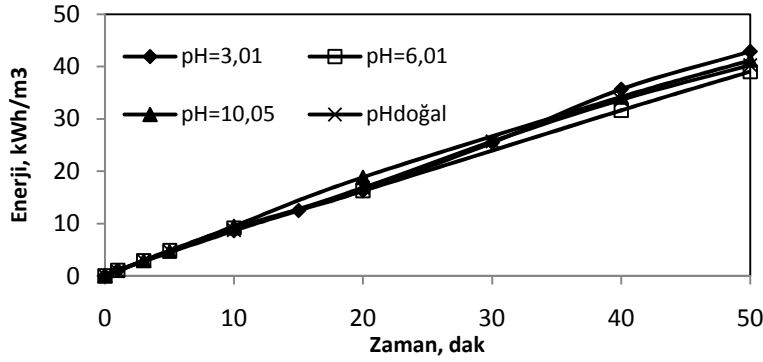


Şekil 6.30. KOİ'nin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)



Şekil 6.31. KOİ gideriminin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.30 ve Şekil 31 'de en yüksek arıtma verimi doğal pH 'ta yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



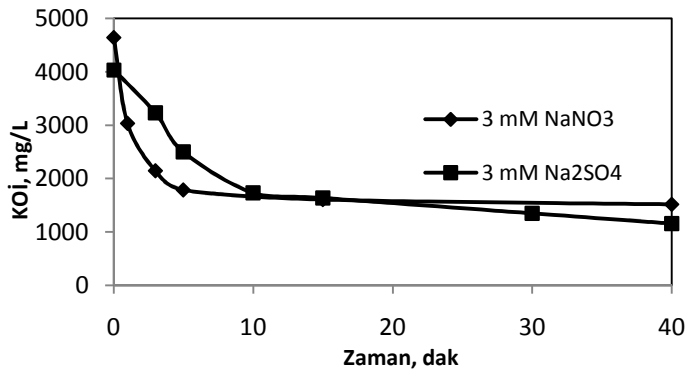
Şekil 6.32. Enerji tüketiminin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.32 'de görüldüğü gibi birbirine çok yakın olmakla beraber pH = 3,01 'de yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

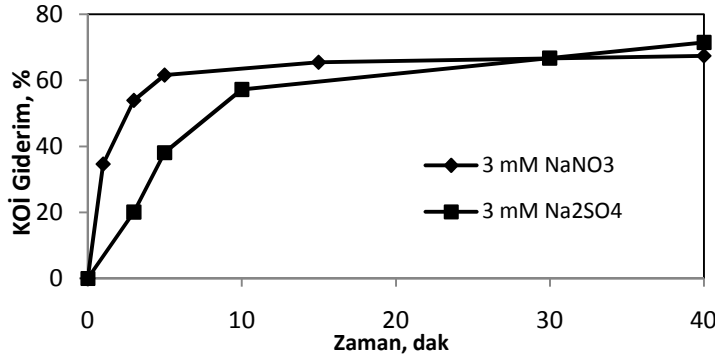
Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 3 mM NaNO<sub>3</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.33 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 67 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.33.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 3 mM NaNO<sub>3</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	22,5	4642	0,000	0,000
1	22,5	3035	34,615	1,875
3	21,8	2142	53,846	5,508
5	22,3	1785	61,538	9,225
10	21,3	1785	61,538	18,100
15	18,4	1607	65,384	25,766
20	18,1	1696	63,461	33,308
30	16,7	1607	65,384	47,225
40	15,1	1517	67,307	59,808
50	14,8	1517	67,307	72,141

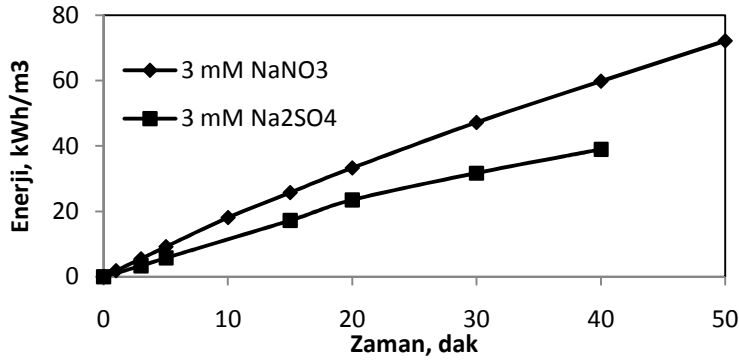


**Şekil 6.33.** KOİ 'nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.34. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.33 ve Şekil 6.34 'de 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 71 olduğu görülmektedir.



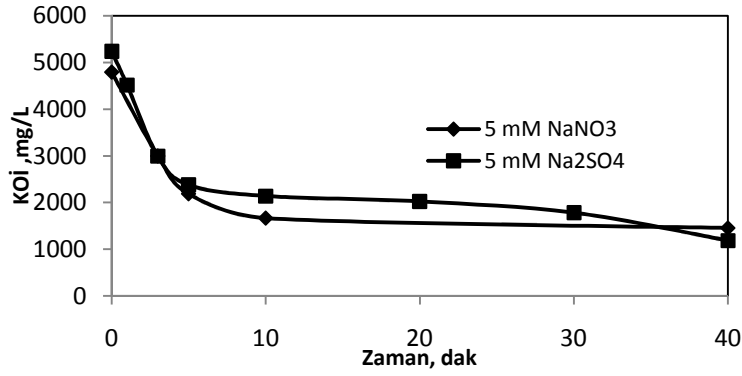
Şekil 6.35. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.35 'de 3 mM NaNO<sub>3</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek enerji tüketimi elde olduğu görülmektedir.

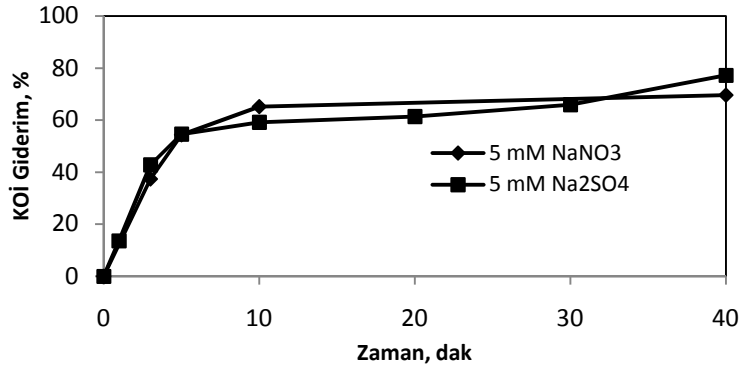
$I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM NaNO<sub>3</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.34 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 69 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.34.  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM NaNO<sub>3</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	19,8	4791	0,000	0,000
1	19,1	4791	0,000	1,591
3	18,9	3000	37,391	4,741
5	19,8	2187	54,347	8,041
10	18,7	1666	65,217	15,833
15	16,9	1770	63,043	22,875
20	17,1	1666	65,217	30,000
30	15,2	1770	63,043	42,666
40	14,6	1458	69,565	54,833
50	13,9	1458	69,565	66,416

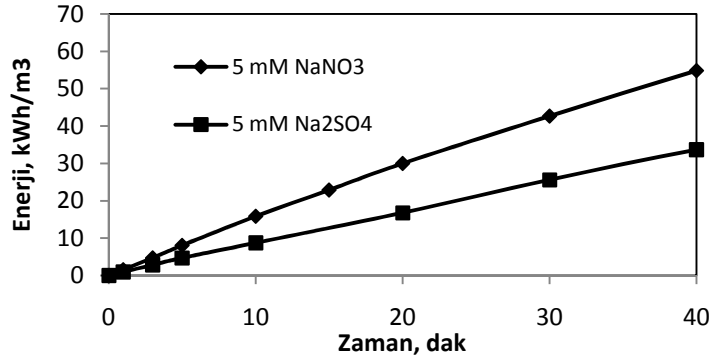


Şekil 6.36. KOİ' nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.37. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.36 ve Şekil 6.37 'de 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



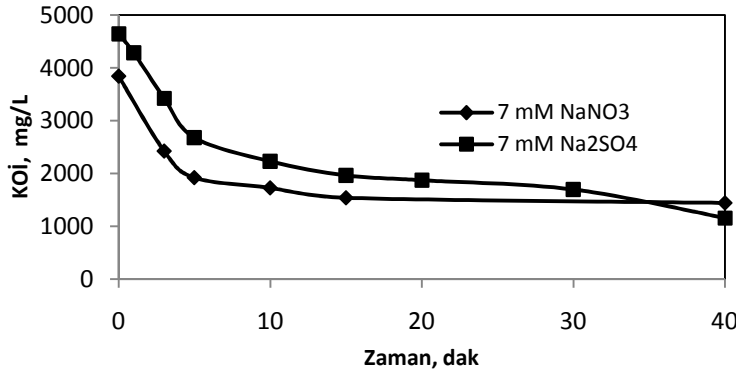
Şekil 6.38. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.38 'de 5 mM NaNO<sub>3</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

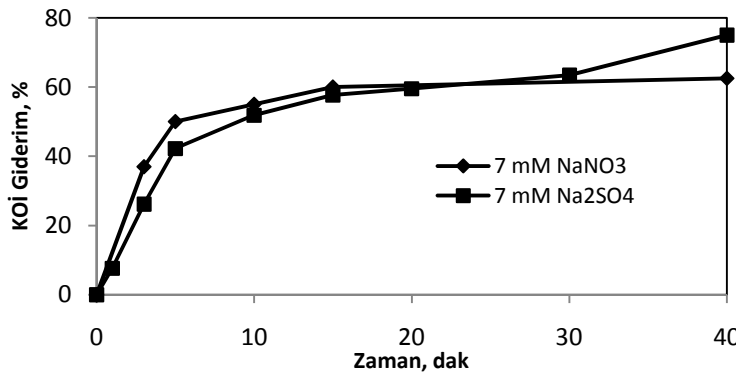
I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup> ve 7 mM NaNO<sub>3</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.35 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 62 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.35. I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, 7 mM NaNO<sub>3</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,9	3846	0,000	0,000
3	16,2	2423	37,000	4,050
5	16,8	1923	50,000	6,850
10	15,6	1730	55,000	13,350
15	16,1	1538	60,000	20,058
20	15,9	1538	60,000	26,683
30	13,9	1634	57,500	38,266
40	13,7	1442	62,500	49,683
50	13,7	1538	60,000	61,100

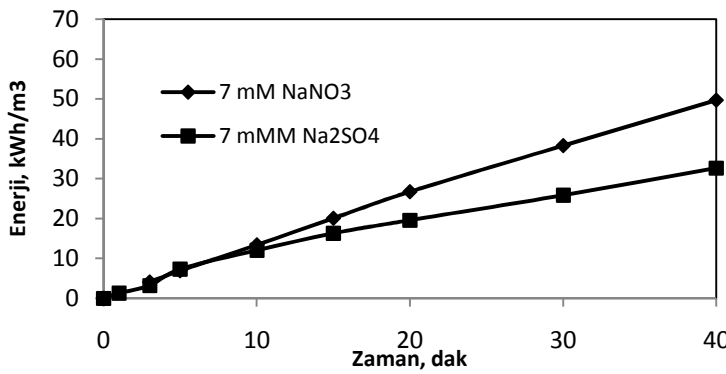


Şekil 6.39. KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



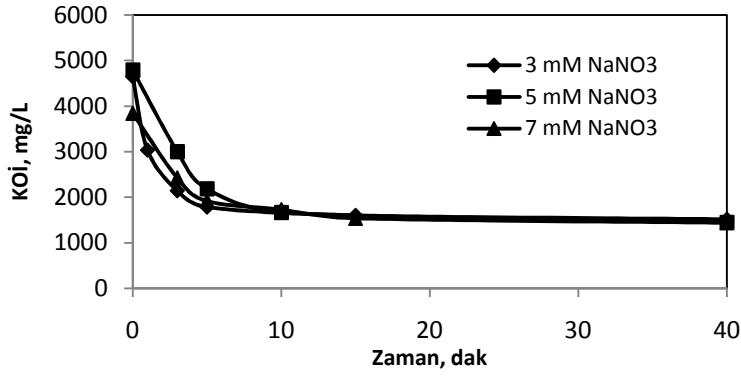
Şekil 6.40. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.39 ve Şekil 6.40 'ta 7 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 75 olduğu görülmektedir.

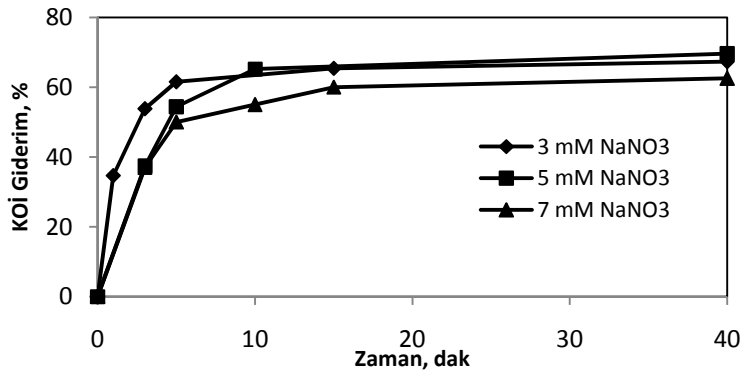


Şekil 6.41. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.41 'de 7 mM NaNO<sub>3</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

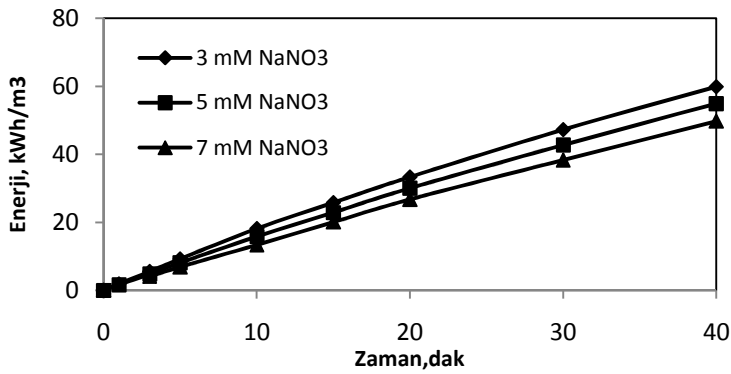


Şekil 6.42. KOİ'nin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)



Şekil 6.43. KOİ gideriminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Şekil 6.42 ve Şekil 6.43 'te 5 mM NaNO<sub>3</sub> 'ta parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin % 69 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.44. Enerji tüketiminin destek elektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, pH doğal, V= 500 mL)

Enerji tüketimi Şekil 6.44 'te görüldüğü gibi birbirine çok yakın olmakla beraber 3 mM NaNO<sub>3</sub> 'ta yapılan çalışmada enerji sarfiyatı en yüksektir.

Doğal pH 'ta I=3 A, i=30 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.36 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 72 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.36.** I=3 A, i=30 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

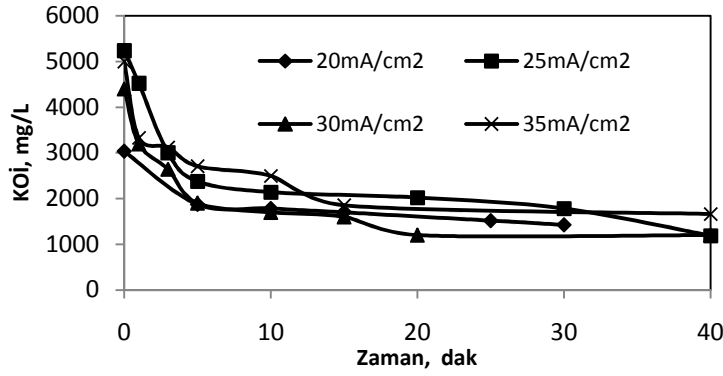
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	17,1	4400	0,000	0,000
1	14,4	3200	27,272	1,440
3	14,0	2640	40,000	4,240
5	14,4	1900	56,818	7,120
10	13,6	1700	61,363	13,920
15	12,7	1600	63,636	20,270
20	12,4	1200	72,727	26,470
30	11,1	1300	70,454	37,570
40	10,5	1200	72,727	48,070
50	10,6	1300	70,454	58,670

Doğal pH 'ta I=3,5 A, i=35 mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.37 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 66 verim elde edildiği görülmektedir.

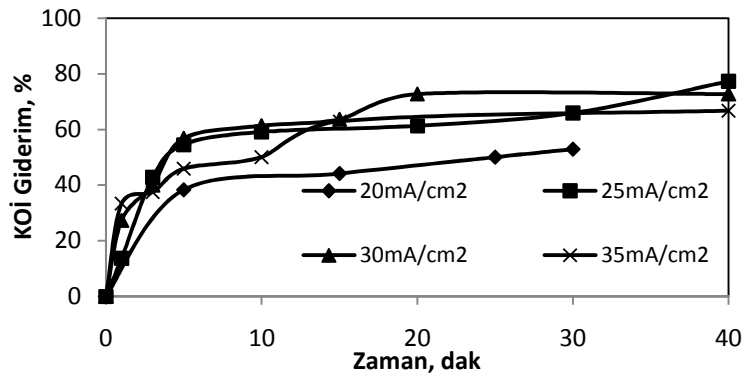


Çizelge 6.37.  $I=3,5$  A,  $i=35$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	17,6	4629	0,000	0,000
1	18,0	3333	28,000	2,100
3	17,2	2333	49,600	6,113
5	18,4	2222	52,000	10,406
10	16,5	2222	52,000	20,031
15	17,2	1851	60,000	30,065
20	16,2	1851	60,000	39,515
30	13,4	1574	66,000	55,148
40	12,5	1666	64,000	69,731
50	11,9	1666	64,000	83,615

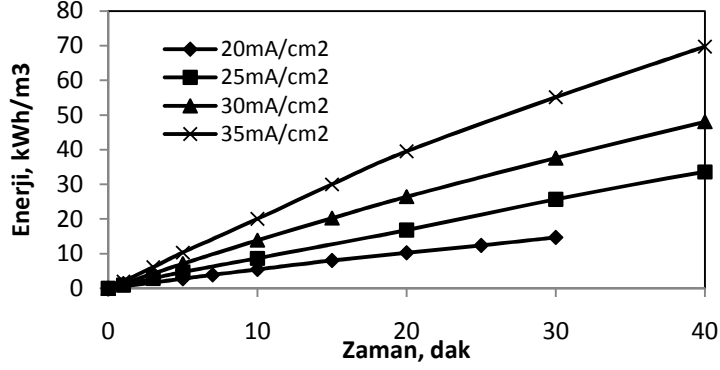


Şekil 6.45. KOİ 'nin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL)



Şekil 6.46. KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL)

Şekil 6.45 ve Şekil 6.46 'da  $i=25 \text{ mA/cm}^2$  'de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.47. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , pH doğal  $V=500 \text{ mL}$ )

Şekil 6.47 'de görüldüğü gibi  $I = 3,5 \text{ A}$ ,  $i=35 \text{ mA/cm}^2$  ve 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  'ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

Diğer parametreler en iyi şartlar olarak belirlenen  $I=2,5 \text{ A}$ ,  $i=25 \text{ mA/cm}^2$  ve 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  parametreleri sabit tutularak gözlemlenmiştir.

Doğal pH 'ta  $I=2,5 \text{ A}$ ,  $i=25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 10 mg/L PAC parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.38 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 70 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.38.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 10 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	20,3	5000	0,000	0,000
1	23,4	3333	33,333	1,950
3	26,5	3125	37,500	6,366
5	27,8	2708	45,833	11,000
10	20,1	2500	50,000	19,375
15	15,8	2291	54,166	25,958
20	15,0	1979	60,416	32,208
30	14,2	1458	70,833	44,042
40	12,7	1466	66,666	54,625
50	12,1	1458	70,833	64,708

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 20 mg/L PAC parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.39 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 73 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.39.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	22,1	4750	0,000	0,000
1	27,7	4250	10,526	2,308
3	24,5	3150	33,684	6,391
5	28,5	2500	47,368	11,141
10	14,9	1750	63,157	17,350
15	17,2	1750	63,157	24,516
20	12,4	1625	65,789	29,683
30	11,1	2000	57,894	38,933
40	8,5	1875	60,526	46,016
50	11,8	1250	73,684	55,850

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 30 mg/L PAC parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.40 'ta verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 76 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

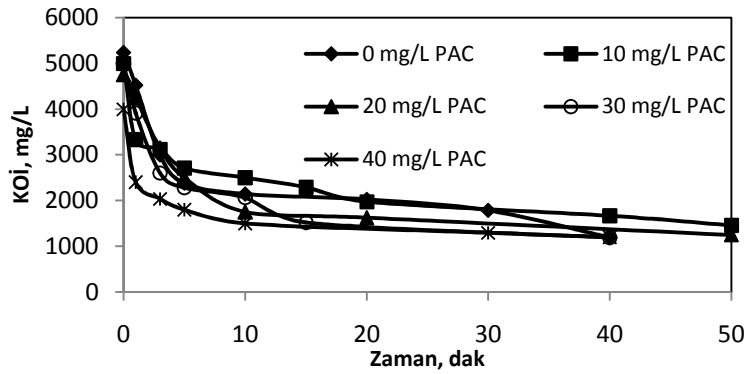
**Çizelge 6.40.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 30 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak.	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	21,2	5000	0,000	0,000
1	26,1	3913	21,740	2,175
3	27,5	2608	47,826	6,758
5	25,6	2282	54,347	11,025
10	15,8	2065	58,695	17,608
15	13,7	1521	69,565	23,316
20	13,9	1195	76,087	29,108
30	13,3	1630	67,391	40,191
40	10,8	1195	76,087	49,191
50	10,3	1195	76,087	57,775

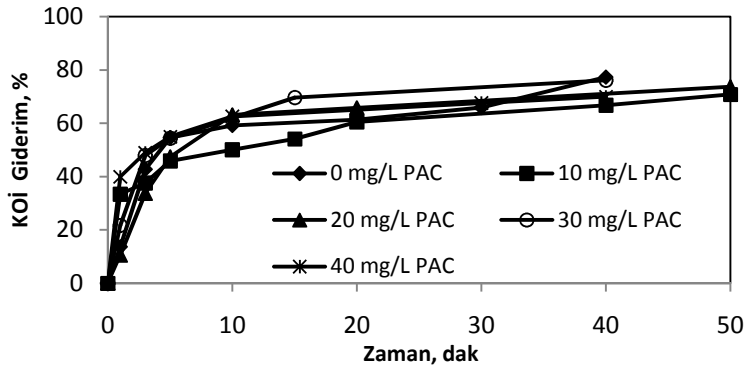
Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 40 mg/L PAC parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.41 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 70 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.41.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 mg/L PAC, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,6	4000	0,000	0,000
1	18,1	2400	40,000	1,508
3	13,6	2040	49,000	3,775
5	13,0	1800	55,000	5,941
10	16,8	1500	62,500	12,941
15	13,4	1900	52,500	18,525
20	11,4	1600	60,000	23,275
30	11,3	1300	67,500	32,691
40	10,2	1200	70,000	41,191
50	9,7	1300	67,500	49,275

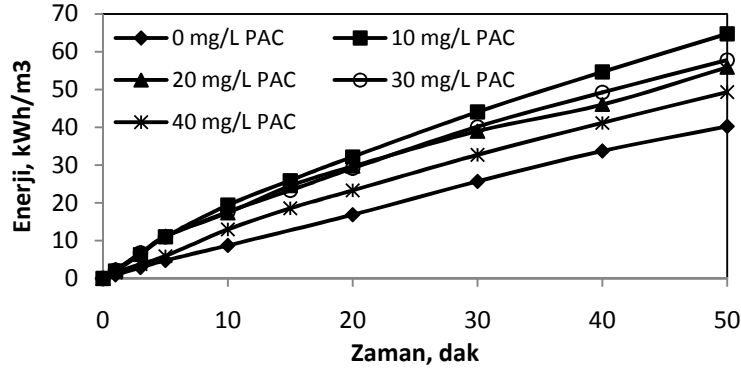


**Şekil 6.48.** KOİ 'nin polielektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL)



Şekil 6.49. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL)

Şekil 6.48 ve Şekil 6.49 'da en yüksek arıtma veriminin PAC kullanmadan yapılan deneyde yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.50. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL)

Şekil 6.50' de görüldüğü gibi 10 mg/L PAC ' ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 10 mg/L Kerofloc parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.42 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 73 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.42.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 10 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,9	4565	0,000	0,000
1	12,2	4347	4,762	1,016
3	12,1	2347	48,571	3,033
5	12,7	2282	50,000	5,150
10	11,8	1630	64,285	10,066
15	13,6	1739	61,904	15,733
20	10,8	1413	69,047	20,233
30	8,7	1630	64,285	27,483
40	8,3	1195	73,809	34,400
50	8,3	1413	69,047	41,316

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 20 mg/L Kerafloc parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.43 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 69 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.43.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	9,9	3750	0,000	0,000
3	10,0	2125	43,333	2,500
5	10,1	1875	50,000	4,183
10	9,8	1666	55,555	8,266
15	10,3	1770	52,777	12,558
20	9,5	1458	61,111	16,516
30	8,3	1562	58,333	23,433
40	8,7	1145	69,444	30,683
50	7,1	1145	69,444	36,600

Doğal pH 'ta  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 30 mg/L Kerafloc parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.44 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 75 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.44.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 30 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL

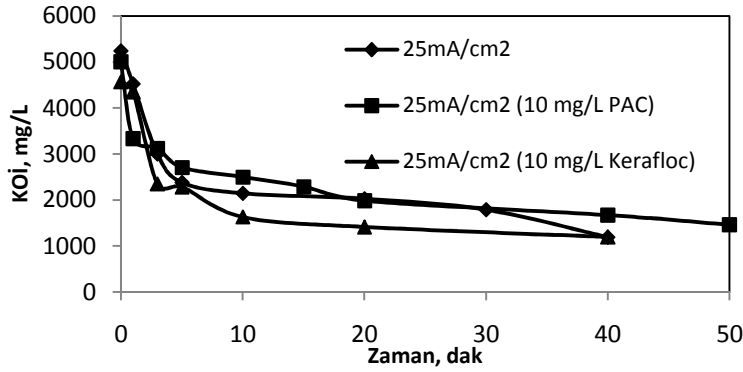
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,8	4000	0,000	0,000
3	29,0	2640	34,000	7,250
5	32,5	2500	37,500	12,666
10	17,9	1500	62,500	20,125
15	11,4	1900	52,500	24,875
20	10,1	1300	67,500	29,083
30	10,3	1400	65,000	37,666
40	8,8	1000	75,000	45,000
50	8,5	1200	70,000	52,083

$I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 40 mg/L Kerafloc parametreleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.45 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 80 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

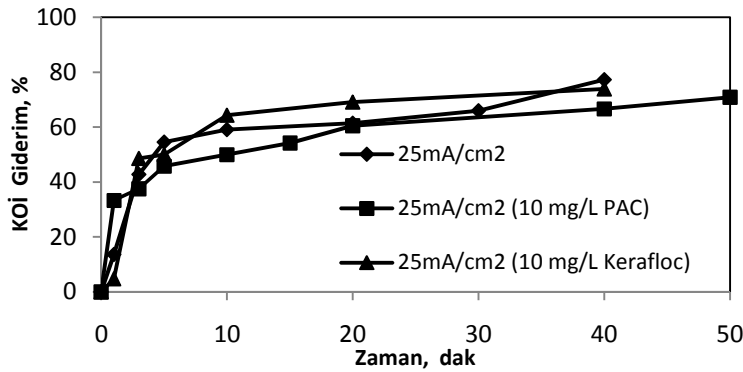


**Çizelge 6.45.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 40 mg/L Kerafloc, pH doğal, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	15,7	5476	0,000	0,000
1	16,1	4285	21,739	1,341
3	16,2	2428	55,652	4,041
5	16,5	2023	63,043	6,791
10	14,6	1785	67,391	12,875
15	13,7	1904	65,217	18,583
20	13,0	1666	69,565	24,000
30	16,8	1666	69,565	38,000
40	12,5	1071	80,434	48,416
50	10,3	1309	76,086	57,000

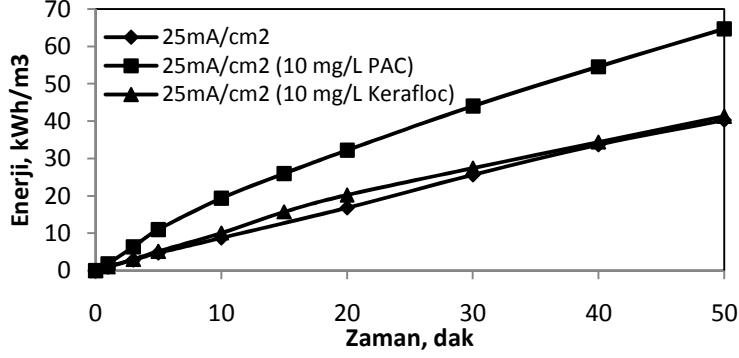


**Şekil 6.51.** KOİ 'nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )



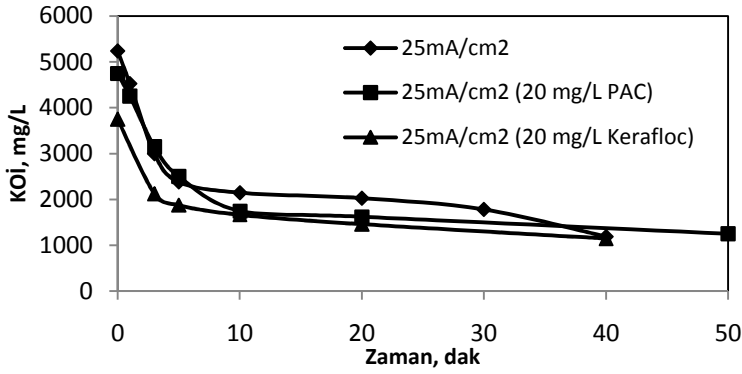
**Şekil 6.52.** KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.51 ve Şekil 6.52 'de polielektrolit kullanmadan  $i=25 \text{ mA/cm}^2$  'de parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.

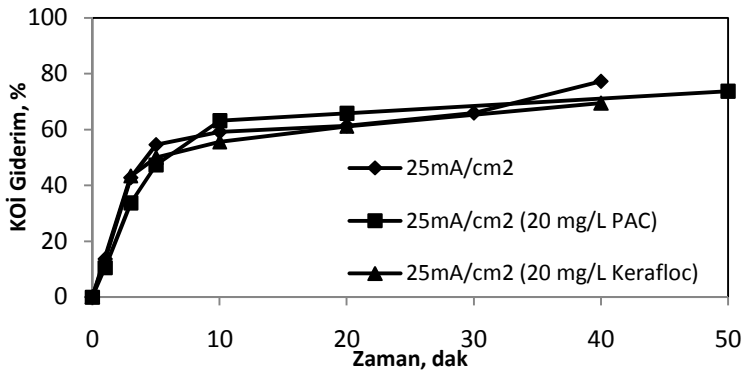


Şekil 6.53. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.53 'te görüldüğü gibi 10 mg/L PAC 'ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

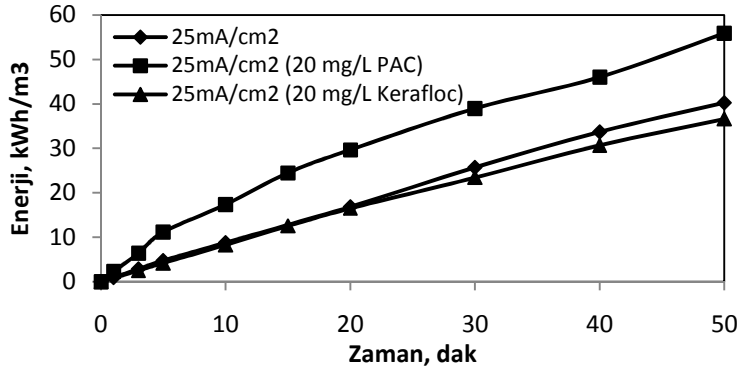


Şekil 6.54. KOİ 'nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )



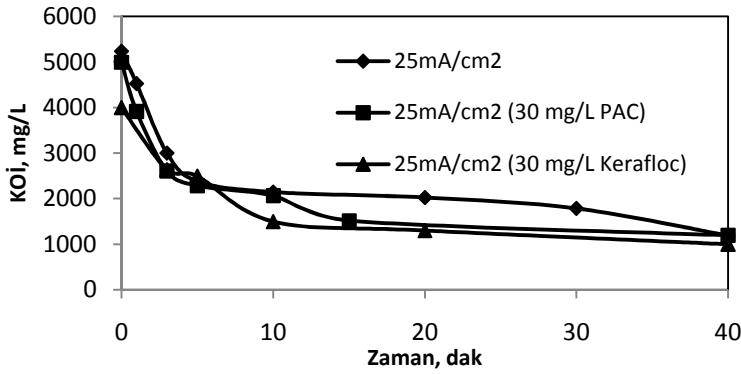
Şekil 6.55. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.54 ve Şekil 6.55 'de polielektrolit kullanmadan,  $i=25 \text{ mA/cm}^2$  'de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık %77 olduğu görülmektedir.

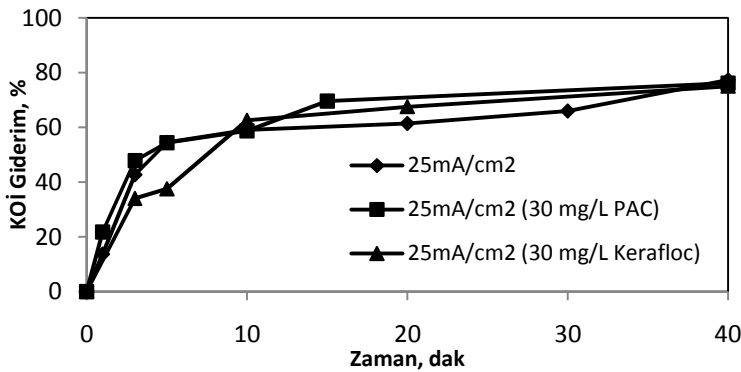


Şekil 6.56. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.56 'da görüldüğü gibi 20 mg/L PAC' ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

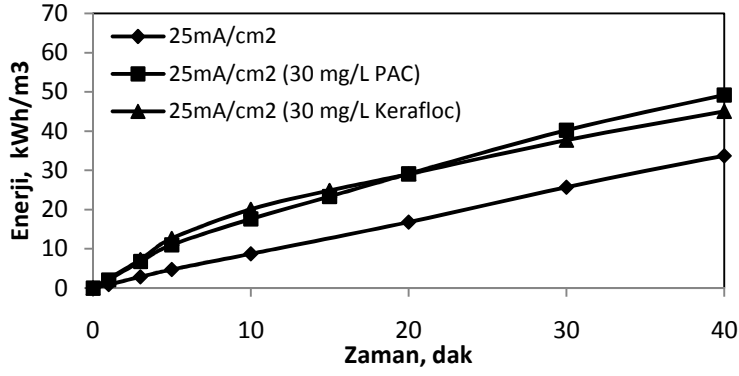


Şekil 6.57. KOİ 'nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )



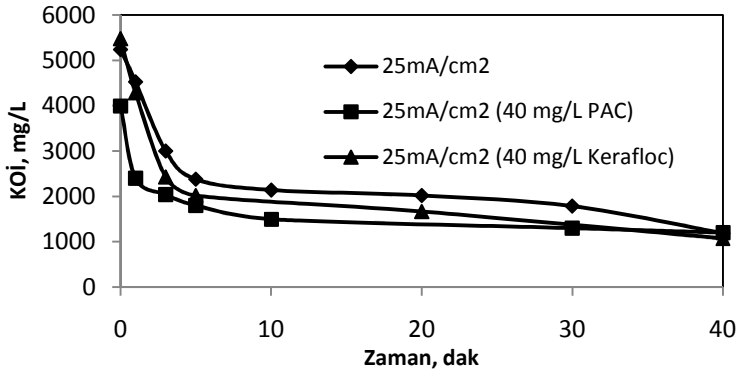
Şekil 6.58. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.57 ve Şekil 6.58 'de polielektrolit kullanmadan,  $i=25 \text{ mA/cm}^2$  'de en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.

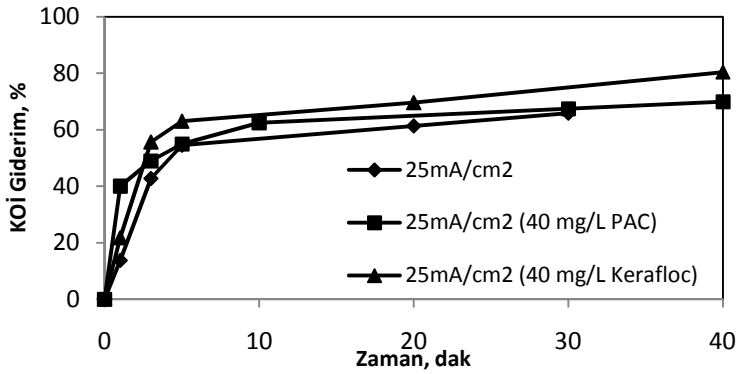


Şekil 6.59. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.59 'da görüldüğü gibi 30 mg/L PAC 'ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

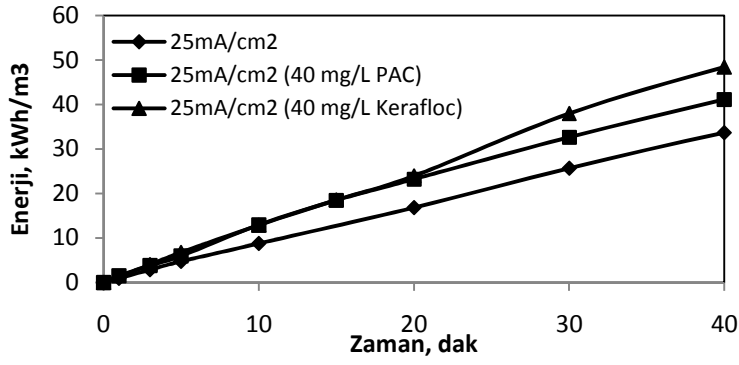


Şekil 6.60. KOİ 'nin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )



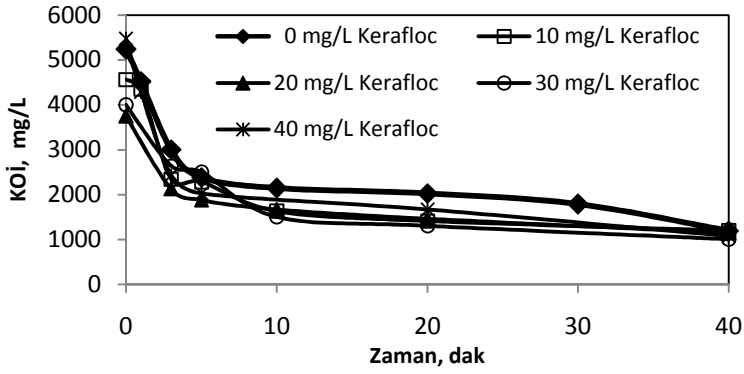
Şekil 6.61. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.60 ve Şekil 6.61 'de 40 mg/L Kerafloc 'ta en yüksek veriminin % 80 olduğu görülmektedir.

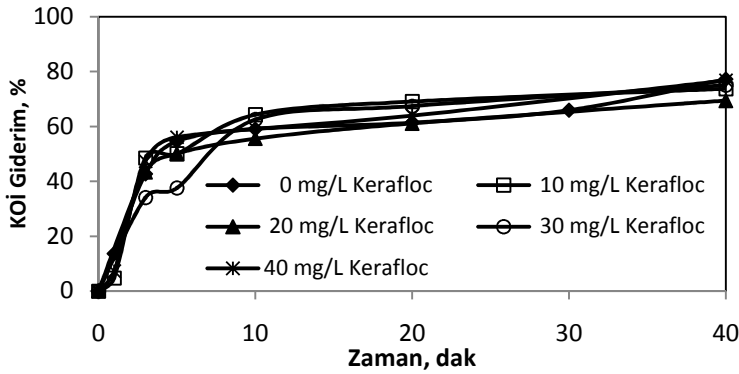


Şekil 6.62. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi (5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.62 'de görüldüğü gibi 40 mg/L Kerafloc 'ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

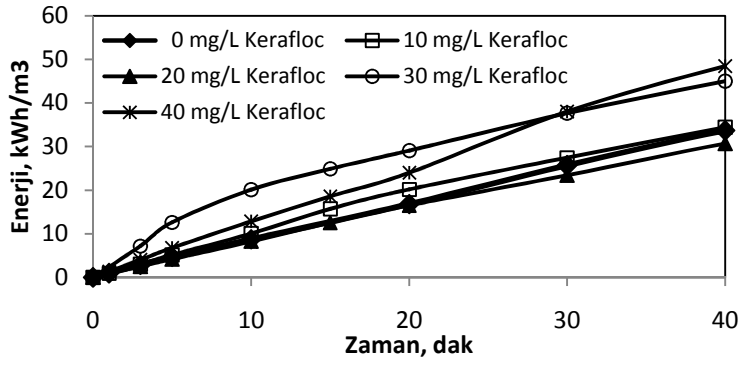


Şekil 6.63. KOİ'nin polielektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )



Şekil 6.64. KOİ gideriminin polielektrolit ile değişimi (I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.63 ve Şekil 6.64' de 40 mg/L en yüksek arıtma veriminin Kerafloc kullanarak yapılan deneyde yaklaşık % 80 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.65. Enerji tüketiminin polielektrolit ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal V= 500 mL )

Şekil 6.65' de görüldüğü gibi 40 mg/L Kerafloc 'ta yapılan çalışmada enerji tüketimi en yüksektir.

Deney boyunca pH = 4 'de sabit tutarak  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.46 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 58 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.46.  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH = 4, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	12,0	3800	0,000	0,000
1	11,2	2600	31,578	0,933
3	10,9	2040	46,315	2,750
5	9,8	2200	42,105	4,383
10	5,4	1700	55,263	6,633
15	6,1	2300	39,473	9,175
20	4,5	1700	55,263	11,050
30	4,4	1900	50,000	14,716
40	4,0	1600	57,894	18,050
50	2,5	1700	55,263	20,133

Deney boyunca pH = 6 'da sabit tutarak  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen çalışma sonucu elde edilen veriler

Çizelge 6.47 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 66 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.47.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH = 6, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	14,4	4565	0,000	0,000
1	9,6	2173	52,381	0,800
3	7,7	2869	37,142	2,083
5	6,6	1847	59,523	3,183
10	5,8	1739	61,904	5,600
15	5,2	2282	50,000	7,766
20	4,8	1521	66,666	9,766
30	4,4	1847	59,523	13,433
40	3,9	1630	64,285	16,683
50	3,7	1630	64,285	19,766

Deney boyunca pH = 8 'de sabit tutarak  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.48 'de verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 73 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

**Çizelge 6.48.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH = 8, V= 500 mL

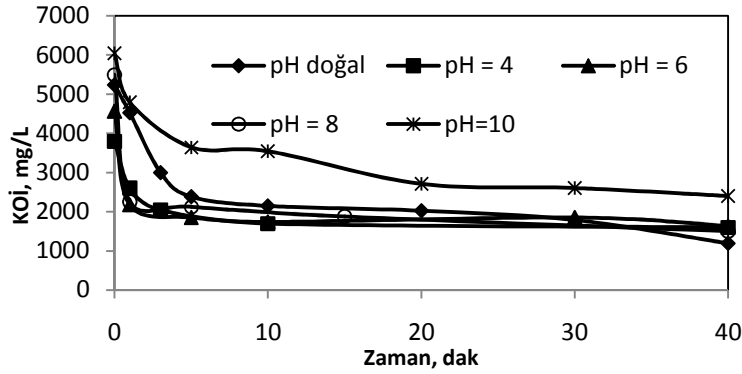
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	13,7	5500	0,000	0,000
1	11,6	2250	59,091	0,966
3	9,8	2850	48,181	2,600
5	9,3	2125	61,363	4,150
10	6,7	2125	61,363	6,941
15	5,7	1875	65,909	9,316
20	5,2	2000	63,636	11,483
30	5,1	2250	59,091	15,733
40	5,1	1500	72,727	19,983
50	4,6	1875	65,909	23,816

Deney boyunca pH= 10 'da sabit tutarak  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup> ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametreleri ile gerçekleştirilen çalışma sonucu elde edilen veriler Çizelge 6.49 'da verilmiştir. Çalışmada yaklaşık % 65 civarında verim elde edildiği görülmektedir.

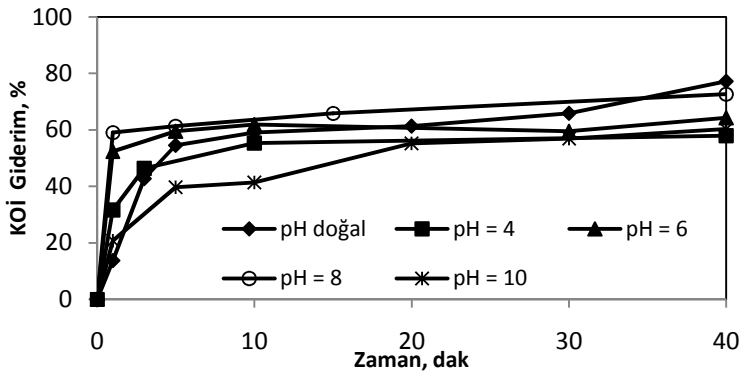


**Çizelge 6.49.**  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH = 10, V= 500 mL

Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	10,5	6041	0,000	0,000
1	8,4	4791	20,689	0,700
3	7,6	4625	23,448	1,966
5	6,5	3645	39,655	3,050
10	4,1	3541	41,379	4,758
15	3,6	3541	41,379	6,258
20	3,3	2708	55,172	7,633
30	2,9	2604	56,896	10,050
40	2,1	2395	60,344	11,800
50	1,9	2083	65,517	13,383

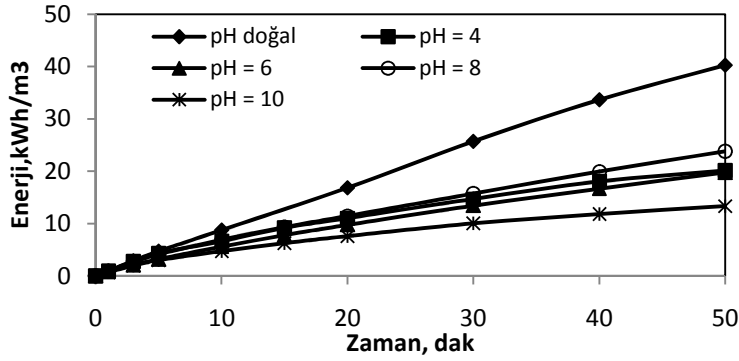


**Şekil 6.66.** KOİ 'nin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)



**Şekil 6.67.** KOİ gideriminin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.66 ve Şekil 6.67 'de doğal pH 'ta yapılan deneyde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 77 olduğu görülmektedir.



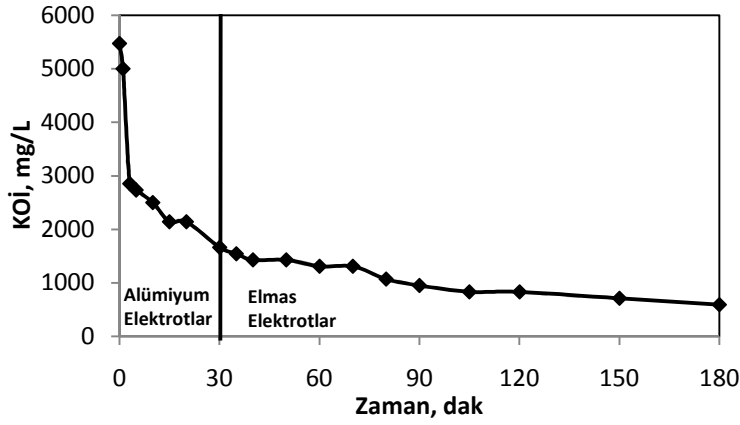
Şekil 6.68. Enerji tüketiminin pH ile değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.68' de doğal pH' ta yapılan deneyden yüksek enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

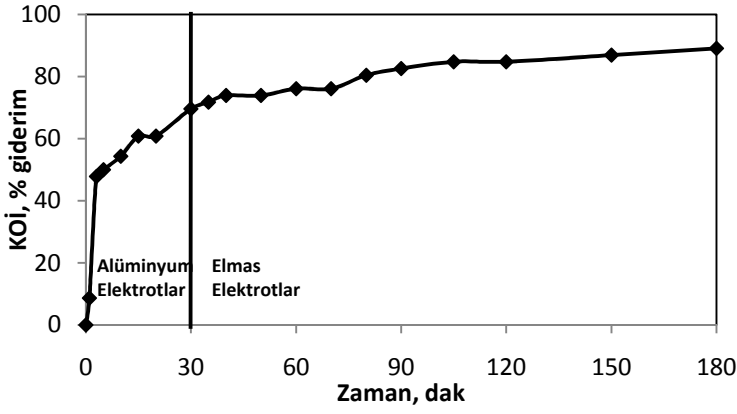
Önceki çalışmalarda, en iyi şartlar olarak belirlenen; 2,5 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit derişiminde 30 dakika boyunca demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon işlemi uygulanmıştır. Ardından elde ettiğimiz örnek ile elmas elektrot kullanılarak, 62,5 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 150 dakika sürede elektrokimyasal yükseltgeme gerçekleştirildiğinde Çizelge 6.50, Şekil 6.69 ve Şekil 6.70 'de görüldüğü gibi elektrokoagülasyon sonucu arıtım verimi % 69 iken elektrokimyasal yükseltgeme ile arıtım verimi % 89 'a kadar çıkmıştır.

**Çizelge 6.50.** Alüminyum elektrotlarla 30 dakika elektrokoagülasyon ve elmas elektrotlarla 150 dakika elektrokimyasal yükseltgeme sonun elde edilen deneysel çalışma sonuçları. (Elektrokoagülasyonda  $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; Elektrokimyasal yükseltgemedede  $I=2,5$  A,  $i=62,5$  mA/cm<sup>2</sup>)

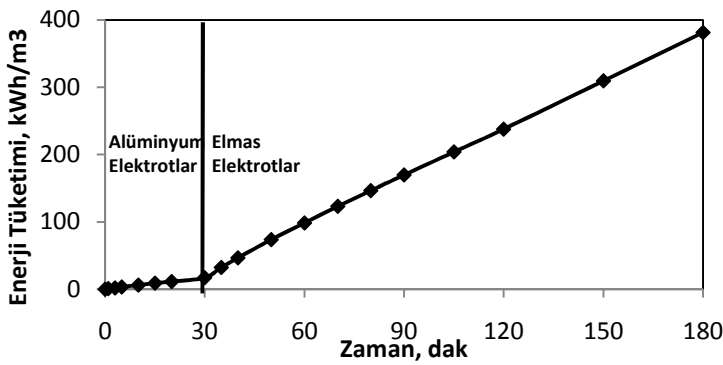
Zaman, dak	Gerilim, V	KOI, mg/L	KOI giderimi, %	Enerji tüketimi, kWh/m <sup>3</sup>
0	8,2	5476,190	0,000	0,000
1	8,1	5000,000	8,695	0,675
3	7,3	2857,142	47,826	1,891
5	7,1	2738,095	50,000	3,075
10	6,9	2500,000	54,348	5,950
15	6,8	2142,857	60,869	8,783
20	6,5	2142,857	60,869	11,491
30	6,4	1666,666	69,565	16,825
35	18,7	1547,619	71,739	32,408
40	16,9	1428,571	73,913	46,491
50	16,3	1428,571	73,913	73,658
60	14,9	1309,523	76,086	98,491
70	14,7	1309,523	76,087	122,991
80	14,1	1071,428	80,434	146,491
90	13,9	952,381	82,608	169,658
105	13,7	833,333	84,782	203,908
120	13,5	833,333	84,782	237,658
150	14,4	714,285	86,956	309,658
180	14,3	595,238	89,130	381,158



Şekil 6.69. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) KOİ' nin zamanla değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

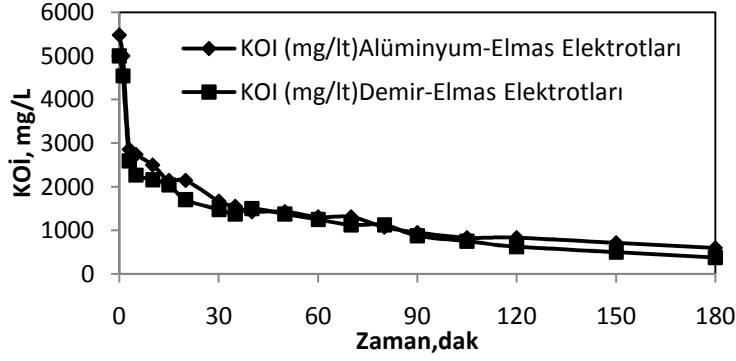


Şekil 6.70. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) KOİ gideriminin zamanla değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

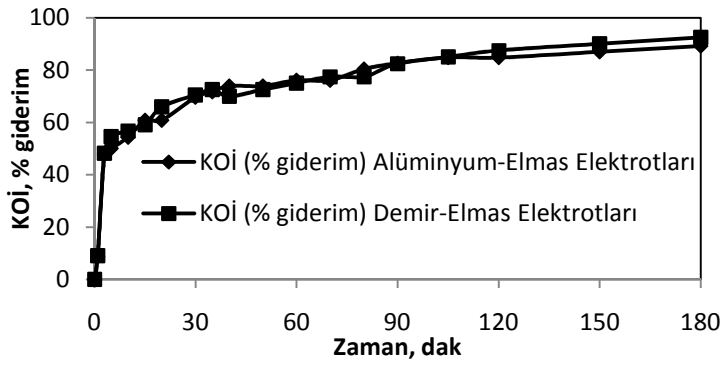


Şekil 6.71. Hibrit sistemde (Alüminyum elektrot-Elmas elektrot) enerji tüketiminin zamanla değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.71 'de Elmas elektrotları ile elektrokimyasal yükseltgeme işleminde alüminyum elektrotlarla elektrokoagülasyondan daha fazla enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

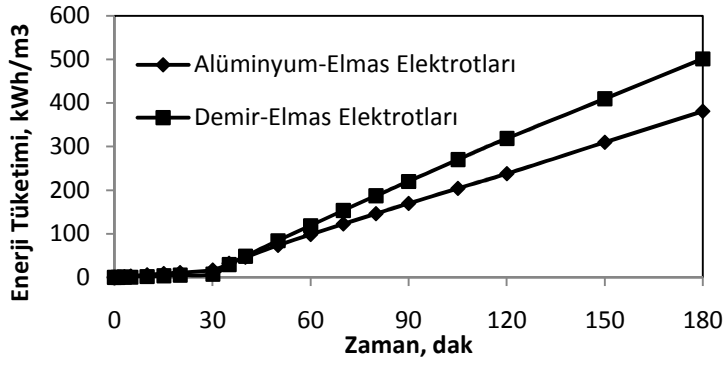


Şekil 6.72. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) KOİ'nin zamanla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 6.73. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) KOİ gideriminin karşılaştırılması

Şekil 6.72 ve Şekil 6.73 'de demir ve elmas elektrotları ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal yükseltgeme işlemleri sonucu elde edilen arıtım verimi % 92,5 iken alüminyum ve elmas elektrotları ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal yükseltgeme işlemleri sonucu elde edilen arıtım verimi % 89 olarak belirlenmiştir. Buna göre arıtım verimi değerleri birbirine yakın olup, demir ve elmas elektrotları ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal yükseltgeme çalışması daha başarılı görülmektedir.



Şekil 6.74. Hibrit sistemlerde (Alüminyum-Elmas ve Demir-Elmas) enerji tüketiminin karşılaştırılması

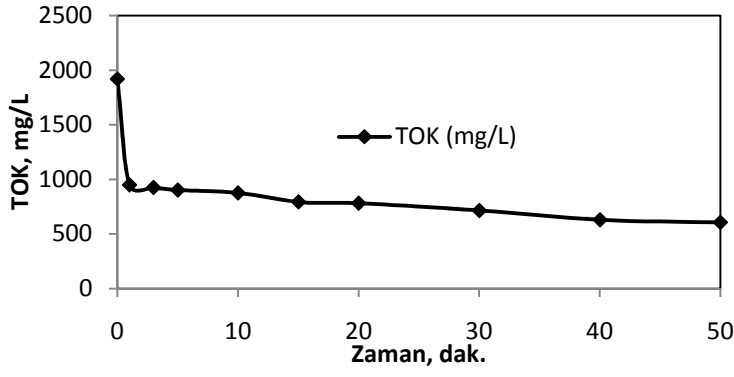
Şekil 6.74 'de demir ve elmas elektrotları ile gerçekleştirilen elektrokoagülasyon ve elektrokimyasal yükseltgeme işlemleri sonucunda daha fazla enerji tüketimi olduğu görülmektedir.

Alüminyum elektrotları ile elektrokimyasal arıtım çalışmalarında TOK miktarları da tayin edilmiştir. Çalışmada Elementar Liqui TOC cihazı kullanılmıştır

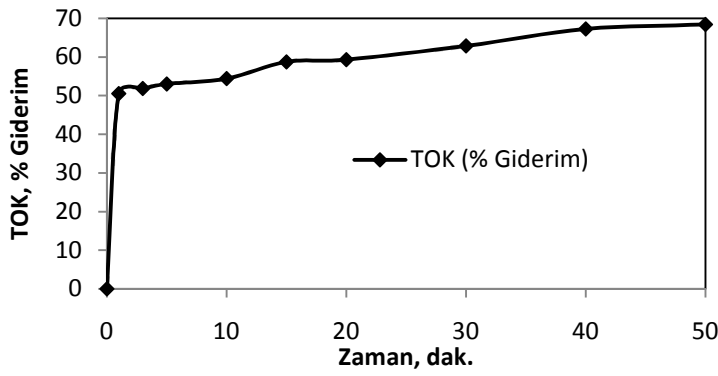
Buna göre en iyi şartlar olarak belirlenen 2,5 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit parametrelerinde gerçekleştirilen TOK ölçüm sonuçları ise Çizelge 6.51 'de görülmektedir.

Çizelge 6.51. I=2,5 A, i=25 mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, pH doğal, V= 500 mL

Zaman	TOK, mg/L	TOK , % Giderim
0	1920,316	0,000
1	950,354	50,510
3	924,784	51,842
5	902,262	53,014
10	875,675	54,399
15	793,106	58,699
20	781,783	59,288
30	713,336	62,853
40	628,667	67,262
50	606,538	68,414

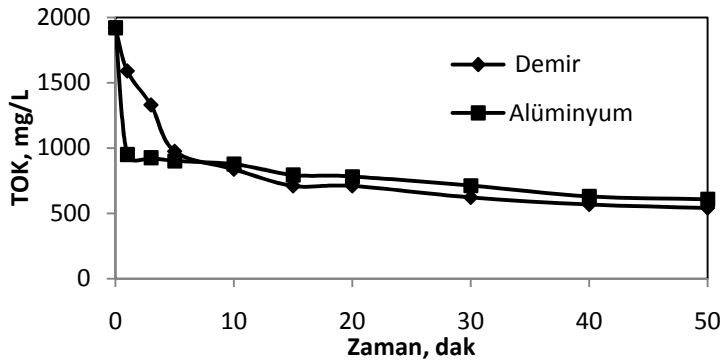


Şekil 6.75. TOK' un zamanla değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

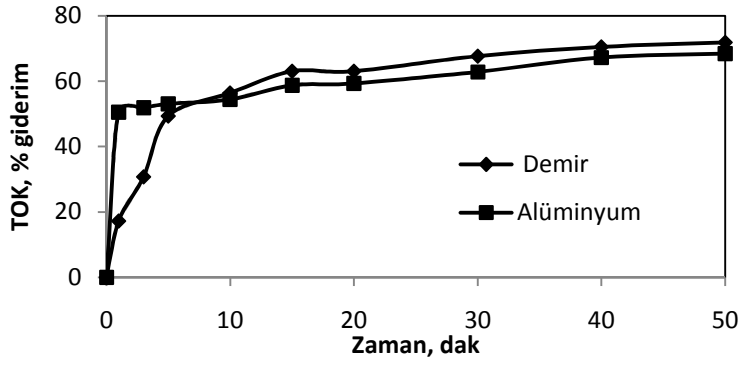


Şekil 6.76. TOK gideriminin zamanla değişimi ( $I=2,5$  A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>, 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V= 500 mL)

Şekil 6.75 ve Şekil 6.76 'da,  $I=2,5$ A,  $i=25$  mA/cm<sup>2</sup>ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> parametrelerinde en yüksek arıtma veriminin yaklaşık % 68 olduğu görülmektedir.



Şekil 6.77. Demir ve Alüminyum elektrotları kullanılarak yapılan deneylerin TOK değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6.78. Demir ve Alüminyum elektrotları kullanılarak yapılan deneylerin TOK gideriminin karşılaştırılması

Şekil 6.77 ve Şekil 6.78 'de, demir elektrotlarla çalışılan deneyde TOK giderimi % 71 olup, alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmadan daha verimli olduğu görülmektedir.



## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çözünebilir demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak süt endüstrisi model atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı araştırılmıştır. Akım yoğunluğu, destek elektrolit ve pH gibi bazı önemli deneysel parametrelerin KOİ giderimine etkileri incelenmiştir.

Demir elektrotlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda akım yoğunluğuna bağlı olarak KOİ değerleri karşılaştırılmıştır ve  $i= 15 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu deneysel çalışmaların devamında kullanacağımız akım yoğunluğu olarak seçilmiştir.

Farklı destek elektrolit derişimlerinin, gerilimde ne kadar değişim yapabileceği hakkında fikir sahibi olmamızı sağlamıştır. Demir elektrotları kullanılarak yapılan çalışmada % 75 arıtma verimi sağlanmıştır ve 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ile çalışmalara devam edilmiştir.

$\text{H}_2\text{O}_2$  ilavesi ile yapılan çalışmalarda  $i= 15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 2000 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  olarak hazırlanan deney şartlarında yapılan çalışmada % 75 giderim elde edilmiştir.

$i= 15 \text{ mA/cm}^2$ , 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 2000 mg/L  $\text{H}_2\text{O}_2$  ilavesi ile başlangıç pH'ı olarak farklı pH ayarlaması yapılarak hazırlanan çalışmalarda pH= 4,06 'da % 78 giderim gerçekleşmiştir.

Alüminyum elektrotlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda akım yoğunluğuna bağlı olarak KOİ değerleri karşılaştırılmıştır ve  $i= 25 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu deneysel çalışmaların devamında kullanacağımız akım yoğunluğu olarak seçilmiştir. Destek elektrolit olarak  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{NaNO}_3$  tuzları kullanılmıştır ve 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ile çalışmaya devam edilmiştir.

$i= 25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve doğal pH 'ta % 77 giderim gerçekleşmiştir.

Polielektrolit çalışmalarında  $i= 25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 30 mg/L PAC (poli alüminyum klorür ) ile % 76 giderim verimi elde edilirken,  $i= 25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve 40 mg/L Kerafloc ile % 80 giderim verimi elde edilmiştir.

$i= 25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  'ta ve deney boyunca farklı pH değerlerinde sabit tutarak hazırlanan çalışmalarda pH= 8 'de % 72 giderim gerçekleşmiştir.



H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile yapılan çalışmaların H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmeden yapılan çalışmalardan daha verimli olduğu görülmüştür.

Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmalarda en iyi şartlar şu şekilde belirlenmiştir;  $i = 25 \text{ mA/cm}^2$ , 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 40 mg/L Kerafloc ile % 80 giderim verimi elde edilmiştir.

3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit ilavesi ile 10, 15, 20, 25 ve 30 mA 'de demir ve alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmalarda 30 mA' de demir elektrot kullanılarak yapılan deneyde yaklaşık % 84 verim elde edilmiştir.

Önceki çalışmalarda, en iyi şartlar olarak belirlenen;  $1,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu ve 3 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit derişiminde 30 dakika boyunca demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon işlemi uygulanmıştır. Ardından elde ettiğimiz örnek ile elmas elektrot kullanılarak,  $75 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda elektrokimyasal yükseltgeme gerçekleştirildiğinde elektrokoagülasyon sonucu arıtım verimi % 70 iken elektrokimyasal yükseltgeme ile arıtım verimi % 92,5 'e kadar çıkmıştır.

Önceki çalışmalarda, en iyi şartlar olarak belirlenen;  $2,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğu ve 5 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> destek elektrolit derişiminde 30 dakika boyunca alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon işlemi uygulanmıştır. Ardından elde ettiğimiz örnek ile elmas elektrot kullanılarak,  $62,5 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda elektrokimyasal yükseltgeme gerçekleştirildiğinde elektrokoagülasyon sonucu arıtım verimi % 69 iken elektrokimyasal yükseltgeme ile arıtım verimi % 89 'a kadar çıkmıştır.

Demir ve alüminyum elektrotları ile elektrokimyasal arıtım çalışmalarında TOK miktarları da tayin edilmiştir. Buna göre demir elektrotları gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonuçları en yüksek verimi yaklaşık % 71, alüminyum elektrotları kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları ise yaklaşık % 68 olarak elde göstermektedir.

Enerji tüketimini ele alacak olursak yapılan deneysel çalışmalarında zaman değerleri ve gerilimler arttıkça enerji tüketimi de giderek artmıştır

Elde edilen sonuçlara göre, süt endüstrisi model atıksuyunun elektrokimyasal yöntemlerle arıtımının verimli olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Karaer, Y., *Atıksuların elektrokimyasal yöntemle arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [2] İleri R., Güner N., *Süt endüstrisi atıksularında yeni bir yağ-sıvı ayırımı teknolojisinin araştırılması*, Çev-kor Ekoloji, 2000.
- [3] Kaplan Yonar G., *Respirometrik yöntemle değişik endüstriyel atıksuların birlikte arıtılabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2006.
- [4] Gürtekin E., *Süt endüstrisi atıksuyunun arıtımında ardışık kesikli reaktöre zeolit ilavesinin etkisi*, Doğu Anadolu Proje Araştırmaları, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 2008.
- [5] Ekdal A., *Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının kimyasal arıtılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
- [6] Demirel, B., Yenigün, O., Onay, T., *Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review*, Institute of Environmental Sciences, Bogaziçi University, İstanbul, 2004
- [7] *Su Kalitesi Kontrol Yönetmeliği*, Resmi Gazete Sayısı: 25687.<http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr/Metin.Asp?MevzuatKod=7.5.7221&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0>
- [8] İpar, A., Saatçioğlu, T., *Süt endüstrisi atıksu kaynakları ve arıtım yöntemleri*, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 2005
- [9] Kılıç A., *Süt endüstrisi atıksularının arıtımında ardışık kesikli reaktör (sbr) 'de hareketli biofilm uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
- [10] Israilides, C.J., Vlyssides, A.G., Mourafeti, V.N. Vekarvouni, G., *Olive oil wastewater treatment with the use of an electrolysis system*, Bioresource Technology, **61**, 163-170, 1997.



- [11] Çelik A., *Süt endüstrisi atıksularının arıtma alternatifleri*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2011.
- [12] Lehmonen E., *Advanced wastewater treatment technologies in the removal of harmful substances*, Master 's Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, Aalto University School of Engineering, Espoo- Finland, 2012.
- [13] İlhan, F., Kurt U., Apaydın Ö., Arslankaya E., Gönüllü M. T., *Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: katı atık sızıntı suyu çalışması*, AB Sürecinde Türkiye 'de Katı Atık Yönetimi Ve Çevre Sorunları Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, İstanbul, 2007.
- [14] Özdemir, K., *Meyvesuyu fabrikası atıksularının elektrokimyasal olarak arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [15] Kırilaroğlu, M., *Tekstil atıksularının farklı güç kaynakları kullanılarak elektrokimyasal arıtımında optimum şartların araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2008.
- [16] Delipınar, S., *Maya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile arıtımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2007.
- [17] Yavuz Y., *Fenolün elektrokimyasal yöntemlerle sudan giderimi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 2004.
- [18] Abamor H. E., *Elektrokoagülasyon metoduyla Paşaköy ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi atıksuyundaki fosforun giderilebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2008.
- [19] Solak, M., *Elektrokoagülasyon prosesi ile mermer atıksularının arıtılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2007.

- [20] Gür, B. N., *Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyonla arıtılabilirliği*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008.
- [21] Rajeshwar K., Ibanez JG., Swain GM., *Electrochemistry and the environment*, Journal of Applied Electrochemistry, **24**, 1077-1091, 1994.
- [22] Scott, K., *Electrochemical Processes For Clean Technology*. University of Newcastle upon Tyne, 1995.
- [23] Yokovlev, S. V., Krosnoboradko, S. G. and Svetoshova, E. S., *Electrochemical Decolourization of Organic Dye Containing Wastewaters*, Khim. Tekhnol Vody, **10(37)**, 266, 1988.
- [24] Kushwaha J. P., Srivastava V. C., Mall I. D., *Organics removal from dairy wastewater by electrochemical treatment and residue disposal*, Separation and Purification Technology, 198-205, 2010.
- [25] TS 2789 ISO 6060 Su Kalitesi- Kimyasal Oksijen İhtiyacının Tayini Standardı.

## EKLER

### Ek 1. Yüzde Giderim Hesabı

Çizelge 6.1 'de 1. dakikadaki verilerle 5869 mg/L KOİ derişimine sahip atıksu için  $i= 10 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğundaki ve 3 mM  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  derişimindeki % giderim hesabı;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$

$$\% \text{ Giderim} = \frac{5869 - 5217}{5869} \times 100$$

$$\% \text{ Giderim} = 11,111$$

### Ek 2. Enerji Tüketimi Hesabı

Çizelge 6.1' de 1. dakikadaki verilerle 5869 mg/L KOİ derişimine sahip atıksu için  $i= 10 \text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğundaki enerji tüketim hesabı;

$$\text{Enerji Tüketimi (Wh/m}^3) = \frac{V \times I \times t}{V_{\text{çözelti}}} \times 100$$

$$\text{Enerji Tüketimi (Wh/m}^3) = \frac{10,3 \text{ V} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ dak} \times (1 \text{ sa}/60 \text{ dak})}{0,5 \text{ L} \times (1 \text{ m}^3/1000\text{L})} \times 100$$

$$\text{Enerji Tüketimi (Wh/m}^3) = 343 \text{ Wh/m}^3 = 0,343 \text{ kWh/m}^3$$