

**FENOLÜN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE
SUDAN GİDERİMİ**

Yusuf YAVUZ
Doktora Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Mayıs – 2004

"Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 01.02.52 nolu proje kapsamında desteklenmiştir."

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Yusuf Yavuz'un Fenolün Elektrokimyasal Yöntemlerle Sudan Giderimi başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 04.05.2004 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç.Dr.A. Savaş KOPARAL	
Üye	: Prof.Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN	
Üye	: Prof.Dr. M. Ercengiz YILDIRIM	
Üye	: Doç.Dr. Aydın DOĞAN	
Üye	: Yard.Doç.Dr. H. Ferdi GERÇEL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.05.2004... tarih ve ...16/1... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Aliğ İFTAR
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

FENOLÜN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE SUDAN GİDERİMİ

YUSUF YAVUZ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL
2004, 162 sayfa

Bu tezde, paralel plaka ve tıkaç akım reaktörlerde, rutenyum oksit, elmas ve demir elektrotlar kullanılarak, fenolün elektrokimyasal yöntemlerle sudan giderimi araştırılmış ve bütün elektrokimyasal sistemlerde fenolün tamamen ve KOİ'nin yüksek oranlarda giderimi sağlanmıştır. Elektrokoagülasyonda, giderim verimlerinin çözeltiye ilave edilen H₂O₂ miktarına aşırı derecede bağımlı olduğu ve artan H₂O₂ miktarı ile çözeltiden fenolün yanı sıra KOİ'nin de yüksek oranlarda giderilebileceği bulunmuştur. Özellikle H₂O₂ varlığında elektrokoagülasyonda, sürekli ve tek geçişli çalışılmalarda çok yüksek akım verimi değerlerine ulaşılmıştır. Direkt ve NaCl varlığında indirekt yükseltgeme çalışılan elmas elektrotlarda, indirekt yükseltgemedede daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir.

Optimum şartlarda, petrol rafinerisi atıksularının elektrokimyasal sistemlerle arıtımı araştırılmış ve bütün sistemlerde yaklaşık %99 civarında fenol giderim verimleri elde edilmiştir. KOİ giderimi ise özellikle elmas elektrotlarda gerek direkt gerekse indirekt çalışma şartlarında %95'in üzerine çıkmıştır. Elmas elektrotlar, fenolün ve KOİ'nin eşanlı olarak gideriminde daha etkin bulunmuştur. Fenton varlığında kimyasal yükseltgeme deneylerinde yüksek fenol giderimlerine rağmen nispeten düşük KOİ giderimleri elde edilmiştir.

Elektrokimyasal yükseltgeme ile kimyasal yükseltgeme sonuçları kıyaslandığında, fenol ve KOİ'nin eşanlı olarak yüksek verimlerde giderilebilmesi sağlandığından elektrokimyasal arıtım daha verimli bir arıtım yöntemi olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal Arıtım, Fenol, Rutenyum Oksit, Demir, Bor Katkılı Elmas

ABSTRACT

PhD Thesis

PHENOL REMOVAL FROM WATER BY ELECTROCHEMICAL METHODS

YUSUF YAVUZ

**Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Environmental Engineering Program**

**Supervisor: Assoc. Prof. A. Savaş KOPARAL
2004, 162 pages**

In this thesis, electrochemical removal of phenol from water was investigated in a parallel plate reactor and a plug flow reactor using ruthenium oxide, diamond and iron electrodes. Complete removal of phenol and high removal efficiency for COD were achieved in all electrochemical systems.

Removal efficiency of electrocoagulation was directly proportional to the H_2O_2 added to the solution. Increase in the added H_2O_2 resulted in an increase in phenol and COD removal efficiency. Indirect electrochemical oxidation in the presence of NaCl was more efficient than the electrochemical oxidation when diamond anodes were used.

Electrochemical treatment of petroleum refining wastewater was studied under optimum conditions and phenol removal of 99% has been achieved in all electrochemical systems. COD removal was also over 95% especially for diamond anodes in both direct and indirect oxidation.

Boron doped diamond anodes were found effective both for phenol and COD removal. Although high removal efficiency was achieved in chemical oxidation in the presence of H_2O_2 , COD removal was more difficult.

Since high removal efficiencies were obtained for the removal of phenol and COD simultaneously, electrochemical oxidation was superior to the chemical oxidation.

Keywords: Electrochemical Treatment, Phenol, Ruthenium Oxide, Iron, Boron Doped Diamond

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince bilgi, hoşgörü, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen, beni sürekli destekleyen, önerileriyle çalışmamı yönlendiren değerli danışman hocam Sn. Doç. Dr. A. Savaş KOPARAL'a

Değerli görüşleriyle çalışmaya ışık tutan, bilgi ve önerileriyle katkıda bulunan, Çevre Mühendisliği Bölümü Başkanı ve Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü hocam Sn. Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN'e

Çalışmanın her aşamasında, ilgi ve destekleriyle yanımda olan Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkez ve Çevre Mühendisliği Bölüm hocalarım ve arkadaşlarıma,

Yaşantım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olacaklarına inandığım eşim Serap, oğlum Barış Aral ve tüm aileme

en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yusuf YAVUZ

Mayıs, 2004

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. KONU VE AMAÇ	1
2. FENOL HAKKINDA GENEL BİLGİ	3
3. FENOLLÜ ATIKSULARIN ARITIMI	5
3.1. Çözücü Özütlemesi	5
3.2. Biyolojik Arıtım.....	6
3.3. Karbon Adsorpsiyonu	7
3.4. Kimyasal Yükseltgeme	7
3.4.1. Fenton Ajanı ile Kimyasal Yükseltgeme	8
3.5. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar.....	10
4. ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE FENOL GİDERİMİ	13
4.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme	13
4.2. Elektrokimyasal Çöktürme (Elektrokimyasal Koagülasyon, Elektrokoagülasyon).....	16
4.2.1. Elektrokoagülasyonun avantajları.....	19
4.2.2. Elektrokoagülasyonun dezavantajları	20
4.3. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar.....	20

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
5.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme: Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar	29
5.2. Elektrokimyasal Çöktürme: RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrotlar	30
5.3. Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar.....	31
5.4. İndirekt Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar	32
5.5. Kimyasal Yükseltgeme: Fenton Ajanı	33
5.6. Kullanılan Elektrot Malzemeleri	33
5.7. Kullanılan Kimyasal Maddeler	35
5.8. Kullanılan Yardımcı Araçlar	35
5.9. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler.....	36
6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	38
6.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme: Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar	38
6.2. Elektrokimyasal Çöktürme: RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrotlar	58
6.3. Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar.....	92
6.4. İndirekt Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar	112
6.5. Kimyasal Yükseltgeme: Fenton Ajanı.....	128
6.6. Petrol Rafinerisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	131
6.7. Ultrasound Çalışması.....	137
7. BULGULARIN TARTIŞILMASI.....	138
7.1. Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar.....	138
7.2. RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrotlar	139
7.3. RASHIG Halkası Şeklindeki Elmas Elektrotlarda Yükseltgeme	141

7.4. RASHIG Halkası Şeklindeki Elmas Elektrotta İndirekt Yükseltgeme.	142
7.5. Fenton Ajanı ile Kimyasal Yükseltgeme.....	143
7.6. Petrol Rafinerisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	143
7.7. Ultrasound Çalışması.....	144
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR	147
EKLER.....	153
EK-1 Bor Katkılı Elmas Elektrotun SEM Görüntüleri ve Elementel Analizi .	153
EK-2 Standart Çalışma Doğrusu ve Derişim Hesabı.....	155
EK-3 Peristaltik Pompa Kalibrasyonu	157
EK-4 Örnek Hesaplamalar	158
EK-5 İki Kutuplu Tıkaç Akım Reaktörün Hacmi ve Anot Yüzey Alanı Hesabı.....	160
EK-6 Elektrokimyasal Oksijen İsteminin Hesaplanması.....	161

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme Mekanizması.....	16
5.1. Elektrokimyasal reaktörün bölmelerine yerleştirilen elektrot demeti.....	29
5.2. Paralel plaka reaktör ve deneysel çalışma düzeneği	30
5.3. Tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği.....	31
6.1. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 5$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı).....	48
6.2. Fenol gideriminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 5$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı).....	49
6.3. Enerji tüketiminin başlangıç pH'ı ile değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i=5$ mA/cm ² , $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı) ..	49
6.4. Akım veriminin başlangıç pH'ı ile değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V=500$ mL, $i=5$ mA/cm ² , $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı) ...	49
6.5. Kalan fenol derişiminin sıcaklığa bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V=500$ mL, $i=10$ mA/cm ² , $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH=doğal)....	50
6.6. Fenol gideriminin sıcaklığa bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V=500$ mL, $i=10$ mA/cm ² , $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH=doğal)...	50
6.7. Enerji tüketiminin sıcaklıkla değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 10$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH= doğal)	50
6.8. Akım veriminin sıcaklıkla değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 10$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH= doğal)	51
6.9. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V=500$ mL, $i= 5$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t= 20^\circ\text{C}$)	51
6.10. Fenol gideriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200$ mg/L, $V=500$ mL, $i= 5$ mA/cm ² , $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t= 20^\circ\text{C}$)	51
6.11. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimi ile değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V=500$ mL, $i= 5$ mA/cm ² , $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$)....	52

6.12. pH'in zamanla değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$)	52
6.13. Akım veriminin zamanla değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$).....	52
6.14. Kalan fenol derişiminin akım yoğunluğuna bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	53
6.15. Fenol gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= \text{laboratuvar}$ sıcaklığı , $\text{pH}= \text{doğal}$)	53
6.16. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$)	53
6.17. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}=\text{doğal}$)	54
6.18. Kalan fenol derişiminin akış hızına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	54
6.19. Fenol gideriminin akış hızına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200$ mg/L , $V=500\text{mL}$, $i=15\text{mA/cm}^2$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}=\text{doğal}$)	54
6.20. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	55
6.21. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	55
6.22. Kalan fenol derişiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	55
6.23. Fenol gideriminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	56
6.24. Enerji tüketiminin başlangıç fenol derişimi ile değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q=24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i=15\text{mA/cm}^2$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}=\text{doğal}$) ...	56
6.25. pH'in zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).....	56

6.26. Akım veriminin zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q=24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$).....	57
6.27. 200 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin H_2O_2 ile değişimi ($I=88,2\text{mA}$, $i=0,5\text{mA/cm}^2$, $Q=24,83 \times 10^{-3}\text{L/dak}$)	66
6.28. 200 mg/L başlangıç derişiminde akım verimi ve enerji tüketiciminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 88,2\text{mA}$, $i= 0,5\text{mA/cm}^2$, $Q=24,83 \times 10^{-3}\text{L/dak}$)	66
6.29. 200 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin H_2O_2 ile değişimi ($I= 176,4\text{mA}$, $i= 1\text{mA/cm}^2$, $Q=24,83 \times 10^{-3}\text{L/dak}$)	66
6.30. 200 mg/L başlangıç derişiminde akım verimi ve enerji tüketiciminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 176,4\text{mA}$, $i= 1\text{mA/cm}^2$, $Q=24,83 \times 10^{-3}\text{L/dak}$)	67
6.31. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2 + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	67
6.32. 500 mg/L başlangıç derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2 + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)	67
6.33. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2 + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)	68
6.34. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiciminin akım yoğunluğu ile değişimi ($1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2 + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)	68
6.35. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($1000 \text{ mg/L H}_2\text{O}_2 + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	68
6.36. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02M Na_2SO_4 derişiminde kalan fenol derişiminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 88,2 \text{ mA}$, $i= 0,5 \text{ mA/cm}^2$).....	69
6.37. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na_2SO_4 derişiminde akım veriminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 88,2 \text{ mA}$, $i= 0,5 \text{ mA/cm}^2$)	69
6.38. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na_2SO_4 derişiminde KOİ gideriminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 88,2 \text{ mA}$, $i= 0,5 \text{ mA/cm}^2$)	69
6.39. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na_2SO_4 derişiminde enerji tüketiciminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 88,2 \text{ mA}$, $i= 0,5 \text{ mA/cm}^2$)	70
6.40. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02M Na_2SO_4 derişiminde kütle aktarım katsayısının H_2O_2 ile değişimi ($I=88,2 \text{ mA}$, $i=0,5 \text{ mA/cm}^2$).....	70
6.41. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02M Na_2SO_4 derişiminde kalan fenol derişiminin H_2O_2 ile değişimi ($I= 176,43 \text{ mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	70

6.42. 500mg/L başlangıç fenol +0,02M Na ₂ SO ₄ derişiminde akım veriminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm ²)	71
6.43. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde KOİ gideriminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm ²)	71
6.44. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde enerji tüketiminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm ²)	71
6.45. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde kütle aktarım katsayısının H ₂ O ₂ ile değişimi (I=176,43 mA, i=1 mA/cm ²).....	72
6.46. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde kalan fenol derişiminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I=264,64 mA, i=1,5 mA/cm ²)	72
6.47. 500mg/L başlangıç fenol +0,02M Na ₂ SO ₄ derişiminde akım veriminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm ²)	72
6.48. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde KOİ gideriminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm ²)	73
6.49. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde enerji tüketiminin H ₂ O ₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm ²)	73
6.50. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na ₂ SO ₄ derişiminde kütle aktarım katsayısının H ₂ O ₂ ile değişimi (I=264,64mA, i=1,5mA/cm ²)....	73
6.51. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	74
6.52. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	74
6.53. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	74
6.54. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	75
6.55. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	75
6.56. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	75
6.57. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	76

6.58. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	76
6.59. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	76
6.60. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	77
6.61. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	77
6.62. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	77
6.63. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	78
6.64. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	78
6.65. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	78
6.66. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	79
6.67. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	79
6.68. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	79
6.69. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	80
6.70. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄).....	80
6.71. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak + 0,02 M Na ₂ SO ₄).....	80
6.72. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak + 0,02 M Na ₂ SO ₄).....	81
6.73. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak + 0,02 M Na ₂ SO ₄).....	81

6.74. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	81
6.75. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	82
6.76. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	82
6.77. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	82
6.78. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	83
6.79. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	83
6.80. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde KOİ gideriminin akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	83
6.81. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde akım veriminin akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	84
6.82. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	84
6.83. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde kütle aktarım katsayısının akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	84
6.84. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	85
6.85. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	85
6.86. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	85
6.87. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	86
6.88. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H_2O_2 derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$).....	86
6.89. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H_2O_2 derişiminde kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($I= 176,43 \text{mA}$, $i= 1 \text{ mA/cm}^2$).....	86

6.90. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde KOİ gideriminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm ²)	87
6.91. 1500 mg/L fenol + 5000mg/L H ₂ O ₂ derişiminde akım veriminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm ²)	87
6.92. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm ²)	87
6.93. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm ²).....	88
6.94. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na ₂ SO ₄).....	88
6.95. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na ₂ SO ₄).....	88
6.96. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na ₂ SO ₄).....	89
6.97. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na ₂ SO ₄).....	89
6.98. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na ₂ SO ₄).....	89
6.99. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,07 M Na ₂ SO ₄ derişiminde pH'ın zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm ² , V= 500 mL, Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L).....	90
6.100. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,07M Na ₂ SO ₄ derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 353 mA, i=2mA/cm ² , V=500mL, Q=24,83x10 ⁻³ L/dak, KOİgiriş=3600mg/L)....	90
6.101. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,07 M Na ₂ SO ₄ derişiminde akım veriminin zamanla değişimi (I=353mA, i=2mA/cm ² , V= 500 mL, Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)	90
6.102. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,07M Na ₂ SO ₄ derişiminde enerji tüketiminin zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm ² , V= 500 mL, Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)	91
6.103. Kalan fenol derişimi ve pH'ın zamanla değişimi (I= 30 mA, V= 500 mL, Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	100

- 6.104. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 101
- 6.105. pH'in destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 101
- 6.106. KOI'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 101
- 6.107. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 102
- 6.108. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 102
- 6.109. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 102
- 6.110. pH'in destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 103
- 6.111. KOI'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 103
- 6.112. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 103
- 6.113. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 104
- 6.114. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{ mg/L}+0,05\text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{ mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)..... 104

- 6.115. KOİ'nin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi
($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA,
 $i=5$ mA/cm², $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$)..... 104
- 6.116. pH'in başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm²,
 $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$)..... 105
- 6.117. Kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm²,
 $t=20^\circ C$, pH= doğal) 105
- 6.118. pH'in akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 ,
 $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal) 105
- 6.119. KOİ'nin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 ,
 $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal) 106
- 6.120. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm²,
 $t=20^\circ C$, pH= doğal) 106
- 6.121. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm²,
 $t=20^\circ C$, pH= doğal) 106
- 6.122. Kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak,
 $t=20^\circ C$, pH= doğal) 107
- 6.123. pH'in akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05M Na_2SO_4 ,
 $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$, pH= doğal)..... 107
- 6.124. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05M Na_2SO_4 ,
 $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$, pH= doğal)..... 107
- 6.125. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$, pH=doğal).. 108
- 6.126. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L
+0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$,
pH= doğal)..... 108

- 6.127. Kalan fenol derişiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal) 108
- 6.128. pH'ın başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal)..... 109
- 6.129. KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal)..... 109
- 6.130. Akım veriminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal) 109
- 6.131. Enerji tüketiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal) 110
- 6.132. Kalan fenol derişiminin sıcaklıkla değişimi (C₀=200 mg/L +0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², pH= doğal) 110
- 6.133. pH'ın sıcaklıkla değişimi (C₀=200mg/L +0,05M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², pH= doğal) 110
- 6.134. KOİ'nin sıcaklıkla değişimi (C₀=200 mg/L +0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q=36,3x10⁻³L/dak, I=882mA, i=5mA/cm², pH=doğal) 111
- 6.135. Akım veriminin sıcaklıkla değişimi (C₀=200 mg/L +0,05M Na₂SO₄, V=500mL, Q=36,3x10⁻³L/dak, I=882mA, i=5mA/cm², pH=doğal) 111
- 6.136. Enerji tüketiminin sıcaklıkla değişimi (C₀=200mg/L +0,05M Na₂SO₄, V=500mL, Q=36,3x10⁻³L/dak, I= 882mA, i=5mA/cm², pH=doğal) 111
- 6.137. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (C₀= 200mg/L, V=500mL, I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 119
- 6.138. pH'ın destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (C₀= 200mg/L, V=500mL, I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 119

- 6.139. KOİ'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi
 $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 176\text{ mA}, i = 1\text{ mA/cm}^2,$
 $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 120$
- 6.140. Enerji tüketimeinin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla
değişimi $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 176\text{ mA},$
 $i = 1\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 120$
- 6.141. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak
zamanla değişimi $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA},$
 $i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 120$
- 6.142. pH'in destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi
 $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA}, i = 3\text{ mA/cm}^2,$
 $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 121$
- 6.143. KOİ'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi
 $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA}, i = 3\text{ mA/cm}^2,$
 $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 121$
- 6.144. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla
değişimi $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA},$
 $i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 121$
- 6.145. Enerji tüketimeinin destek elektrolit derişimine bağlı olarak
zamanla değişimi $(C_o = 200\text{mg/L}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA},$
 $i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 122$
- 6.146. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla
değişimi $(C_o = 200\text{ mg/L} + 0,07\text{ M NaCl}, V = 500\text{ mL},$
 $I = 530\text{ mA}, i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 122$
- 6.147. KOİ'nin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi
 $(C_o = 200\text{ mg/L} + 0,07\text{ M NaCl}, V = 500\text{ mL}, I = 530\text{ mA},$
 $i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 122$
- 6.148. pH'in başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi
 $(C_o = 200\text{ mg/L} + 0,07\text{ M NaCl}, V = 500\text{ mL}, I = 530\text{ mA},$
 $i = 3\text{ mA/cm}^2, Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}, t = 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots 123$
- 6.149. Kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi $(C_o = 200\text{ mg/L}$
 $+ 0,07\text{ M NaCl}, V = 500\text{mL}, I = 530\text{ mA}, i = 3\text{ mA/cm}^2,$
 $t = 20^\circ\text{C}, \text{pH} = \text{doğal}) \dots\dots\dots 123$

- 6.150. pH'ın akış hızı ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L} +0,07 \text{ M NaCl}$,
 $V=500\text{mL}$, $I= 530 \text{ mA}$, $i= 3 \text{ mA/cm}^2$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 123
- 6.151. KOİ'nin akış hızı ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L} +0,07 \text{ M NaCl}$,
 $V=500\text{mL}$, $I= 530 \text{ mA}$, $i= 3 \text{ mA/cm}^2$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 124
- 6.152. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L}$
 $+0,07 \text{ M NaCl}$, $V=500\text{mL}$, $I= 530 \text{ mA}$, $i= 3 \text{ mA/cm}^2$,
 $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 124
- 6.153. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L}+0,07\text{M NaCl}$,
 $V=500\text{mL}$, $I= 530 \text{ mA}$, $i= 3 \text{ mA/cm}^2$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 124
- 6.154. Kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L}$
 $+0,07 \text{ M NaCl}$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$,
 $\text{pH}= \text{doğal}$) 125
- 6.155. pH'ın akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L}+0,07\text{M NaCl}$,
 $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 125
- 6.156. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200\text{mg/L} +0,07\text{M NaCl}$,
 $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 125
- 6.157. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L}$
 $+0,07\text{M NaCl}$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$).. 126
- 6.158. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o= 200 \text{ mg/L}$
 $+0,07 \text{ M NaCl}$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$). 126
- 6.159. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı
olarak zamanla değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{mL}$, $I= 530 \text{ mA}$,
 $i= 3 \text{ mA/cm}^2$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 126
- 6.160. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı
olarak zamanla değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{mL}$, $I= 882 \text{ mA}$,
 $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 127
- 6.161. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi ($C_o= 1500\text{mg/L}$
 $+0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{mL}$, $I= 882 \text{ mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$,
 $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$, $\text{pH}= \text{doğal}$) 127
- 6.162. 200 mg/L fenol başlangıç derişimi için kalan fenol derişiminin ilave
edilen H_2O_2 ve FeSO_4 ile değişimi 129

6.163. 200 mg/L fenol başlangıç derişimi için KOİ'nin ilave edilen H ₂ O ₂ ve FeSO ₄ ile değişimi.....	130
6.164. 500 mg/L fenol başlangıç derişimi için kalan fenol derişiminin ilave edilen H ₂ O ₂ ve FeSO ₄ ile değişimi	130
6.165. 500 mg/L fenol başlangıç derişimi için KOİ'nin ilave edilen H ₂ O ₂ ve FeSO ₄ ile değişimi.....	130
6.166. Paralel plaka rutenyum oksit elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 7200 mA, i= 20 mA/cm ² , Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	133
6.167. Demir elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 176 mA, i= 1 mA/cm ² , Q= 36,3x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	134
6.168. Demir elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (1000mg/L H ₂ O ₂ , I= 176 mA, i= 1 mA/cm ² , Q= 36,3x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	134
6.169. Elmas elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 882 mA, i= 5 mA/cm ² , Q= 36,3x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	134
6.170. Elmas elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (0,05 M NaCl, I= 530 mA, i= 3 mA/cm ² , Q= 24,83x10 ⁻³ L/dak, t= 20°C).....	135
6.171. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda kalan fenol derişiminin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi	135
6.172. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda pH'ın elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi	135
6.173. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda KOİ'nin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi	136
6.174. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda enerji tüketiminin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi	136
6.175. 50 mg/L fenol çözeltisi ile yapılan ultrasound çalışması (t= 35°C).....	137

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Fenolün fiziksel ve kimyasal özellikleri	4
5.1. Bazı kimyasal yükseltgenlerin oluşum gerilimleri.....	34
6.1. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1080\text{mA}$, $i= 3\text{mA/cm}^2$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$) ...	38
6.2. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t= \text{lab. sıcaklığı}$, $\text{pH}_{\text{başlangıç}}= 6,86$ (doğal), $\text{pH}_{\text{son}}= 4,23$).....	39
6.3. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t= \text{laboratuvar}$ sıcaklığı , $\text{pH}_{\text{başlangıç}}= 3,05$, $\text{pH}_{\text{son}}= 3,35$).....	39
6.4. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t= \text{laboratuvar}$ sıcaklığı , $\text{pH}_{\text{başlangıç}}=11,02$, $\text{pH}_{\text{son}}= 10,73$).....	39
6.5. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$).....	40
6.6. 200 mg/L fenol ve $0,05\text{M Na}_2\text{SO}_4$ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I=1800\text{mA}$, $i=5 \text{mA/cm}^2$, $V=500 \text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$).....	40
6.7. 200 mg/L fenol ve $0,1\text{M Na}_2\text{SO}_4$ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I=1800\text{mA}$, $i=5\text{mA/cm}^2$, $V=500 \text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$).....	40
6.8. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600\text{mA}$, $i= 10 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$).....	41
6.9. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600\text{mA}$, $i=10\text{mA/cm}^2$, $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$) .	41
6.10. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600\text{mA}$, $i= 10 \text{mA/cm}^2$, $V= 500 \text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{L/dak}$, $t= 50^\circ\text{C}$)	41
6.11. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 5400\text{mA}$, $i=15\text{mA/cm}^2$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$) ..	42
6.12. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 7200\text{mA}$, $i=20\text{mA/cm}^2$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=\text{laboratuvar sıcaklığı}$) ..	42

- 6.13. 200 mg/L fenol ve 0,1M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 3600mA, i= 10 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak,
t= laboratuvar sıcaklığı)..... 42
- 6.14. 200 mg/L fenol ve 0,1M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak,
t= laboratuvar sıcaklığı)..... 43
- 6.15. 200 mg/L fenol ve 0,1M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 7200mA, i= 20 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak,
t= laboratuvar sıcaklığı)..... 43
- 6.16. 200 mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak,
t= laboratuvar sıcaklığı)..... 44
- 6.17. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=5400mA, i=15
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 44
- 6.18. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=5400mA, i=15
mA/cm², V= 500 mL, Q= 47,8x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı).... 44
- 6.19. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=3600mA, i=10
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 45
- 6.20. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=7200mA, i=20
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 45
- 6.21. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=3600mA, i=10
mA/cm², V=500 mL, Q=24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)..... 45
- 6.22. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=5400mA, i=15
mA/cm², V=500 mL, Q=24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)..... 46
- 6.23. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=7200mA, i=20
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 46
- 6.24. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=3600mA, i=10
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 46
- 6.25. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=5400mA, i=15
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 47
- 6.26. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=7200mA, i=20
mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)... 47

6.27. Kütle aktarım katsayısının çalışma parametreleri ile değişimi	48
6.28. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak).....	58
6.29. 200 mg/L fenol +250 mg/L H ₂ O ₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak).....	59
6.30. 200 mg/L fenol +500 mg/L H ₂ O ₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak).....	59
6.31. 200 mg/L fenol +1000mg/L H ₂ O ₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak).....	59
6.32. 500 mg/L fenol +1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,02 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	60
6.33. 500 mg/L fenol + 1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,02 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	60
6.34. 500 mg/L fenol + 2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,02 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	60
6.35. 500 mg/L fenol + 1000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	61
6.36. 500 mg/L fenol + 1500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	61
6.37. 500 mg/L fenol + 2000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	62
6.38. 500 mg/L fenol + 2500 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	62
6.39. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	63
6.40. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,05 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	63
6.41. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,07 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	64
6.42. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,03 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	64
6.43. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H ₂ O ₂ + 0,05 M Na ₂ SO ₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar	64

- 6.44. 1500 mg/L fenol +5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar..... 65
- 6.45. 1500 mg/L fenol +5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak)..... 65
- 6.46. 1500mg/L fenol +5000mg/L H₂O₂ +0,07M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I=353mA,i=2mA/cm², V=500mL, Q_{çözelti}= 24,83x10⁻³L/dak, Q_{hava}=24,83x10⁻³L/dak) 65
- 6.47. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 30 mA, V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 92
- 6.48. 200mg/L fenol ve 0,01MNa₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 93
- 6.49. 200mg/L fenol ve 0,03M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C 93
- 6.50. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 94
- 6.51. 200mg/L fenol ve 0,07M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 94
- 6.52. 200mg/L fenol ve 0,01M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 94
- 6.53. 200mg/L fenol ve 0,03M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 95
- 6.54. 200mg/L fenol ve 0,07M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 95
- 6.55. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)..... 95
- 6.56. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH=3,02).... 96
- 6.57. 200mg/L fenol ve 0,05 MNa₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH=11,10).. 96
- 6.58. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)... 96

- 6.59. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882mA, i= 5mA/cm², Q =47,8x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 97
- 6.60. 200mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882mA, i= 5mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 5°C, pH=doğal)..... 97
- 6.61. 50mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882mA, i= 5mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 97
- 6.62. 50mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i=3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 98
- 6.63. 50mg/L fenol ve 0,03M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882mA, i= 5mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 98
- 6.64. 50mg/L fenol ve 0,03M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 98
- 6.65. 500mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882mA, i= 5mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 99
- 6.66. 500mg/L fenol ve 0,05M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 99
- 6.67. Kütle aktarım katsayısının deneysel çalışma parametreleri ile değişimi 100
- 6.68. 200 mg/L fenol ve 0,03 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 176mA, i= 1mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 112
- 6.69. 200 mg/L fenol ve 0,05 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 176mA, i= 1mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 113
- 6.70. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 176mA, i= 1mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 113
- 6.71. 200 mg/L fenol ve 0,03 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 114
- 6.72. 200 mg/L fenol ve 0,05 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 114
- 6.73. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=doğal)..... 115
- 6.74. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 36,3x10⁻³L/dak, t= 20°C, pH=3)..... 115

- 6.75. 200mg/L fenol ve 0,07M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= 11)..... 116
- 6.76. 200mg/L fenol ve 0,07M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530mA, i= 3mA/cm², Q= 24,83x10⁻³L/dak, t=20°C, pH=doğal)..... 116
- 6.77. 200mg/L fenol ve 0,07M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530 mA, i= 3mA/cm², Q= 47,8x10⁻³L/dak, t=20°C, pH=doğal)..... 117
- 6.78. 500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 530 mA, i= 3mA/cm², Q= 24,83x10⁻³L/dak, t=20°C, pH=doğal)..... 117
- 6.79. 500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882 mA, i= 5mA/cm², Q= 24,83x10⁻³L/dak, t=20°C, pH=doğal)..... 118
- 6.80. 1500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar
(I= 882 mA, i= 5mA/cm², Q= 24,83x10⁻³L/dak, t=20°C, pH=doğal)..... 118
- 6.81. Kütle aktarım katsayısının deneysel çalışma parametreleri ile değişimi 119
- 6.82. 200 mg/L fenol başlangıç derişiminde gerçekleştirilen çalışmalar
(V= 500 mL)..... 128
- 6.83. 500 mg/L fenol başlangıç derişiminde gerçekleştirilen çalışmalar
(V= 500 mL)..... 129
- 6.84. Paralel plaka rutenyum oksit elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 7200 mA, i= 20 mA/cm²,
Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 131
- 6.85. Demir elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 132
- 6.86. Demir elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (1000mg/L H₂O₂, I= 176 mA, i= 1 mA/cm²,
Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 132
- 6.87. Elmas elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 132
- 6.88. Elmas elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (0,05 M NaCl, I= 530 mA, i= 3 mA/cm²,
Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C) 133
- 6.89. 50 mg/L fenol çözeltisi ile yapılan ultrasound çalışması (t= 35°C)..... 137

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

3-MP	: 3-Metilpiridin
A	: Amper
ACGIH TLV	: American Conference of Governmental and Industrial Hygienists Threshold Limit Value
AEOP	: İleri Elektrokimyasal Yükseltgeme Süreci
AKM	: Askıda Katı Madde
BDD	: Bor Katkılı Elmas
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İstemi
DSA	: Dimensionally Stable Anodes
E°	: Elektrik potansiyeli
EDTA	: Etilen Diamin Tetra Asetikasit
EOD	: Elektrokimyasal Oksijen İstemi
EOİ	: Elektrokimyasal Yükseltgeme İndisi
GAC	: Granüler Aktif Karbon
GMC	: Granüler Maghara Kömürü
HDTMA	: Hekzadesiltrimetilamonyumbromür
HF	: Hidroflorik asit
ICE	: Instantaneous Current Efficiency
KOİ	: Kimyasal Oksijen İstemi
k_m	: Kütle Aktarım Katsayısı
LSV	: Linear Swipping Voltammogram
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit
OSHA PEL	: Occupational Safety and Health Administration's Permissible Exposure Limit
PA	: Poliakrilat
ppm	: parts per million
ppb	: parts per billion
SCE	: Saturated Calomel Electrode
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
TOK	: Toplam Organik Karbon
TDS	: Toplam Çözünmüş Katı

1. KONU VE AMAÇ

Petrol rafinerileri, kok tesisleri, tekstil endüstrisi, kimyasal ve plastik fabrikalarının da içinde bulunduğu geniş bir endüstri grubu fenolik bileşiklerin temel kaynaklarıdır.

Atıksularda bulunan ve toksik özellikleri olan fenoller gibi aromatik yapılu ve biyolojik parçalanmaya dirençli organik maddelerin sulardan giderimi için geleneksel yöntemler yeterli olamayabilmektedir. Biyolojik arıtım yöntemleriyle giderilememesinin yanı sıra, bu süreçlerde önemli rol oynayan mikroorganizmalar üzerindeki inhibe edici etkisi fenollerin önemli dezavantajlarıdır. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde de belirtildiği üzere alıcı ortam deşarj standart değerleri çok düşük olan fenolik bileşiklerin alıcı ortama deşarjından önce mutlaka giderilmeleri gereklidir. Fenolik bileşikler sadece insanlar için değil, deşarj edildiği ortamlarda bulunan canlılar (balıklar ve sucul ekosistemler) için de ciddi bir tehlikedir (Saha ve ark. 1999). Fenoller, atıksu arıtımı yada üretim süreçleri sırasında klorla tepkimeye girerek kanserojen özellik taşıyan klorlu fenollerin oluşumuna neden olmaktadır (Awad ve Abuzaid 1999).

Su içinde çok düşük miktarlardaki fenol varlığı bile su kalitesini önemli derecede etkilemektedir. 2,5 mg/L derişimde fenol, içme suyunda istenmeyen tada ve balıklarda kötü kokuya neden olmaktadır. Daha yüksek derişimlerde ise sadece balıkların değil bütün sucul canlıların tamamen yok olmasına neden olmaktadır. Fenol, sucul canlılara, mikroorganizmalara ve memelilere olan toksik etkileri nedeniyle "öncelikli kirleticiler" arasında yer almaktadır (Awad ve Abuzaid 1997).

Elektrokimyasal yöntemlerle organik madde giderimi günümüzde bir çok araştırmacı tarafından çalışılmakta olan bir konudur. Özellikle biyolojik parçalanmaya direnç gösteren organik maddelerin sulara girmesi geleneksel su/atıksu arıtım yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmuş ve çalışmaları ileri arıtım tekniklerine yönelmeye zorlamıştır.

Bu çalışmada, fenolün elektrokimyasal yöntemlerle giderimi araştırılmıştır. Distile su ile hazırlanan model atıksular direkt ve indirekt elektrokimyasal yükseltgemenin yanı sıra, H₂O₂ varlığında elektrokoagülasyona da tabi

tutulmuştur. Çalışmalarda elektrot malzemesi olarak, paralel plaka şeklindeki rutenyum oksit kaplı titanyum, RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas ve RASHIG halkası şeklindeki demir kullanılmıştır.

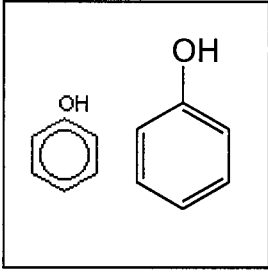
Optimum şartlarda elektrokimyasal yöntemlerle petrol rafinerisi atıksularının arıtılabilirliği araştırılmıştır.

Ayrıca, elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi amacıyla Fenton (Fe^{2+}) varlığında H_2O_2 ile fenolün kimyasal yükseltgenmesi çalışılmıştır.

Çalışmalarda ultrasoundun (yüksek frekanslı ses dalgaları) fenol giderimine etkisi de araştırılmıştır.

DeneySEL çalışmalarda fenolün elektrokimyasal yükseltgeme ile CO_2 ve suya kadar yükseltgenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada kullanılan elektrot malzemesine bağlı olarak, fenolün benzokinon, hidrokinoN, kateşol gibi aromatik ara ürünlere, ve bu ara ürünlerin maleik asit, fumarik asit ve oksalik asit gibi alifatik ara ürünlere yükseltgenmesi de söz konusudur. Elektrokimyasal fenol yükseltgenmesinde nihai ürünler CO_2 ve H_2O 'dur.

2. FENOL HAKKINDA GENEL BİLGİ



Fenoller, aromatik halkaya bir yada daha fazla hidroksil grubunun bağlandığı aromatik bileşiklerdir. Saf halde, renksiz veya beyazdan hafifçe pembeye çalan renkte kristal katı şeklindedir. Tatlımsı, buruk bir kokuya sahip fenollerin tespit limiti havada 40 ppb, suda ise 1-8 ppm'dir. Suya kıyasla çok yavaş buharlaşır, suda orta dereceli bir çözünürlüğe sahiptir ve oldukça yanıcıdır.

Fenol hem doğal olarak oluşmakta, hem de insan faaliyetleri sonucu üretilmektedir. Doğal olarak bazı gıdalarda, insan ve hayvan atıklarında, bozulmuş organik maddelerde bulunmaktadır.

Fenol, ilk olarak 1834 yılında bir Alman kimyageri olan Friedlieb RUNGE tarafından kömür katranından izole edilmiş ve karbolik asit olarak isimlendirilmiştir. Fenol, ticari olarak ilk kez 1860 yılında kömür katranından damıtılarak üretilmiştir (http-1). Günümüzde ise sentetik olarak üretilmektedir.

Fenol halen en yaygın olarak kontrplak, yapıştırıcı, yapı ve otomotiv endüstrilerinde ve çeşitli endüstrilerde yararlanılan fenolik reçine üretiminde kullanılmaktadır. Fenol, aynı zamanda naylon ve epoksi reçinelerin üretiminde kullanılan Caprolactam ve Bisfenol-A eldesinde kullanılmaktadır (http-2). Bakteri ve mantarlar için toksik olan fenol, dezenfektan olarak kullanılır. Ayrıca, analitik reaktif, antiseptik ve petrol çözücüsü olarak da kullanım alanı bulmaktadır. Anestetik etkileri nedeniyle fenol, merhem, kulak ve burun damlası, yanık losyonları, boğaz pastilleri ve spreylerde de kullanılmaktadır.

En önemli fenol maruziyet kaynakları, fenolün kullanıldığı üretim süreçleridir. İnsanlar aynı zamanda fenole, ilaçlar ve losyonlar, bazı gıdalar ve tütün içimi nedeniyle de maruz kalmaktadırlar.

Fenol; solunum, ağız yada deri yoluyla kolayca absorbe olabilir. Absorplandıktan sonra, vücutta geniş bir yayılım gösterir. Vücuda giriş yoluna bakılmaksızın, öncelikli olarak üre ile hızla atılır. Vücutta belirgin bir birikim göstermez. Ağız yoluyla alındığında, insan için öldürücü doz 50-500mg/kg'dır.

Fenolün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Fenolün fiziksel ve kimyasal özellikleri (http-2, http-3, http-4, http-5, http-6)

CAS Liste Numarası	108-95-2
Diğer isimleri	Benzenol, hidroksibenzen, monofenol, monohidroksi benzen, oksibenzen, fenil alkol, fenil hidrat, izal, fenil hidroksit, fenilik asit, fenilik alkol
Tescilli ticari isimleri	Karbolik asit, fenik asit, fenik alkol
Erime noktası, °C	43
Kaynama noktası, °C	181,8
Buhar basıncı (mm-Hg), 25°C'de	0,3513
Buhar yoğunluğu (Hava = 1)	3,24
Yoğunluğu, 4°C'deki suyun yoğunluğuna kıyasla 25°C'de	1,0576
Parlama noktası, °C	85
Suda çözünürlüğü, 25°C'de gr/L	87 (alkol, kloroform, eter, benzin, aseton, suda çözünürlüğü çok yüksek)
Koku eşik değeri	0,047 ppm (0,18mg/m ³) - %100 cevap 0,006 ppm (0,02mg/m ³) – hissedilebilir
OSHA PEL ^a	5 ppm (19 mg/m ³)
ACGIH TLV ^b	5 ppm (19 mg/m ³)
Moleküler ağırlığı	94,12
Dönüşüm faktörleri	1 ppm (v/v) = mg/m ³ x 0,260 1 mg/m ³ = ppm (v/v) x 3,85
Ampirik (kimyasal) formülü	C ₆ H ₆ O
^a Occupational Safety and Health Administration's Permissible Exposure Limit ^b American Conference of Governmental and Industrial Hygienists Threshold Limit Value	

19919 No ve 04.09.1988 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde fenol için çeşitli kısıtlamalar getirilmiştir. Örneğin Kıtaçi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterlerinin verildiği çizelgede I. kalite sularında fenolik maddeler için verilen sınır değer 0,002 mg/L'dir. Bu değer II., III. ve IV. Kalite su kaynakları için sırasıyla; 0,01, 0,1 ve >0,1 mg/L şeklinde verilmiştir. Aynı yönetmelikte, rekreasyon amacıyla kullanılan kıyı ve deniz sularının sağlanması gereken fenol standardının 0,005 mg/L'nin altında olması gerektiği belirtilmektedir. Deniz suyunun genel kalite kriterlerinin verildiği çizelgede ise fenol için verilen sınır değer 0,001 mg/L'dir.

3. FENOLLÜ ATIKSULARIN ARITIMI

Bozunan organik maddelerde ve canlıların idrarlarında tespit edilmesine rağmen, fenolün (C_6H_5OH) yüzeysel sularda varlığı, genelde bir endüstriyel kirliliğe bağlanmaktadır. Fenolik bileşenler ve türevleri, kaplamalarda, çözücülerde, plastiklerde, patlayıcılarda, gübrelerde, eczacılıkta, tekstilde, sabun ve boyalarda kullanılmaktadır. Petrol rafinerileri, kok tesisleri ve reçine üretim tesisleri temel endüstriyel fenolik atık kaynaklarıdır. Örneğin, işlenen kokun tonu başına ortalama $0,3-4 m^3$ atıksu oluşturulan kok üretim tesislerinin atıksuları $150-2000 mg/L$ civarında fenol ($0,3-12 kg/ton$ işlenen kok) içermektedir (http-7). Benzer şekilde, özellikle soğutma sistemlerinde olmak üzere, yüksek miktarlarda su kullanılan petrol rafinerilerinde, soğutma suyu döngüsünde, işlenen ham petrolün tonu başına $3,5-5 ton$ atıksu oluşmaktadır. Rafinerilerde oluşan atıksular $20-200 mg/L$ düzeyinde fenol içermektedir (http-8).

Fenol gideriminde kullanılan arıtma yöntemleri arasında biyolojik (aktif çamur, damlamalı filtre, yükseltgeme havuzları), kimyasal yükseltgeme (hava, klor, klor dioksit, ozon, hidrojen peroksit), fiziksel (aktif karbon adsorpsiyonu, çözücü özütlemesi ve iyon değiştirme), fizikokimyasal yöntemler sayılabilir.

3.1. Çözücü Özütlemesi

Yüksek derişimlerde fenol içeren atıksulardaki fenol, çözücü özütlemesi ile kabul edilebilir düzeylere indirgenebilir. Geri kazanılan fenol, üretim sürecinde tekrar kullanılabilir ya da katı halde yan ürün olarak kullanılabilir. Çözücü özütlemesinde, iki karışmayan ya da kısmen çözünebilir sıvı bir ya da daha fazla bileşenin yer değiştirmesi için bir araya getirilir. Benzen gibi bir çözücü kullanılarak, fenol atıksudan özütlenir. Özütlenen fenol, kostik ile sodyum tuzu oluşturularak ayrılır, ve benzen tekrar kullanılır. Sürecin verimliliği çözücü seçimi ve sistem tasarımına bağlıdır.

3.2. Biyolojik Arıtım

Fenölü parçalayabilme özelliği olan mikroorganizmalar çok özel türlerdir ve sürekli kontrol gerektiren durağan (stabil) bir çevreye ihtiyaç duyarlar. İdeal şartlarda uygun bir biyolojik çamur gelişimi haftalarca sürebilir. Fenolik atıkların arıtımı için uygun hale getirilmiş bir biyolojik sistemin verimi, sıcaklığa, pH'ya, besin maddelerine (azot, fosfor, mineraller), oksijen derişimine, fenol derişimine, atıksudaki diğer organiklerin derişimine bağlıdır. Biyolojik arıtımı inhibe ettiği için 50 mg/L'nin üzerindeki fenol derişimleri biyolojik arıtım için uygun değildir (Körbahti ve ark. 2003).

Fenölü parçalamak için, mikroorganizma sayısı sabit olmalıdır. Değişkenlerin herhangi birindeki dalgalanmalar, bu nüfus dengesini değiştirir, sistem verimliliğini düşürür ve biyolojik organizmaların ölmesine sebep olur. Optimum fenol giderimine, nötral pH, 21°C sıcaklık ve sabit fenol derişiminde ulaşılır.

Fenol gideriminde kullanılan biyolojik yöntemler arasında, aktif çamur, damlamalı filtre, yükseltgeme havuzları sayılabilir. Giderim verimi, atıksu arıtma sisteminin yukarıda adı geçen süreç değişkenlerini kontrol edebilme yeteneğine bağlı olarak, %65-90 arasında değişir. Aktif çamur, damlamalı filtre ve yükseltgeme havuzları, uygun bir şekilde tasarımılandırılır ve işletilirse, yüksek fenol giderimine sahiptirler. Bununla beraber, damlamalı filtre süreçleri, performans kaybı olmaksızın, aşırı yüklemelere karşı daha dayanıklıdır. Fenolik atıkların arıtımında kullanılan lagünler, giriş debisinin dengelenmesinde önemli olan buharlaşma ve sızıntı değerleri de göz önünde bulundurularak, taşkınları önleyecek şekilde tasarımılandırılır. Bu yöntem, yeraltı suyu kirlenmesi, koku problemi ve yağışların sebep olabileceği taşkın ihtimalleri nedeniyle daha az tercih edilir.

Fenolik atıklar, sıklıkla evsel kaynaklı atıklarla seyreltilerek evsel arıtım tesislerinde arıtılır. Evsel ve endüstriyel atıkların birlikte arıtılması seyrelmeyi engeller ve bol miktardaki besin maddesi ve mikroorganizma sistemin çökmesine neden olur. Fenolik atıklar, evsel kanalizasyon sistemine deşarj edilmeden önce nötrale edilmelidir.

3.3. Karbon Adsorpsiyonu

Toz ve granüler aktif karbon, içme suyu kaynaklarından fenolik tat ve kokunun giderilmesinde kullanılmaktadır. Fenolün, içme suyu uygulamalarına kıyasla daha büyük miktarlarda olduğu ve akışın sürekli olduğu atıksu arıtımı uygulamalarında, granüler karbon sistemleri daha ekonomiktir.

Atıksudaki fenol ve diğer organik maddelerin derişimlerine bağı olarak, aktif karbon, 4,53-11 kg fenol / 45,36 kg karbon (10-25 lb fenol / 100 lb karbon) oranında adsorplama kapasitesine sahiptir. Bu kapasite, izotermeler ve kolon testi verilerinden elde edilebilir. Genel olarak, pH düştükçe fenol adsorpsiyonu artmaktadır.

Yüksek pH'larda, fenolat tuzlarının oluşması ve bu tuzların adsorpsiyonunun zor olması nedeniyle adsorpsiyon daha verimsizdir. Bu fenolün geri kazanımının gerekli olduğu uygulamalarda bir avantajdır. Fenol düşük pH'da adsorplanır ve sıcak kostik kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal rejenerasyonla sodyum tuzu olarak geri alınır. Eğer atıksuda başka organik maddeler varsa, onlar da adsorplanacaktır. Bu organik maddeler, kostik rejenerasyonu ile desorbe edilemezlerse, sonraki uygulamalarda karbonun fenol adsorplama kapasitesini azaltırlar. Eğer kimyasal rejenerasyonla karbonun fenol adsorplama kapasitesi geri kazanılamazsa, ısıl rejenerasyona gerek duyulur.

3.4. Kimyasal Yükseltgeme

Hava, klor, ozon, fenton ajanı ve diğer kimyasal yükseltgeyici ajanlar fenolü parçalamak için kullanılmaktadırlar. Fenol, önce hidrokinona sonra kinona dönüştürülür. Yükseltgemeye devam edilirse, aromatik halka kırılarak önce organik asitler ve nihai olarak CO₂ ve su oluşur.

Hava, ucuz bir yükseltgeyici ajan olmakla birlikte tepkime hızı yavaştır. Stokiyometrik olarak yeterli klor ilave edilirse, fenol pH 7,7'de tamamen parçalanabilir. Bu işlem, su arıtma tesislerinde "süperklorlama" ile gerçekleştirilir. İlave edilen klorun büyük bir bölümü diğer organik maddeleri ve amonyağı parçalamak için sarf edilir. Bir birim fenol için yaklaşık 42 birim klor gereklidir.

Ozonlama ile fenol etkin bir şekilde yükseltgenir. Ancak, ozon üretmek için yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Amonyak, ozonlamada girişim yapmaz, ve bir birim fenol için yaklaşık 5,8 birim ozon gerekir.

3.4.1. Fenton ajanı ile kimyasal yükseltgeme

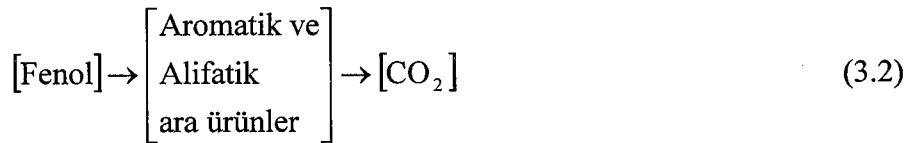
Fenolün, asidik şartlarda Fe^{2+} (Fenton Ajanı) katalizörü varlığında H_2O_2 ile kimyasal yükseltgenmesinde, oluşan hidroksil radikallerinin önemi büyüktür (Qiang ve ark. 2002). Fenton ajanı ile yükseltgemedeki iki ayrı yöntem söz konusudur;

- i.) Oda sıcaklığında yükseltgeme; yükseltgeme $20-30^{\circ}C$ sıcaklıkta fenolün aşırı H_2O_2 ile karıştırılması ile gerçekleştirilir.
- ii.) Yüksek sıcaklık yükseltgemesi; yükseltgeme yüksek sıcaklık ($140^{\circ}C$) ve basınçta (5 bar) H_2O_2 'nin tepkime ortamına sürekli beslenmesi ile gerçekleştirilir.

Oda sıcaklığında yükseltgemedeki, öncelikle yüksek miktarlarda aromatik ara ürünler (hidrokinon, kateşol, benzokinon) oluşur, daha sonra bu ara ürünler alifatik asitlere (maleik, fumarik, oksalik asit) yükseltgenirler. Oluşan bu asitler daha ileri yükseltgemedeki kararlı olarak kalırlar.



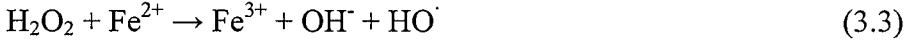
Yüksek sıcaklık ve basınçta ($140^{\circ}C$ ve 5 bar) fenton ajanı ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık yükseltgemesinde ise çok düşük miktarlarda halkalı ara ürünler oluşur. Temel ara ürünler daha ileri aşamada CO_2 'e yükseltgenen düz zincirli asitlerdir.



Fenton sürecinde iyi bir verim elde edilmesi, yükseltgeme tepkimelerinin, aynı zamanda ortamda bulunan Fe^{2+}/Fe^{3+} kanyonları nedeniyle oluşan

koagülasyon ile birlikte gerçekleşmesinden kaynaklanır, bu metalik iyonlar hem katalizör hem koagülant şeklinde ikili rol oynarlar. Dahası fenton sürecinde, demir iyonları ile tepkimeye giren hidrojen peroksit (H₂O₂) yükseltgeme potansiyeli çok yüksek (2,8V) yükseltgeme ajanları olan hidroksil radikallerini oluşturur (Szpyrkowicz ve ark. 2001).

Fenton sürecinde çözeltilerde meydana gelen ana tepkimeler şöyledir:

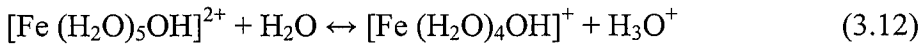
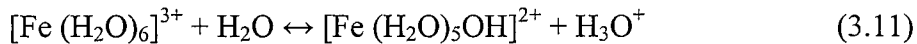


Bu eşitliklerde R, yükseltgenebilir bir maddeyi temsil etmektedir.

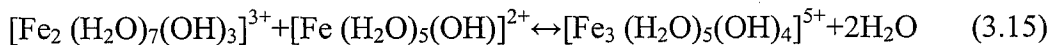
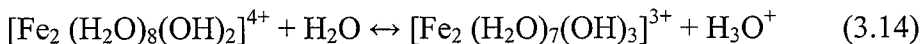
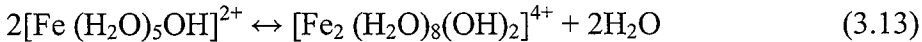
Meydana gelebilecek diğer muhtemel tepkimeler ise:



Oluşan bu hidroksil radikalleri (OH⁻) organik bileşikleri yükseltger. Yükseltgeme ile eşanlı olarak, demirin hidroksil komplekslerinin oluşumunu içeren bir koagülasyon süreci gerçekleşir (eşitlik 3.11 ve 3.12);



Çözeltinin pH'ı 3,5-7 arasında tutulduğunda, bu tepkimelerin ürünleri (3.13), (3.14) ve (3.15) tepkimeleri uyarınca polimerize olurlar;



Fenton sürecinin performansı, çözeltinin pH'ı, eklenen H₂O₂'nin miktarı, tepkime süresi ve FeSO₄'ün dozu gibi etkenlere önemli ölçüde bağlıdır (Szpyrkowicz ve ark. 2001).

3.5. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar

Szpyrkowicz ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, ozon, hipoklorit ve fenton ajanı ($H_2O_2 + Fe^{2+}$) kullanarak gerçekleştirdikleri kimyasal yükseltgeme ile boyar madde giderimi çalışmalarının sonuçlarını, elektrokimyasal yükseltgemedan elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hipoklorit yükseltgemesi ile tatmin edici sonuçlar elde edilemezken (6 g/L'lik dozla ancak %35 renk giderimi sağlanmıştır), ozonlama ile %90'a varan renk giderimi sağlanmıştır. Ozonlamada, yüksek renk giderimine rağmen, KOİ %10 gibi düşük değerlerde giderilebilmiştir. Elektrokimyasal yükseltgeme ile daha iyi bir giderme verimi elde etmişlerdir. Test edilen 7 anot malzemesi içinde en iyi sonuç, Ti/Pt-Ir anotlarla, asidik şartlarda 40 dakikalık bir elektroliz süresi içinde KOİ'nin %79'u rengin ise %90'ı giderilerek elde edilmiştir. En iyi arıtma sonuçları, %100 renk ve yaklaşık %100 KOİ (100 mg/L) giderimi ile fenton süreci ile elde edilmiştir. Ayrıca, kimyasal yükseltgemed, yükseltgeme ara ürünlerinin çözeltide biriktiği, elektrokimyasal yükseltgemed ise çözeltideki birincil kirleticilerle eşanlı olarak giderildiği sonucuna varılmıştır.

Roostaei ve Tezel (2004), fenolün sudan silika jel, aktif karbon, aktif alumina, HiSiv 1000 (zeolit), HiSiv 3000 (zeolit) ve Filtrasorb-400'e adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarla adsorpsiyon dengesi ve kinetiği analiz edilmiştir. Çalışılan adsorbanların, Langmuir-Freundlich tip adsorpsiyon izotermine uyduğu bulunmuştur. Kinetik deney sonuçları, en iyi adsorpsiyonun HiSiv 1000 adsorbanı ile gerçekleştirildiğini ortaya koymuş ve daha detaylı çalışmalar bu adsorban ile gerçekleştirilmiştir. Partikül boyutu, sıcaklık ve ısıl rejenerasyonun fenol adsorpsiyonuna etkileri değerlendirilmiştir. Partikül boyut deneyleri, partikül boyutunu değiştirmenin HiSiv 1000'in adsorpsiyon kapasitesini değiştirmedeğini, ancak partikül boyut artışının adsorpsiyon hızını düşürdüğünü göstermiştir. Sıcaklığın adsorpsiyona etkisi, 25, 40 ve 55°C'de denge izotermi çalışılarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, adsorpsiyon kapasitesinin artan sıcaklıkla azaldığını göstermiştir. HiSiv 1000, 360°C'de ısıl rejenerasyona tabi tutulmuş ve 14 rejenerasyon döngüsü sonrasında adsorpsiyon kapasitesinin değişmediği görülmüştür.

Amat ve ark. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada biyolojik arıtıma dirençli bir kirletici grup olan fenolik asitler ozonlamaya tabi tutulmuştur. Yüksek derişimlerde fenol içeren zeytinyağı atıksuyunu simüle etmek için cinnamic, p-coumaric, ferulic ve caffeic asit içeren çözeltiler hazırlanmıştır. Ozonlama sonrası biyolojik parçalanabilirlikteki değişim araştırılmıştır. Optimum ozon dozlamasında, 3-5 dakikalık maruziyetle, biyolojik parçalanabilirlikte maksimum artış (10 kat) ve ozonlama sürecinde yüksek verim sağlanmıştır (KOİ'de %50 azalma). Benzer sonuçlar, gerçek zeytinyağı atıksuları ile de elde edilmiştir. Sürecin bu davranışı, ozonlama ara ürünü olan ve biyolojik parçalanabilirliği yüksek olan benzaldehit oluşumu ile açıklanmıştır.

Abdo ve ark. (1997) sabit yataklı reaktörde değişik oranlarda karıştırılmış granüler Maghara kömürü (GMC, Mısır) ve granüler aktif karbona (GAC) model atıksuların adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Çalışma sonrası, GAC'ın adsorpsiyon kapasitesinin GMC'ye kıyasla 21 kat daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Başlangıç fenol derişimi, yatak derinliği ve adsorban türü parametreleri çalışılmıştır. Çalışmalarda sadece GMC, sadece GAC, %50 GMC+%50 GAC ve %25 GMC+%75 GAC adsorban olarak kullanılmıştır. Fenol çözeltilisinin akış hızı 27,5 mL/dak olup sıcaklığı 27°C'de sabit tutulmuştur. Toz Maghara kömürü ve toz aktif karbon için de adsorpsiyon izotermi çalışılmıştır. Denge verileri Freundlich izotermi ile uygunluk göstermiştir.

Susarla ve ark. (1999) üç adet fenoksiasetik asit ve üç adet klorofenolün, sabit yataklı kolonlarda, volkan toprağına adsorpsiyon ve desorpsiyon karakteristiklerini araştırmışlardır. Derişimin ve akış hızının kırılma noktasına etkisini incelemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar, artan başlangıç derişimi ve akış hızıyla kırılma noktasına çok daha çabuk ulaşıldığını göstermiştir. Bu çalışmada, sabit yatakta katıların taşınımı için teorik bir model de sunulmuştur. Modelden hesaplanan değerler, deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve değerler birbirleri ile uyum göstermiştir. Sonuçlar, klorofenollerin taşınımının, fenoksiasetik asitlerden daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur.

Yıldız ve ark. (2000) bir organobentonite (HDTMA-bentonit) fenol adsorpsiyonunu incelemiştir. Organobentonit Çankırı sodyum bentonitinin bir amonyum tuzu (heksadesiltrimetilamonyumbromür, HDTMA) ile

sentezlenmesinden elde edilmiştir. Fenol adsorpsiyonu için sıcaklık, karıştırma hızı, organobentonit miktarı ve fenol derişimi parametreleri incelenmiştir. HDTMA-bentonitine fenol adsorpsiyonunda optimum şartlar, 20°C sıcaklık, 120 rpm karıştırma hızı, 3 g organobentonit miktarı ve 4000 mg/L fenol derişimi şeklinde belirlenmiştir.

Kartal ve ark. (2000) yaptıkları çalışmada bir ileri yükseltgeme süreci olan heterojen fotokatalitik yükseltgeme yöntemiyle 2,4,6-triklorofenolün bozunmasını amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalar pyrex camdan yapılmış manyetik karıştırıcılı bir fotoreaktörde gerçekleştirilmiştir. 2,4,6-triklorofenolün fotokatalitik yükseltgeme ile giderimine pH, başlangıç fenol derişimi ve sıcaklık parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Veriler, en yüksek giderimin asidik şartlarda (pH= 3) gerçekleştiğini göstermiştir. 2,4,6-triklorofenolün bozunma sürecini takip etmek üzere fotokatalitik yükseltgeme süresince TOK analizleri de gerçekleştirilmiştir.

4. ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE FENOL GİDERİMİ

4.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme

Endüstriyel atıksular, inorganik maddelerin (ağır metaller, asitler, bazlar, vb.) yanı sıra, deşarj edilmeden önce mutlaka giderilmeleri gereken organik maddeler de içerirler.

Biyolojik arıtım, atıksularda bulunan kolay parçalanabilir organik maddelerin arıtımında sıkça kullanılan ekonomik bir süreçtir. Ancak, atıksu dayanıklı (biyolojik arıtıma direnç gösteren) organik maddeler içeriyorsa ya da derişimleri çok yüksekse ve/veya çeşitlilik arz ediyorlarsa durum farklı olacaktır. Bu durumda, daha farklı arıtım yöntemlerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Bu tür kirleticilerin parçalanmasında ya da geri kazanımında kullanılan ve ya önerilen birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler arasında aktif karbon adsorpsiyonuyla ya da çözücü özütlemesi ile kimyasal maddelerin geri kazanımı ve parçalanmasında ise elektrokimyasal yükseltgeme sayılabilir. Yükseltgen olarak hidrojen peroksit (Fe^{2+} varlığında), ozon, klor vs. kullanılan kimyasal yükseltgenme ile de birçok çalışma yapılmıştır.

Kimyasal yükseltgenme genellikle birincil organik kirleticilerin tamamen giderimini sağlamakla birlikte, TOK'un tamamen giderimi çok daha zordur. Örneğin, ozon ($E^\circ = 2,07 \text{ V}$) gibi güçlü bir yükseltgen ile fenolün yükseltgenmesinde TOK'un ancak %30'u giderilebilmektedir. Aynı düzeyde TOK giderimi oda sıcaklığında katalizör olarak Fe^{2+} varlığında H_2O_2 ile de elde edilebilmektedir. Elektrokimyasal yükseltgemedeki de benzer sorun söz konusu olmakla beraber, yapılan araştırmalarda, örneğin platin elektrotlarda kimyasal yükseltgenme ile elde edilenden daha yüksek bir TOK giderimine ulaşıldığı görülmüştür. Elektrokimyasal yükseltgemedeki bu yüksek TOK giderimi adsorplanan organik bileşenlerin de CO_2 'e yükseltgenmesine atfedilmiştir (Comninellis ve Pulgarin 1993).

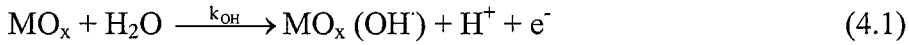
Literatürde organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgemesi için iki ayrı yol belirtilmiştir; i) elektrokimyasal dönüşüm, ii) elektrokimyasal yanma:

i) elektrokimyasal dönüşümde toksik biyolojik uyumsuzluğu olan kirleticilerin, biyolojik uygunluğu olan organik maddelere dönüşümü söz konusudur, ancak elektrokimyasal yükseltgeme sonrası yine de biyolojik arıtım gereksinimi vardır.

ii) elektrokimyasal yanmada CO₂ ve H₂O oluşur ve daha fazla giderim gerektirmez (Grimm ve ark. 2000).

Daha önce yapılan çalışmalar; elektrot dokusuna (lattice) oksijen girişinin dönüşüm ile sonuçlandığını, OH[·] radikallerinin oluşumunun ise yanma tepkimesini teşvik ettiğini ortaya koymaktadır (Grimm ve ark. 2000).

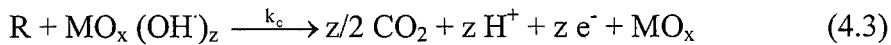
Literatürde (Tahar ve Savall 1999; Bock ve MacDougall 2000), bir metal oksit anotta (MO_x) suyun elektrokimyasal yükseltgenmesi ile OH[·] radikallerinin oluşum mekanizması aşağıdaki gibi tarif edilmiştir;



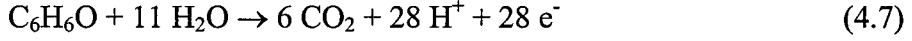
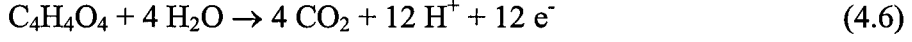
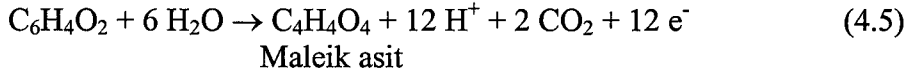
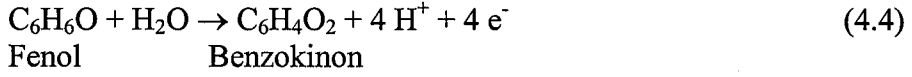
Benzer şekilde, elmas elektrotlarda suyun direkt anodik yükseltgenmesi ile elektrokimyasal olarak OH[·] radikalleri üretilir (Kraft ve ark. 2003);



Oluşan hidroksil radikalleri elektrot yüzeyinde adsorplanır ve (4.3) tepkimesi uyarınca organik maddelerin parçalanmasını sağlarlar;



Fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesinin araştırıldığı bir çalışmada (Sharifian ve Kirk 1986), fenolün benzokinona (aromatik ara ürün), maleik aside (alifatik asit) ve nihai ürün olarak ise karbon dioksit'e yükseltgenme tepkimeleri (4.4), (4.5) ve (4.6) no'lu eşitliklerde verilmiştir. Bu üç tepkimeden yararlanılarak tüm tepkime (4.7) eşitliği şeklinde özetlenebilir. (4.7) tepkimesi uyarınca fenolün yükseltgenmesinde alınan-verilen elektron sayısı 28'dir (Iniesta ve ark. 2001).

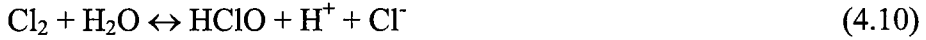


Organik maddelerin indirekt elektrokimyasal yükseltgemesinde, yükseltgen madde elektrokimyasal olarak oluşturulur. Birçok endüstriyel atıksuyun bileşiminde bulunması nedeniyle klorürlerin indirekt elektrokimyasal yükseltgemedeki kullanımını oldukça yaygındır (Szpyrkowicz ve ark. 2001).

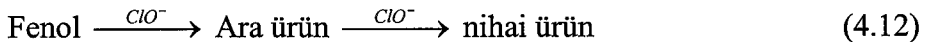
Klorür iyonlarının anodik yükseltgeme tepkimesi (4.8) ve (4.9) eşitliklerinde verilmiştir;



Oluşan klor gazının suda hidrolize uğraması sonucu ise hipoklorit iyonları oluşur;



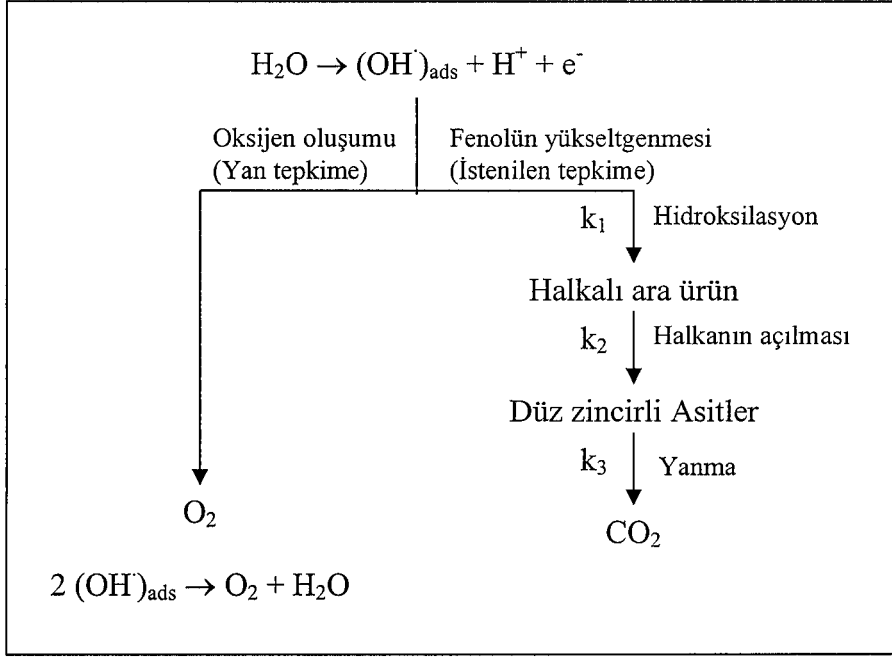
Oluşan hipoklorit iyonları fenol ve/veya yükseltgeme ara ürünleri ile indirekt yükseltgeme tepkimesi (Bkz. 4.12) verir (Comminellis ve Nerini 1995);



Genel olarak, organik atıklar çok sayıda elektrot malzemesi ile yükseltgenebilmelerine karşın, fenollerin, anodun işlevini engellediği ve ön işleme tabi tutulmayan elektrotlarda, fenoksi radikalleri şeklindeki oligomerlerin birikimine sebep olduğu rapor edilmiştir. Buna göre oksit temelli anotların bozulmaya, metallere kıyasla daha az meyilli olduğu ortaya çıkmaktadır. Örneğin, PtO₂'de ürünler elektrot yüzeyine hem daha az adsorbe olurlar, hem de Pt, grafit ya da nikel elektrotlardakine kıyasla daha hızlı yükseltgenirler (Rodgers ve ark. 1999). Organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgenme ürünleri, elektrot

malzemesine ve elektrot yüzeyinin hazırlanma metoduna önemli derecede bağlıdır (Sistiaga ve ark. 1998).

Elektrokimyasal yükseltgeme mekanizmasının temel basamakları Şekil 4.1'de özetle gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Elektrokimyasal yükseltgeme mekanizması (Comminellis 1994)

4.2. Elektrokimyasal Çöktürme (elektrokimyasal koagülasyon, elektrokoagülasyon)

Elektrokoagülasyon sürecinde koagülant, uygun bir anot malzemesinin elektrokimyasal yükseltgenmesi ile yerinde üretilir. Bu süreçte, yüklü iyonik türler (metaller yada diğerleri) atıksudan; i) karşı yüke sahip bir iyon ile, ii) çözeltide üretilen metal hidroksit flokları ile tepkimeye sokularak giderilir.

Atıksuların elektrokoagülasyonla arıtımı, geçtiğimiz yıllarda, metal içeren endüstriyel atıksuların arıtımında Güney Amerika ve Avrupa'da kullanılmıştır. Yine bu yöntem, Kuzey Amerika'da kağıt endüstrisi, madencilik ve metal işleme endüstrileri atıksularının arıtımında da kullanılmıştır. Ayrıca, yemek atıkları, yağ atıkları, boyalar, askıda katılar, kimyasal ve mekanik cilalama atıkları, sızıntı sularından gelen organik maddeler, sudan flor giderimi, sentetik deterjan atıkları,

maden ocağı atıkları ve ağır metal içeren çözeltilerin arıtımında da elektrokoagülasyon kullanılmıştır (Mollah ve ark. 2001).

Elektrokoagülasyon teknolojisi kararlı emülsiyon ve asıtların gideriminde, metal tuzları yada polimerlerin kullanımına ve polielektrolit ilavesine alternatif getirmektedir. Bu teknoloji ile metaller, koloidal katı ve parçacıklar ve çözünmüş inorganik kirleticiler sulardan çok yüklü polimerik metal hidroksit türlerinin suya girmesiyle giderilmektedir. Bu türler, askıda katı ya da yağ damlacıklarının üzerindeki elektrostatik yükü nötralize ederek bir araya gelmelerine (aglomerasyona) ya da koagülasyona yardım etmekte ve onların sıvı fazdan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Arıtım belirli metal ve tuzların çökmesini de teşvik etmektedir.

Teorisi bir çok bilimadama tarafından araştırılan elektrokoagülasyon sürecinin genellikle şu üç basamaktan oluştuğu kabul edilir;

- a. çözünebilir elektrotun elektrolitik yükseltgenmesi ile koagülantların oluşumu,
- b. kirleticilerin ve asıttaki parçacıkların kararlılığının bozulması (destabilizasyon) ve emülsiyonların bozulması,
- c. kararlılığı bozulan fazın bir araya gelerek flokları oluşturması.

Kirleticilerin kararlılığının bozulması mekanizması ve emülsiyonların kırılması ise şu şekilde özetlenebilir;

- yüklü türlerin etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılması; çözeltilerden geçen akımın neden olduğu elektrot çözünmesi ile oluşan iyonların etkileşimi ile oluşur.
- atıksuda bulunan iyonik türlerin yük nötralizasyonu; çözünebilir elektrotun elektrokimyasal çözünmesi ile oluşan karşıt yüklü iyonlarla sağlanır. Bu karşıt yüklü iyonlar, parçacıklar arası elektrostatik çekimi azaltarak Van der Waals bağlarını ön plana çıkarır, ve koagülasyona neden olur.
- flok oluşumu; koagülasyon sonucu oluşan floklar bir çamur bloğu oluştururlar (Mollah ve ark. 2001).

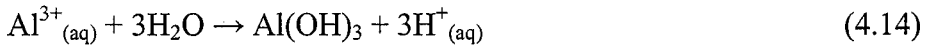
Elektrokoagülasyon mekanizması, sulu ortamın kimyasına, özellikle de iletkenliğine önemli derecede bağlıdır. Ayrıca, pH, parçacık boyutu ve kimyasal

bileşenlerin derişimleri gibi parametreler de elektrokoagülasyon sürecinde etkilidir.

Elektrokoagülasyon ile iyonların giderim mekanizması atıksu arıtımında sıkça kullanılan iki elektrot (metal) olan alüminyum ve demir tepkimeleri ile eşitlik (4.13)-(4.23) arasında açıklanmıştır.

Alüminyum;

Alüminyum elektrot kullanılarak atıksuların elektrokoagülasyonu bir çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Alüminyum anodun 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 (Mollah ve ark. 2001; Mameri ve ark. 1998).



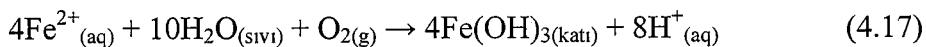
Ayrıca, sucül ortamın pH'ına bağlı olarak $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ ve $Al(OH)_4^-$ gibi diğer iyonik türler de sistemde bulunabilir.

Demir;

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

1. mekanizma:

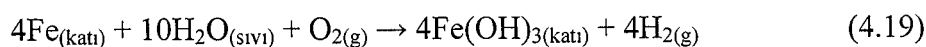
Anot:



Katot:



Tüm tepkime:



2. mekanizma:

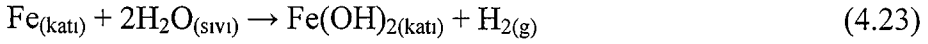
Anot:



Katot:



Tüm tepkime:



Oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_{n(\text{kati})}$, çözelti içerisinde jelatinimsi asıltı olarak kalır ve atıksudan kirleticileri kompleksleşme yada elektrostatik çekim ile giderir. Redoks tepkimeleri sonucu üretilen H_2 , çözünmüş organikleri ya da askıda katıları flotasyon ile giderebilir.

4.2.1. Elektrokoagülasyonun avantajları

- Elektrokoagülasyon basit ekipmanlar gerektirir, işletilmesi kolaydır.
- Elektrokoagülasyon ile arıtılan su lezzetli, temiz, renksiz ve kokusuzdur.
- Elektrokoagülasyon sonucu oluşan çamurlar, başlıca metal oksitleri/hidroksitlerinden oluştuğu için kolayca çökmeye ve susuzlaştırılmaya elverişlidir. Ayrıca, bu süreç düşük miktarda çamur üreten bir tekniktir.
- Elektrokoagülasyon sonucu oluşan floklar kimyasal floklara benzerler, ancak daha büyük olurlar, daha az bağlı su içerirler, asitlere dirençli ve daha kararlıdır, bu nedenlerle de süzme ile daha çabuk uzaklaştırılırlar.
- Kimyasal arıtıma kıyasla daha az toplam çözünmüş katı (TDS) içeren atıksular oluştururlar. Eğer bu yeniden kullanılacak bir su ise, daha düşük bir geri kazanım maliyeti sağlarlar.
- Elektrokoagülasyon süreci, uygulanan elektrik alan çok daha hızlı hareket etmelerini sağladığı için, çok küçük koloidal parçacıkların giderilmesi avantajına sahiptir.

- Kimyasal kullanımına gerek duyulmayan bir süreçtir, atıksuyun kimyasal koagülasyonunda olduğu gibi, fazla kimyasalların nötralize edilmesi gibi bir sorun ve yüksek konsantrasyonlarda ilave edilen kimyasal maddelerin ikinci bir kirliliğe neden olması gibi bir ihtimal de yoktur.
- Elektroliz esnasında oluşan gaz kabarcıkları, kirleticileri çözeltilerin yüzeyine taşıyarak, onların kolayca deriştirilmesini, toplanmasını ve uzaklaştırılmasını sağlar.
- Elektrokoagülasyon hücresindeki elektroliz süreçleri, herhangi bir parça hareketi olmaksızın elektriksel olarak kontrol edilebilir, böylece daha az bakım gerektirir.
- Elektrokoagülasyon tekniği, elektrik olmayan kırsal alanlarda, üniteye bağlı bir güneş enerjisi paneli ile süreç yürütebileceği için rahatlıkla kullanılabilir (Mollah ve ark. 2001).

4.2.2. Elektrokoagülasyonun dezavantajları

- Kullanılan elektrotlar, yükseltgeme sonucu atıksu içerisine çözümler ve bu nedenle elektrotların düzenli olarak değiştirilmeleri gerekir.
- Bazı bölgelerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.
- Katot yüzeyinde geçirimsiz yükseltgeme filmi oluşarak, elektrokoagülasyon biriminin veriminin düşmesine neden olabilir.
- Atıksuyun yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.
- Jelatinimsi hidroksitler bazı durumlarda çözünme eğilimi gösterirler (Mollah ve ark. 2001).

4.3. Konuyla İlgili Önceden Yapılmış Çalışmalar

Fenolün kurşun dioksit (PbO_2) anotlarda elektrokimyasal yükseltgenmesinin araştırıldığı çalışmada (Sucre ve Watkinson 1981) Na_2SO_4 , H_2SO_4 veya $NaOH$ çözeltilerinde çözünmüş ve derişimi 1100 mg/L'e kadar olan fenol çözeltileriyle çalışılmıştır. Uygulanan akımın etkisini incelemek için 10, 20 ve 30A de bölünmüş ve bölünmemiş hücrelerde çalışılmış, bölünmemiş hücrede daha iyi

verimlere ulaşılmıştır. Hem kesikli hem sürekli modda çalışılmış, anolit debisi 1,12 L/dak ve katolit debisi 1,54 L/dak olarak belirlenmiştir. Elektrolit sıcaklığı 22-24°C olup, sıcaklık 10 A'de izotermaldir. Ancak, 20 A'de 4°C ve 30 A'de 12°C artış görülmüştür. PbO₂ anotta, 1,5 saat sonra bütün fenolün yükseltgendiği, bu süre içinde TOK'un %20 giderildiği görülmüştür. Başlıca ara ürün kinondur.

Comninellis ve Nerini (1995), Ti/SnO₂ ve Ti/IrO₂ anotlarda NaCl varlığında fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları NaCl varlığının fenolün anodik yükseltgenmesini, elektrokimyasal olarak oluşan ClO⁻ nedeniyle Ti/IrO₂ anotlarda katalizlediğini göstermiştir. Yükseltgenme ürünlerinin analizleri, başlangıçta elektrolitte klorlu organik bileşiklerin oluştuğunu daha sonra da bu bileşiklerin uçucu organiklere (CHCl₃) yükseltgendiğini göstermiştir. Fenolün NaCl varlığında elektrokimyasal yükseltgenme mekanizmasını daha iyi anlamak için kimyasal yükseltgenme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Kimyasal yükseltgenme ürünleri; fenol, 2-klorofenol, 4-klorofenol, 2,4-diklorofenol, 2,4,6-triklorofenoldür. Elektrokimyasal yükseltgemedede oluşan klorlu fenoller parçalanmakta ve oluşan klorlu alifatik asitler CHCl₃'e kadar yükseltgenmektedir.

Kötz ve ark. (1991) yaptıkları çalışmada, atıksulardaki biyolojik parçalanmaya dayanıklı organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgenmesi için oksijen aşırı gerilimi yüksek olan bir anot malzemesi olarak kalay dioksitin (SnO₂), elektrokimyasal giderim potansiyelini araştırmışlardır. Bu elektrot malzemesinin yükseltgeme gücü, Pt ve PbO₂ anotlarla karşılaştırılarak fenol yükseltgenmesi incelenmiştir. Fenol gideriminin SnO₂ anotlarda Pt ve PbO₂'den çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Kalay dioksite ilave edilen Sb, F, Cl gibi materyallerin kısa süreli çalışmalarda etkin olmamakla birlikte, kalay dioksitin dayanıklılığı açısından önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, Ti/SnO₂ elektrotun kullanım ömrünün elektrolit pH'ının artmasıyla arttığını bulmuşlardır.

Polcaro ve ark. (1999), Ti/PbO₂ ve Ti/SnO₂ elektrotlarda 2-klorofenolün elektrokimyasal yükseltgenmesini çalışmışlardır. Başlangıç 2-klorofenol derişimi 400-600 mg/L arasında seçilmiş, 12 cm² yüzey alanlı elektrotlarda 8-16 mA/cm² arası akım yoğunluklarında çalışılmıştır. Çalışmalar 25°C sıcaklıkta ve 1 cm³/s akış hızlarında gerçekleştirilmiştir. Destek elektrolit olarak pH 7 (0,05 M

$\text{Na}_2\text{HPO}_4 + 0,05 \text{ M NaH}_2\text{PO}_4$) ve pH 3 ($0,05 \text{ M Na}_2\text{HPO}_4 + 0,05 \text{ M H}_3\text{PO}_4$)’de tamponlanmış fosfor çözeltisi kullanılmıştır. Bazı deneylerde ise çözeltiliye 1000 mg/L klorür ilave edilmiştir. Elektroliz sırasında düzenli olarak alınan numunelerde KOİ, 2-klorofenol ve yükseltgenme ürünleri ölçülmüştür.

Stucki ve ark. (1991), biyolojik parçalanmaya dayanıklı atıksuların arıtımında SnO_2 anotla PbO_2 ve Pt anotların performansını karşılaştırmışlardır. Geniş aralıktaki organik maddeler için, SnO_2 ’in Pt’e kıyasla 5 kat daha fazla etkin olduğunu ve yükseltgenme veriminin suyun pH’ından bağımsız olduğunu bulmuşlardır. Klorür iyonları bulunan ortamlarda SnO_2 anotlar, Pt anottan daha az klor gazı oluşturmuştur; dolayısıyla tehlikeli klorlu organik yan ürün oluşturma olasılığı da daha azdır. Bu elektrot malzemesi, atıksudaki organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgenmesi için gerekli spesifik enerji tüketimini 30-50 kWh/kg KOİ’e kadar düşürmüştür. Bu ise süreci, ozon, hidrojen peroksit gibi yükseltgenler kullanılan kimyasal yükseltgemeye göre önemli bir seçenek haline getirmektedir.

Comninellis ve Pulgarin (1991), 10-120 mmol/L arası başlangıç derişimlerinde fenol içeren atıksuların elektrokimyasal yükseltgenmesi için 35 cm^2 yüzey alanı olan Pt silindir anot kullanmışlardır. 10-60 mA/cm^2 arası 4 ayır akım yoğunluğunun denendiği çalışmalarda pH 3 ve 12,5’te sabit tutulmuştur. Yaklaşık 10 saatlik elektroliz süresinde elde edilen elektrokimyasal çalışma sonuçları, Fenton Ajanı ($\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$) kullanılan kimyasal yükseltgeme çalışması sonuçları ile kıyaslanmıştır. Destek elektrolit olarak Na_2SO_4 ’ün etkisi incelenmiş, elektroliz süresince fenolün değişimi, CO_2 ’nin ve tepkime ara ürünlerinin oluşumu (hidrokinon, kateşol, benzokinon, maleik asit, fumarik asit, oksalik asit) izlenmiştir. Alkali ve asidik ortamlarda ara ve nihai ürünlerin farklılık gösterdiği görülmüştür.

Comninellis ve Pulgarin (1993) atıksu arıtımında fenolün SnO_2 anotlarda elektrokimyasal yükseltgeme ile giderimini çalışmışlardır. Ayrıca, Pt anot kullanılarak bu iki elektrot malzemesinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. SnO_2 anot, çalışma öncesi, 12 mA/cm^2 ’lik akım yoğunluğunda anodik polarizasyonla bir ön işleme tabi tutulmuştur. Çalışmalar 25 ve 70°C sıcaklıklarda, 21mM başlangıç derişiminde gerçekleştirilmiştir. Elektrolit olarak 50 g/L Na_2SO_4

+ 4 g/L NaOH kullanılmış, çalışmanın bir kısmı pH 2'de (sabit) asidik ortamda yapılmıştır. Platin ve SnO₂ elektrotlarda spesifik elektrik yükü ile yükseltgenme ürünlerinin değişimi gözlemlenmiştir.

Tahar ve Savall (1999), 21 mmol/L başlangıç derişiminde fenol içeren elektroliz çalışmalarında yüzey alanları 20 cm² olan ve değişik kaplama yöntemleri ile elde ettikleri 8 adet PbO₂ ve Bi₂O₅-PbO₅ anotları kullanmışlardır. 100 mA/cm² akım yoğunluğunda gerçekleştirilen çalışmalarda, asidik fenol çözeltilerinin elektrolizinde iki bölmeli izotermal reaktör kullanılmıştır. H₂SO₄ ile 2'e ayarlanan elektrolit çözeltisinin pH'ı, elektroliz esnasında 0,5 civarına düşmüştür. Elektrolizler 70°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Analizlerde görülen başlıca fenol yükseltgenme ürünleri 1,4-benzokinin, maleik asit ve CO₂'dir. TOK hesaplamalarından fenolün tamamen CO₂ ve H₂O'ya yükseltgendiği bulunmuştur. Ayrıca, düşük derişimlerde (<0,5 mmol/L) olmak üzere hidrokinon, kateşol ve fumarik aside de rastlanmıştır.

Sharifian ve Kirk (1986), dolgulu yatak (kolon) reaktör kullandıkları çalışmalarında fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesini araştırmışlardır. Anot olarak PbO₂ parçacıkları ve katot olarak paslanmaz çelik levha kullanılan çalışmada başlangıç fenol derişimi (3,5 mM, 56 mM fenol) ve akım (1, 2 ve 3 A) parametreleri denenmiştir. Anolit sıcaklığı 24-25°C civarında tutulmuş, sıcaklığın etkisini incelemek amacıyla 50°C'ta da çalışılmıştır. Destek elektrolit olarak 0,1, 1,0, ve 2,0 M'lık H₂SO₄ çözeltileri kullanılmıştır.

Rodgers ve ark. (1999) PbO₂, IrO₂ ve SnO₂ anotlarda klorlu fenollerin elektrokimyasal yükseltgenmesini çalışmışlardır. Anotların yüzey alanları 10-30 cm² arası seçilmiş ve ~5-6,5 mA/cm²'e karşılık gelen 85 mA akım değerlerinde çalışılmıştır. pH 2 ve 12'de gerçekleştirilen çalışmalarda LSV (Linear Sweep Voltammogram)'de kullanılmıştır. 10 mM'lık çözeltilerde anotların katalitik işlevleri bir kaç saat içinde kaybolmuş ve tekrar aktive edilememişlerdir. Bu problem derişim 1 mM'a düşürülerek en aza indirilmiştir. Çalışmada 0,1 M Na₂SO₄ destek elektrolit olarak kullanılmış, ara ürünler ölçülmemiş, nihai ürün analizlerinde ise CO₂ ve kinona rastlanmıştır.

Asidik ortamda siklik voltammogram ve elektroliz yoluyla bor katkılı ince film elmas elektrotlarda fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesi, Iniesta ve ark. (2001) tarafından çalışılmıştır. Suyun bozunmadan durağan kaldığı gerilim bölgesinde ($E < 2,3$ V vs. SHE), elektrot yüzeyinde polimerik film oluşumu nedeniyle elektrotların bozunmasına yol açan direkt elektron transfer tepkimelerinin gerçekleştiği görülmüştür. Suyun bozunma tepkimelerinin gerçekleştiği bölgedeki ($E > 2,3$ V vs. SHE) elektroliz çalışmaları sırasında, elektrokimyasal olarak üretilen hidroksil radikalleri gibi aktif ara ürünler vasıtasıyla elektrot bozunmasına neden olmayan indirekt yükseltgeme tepkimeleri gerçekleşmiştir. Uygulanan akım ve fenol derişimine bağı olarak, fenolün CO₂'e kadar tamamen parçalanması yada diğere aromatik bileşenlere (benzokinon, hidrokinon, kateşol) kısmi yükseltgenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, düşük akım yoğunlukları (5mA/cm²), yüksek fenol derişimleri (20mM) ve düşük fenol dönüşümlerinde aromatik ürünler oluşurken, yüksek akım yoğunlukları (60mA/cm²) ve düşük fenol derişimlerinde (5mM) ana yükseltgenme ürünü olarak CO₂ elde edilmiştir.

Jedral ve ark. (1999) benzen ve klorlu türevlerinin, asetonitril, su ve sıvı emülsiyonlarda elektrokimyasal yükseltgenmesini hem metal hem de metal oksit elektrotlarda çalışmışlardır. Bu çalışmada, anot olarak platin folyo, grafit, Ti/IrO₂ ve Ti/SnO₂ kullanılmıştır. Araştırmacılar, klorlu benzenin, grafit elektrotta platine kıyasla daha düşük bir verimle yükseltgendiğini, ancak yükseltgenme ürünlerinin benzer olduğunu bulmuşlardır. Kullanılan metal oksit elektrotlar arasında en iyi sonuca Ti/SnO₂ ile ulaşılmıştır. Bu elektrotlarda (Ti/SnO₂), %8 monoklorobenzen azalması, 1:4 oranında 2-klorofenol ve 4-klorofenol oluşumu ve 100 mA'de giderilen monoklorobenzenin %40'ının CO₂'e dönüşümü sağlanmıştır. Araştırmacılara göre;

-Düşük verimli yükseltgeme tepkimeleri, anot yüzeyinde oluşan hidroksil radikallerinin, diğere ürünlerle, monoklorobenzene kıyasla daha hızlı tepkimeye girdiğini,

-Yüksek oranlarda oluşan CO₂ ise, klorlu benzenin fenoller gibi, elektrokimyasal yanmaya eğimli olduğunu, yani, ara yükseltgenme ürünlerinin ana kirleticiden daha hızlı yükseltgendiğini göstermektedir (Jedral ve ark. 1999).

Başka bir çalışmada Sistiaga ve ark. (1998) farklı miktarlarda platin ve kalay içeren amorf Ni-Nb temelli alaşımlar (Ni-40Nb-(1-x)Pt-xSn) kullanarak fenolün oda sıcaklığında elektrokimyasal yükseltgenmesini çalışmışlardır. Hidroflorik asit (HF) ile aktivasyon sonrası alaşımlar, fenolün anodik yükseltgenmesinde yüksek aktivite göstermişlerdir. Bu aktivite, alaşımdaki kalay varlığından ve HF ile aktivasyon süresinden etkilenmiştir. Çalışmacılara göre HF muamelesi, alaşım yüzeyinde platin zenginleşmesine ve elektrotun sertliğinin artmasına sebep olmuştur. En iyi sonuçlar, düşük akım yoğunluklarında ve uzun HF aktivasyon süreleri uygulandıktan sonra elde edilmiştir. Fenolün elektro-yükseltgemesi ile oluşan başlıca ürünler benzokinon ve hidrokinondur. HF muamelesi, yüzeyde fenol zenginleşmesinin yanı sıra amorf alaşımların spesifik yüzey alanını da artırmıştır. Fenolün elektro-yükseltgenme hızı, alaşımda düşük miktarda kalay olması ve kalayın oksijen oluşum aşırı gerilimini artırması nedeniyle artmıştır.

Pierna ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, asidik fenol, hidrokinon ve p-benzokinon çözeltilerini, CO₂ ve suya yükseltgenmesini sağlamak için, elektrokimyasal yöntemlerle arıtmışlardır. Elektrokimyasal tepkimeler farklı Ni-Nb-Pt-Sn alaşımların yüzeylerinde gerçekleştirilmiştir. Elektrotların özellikleri, elektrokimyasal yükseltgemenin amorf durumda platinde ve nikel-niyobyum matriksteki kalay dioksit tabakada gerçekleştiğini göstermiştir. Sonuçlar optimum bileşimin Ni-40Nb-0,6Pt-0,4Sn olduğunu göstermiştir. 100A/m²'lik akım yoğunluğunda 3 saatlik elektro-yükseltgeme sonrası fenol, hidrokinon ve benzokinon, CO₂ ve suya dönüştürülmüştür. Bu çalışmayla kalay ve platin parçacıklarının sinerjik etkileri gösterilmiştir.

Johnson ve ark. (2000), yaptıkları çalışmada organik maddelerin hızlı bir şekilde CO₂'e yükseltgenmesi için elektroliz şartları ve optimum elektrot malzemesinin bulunmasını amaçlamışlardır. Bu amaçla, 4-klorofenol ve benzokinonun anodik yükseltgemesi esnasında ara ürün olarak oluşan karboksilik asit incelenmiştir. Araştırmacılara göre, anodik bozunma tepkimeleri genel olarak çözücü fazındaki H₂O'dan oksijen atomlarının yükseltgenme ürünlerine transferini içermektedir. Bütün deneysel çalışmalarda destek elektrolit olarak 0,10 M H₂SO₄ kullanılmıştır. Bu konsantrasyon, çözelti için yeterli iletkenliği

sağlamak ve ürünün deşarj öncesi nötralizasyon gerektirmemesi için seçilmiştir. Çalışmada, asidik ortamda anot sıcaklığının artmasıyla, karboksilik asidin anodik bozunma hızının artırılabilceği görülmüştür. Ayrıca, bu sıcaklığın bir etkisi olarak, normal laboratuvar sıcaklıklarında inaktif olan asetik ve malonik asidin 95°C’de önemli oranda bozunması sağlanmıştır.

Bock ve MacDougall (2000) yaptıkları çalışmada farklı anot malzemelerinde p-benzokinonun anodik yükseltgemesini araştırmışlardır. Ayrıca, uygulanan akım yoğunluğunun, p-benzokinon giderim verimi üzerine etkisini de incelemiştirler. Çalışmaya göre, uygulanan akım yoğunluğundaki artış, p-benzokinonun giderim veriminde az bir artışa neden olmakta, sürecin akım verimini düşürmektedir. p-benzokinonun giderim verimi anot malzemelerinin bir çok özelliğinden etkilenmektedir. Anot malzemesinin elektroaktif yüzey alanı gibi özellikleri ile organiklerin giderilmeleri arasında ilişki olduğu bulunmuştur. Anodik yükseltgeme tepkimesinin birinci basamağında (örneğin fenolün p-benzokinona dönüşümü), tepkime hızla gerçekleşmekte ve bu hız antimon katkılı kalay dioksit [Sn(Sb)-oksit] anotlarda ve platin oksit kaplı platin elektrotlarda (Pt/Pt-oksit) aynı olmaktadır. Bununla beraber, p-benzokinon gibi ara ürünlerin daha düşük yapıli alifatik asitlere yükseltgenme hızı antimon katkılı kalay dioksit anotlarda platin oksit kaplı platin elektrotlara yada iridyum oksit anotlara kıyasla çok daha hızlı olmaktadır. Ayrıca, Pt/Pt-oksit ve IrO₂ gibi iyi O₂ katalizörü olan metal oksit anotların fenolü düşük yapıli alifatik asitlere yükseltgerken, antimon katkılı metal oksit gibi zayıf O₂ katalizörü olan anotların fenolü tamamen CO₂’ye yükseltgediği gözlenmiştir.

Kimyasal olarak inert oluşu ve kendine has elektrokimyasal özellikleri nedeniyle bor katkılı elmas elektrotlar, elektrokimyasal atıksu arıtımında önemli bir potansiyele sahiptirler. Tröster ve ark. (2002) tarafından yapılan çalışmada kullanılan DiaChem elektrotlarda, elmas yüzeyde bozulma olmadığı görülmüş ve yükseltgemedede %100’e yakın akım verimleri elde edilmiştir. Elmas elektrotların sahip oldukları yüksek aşırı gerilim, suyun elektrolizinden önceki en büyük elektrokimyasal aralıktır ve direkt suda üretilen hidroksil radikalleri ile kirleticilerin indirekt yükseltgenmesini sağlarlar. Gerçekleştirilen endüstriyel uygulanabilirlik testleri, elmas elektrotların atıksu arıtımında uygun olduğunu

göstermiştir. Bu çalışmada, elmas elektrotların karakterizasyonu ve üretimi, elektrokimyasal su arıtım bulguları ve gerçek atıksudaki sonuçlar da dikkate alınarak özetlenmiştir. Elmas elektrotlarda, asidik çözeltilerde aşırı-gerilim 2,8V'tan (oksijen oluşumu) -1,3V'a (hidrojen üretimi) kadar değişmektedir. DiaChem elektrotların elektrokimyasal çalışma aralığında, ozon, hatta hidroksil radikalleri gibi güçlü yükseltgenlerin oluşumu söz konusudur. DiaChem elektrotlarla model ve gerçek atıksularda ileri elektrokimyasal yükseltgeme süreci gerçekleştirilmiştir (AEOP). Ölçek büyütme ile 50L/h kapasiteli bir pilot tesis yapılmış, ve bir endüstriyel bölgede test edilmiştir.

Panizza ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada, bor katkılı elmas (BDD) elektrotlarda organik bileşenlerin parçalanması için gerekli elektrot yüzeyi ve spesifik enerji tüketiminin tahmini için bir teorik analiz sunulmuştur. Model, galvanostatik şartlarda kesikli geri döngülü olarak işletilen tam karıştırmalı bir elektrokimyasal reaktör için formüle edilmiştir. Organiklerin yükseltgenmesi difüzyon kontrollü olarak kabul edilmiştir. Fenolün anodik yükseltgenmesi için deneysel kontrol çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Deneysel bulgular ile modelden elde edilen değerler tutarlılık göstermiştir.

Iotov ve Kalcheva (1998) siklik voltammetri ile 35,7°C'de 0,5M H₂SO₄ çözeltilerinde platin/altın (%60/40) alaşımlarında fenolün elektrokimyasal yükseltgemesini çalışmıştır. Aynı deneysel şartlarda, platin ve altın elektrotlar kullanılarak kıyaslamalı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Platin, altın ve platin/altın elektrotlarda fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesi için deneysel mekanizmalar önerilmiştir.

Bellagamba ve ark. (2002) poliakrilatlar (PA) gibi suda çözünebilen organik polimerik kirleticilerin, asidik çözeltilerde, bor katkılı elmas anotlarla elektrokimyasal giderimini çalışmıştır. Test edilen bütün şartlarda, PA'nın tamamen giderimi sağlanmıştır. 63 cm² yüzey alanına sahip disk şeklindeki anotta, elmas film iletken silisyum (siltronix) üzerine kaplanmıştır. 1 mol/L HClO₄'te hazırlanan PA'nın anodik yükseltgenmesi, 1-30 mA/cm² arası akım yoğunluklarında ve 2,78-187,5 mmol O₂/L KOİ'ye eşdeğer başlangıç derişimlerinde gerçekleştirilmiştir.

Alvarez-Gallegos ve Pletcher (1998), pH= 2'de klorür ve sülfat içeren çözeltilerde camsı karbon katot kullanarak oksijen indirgenmesi ile % 40-70 civarındaki akım verimlerinde H₂O₂ üretilebileceğini göstermişlerdir. Demir tuzlarının, gerilimin ve elektrolit derişiminin akım verimi ve H₂O₂ üretim hızına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirilen çalışmada Alvarez-Gallegos ve Pletcher (1999), camsı karbon katotta, Fe²⁺ varlığında elektrokimyasal olarak oksijen indirgenmesi ile üretilen hidrojen peroksidin organik bileşikler için güçlü bir yükseltgen olduğu gösterilmiştir. Araştırmacılar, bu yöntemin zayıf asidik şartlarda güvenli ve verimli bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarda fenol, krezol, kateşol, kinon, hidrokinon, anilin, oksalik asit ve bir azo-boyası olan amarant kullanılmıştır. Genel olarak, %50'lik akım verimi değerlerinde, KOİ'nin 50-500ppm'den 10ppm'e düşürülmesi sağlanmıştır.

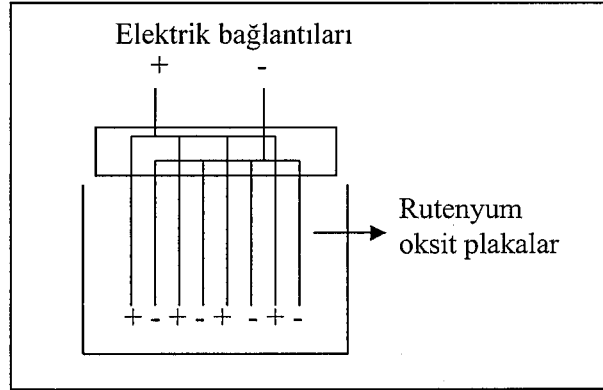
McGuire ve ark. (1985), 0-100 mg/L başlangıç derişimindeki fenolün 25°C'ta pH 7,7, 6,5, 4,1 ve 1,9'da aktif karbona elektro-adsorplanmasını çalışmışlar ve elektro-adsorpsiyon izotermelerini elde etmişlerdir. Bütün deneysel çalışmalarda 0,5M Na₂SO₄ içeren çözeltiler kullanılmıştır. Araştırmacılar, tükenmiş aktif karbonların elektro-rejenerasyonunu da başarıyla sağlamışlardır. Sonuçta, aktif karbonlara uygulanan gerilimin fenol adsorpsiyon kapasitesini etkilediğini bulmuşlardır.

Körbahti ve Tanyolaç (2003) tarafından paslanmaz çelikten yapılmış sürekli çalışılan borsal reaktörde fenolik atıksuların elektrokimyasal arıtımı araştırılmıştır. 25°C sıcaklık, 120 g/L elektrolit derişimi ve 61,4 ve 54,7 mA/cm² akım yoğunluklarında, 450 ve 3100 mg/L fenol içeren çözeltilerden fenol giderimine reaktörde kalış süresinin etkisi incelenmiştir. Çalışmalarda çözeltinin pH'ı ve fenol derişimi monitorlanmış, ayrıca kesikli bir çalışmada ise GC/MS analizleri ile ara ürün oluşumu tespit edilmiştir. Elektroliz esnasında, önce mono-, di-, tri- klorlu fenol bileşikleri oluşmuş, daha sonra bu bileşikler fenolle birlikte polimerizasyon mekanizmasıyla tüketilmiştir. 10 ve 20 dakika alıkonma süreleri için sırasıyla %56 ve %78 fenol giderimi olan 450 mg/L başlangıç derişiminde, 40 dakikanın üzerindeki alıkonma sürelerinde kolondaki fenolün tamamen giderimi sağlanmıştır. 1500 mg/L başlangıç derişiminde, 1, 1,5, 2 ve 3 saatlik alıkonma sürelerinde sırasıyla %42, %71, %81 ve %98 fenol giderimi sağlanmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme: Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar

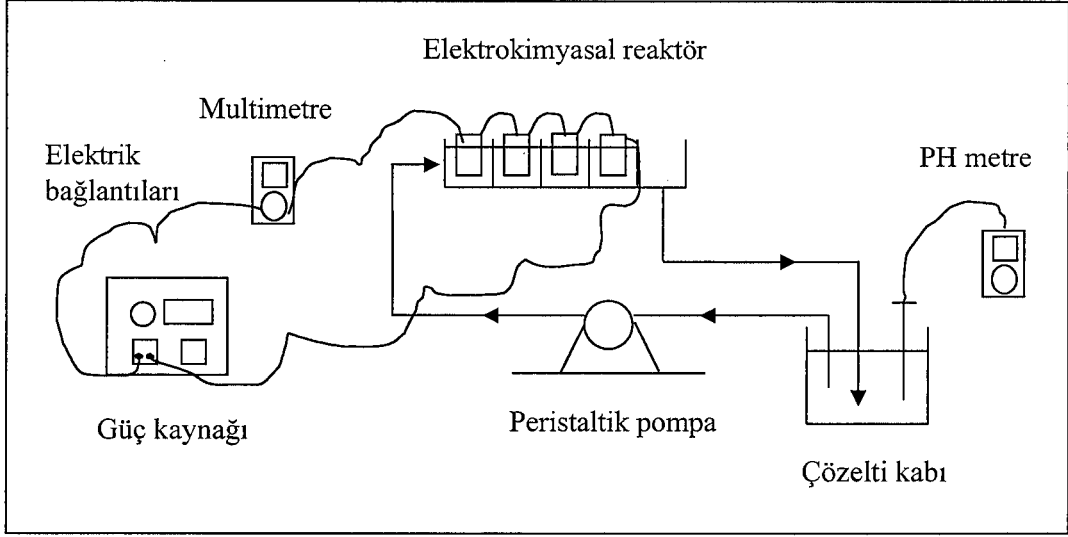
Deneysel çalışmalarda, distile su ile hazırlanan ve 50, 200 ve 500 mg/L fenol içeren çözeltiler kullanılmıştır. Fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesi 5 bölmeden oluşan ve 4 bölmesine paralel plaka elektrot demeti yerleştirilmiş reaktörle gerçekleştirilmiştir. Her bölmede birbirine paralel olarak yerleştirilmiş ve boyutları 3x4 cm olan 8 adet rutenyum oksit elektrot bulunmaktadır. Elektrik bağlantıları, bu elektrotların sırasıyla 1 anot 1 katot şeklinde davranmalarını sağlayacak şekilde yapılmıştır. Bir bölmede toplam 4 anot ve 4 katot yer almaktadır (Bkz. Şekil 5.1). Deneysel çalışma düzeneği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Elektrokimyasal reaktörün bölmelerine yerleştirilen elektrot demeti

Çalışmalar kesikli ve geri döngülü olarak yapılmıştır. Reaktörden çıkan çözelti, bir peristaltik pompa yardımıyla reaktöre geri döndürülmüştür. Çözelti reaktörden $24,83 \times 10^{-3}$, $36,3 \times 10^{-3}$ ve $47,8 \times 10^{-3}$ L/dak ($1,49 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ ve $2,87 \times 10^{-3}$ m³/saat) akış hızlarında geçirilmiş ve 10, 15 ve 20 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır (ön deneme çalışmalarda 3 ve 5 mA/cm² değerleri de denenmiştir). Sıcaklığın etkisini incelemek amacıyla 20, 50°C ve sıcaklık müdahalesi olmadan laboratuvar şartlarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Başlangıç pH'ının etkisini incelemek amacıyla 3, 11 ve çözeltinin doğal pH değerlerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, destek

elektrolitin etkisini belirlemek üzere 0,05M ve 0,1M Na₂SO₄ derişimlerinde de denemeler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar süresince çalışma çözeltisinin pH'ı düzenli olarak ölçülmüştür.

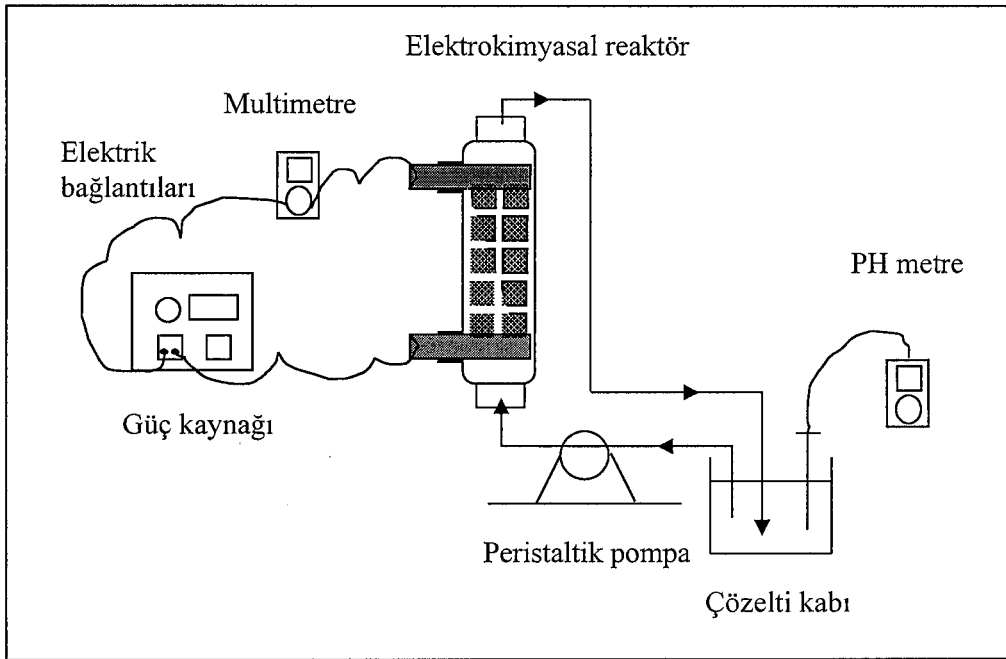


Şekil 5.2. Paralel plaka reaktör ve deneysel çalışma düzeneği

5.2.Elektrokimyasal Çöktürme: RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrot

Deneysel çalışmalarda kullanılan iki kutuplu tıkaç akım reaktör, iç içe yerleştirilmiş 2,5 ve 4 cm çapında ve 21,5 cm uzunluğunda iki adet cam borudan oluşmaktadır. Reaktörde, çözünebilir anot olarak RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotlar kullanılmıştır. Demir elektrotların dış çapı 0,8 cm, iç çapı 0,55 cm ve yüksekliği 0,8 cm'dir. Elektrokimyasal reaktör, her biri 4 elektrot içeren 26 tabakadan oluşmaktadır. Tabakalar arasına yalıtkan polyesterler yerleştirilerek elektrotlar birbirinden ayrılmış ve reaktörde iki kutupluluk sağlanmıştır. Anot ve katot bağlantısı için iki adet grafit çubuk kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.3). Deneysel çalışmalar sürekli tek geçişli olarak gerçekleştirilmiş, çözelti bir peristaltik pompa yardımıyla reaktörün alt kısmından yukarı doğru beslenmiş ve reaktörün üst kısmından alınan örneklerde fenol ve KOİ analizleri yapılmıştır. Ayrıca, KOİ'nin zamanla değişimini gözlemleyebilmek ve reaktöre beslenen fazla havanın giderime etkisini inceleyebilmek için kesikli geri döngülü çalışmalarda gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda distile su ile hazırlanan ve 200, 500 ve 1500 mg/L fenol içeren çözeltiler kullanılmıştır. Destek elektrolit olarak farklı derişimlerde Na_2SO_4 kullanılan deneysel çalışmalarda, laboratuvar sıcaklığında (20-25°C) gerçekleştirilmiştir. Çözelti reaktörden $24,83 \times 10^{-3}$, $36,3 \times 10^{-3}$ ve $47,8 \times 10^{-3}$ L/dak ($1,49 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ ve $2,87 \times 10^{-3}$ m³/saat) akış hızlarında geçirilmiş ve 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 5 ve 10 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda farklı derişimlerde H_2O_2 çözeltisinin giderim verimine etkileri de incelenmiştir.



Şekil 5.3. Tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği

5.3. Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar

RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokimyasal yükseltgeme çalışmasında, elektrokimyasal çöktürmede kullanılan iki kutuplu tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.3). Bor katkılı elmas elektrotların dış çapı 0,8 cm, iç çapı 0,55 cm ve yüksekliği 0,8 cm'dir. Elektrokimyasal reaktör, her biri 4 elektrot içeren 26 tabakadan oluşmaktadır. Tabakalar arasına yalıtkan polyesterler yerleştirilerek elektrotlar birbirinden ayrılmış ve reaktörde iki kutupluluk

sağlanmıştır. Anot ve katot bağlantısı için iki adet grafit çubuk kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kesikli ve geri döngülü olarak yapılmış ve distile su ile hazırlanan ve 50, 200 ve 500 mg/L fenol içeren çözeltiler kullanılmıştır.

Reaktörden çıkan çözelti, bir peristaltik pompa yardımıyla reaktöre geri döndürülmüştür. Çözelti reaktörden $24,83 \times 10^{-3}$, $36,3 \times 10^{-3}$ ve $47,8 \times 10^{-3}$ L/dak ($1,49 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ ve $2,87 \times 10^{-3}$ m³/saat) akış hızlarında geçirilmiş ve 3 ve 5 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır. Sıcaklığın etkisini incelemek amacıyla 5 ve 20°C'de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Başlangıç pH'ının etkisini incelemek amacıyla 3, 11 ve çözeltinin doğal pH değerlerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, destek elektrolit derişimini incelemek üzere Na₂SO₄ içeren çözeltilerle de denemeler yapılmıştır. Bu amaçla 0,01, 0,03, 0,05 ve 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözeltiler kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar süresince çalışma çözeltisinin pH'ı düzenli olarak ölçülmüştür.

5.4. İndirekt Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar

İndirekt elektrokimyasal yükseltgeme çalışmalarında, RASHIG halkası şeklindeki bor katkı elmas elektrotlar kullanılmış ve çalışmada elektrokimyasal yükseltgeme ve elektrokimyasal çöktürme çalışmalarında kullanılan iki kutuplu tıkaç akım reaktör ve deneysel çalışma düzeneği kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5.3). Deneysel çalışmalar kesikli ve geri döngülü olarak yapılmış ve 200, 500 ve 1500 mg/L fenol başlangıç derişimlerinde çalışılmıştır.

Çözelti reaktörden $24,83 \times 10^{-3}$, $36,3 \times 10^{-3}$ ve $47,8 \times 10^{-3}$ L/dak ($1,49 \times 10^{-3}$, $2,18 \times 10^{-3}$ ve $2,87 \times 10^{-3}$ m³/saat) akış hızlarında geçirilmiş ve bir peristaltik pompa yardımıyla reaktöre geri döndürülmüştür. 1, 3 ve 5 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır. 3, 11 ve çözeltinin doğal pH değerlerinde deneysel çalışmalar yapılarak başlangıç pH'ının giderime etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda 0,03, 0,05 ve 0,07 M NaCl içeren çözeltiler kullanılarak NaCl derişiminin giderim verimine etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince çalışma çözeltisinin pH'ı düzenli olarak ölçülmüştür.

5.5. Kimyasal Yükseltgeme: Fenton Ajanı

Fenton ajanı ile kimyasal yükseltgemede 200 ve 500 mg/L fenol başlangıç derişimlerinde kesikli olarak çalışılmış ve 500mL örnek hacimleri kullanılmıştır. Beherlere alınan örneklere kimyasal maddelerin (H_2O_2 ve $FeSO_4$) ilavesinden sonra, çözelti 1 dakika 200 devir/dk (hızlı karıştırma) ve sonrasında 10 dakika 30 devir/dk'da (yavaş karıştırma) karıştırılmıştır. Daha sonra 25 dakikalık bir bekleme sonrası beherlerden alınan örneklerde fenol ve KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir. 200 mg/L fenol başlangıç derişimi için 250, 500, 750 ve 1000 mg/L H_2O_2 ve 250, 500, 750 ve 1000 mg/L $FeSO_4$ derişimlerinde çalışılmıştır. 500 mg/L fenol başlangıç derişiminde ise 1000, 1250, 1500 ve 2000 mg/L H_2O_2 ve 500, 750, 1000, 1250, 1500 ve 2000 mg/L $FeSO_4$ derişimlerinde çalışılmıştır.

5.6. Kullanılan Elektrot Malzemeleri

Bütün elektrokimyasal süreçlerde olduğu gibi, organik maddelerin elektrokimyasal yükseltgenmesinde de elektrot malzemesi sistemin en önemli parçalarından biridir. Elektrot malzemesi yükseltgeme mekanizmasını ve sonuçta oluşan anodik tepkime ürünlerini direkt olarak etkilemektedir.

Deneyisel çalışmalarda rutenyum oksit paralel plaka elektrotlar, RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas kaplı niyobyum elektrotlar ve RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotlar kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda kullanılan bor katkılı elmas elektrotların SEM görüntüleri EK-1'de verilmiştir.

Bor kaplı elmas anotlar, suyun elektroliziyle yüksek akım verimlerinde direkt olarak hidroksil radikali oluşumuna imkan vermektedirler. Bu olay, elmas anotların oksijen üretimi ve daha bir çok anodik süreç için çok yüksek aşırı gerilime sahip olması ile açıklanabilmektedir (Kraft ve ark. 2003). Elmas çok iyi bir yalıtkan olmasına rağmen, bor ile katkılandırıldığında elektrokimyasal çalışmalar için uygun bir malzeme haline gelmektedir. Böylece film yüzeyin elektriksel iletkenliği, bor katkısı miktarından ve diğer safsızlıklardan etkilenmektedir. Elmas filmler titanyum, tantal, niyobyum, molibden ve grafit gibi farklı endüstriyel elektrot malzemeleri üzerine, ve silikon veya silikon karbür üzerine kaplanabilmektedir. Yoğun kimyasal ortamlarda elmasın son derece

kararlı olması, derişik asidik (HCl, HF) elektrolit ortamlarında kullanımını sağlamaktadır (Fujishima ve Rao 2001).

Elmasın önemli özellikleri arasında;

- son derece yüksek mekanik sertlik,
- bilinen en sert malzeme,
- oda sıcaklığında bilinen en yüksek ısıl iletkenlik (bakırdan 2-4 kat fazla),
- çok geniş bir dalga boyu aralığında geçirimsizlik (UV'den uzak IR'ye),
- kimyasal korozyona karşı çok dirençli, kimyasal olarak inert (özellikle şiddetli yükseltgen ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta)
- biyolojik uyumluluk,
- çok düşük ısıl genleşme katsayısı sayılabilir.

Elmasın elektrokimyasal özellikleri ise şu şekilde sıralanabilir;

- sıra dışı elektrokimyasal penceresi (>3V) nedeniyle hem anodik hem de katodik tepkimelerde yeni olasılıklar sunar, bu geniş aralık Çizelge 5.1'de yer alan yükseltgenlerin oluşumuna imkan verir,
- hidroksil radikallerinin oluşumuyla organik maddelerin kinonlar gibi toksik ara ürünler oluşturmadan CO₂'ye yükseltgenmesini ve siyanürün tamamen yükseltgenmesini sağlar,
- elektrot yüzeyinde bozunma olmaksızın klor üretimi, yüzeydeki elmas tabakasını tüketmeden ozon üretimi sağlar (http-9).

Çizelge 5.1. Bazı kimyasal yükseltgenlerin oluşum gerilimleri (Tröster ve ark. 2002)

Yükseltgen	Oluşum gerilimi (V)
Hidroksil radikali (H ₂ O/OH [•])	2,80
Ozon (O ₂ /O ₃)	2,07
Peroksidisülfat (SO ₄ ²⁻ /S ₂ O ₈ ²⁻)	2,01
Hidrojen peroksit (H ₂ O/H ₂ O ₂)	1,77
Permanganat iyonu (MnO ₂ /MnO ₄ ⁻)	1,67
Klor dioksit (Cl ⁻ /ClO ₂ ⁻)	1,57
Klor (Cl ⁻ /Cl ₂)	1,36
Dikromat (Cr ³⁺ /Cr ₂ O ₇ ⁻)	1,23
Oksijen (H ₂ O/O ₂)	1,23

Rutenyum oksit, endüstriyel elektroliz için önemli bir malzemedir. Sabit boyutlu anot (DSA, Dimensionally Stable Anodes) olan rutenyum oksit elektrotlar

klor gazı ve oksijen üretiminde anot olarak ve hidrojen üretiminde ise katot olarak sıkça kullanılmaktadır (Lister ve ark. 2003; Terezo ve Pereira 2002). Elektriksel iletkenliği yüksek olan rutenyum oksit elektrotlar, 800°C kadar yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gösterirler. Bu dayanıklılık, özellikle, ortamda oksijen bulunmasına bağılı olarak değişmektedir; oksijensiz ortamda 630°C’de bozunma başlarken, oksijenli ortamda bu değer 800°C’a kadar çıkmaktadır. Aynı şekilde, bu elektrotların kimyasal dayanımları da yüksektir (Ganesan ve ark. 2003).

5.7. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan model atıksuları hazırlamak üzere katı kristal şeklindeki fenol (C₆H₅OH, MERCK) kullanılmıştır. Destek elektrolitin etkisinin incelendiği çalışmalarda sodyum sülfat (Na₂SO₄, MERCK), indirekt elektrokimyasal yükseltgeme çalışmalarında sodyum klorür (NaCl, MERCK) ve gerektiğinde pH ayarlamalarında sülfürik asit (H₂SO₄, MERCK) ve sodyum hidroksit (NaOH, MERCK) kullanılmıştır. Elektrokimyasal çöktürme çalışmalarında hidrojen peroksit (H₂O₂, CARLO ERBA) kullanılmıştır. Kimyasal yükseltgeme deneylerinde hidrojen peroksitin yanı sıra demir sülfat (FeSO₄.7H₂O, CARLO ERBA) kullanılmıştır. Ayrıca, fenol analizleri (ASTM 5530 D; Direkt fotometrik metot) için amonyum hidroksit (NH₄OH, J.T. BAKER), potasyum hidrojen fosfat (KH₂PO₄, MERCK), di-potasyum hidrojen fosfat (K₂HPO₄, CARLO ERBA), 4-aminoantipirin (MERCK) ve potasyum ferri siyanür (K₃Fe(CN)₆, MERCK) kullanılmıştır.

5.8. Kullanılan Yardımcı Araçlar

Deneysel çalışmalarda yardımcı araç olarak; Statron marka 3234.4 ve 3234.9 model güç kaynakları, OGSM 3900 model dijital multimetre, Fluke marka 26-III model multimetre, iki adet Multifix MC 1000 PEC model peristaltik pompa, tartım işlemlerinde OHAUS marka AS200 model analitik terazi, Polyscience 9605 model ısıtmalı/soğutmalı su banyosu, Orion 420 A model pH metre, DR Lange CADAS 100 model spektrofotometre, Elektromag M 615M

model santrifüj, Velp Scientifica marka F.4/S model Jar testi cihazı, Bandelin Sonorex TK 100 model ultrasonik banyo kullanılmıştır.

5.9. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler

Fenol Derişimi;

$$mg \text{ fenol} / L = \frac{x}{z} 1000 \quad (5.1)$$

x = mg olarak numunedeki fenol miktarı

z = mL orijinal numune hacmi

Yüzde Giderim;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_o - C)}{C_o} 100 \quad (5.2)$$

C_o = Başlangıçtaki fenol derişimleri (mg/L)

C = Reaktörden çıkan çözeltideki fenol derişimleri (mg/L)

Enerji Tüketimi;

$$(kWhm^{-3}) = \frac{I \cdot V}{Q \cdot 1000} \quad (5.3)$$

$$(kWhg^{-1}) = \frac{I \cdot V}{(C_o - C) \cdot Q \cdot 1000} \quad (5.4)$$

I = Akım (amper)

V = Gerilim (V)

Q = Akış hızı (m³/saat)

Kütle aktarım katsayısı, k_m ;

$$k_m = -\frac{Q}{A} \ln\left(\frac{C}{C_o}\right) \quad (5.5)$$

Q = Akış hızı (m³/s)

A = Anot yüzey alanı, m²

Akım verimi;

$$\text{Akım verimi} = \frac{\text{İstenen tepkime için gerekli yük}}{\text{Toplam yük}} = \frac{\theta_p}{\theta} \quad (5.6)$$

$$\text{Akım verimi} = \frac{m \cdot n \cdot F}{\theta} = \frac{w \cdot n \cdot F}{M \cdot \theta} \quad (\text{Walsh 1993}) \quad (5.7)$$

$$\text{Akım verimi} = \frac{(C_o - C) \cdot v \cdot n \cdot F}{M \cdot I \cdot t} \quad (5.8)$$

θ_p = İstenen tepkime için gerekli yük (A.s)

θ = Toplam yük (A.s)

v = Çözelti hacmi (L)

F = Faraday sabiti (96500 A.s/mol)

n = Alınan verilen elektron sayısı (fenol yükseltgenmesi için 28)

M = Molar kütle (94g/mol)

t = Elektroliz süresi (s)

Elektrokimyasal Oksijen İstemi;

$$EOD = \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{[PhOH]} V \quad (5.9)$$

$(KOİ)_t, (KOİ)_{t+\Delta t} = t$ ve $t+\Delta t$ zamanlarındaki KOİ (g O₂/L)

V = Çözelti hacmi (L)

$[PhOH]$ = Elektrolitteki fenol miktarı (g)

Eşitlikler ile ilgili örnek hesaplamalar EK 2, EK 4 ve EK 6'da verilmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

6.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme: Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar

Bu çalışmada, rutenyum oksit kaplı titanyum plaka elektrotlar kullanılarak fenolün elektrokimyasal yükseltgenmesi çalışılmıştır. 50, 200 ve 500 mg/L başlangıç fenol derişimlerine sahip çözeltilerin, 4 bölmeden oluşan ve paralel plakalar şeklinde yerleştirilmiş rutenyum oksit elektrotlar bulunan elektrokimyasal reaktörle giderimi araştırılmıştır. Kesikli geri döngülü çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde, başlangıç pH'ı, çalışma sıcaklığı (laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen çalışmalarda çözelti sıcaklığı başlangıçta 20-25°C civarında olup, elektroliz esnasında artan elektrot sıcaklığına paralel olarak artmış ve çalışma sonrası 35-50°C arasında değişen değerlere ulaşmıştır), akım yoğunluğu, başlangıç derişimi, destek elektrolit derişimi ve akış hızının giderim verimine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.1-27'de ve Şekil 6.1-26'da verilmiştir.

Çizelge 6.1. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1080\text{mA}$, $i= 3\text{ mA/cm}^2$, $V= 500\text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	87,2	-	-	-	-	-
10	79,4	191,27	19,82	4,36	39,33	4,510
20	66,3	183,27	19,36	8,36	32,84	1,965
30	57,7	174,27	19,15	12,86	28,58	1,112
40	53,1	165,46	19,09	17,27	26,30	0,762
50	49,3	158,08	19,02	20,96	24,42	0,582
60	46,5	149,02	18,85	25,50	23,03	0,452
70	43,8	139,76	18,63	30,12	21,70	0,361
80	42,1	128,51	18,55	35,75	20,85	0,292

Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $7,44 \times 10^{-6}\text{ m/s}$

Çizelge 6.2. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= \text{lab. sıcaklığı}$, $\text{pH}_{\text{başlangıç}}= 6,86$ (doğal), $\text{pH}_{\text{son}}= 4,23$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	60	-	-	-	-	-
15	44,3	176,26	21,1	11,87	49,54	2,09
30	39,0	158,06	18,6	20,97	32,20	0,777
45	36,3	135,61	18,6	32,19	29,97	0,465
60	34,1	118,01	18,2	40,99	28,15	0,343
Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $8,87 \times 10^{-6} \text{ m/s}$						

Çizelge 6.3. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}_{\text{başlangıç}}= 3,05$, $\text{pH}_{\text{son}}= 3,35$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	20,2	-	-	-	-	-
15	19,3	195,37	4,1	2,31	15,93	3,44
30	18,9	190,82	3,4	4,59	15,60	1,70
45	18,3	185,36	3,3	7,32	15,11	1,03
60	18,0	179,29	2,9	10,35	14,86	0,717
Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $1,84 \times 10^{-6} \text{ m/s}$						

Çizelge 6.4. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= \text{laboratuvar sıcaklığı}$, $\text{pH}_{\text{başlangıç}}= 11,02$, $\text{pH}_{\text{son}}= 10,73$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	16	-	-	-	-	-
15	11,7	195,37	4,1	2,31	9,66	2,086
30	11,7	194,16	2,6	2,92	9,66	1,654
45	12,0	191,73	2,5	4,13	9,91	1,198
60	12,1	183,24	2,5	8,38	9,99	0,596
Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $1,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$						

Çizelge 6.5. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	18,0	6,78	-	-	-	-	-
10	14,1	3,32	194,46	7,37	2,77	11,65	2,10
20	13,8	3,43	190,22	6,51	4,89	11,40	1,16
30	13,6	3,36	187,18	5,68	6,41	11,24	0,87
40	13,6	3,24	185,06	4,97	7,47	11,24	0,75
60	13,6	3,37	179,60	4,52	10,20	11,24	0,55

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 469,4 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 2,21
EOD= 0,053 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $1,81 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.6. 200 mg/L fenol ve 0,05M Na_2SO_4 içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	5,4	7,03	-	-	-	-	-
10	5,4	6,21	188,39	15,45	5,80	4,46	0,384
20	5,4	6,09	182,63	11,56	8,68	4,46	0,257
30	5,4	6,65	181,11	8,38	9,44	4,46	0,236
40	5,4	6,85	179,90	6,69	10,05	4,46	0,222
60	5,4	6,91	175,35	5,47	12,32	4,46	0,181

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 457,6 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 4,67
EOD= 0,112 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $2,21 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.7. 200 mg/L fenol ve 0,1M Na_2SO_4 içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 1800\text{mA}$, $i= 5 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t= 20^\circ\text{C}$)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	5,4	7,02	-	-	-	-	-
10	5,0	3,83	160,18	52,99	19,91	4,13	0,104
20	5,0	3,63	157,15	28,5	21,43	4,13	0,096
30	4,9	3,64	154,11	20,35	22,94	4,05	0,088
40	5,1	3,62	149,26	16,88	25,37	4,21	0,083
60	5,2	3,60	143,19	12,6	28,40	4,30	0,076

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 420,3 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 12,4
EOD= 0,298 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $5,61 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.8. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 3600mA, i= 10 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	28,9	6,80	-	-	-	-	-
30	20,9	4,05	158,36	9,2	20,82	34,51	0,828
60	18,4	3,96	121,65	8,7	39,17	30,38	0,388
90	17,5	3,88	104,66	7,1	47,67	28,90	0,303
120	16,3	3,75	78,88	6,7	60,56	26,917	0,222
150	15,3	3,41	55,21	6,4	72,39	25,266	0,174
180	14,3	3,02	39,44	5,9	80,28	23,61	0,147

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 243,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 49,30
EOD= 1,18 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 27,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.9. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 3600mA, i= 10 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	39,2	6,76	-	-	-	-	-
30	14,0	3,70	137,73	13,8	31,13	23,12	0,371
60	12,3	3,73	104,66	10,6	47,67	20,31	0,213
90	11,6	3,45	66,44	9,9	66,78	19,15	0,143
120	10,8	3,10	37,92	9	81,04	17,83	0,11
150	10,2	2,88	19,72	8	90,14	16,84	0,0934
180	10,0	2,93	10,31	7	94,84	16,51	0,087

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 156,66 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 67,36
EOD= 1,62 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 49,9 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.10. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 3600mA, i= 10 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 50°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	23,3	6,49	-	-	-	-	-
30	19,8	4,39	142,59	12,7	28,71	32,697	0,569
60	12,1	3,75	107,70	10,2	46,15	19,98	0,216
90	10,8	3,54	70,38	9,6	64,81	17,835	0,137
120	9,9	3,44	42,47	8,7	78,76	16,348	0,104
150	8,2	3,38	15,77	8,2	92,11	13,54	0,073
180	8,0	2,89	10,31	7	94,84	13,21	0,0696

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 225,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 53,06
EOD= 1,27 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 49,9 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.11. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 5400\text{mA}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	50,1	7,12	-	-	-	-	-
10	30,4	3,88	152,29	21,2	23,85	75,30	1,578
20	16,6	3,47	116,19	18,6	41,90	41,12	0,490
30	13,4	3,42	85,25	17	57,37	33,19	0,289
40	12,6	3,40	65,53	14,9	67,23	31,21	0,232
50	12,3	3,40	47,93	13,5	76,03	30,468	0,200
60	12,1	3,36	32,76	12,4	83,62	29,97	0,179
90	11,8	2,86	6,98	9,5	96,51	29,229	0,151
120	12,9	3,19	1,82	7,3	99,09	31,95	0,161

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 93,33 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 80,55
EOD= 1,93 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $79 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.12. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 7200\text{mA}$, $i= 20 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	35,8	6,86	-	-	-	-	-
10	27,6	5,03	136,52	21,1	31,74	91,156	1,436
20	16,7	3,80	81,00	19,8	59,50	55,156	0,463
30	15,9	3,80	43,68	17,3	78,16	52,52	0,336
40	14,6	3,81	20,93	14,9	89,53	48,22	0,269
50	14,8	4,00	10,01	12,6	94,99	48,88	0,257
60	14,8	4,14	5,46	11	97,27	48,88	0,251
70	14,6	4,03	3,64	9,3	98,18	48,22	0,245

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 63,33 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 86,80
EOD= 2,08 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $67,4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.13. 200 mg/L fenol ve 0,1 M Na_2SO_4 içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600\text{mA}$, $i= 10 \text{ mA/cm}^2$, $V= 500 \text{ mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm^{-3})	Enerji Tüketimi (kWhg^{-1})
0	3,4	6,92	-	-	-	-	-
10	3,4	7,99	171,71	18,8	14,14	5,61	0,198
20	3,4	8,17	174,74	8,4	12,63	5,61	0,222
30	3,4	8,50	171,71	6,3	14,14	5,61	0,198
40	3,4	8,55	168,37	5,3	15,81	5,61	0,177
50	3,4	8,48	165,95	4,5	17,03	5,61	0,165
60	3,4	8,42	162,61	4,2	18,69	5,61	0,150
90	3,3	8,71	148,05	3,8	25,98	5,449	0,105
120	3,3	8,75	137,43	3,5	31,28	5,449	0,0871
150	3,3	8,55	125,90	3,3	37,05	5,449	0,0735
180	3,4	8,43	116,19	3,1	41,90	5,61	0,0669

KOİ giriş= 480 mgO_2/L , KOİ çıkış= 323,33 mgO_2/L , KOİ giderimi= % 32,64
EOD= 0,78 g O_2/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $9,14 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Çizelge 6.14. 200 mg/L fenol ve 0,1 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	3,8	6,96	-	-	-	-	-
10	3,7	8,22	190,22	4,3	4,89	9,165	0,937
20	3,7	8,33	187,48	2,8	6,26	9,165	0,998
30	3,7	8,38	185,36	2,7	7,32	9,165	0,626
40	3,7	8,10	176,87	2,7	11,56	9,165	0,396
50	3,7	7,60	168,37	2,7	15,81	9,165	0,290
60	3,6	7,04	166,55	2,6	16,72	8,917	0,266
90	3,6	5,73	144,71	2,6	27,64	8,917	0,161
120	3,6	5,38	128,63	2,6	35,68	8,917	0,125
150	3,7	5,78	107,09	2,5	46,45	9,165	0,098
180	3,6	5,50	88,585	2,5	55,71	8,917	0,080

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 296,66 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 38,19
EOD= 0,92 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 13,7 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.15. 200 mg/L fenol ve 0,1 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 7200mA, i= 20 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	4,0	6,90	-	-	-	-	-
10	3,9	8,43	175,35	8,2	12,32	12,88	0,522
20	3,9	8,52	166,86	5,5	16,57	12,88	0,388
30	3,9	7,67	161,09	4,3	19,45	12,88	0,331
40	3,9	7,52	151,99	4	24,01	12,88	0,268
50	3,9	7,38	140,46	4	29,77	12,88	0,216
60	3,9	7,08	128,33	4	35,84	12,88	0,180
90	3,8	6,85	104,66	3,5	47,67	12,55	0,131
120	3,8	6,60	93,44	3,2	53,28	12,55	0,118
130	3,8	6,54	75,24	2,9	62,38	12,55	0,100

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 260 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 45,83
EOD= 1,1 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 16,4 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.16. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	4,2	7,06	-	-	-	-	-
10	3,9	7,40	183,84	7,2	8,08	9,66	0,598
20	3,9	6,50	176,56	5,2	11,72	9,66	0,412
30	3,8	5,80	165,64	5,1	17,18	9,41	0,274
40	3,8	5,17	161,70	4,7	19,15	9,41	0,246
50	3,8	5,09	147,44	4,7	26,28	9,41	0,179
60	3,8	4,91	141,07	4,5	29,46	9,41	0,160
90	3,7	4,03	108,61	4,5	45,69	9,165	0,100
120	3,7	3,75	78,57	4,4	60,71	9,165	0,075
150	3,7	3,70	52,78	4,3	73,61	9,165	0,062
180	3,7	3,62	35,49	4,1	82,25	9,165	0,0557

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 246,66 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 48,61
EOD= 1,17 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 29,1 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.17. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	51,2	7,05	-	-	-	-	-
10	28,2	6,03	33,07	74,1	83,47	102,2	0,612
20	20,0	4,28	23,96	39	88,02	72,48	0,412
30	17,3	4,18	7,28	28,5	96,36	62,70	0,325
40	16,8	4,25	3,03	21,8	98,48	60,88	0,309
50	16,7	4,61	0,22	17,7	100	60,52	0,302

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 70 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 85,41
EOD= 2,05 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 78,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.18. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 5400mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 47,8x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	82	6,96	-	-	-	-	-
10	38	6,26	155,02	19,9	22,49	71,50	1,589
20	19,3	5,60	118,62	18,1	40,69	36,31	0,446
30	17,7	5,36	101,33	14,6	49,34	33,30	0,337
40	17,4	5,44	79,18	13,4	60,41	32,74	0,271
50	17,3	5,39	62,49	12,2	68,75	32,55	0,237
60	17,0	5,16	41,56	11,7	79,22	31,98	0,202
90	16,6	4,23	2,73	9,7	98,635	31,23	0,158
120	17,4	5,20	0,61	7,4	99,67	32,74	0,164

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 53,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 88,89
EOD= 2,13 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 128 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.19. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600$ mA, $i= 10$ mA/cm², $V= 500$ mL, $Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	92	7,03	-	-	-	-	-
10	51,3	6,47	85,85	75,9	57,07	123,49	1,086
20	19,8	5,11	77,36	40,8	61,32	47,84	0,390
30	21,0	4,77	63,41	30,3	68,30	50,74	0,371
40	15,6	4,67	46,11	25,6	76,94	37,69	0,245
50	16,3	4,68	37,62	21,6	81,19	39,38	0,242
60	16,3	4,43	27,61	19,1	86,19	39,38	0,228
90	16,4	3,67	7,28	14,2	96,36	39,62	0,206
120	17,1	3,88	2,12	11	98,94	41,31	0,209

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 63,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 86,80
EOD= 2,08 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $52,3 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.20. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 7200$ mA, $i= 20$ mA/cm², $V= 500$ mL, $Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	100	7,06	-	-	-	-	-
10	97,2	6,00	91,32	36,2	54,34	469,69	4,322
20	38,1	4,45	13,04	31,1	93,48	184,11	1,728
25	35,5	4,37	6,07	25,8	96,96	171,54	0,884
30	28,2	4,36	1,82	22	99,09	136,27	0,687
35	25,2	4,47	0	19	100	121,77	0,610

KOİ giriş= 480 mgO₂/L, KOİ çıkış= 43,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 90,98
EOD= 2,18 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $87,4 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.21. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 3600$ mA, $i= 10$ mA/cm², $V= 500$ mL, $Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,2	7,08	-	-	-	-	-
10	69,7	6,15	5,46	29,6	89,08	168,40	3,78
20	25,3	5,86	3,18	15,6	93,63	61,13	1,306
30	19,8	6,29	1,06	10,8	97,87	47,84	0,977
40	20,4	6,55	0,30	8,3	99,39	49,29	0,992

KOİ giriş= 120 mgO₂/L, KOİ çıkış= 16,66 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 86,11
EOD= 2,07 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $58,8 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.22. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 5400 mA, i= 15 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,2	7,03	-	-	-	-	-
5	97,2	6,52	5,76	39,3	88,47	352,27	7,963
10	42,6	6,41	2,73	21	94,54	154,39	3,266
15	31,1	6,20	2,27	14,1	95,45	112,71	2,362
20	33,9	6,30	1,82	10,7	96,36	122,86	2,550
25	31,1	6,52	0,76	8,7	98,48	112,72	2,288
30	27,5	6,45	0,15	7,4	99,69	99,66	1,999

KOİ giriş= 120 mgO₂/L, KOİ çıkış= 16,66 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 86,11
EOD= 2,07 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 66,8 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.23. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 7200 mA, i= 20 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,2	7,03	-	-	-	-	-
5	97,1	7,28	4,40	30,3	91,20	469,21	10,29
10	97,0	6,73	2,43	15,8	95,15	468,72	9,853
15	97,0	6,96	1,21	10,8	97,57	468,72	9,608
20	44,4	6,68	0,61	8,2	98,79	214,55	4,344
25	40,7	6,79	0,15	6,6	99,69	196,67	3,945

KOİ giriş= 120 mgO₂/L, KOİ çıkış= 20 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 83,33
EOD= 2 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 66,8 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.24. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 3600 mA, i= 10 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,2	7,22	-	-	-	-	-
10	51,3	6,38	433,07	44,5	13,38	123,84	1,852
20	26,0	6,83	414,11	28,6	17,18	62,82	0,731
30	21,5	7,11	409,55	20,1	18,09	51,95	0,556
40	20,8	6,92	389,84	18,3	22,03	50,255	0,456
50	20,0	6,65	368,60	17,5	26,28	48,32	0,368
60	19,1	6,16	352,67	16,3	29,46	46,15	0,313
90	17,4	4,07	309,44	14,1	38,11	42,04	0,221
120	15,8	4,51	276,07	12,4	44,78	38,17	0,170
150	14,5	3,44	236,63	11,7	52,67	35,03	0,133
180	13,6	3,34	189,61	11,5	62,08	32,86	0,106
210	12,8	3,14	147,14	11,2	70,57	30,93	0,087
240	12,1	3,07	104,66	11	79,07	29,23	0,074

KOİ giriş= 1200 mgO₂/L, KOİ çıkış= 413,33 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 65,55
EOD= 1,57 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 18 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.25. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 5400$ mA, $i= 15$ mA/cm², $V= 500$ mL, $Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,2	7,18	-	-	-	-	-
10	75,0	5,41	301,86	87,9	39,63	271,81	1,372
20	27,5	3,97	244,97	56,6	51,00	99,66	0,391
30	22,6	3,78	191,12	45,7	61,77	81,91	0,265
40	17,8	3,64	127,42	41,3	74,51	64,51	0,173
50	16,5	3,57	91,77	36,2	81,64	59,80	0,146
60	15,4	3,52	56,88	32,8	88,62	55,81	0,126
90	14,9	3,00	1,52	24,6	99,70	54,00	0,108

KOİ giriş= 1200 mgO₂/L, KOİ çıkış= 240 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 80
EOD= 1,92 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $66,6 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.26. 500 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 7200$ mA, $i= 20$ mA/cm², $V= 500$ mL, $Q= 24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=$ laboratuvar sıcaklığı)

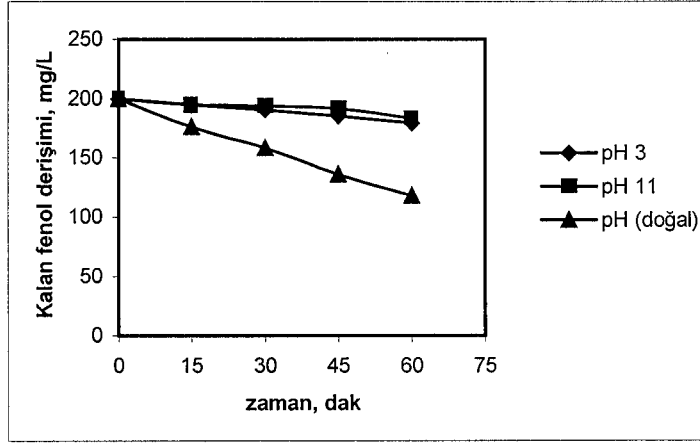
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhm ⁻³)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	97,0	7,13	-	-	-	-	-
10	97,0	5,31	253,32	82,1	49,34	468,72	1,901
20	40,7	4,26	202,50	49,5	59,50	196,67	0,660
30	33,3	4,02	134,24	40,6	73,15	160,9	0,440
40	28,0	4,06	51,57	37,3	89,68	135,3	0,302
50	25,4	3,92	6,82	32,8	98,63	122,74	0,249
60	24,8	4,07	0	27,7	100	119,84	0,239

KOİ giriş= 1200 mgO₂/L, KOİ çıkış= 120 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 90
EOD= 2,16 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $97,9 \times 10^{-6}$ m/s

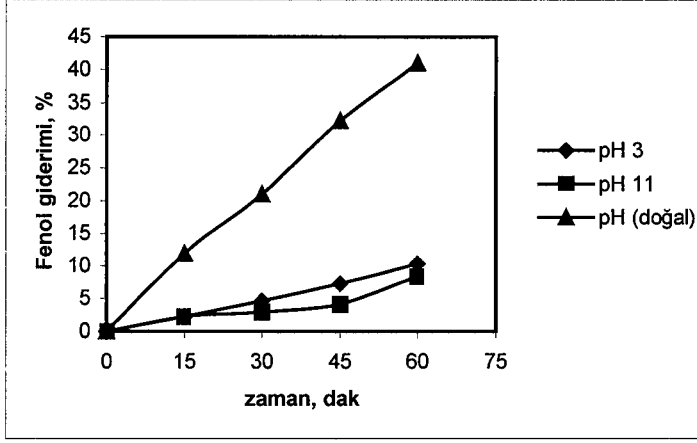
Çizelge 6.27. Kütle aktarım katsayısının deneysel çalışma parametreleri ile değişimi

Parametre	Değer	Kütle aktarım katsayısı (k_m , 10^{-6} m/s)
Sıcaklık (°C)	20	27,3
	50	49,9
	Lab. Sıcaklığı*	49,9
Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	10	49,9
	15	79
	20	67,4
pH	3	1,84
	11	1,47
	doğal	8,87
Destek elektrolit (Na ₂ SO ₄ , M)	doğal	1,81
	0,05	2,21
	0,1	5,61
Akış hızı (10 ⁻³ L/dak)	24,83	78,3
	36,3	79
	47,8	128

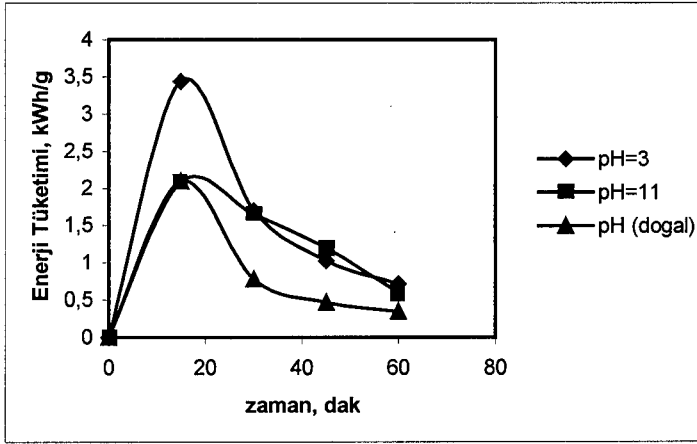
*Laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen çalışmalarda çözelti sıcaklığı, başlangıçta 20-25°C civarında olup, elektroliz sırasında artan elektrot sıcaklığına paralel olarak artmış ve çalışma sonrası 35-50°C arasında değişen değerlere ulaşmıştır.



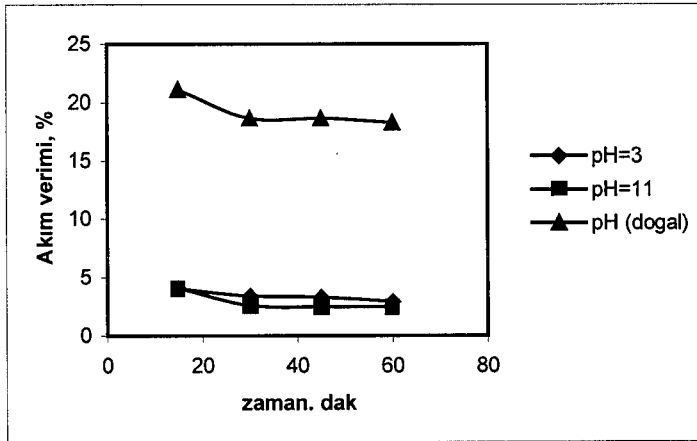
Şekil 6.1. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o = 200$ mg/L, $V = 500$ mL, $i = 5$ mA/cm², $Q = 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t =$ laboratuvar sıcaklığı)



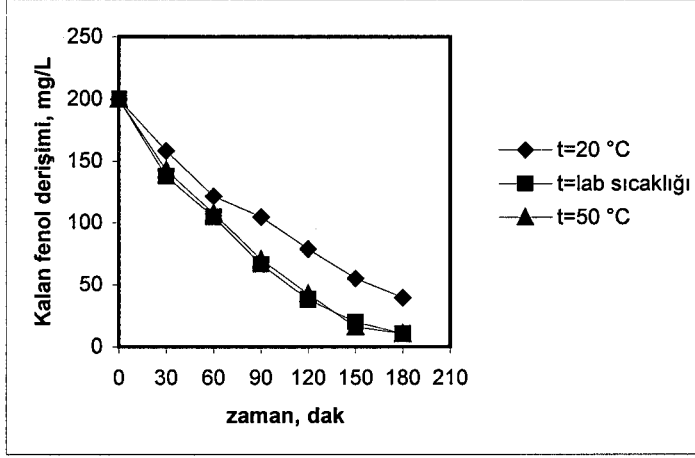
Şekil 6.2. Fenol gideriminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0 = 200$ mg/L, $V = 500$ mL, $i = 5$ mA/cm², $Q = 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t =$ laboratuvar sıcaklığı)



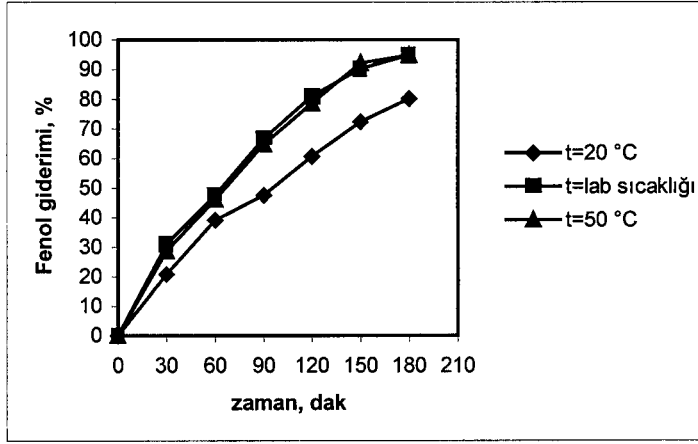
Şekil 6.3. Enerji tüketiminin başlangıç pH'ı ile değişimi ($C_0 = 200$ mg/L, $V = 500$ mL, $i = 5$ mA/cm², $Q = 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t =$ laboratuvar sıcaklığı)



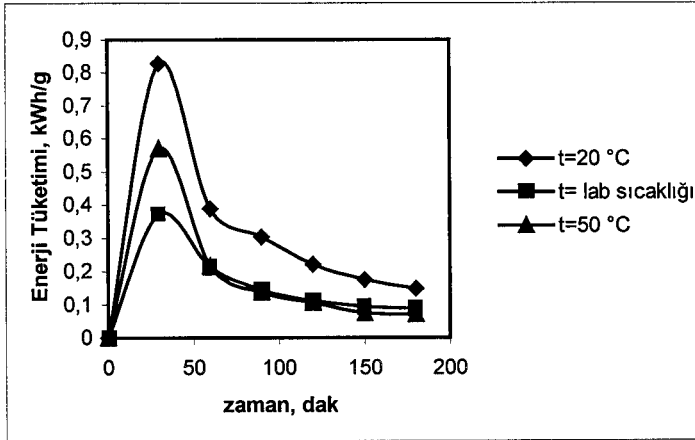
Şekil 6.4. Akım veriminin başlangıç pH'ı ile değişimi ($C_0 = 200$ mg/L, $V = 500$ mL, $i = 5$ mA/cm², $Q = 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t =$ laboratuvar sıcaklığı)



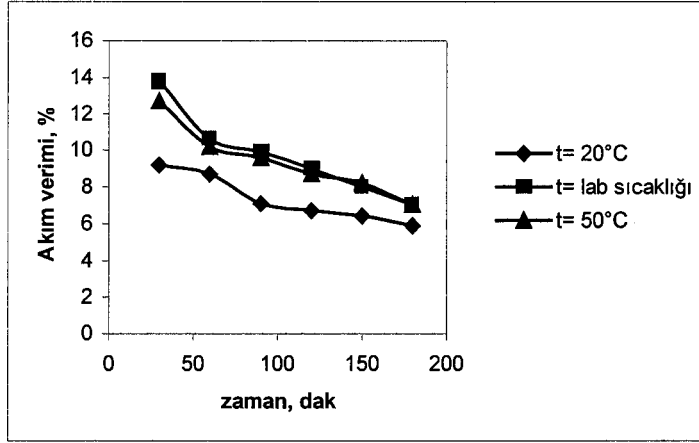
Şekil 6.5. Kalan fenol derişiminin sıcaklığa bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 10$ mA/cm², $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH= doğal)



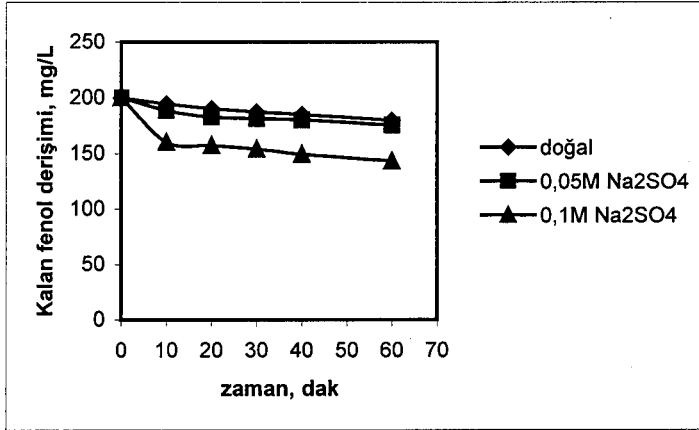
Şekil 6.6. Fenol gideriminin sıcaklığa bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 10$ mA/cm², $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH= doğal)



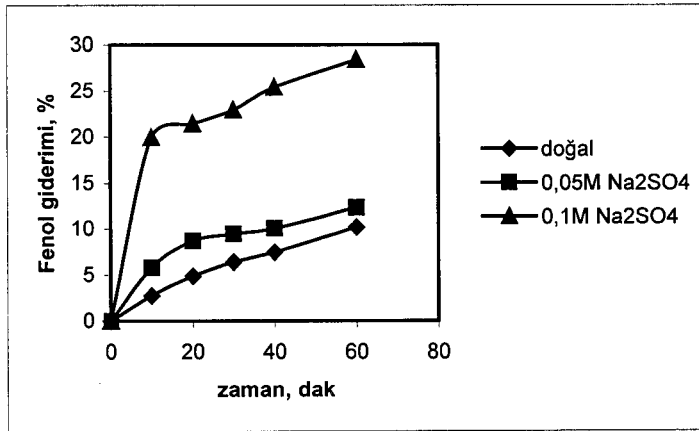
Şekil 6.7. Enerji tüketiminin sıcaklıkla değişimi ($C_o=200$ mg/L, $V= 500$ mL, $i= 10$ mA/cm², $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, pH= doğal)



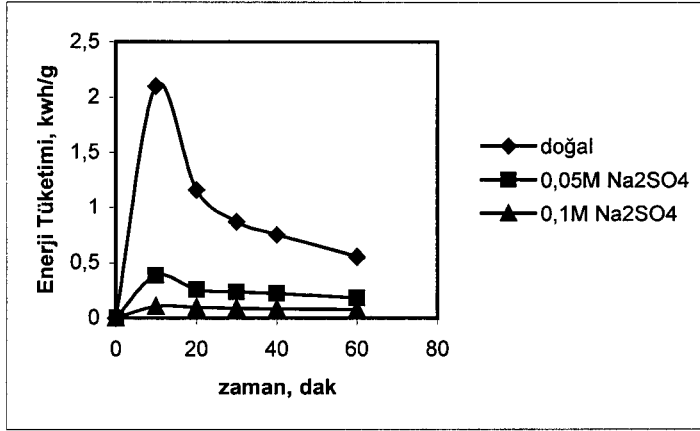
Şekil 6.8. Akım veriminin sıcaklıkla değişimi (C_o=200 mg/L, V= 500 mL, i= 10 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, pH= doğal)



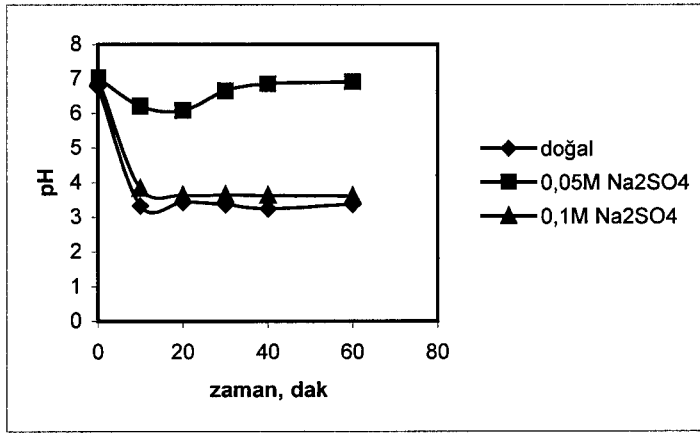
Şekil 6.9. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağı olarak zamanla değişimi (C_o= 200mg/L, V=500mL, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)



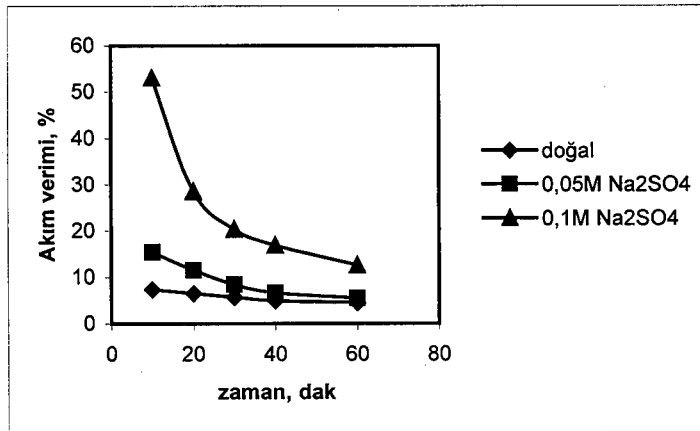
Şekil 6.10. Fenol gideriminin destek elektrolit derişimine bağı olarak zamanla değişimi (C_o= 200mg/L, V=500mL, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)



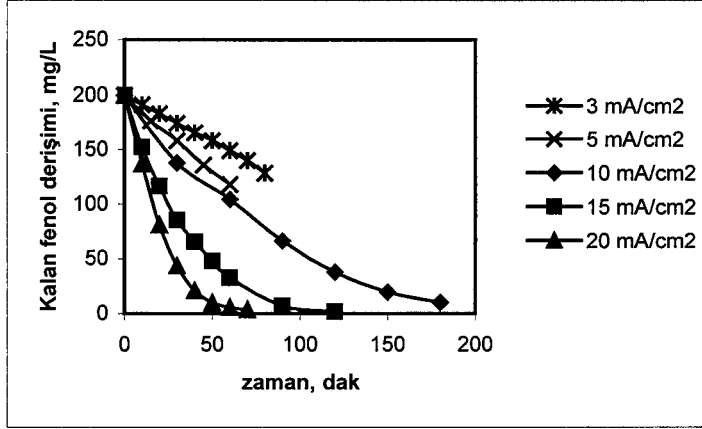
Şekil 6.11. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimi ile değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $i = 5\text{ mA/cm}^2$, $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



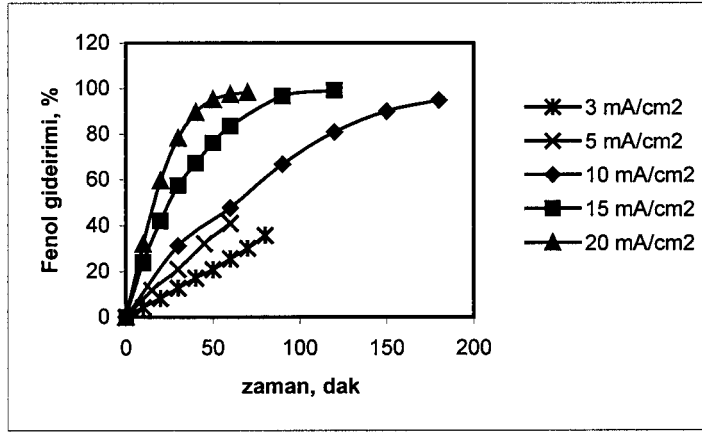
Şekil 6.12. pH'nın zamanla değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $i = 5\text{ mA/cm}^2$, $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



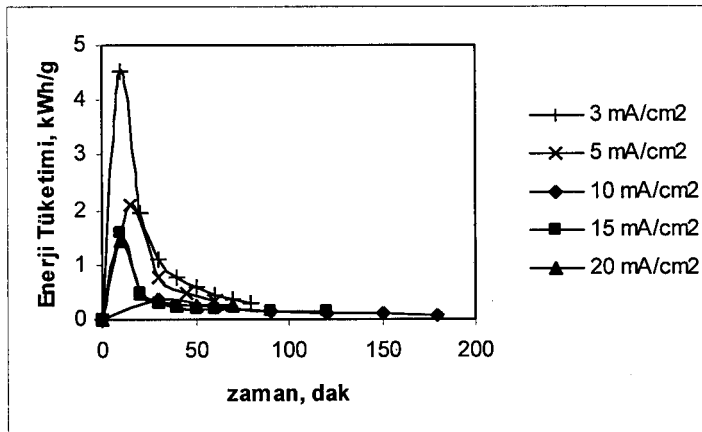
Şekil 6.13. Akım veriminin zamanla değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $i = 5\text{ mA/cm}^2$, $Q = 36,3 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



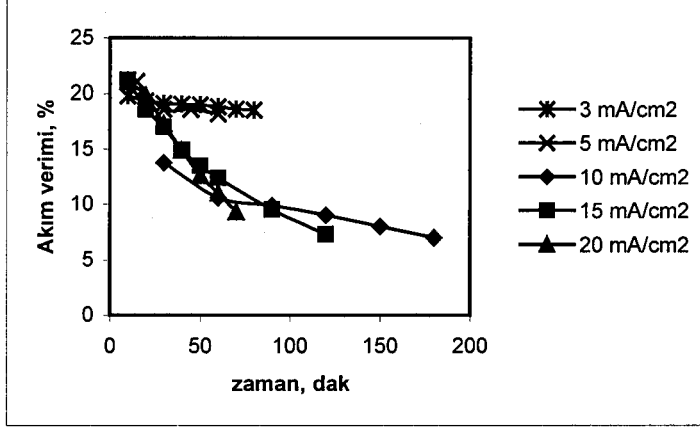
Şekil 6.14. Kalan fenol derişiminin akım yoğunluğuna bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



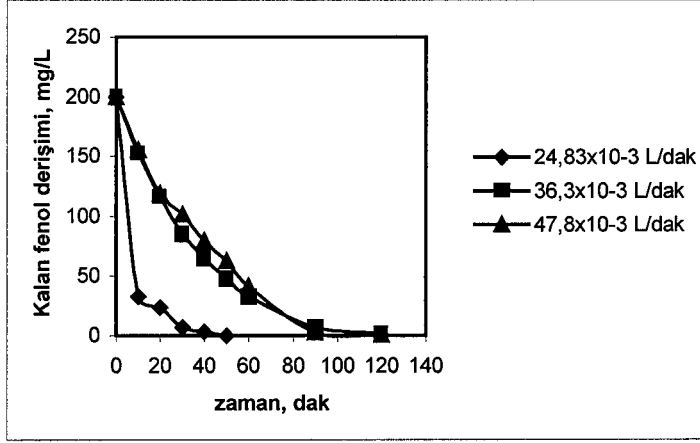
Şekil 6.15. Fenol gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



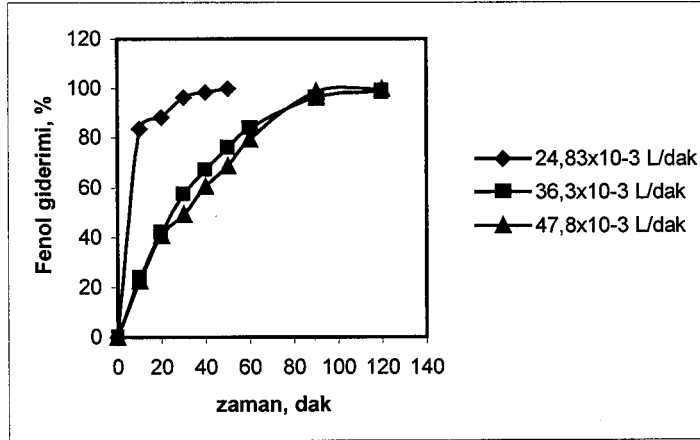
Şekil 6.16. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{L/dak}$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



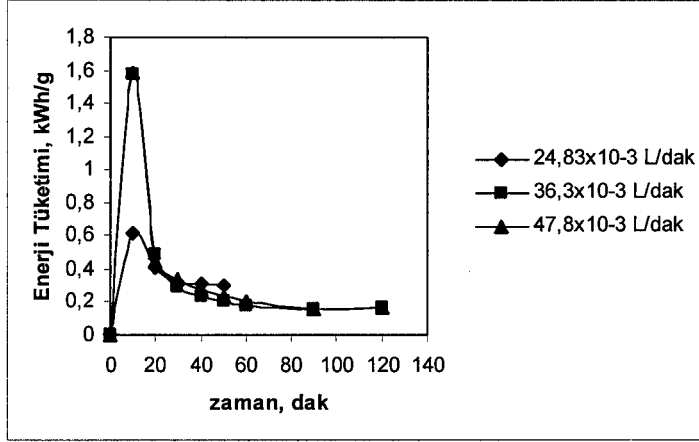
Şekil 6.17. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, t = laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



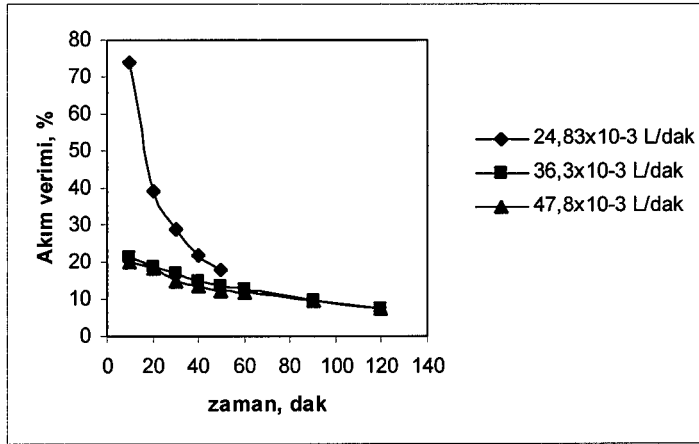
Şekil 6.18. Kalan fenol derişiminin akış hızına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i=15\text{mA/cm}^2$, t = laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



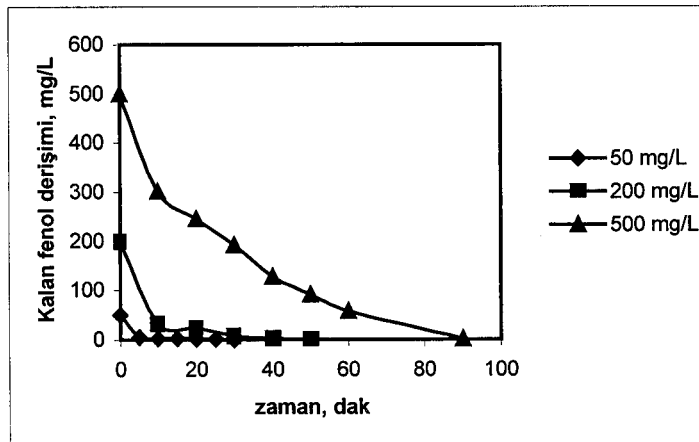
Şekil 6.19. Fenol gideriminin akış hızına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i=15\text{mA/cm}^2$, t = laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



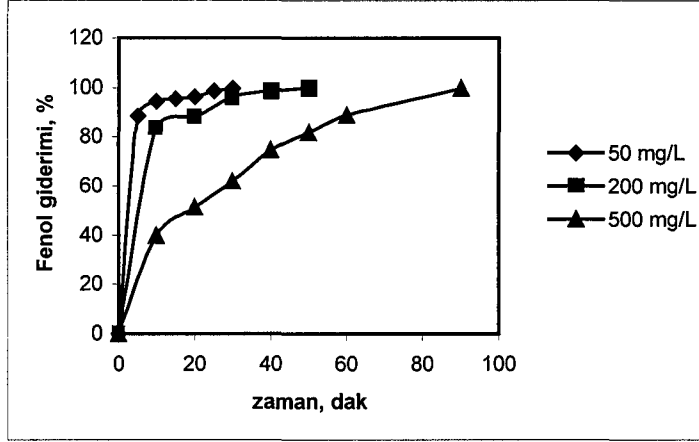
Şekil 6.20. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i=15\text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



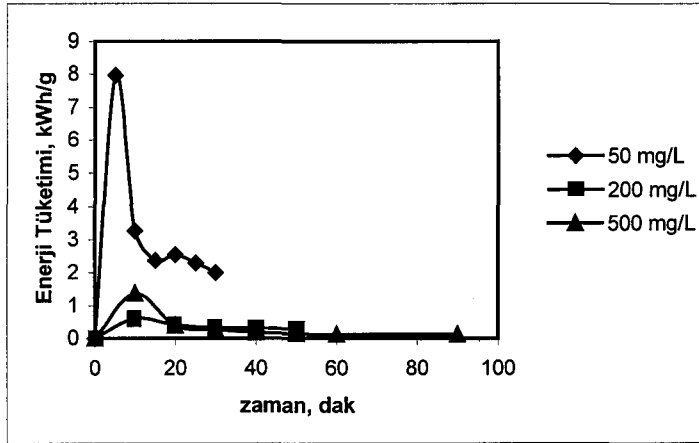
Şekil 6.21. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $i=15\text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



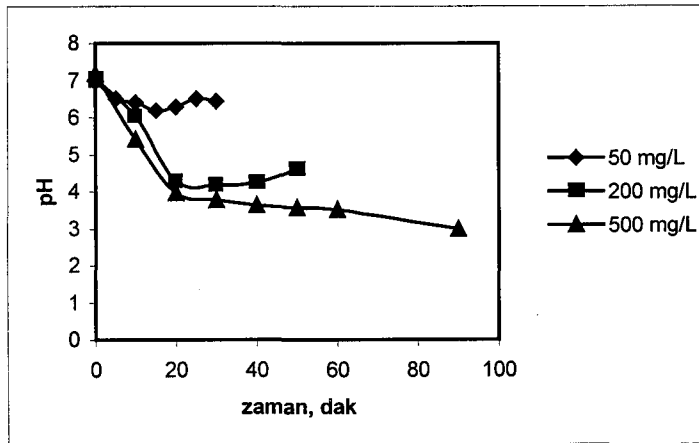
Şekil 6.22. Kalan fenol derişiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $i=15\text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



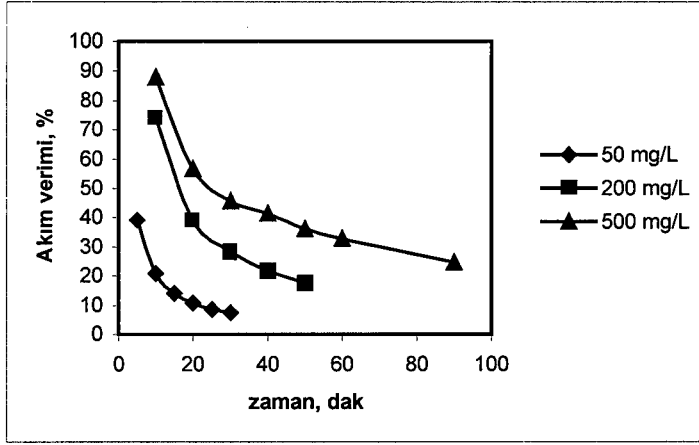
Şekil 6.23. Fenol gideriminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



Şekil 6.24. Enerji tüketiminin başlangıç fenol derişimi ile değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



Şekil 6.25. pH'nın zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)



Şekil 6.26. Akım veriminin zamanla değişimi ($V=500\text{mL}$, $Q= 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $i= 15 \text{ mA/cm}^2$, $t=$ laboratuvar sıcaklığı, $\text{pH}=\text{doğal}$)

6.2. Elektrokimyasal Çöktürme: RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrot

RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotlar kullanılarak fenolün elektrokimyasal çöktürmesi çalışılmıştır. 200, 500 ve 1500 mg/L başlangıç fenol derişimlerine sahip çözeltilerin, tıkaç akım reaktörle elektrokimyasal giderimi araştırılmıştır. Sürekli tek geçişli çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde, başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, H₂O₂ derişimi ve akış hızının giderim verimine etkileri incelenmiştir. Optimum şartlarda, kesikli geri döngülü çalışılarak KOİ'nin zamanla değişimi incelenmiş ve başka bir çalışmada da çözelti akış hızıyla aynı debide hava beslenerek, fazla havanın fenol ve KOİ giderim verimine etkisi gözlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.28-46'da ve Şekil 6.27-102'de verilmiştir.

200 mg/L fenol başlangıç derişiminde çalışılırken (herhangi bir destek elektrolit ve H₂O₂ ilavesi olmaksızın) örnek elektrokoagülasyona tabi tutulmuş ve 1 mA/cm² akım yoğunluğunda %20 fenol gideriminin yanı sıra hiç KOİ giderimi olmamıştır. Aynı şekilde, fenol çözeltilisine ilave edilen 0,05 M Na₂SO₄'ün fenol giderim verimini 5 mA/cm² akım yoğunluğunda % 6,71'e ve 10 mA/cm² akım yoğunluğunda % 13'e düşürdüğü ve yine hiç KOİ giderimi olmadığı görülmüştür.

Çizelge 6.28. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)

Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Na ₂ SO ₄ (M)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ /g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
0,17	-	163	198,10	480	505,7	0	1,04	0	1,727	0,22
1	-	204	155,33	480	2021	0	22,33	0	0,541	5,93
5	0,05	41	186,57	480	121,5	0	6,71	0	1,807	1,63
10	0,05	26	173,83	480	118,4	0	13,08	0	1,176	3,29

KOİ giriş = 480 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.29. 200 mg/L fenol + 250 mg/L H₂O₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)

Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Na ₂ SO ₄ (M)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
0,5	-	35	11,53	213,33	17059	1,33	94,23	55,55	0,011	66,9
1	-	68	11,22	180	8543	1,50	94,39	62,5	0,043	67,6
1	0,05	50	97,08	346,66	4657	0,67	51,46	27,78	0,057	17
2	-	75	12,13	246,66	4251	1,17	93,93	48,61	0,095	65,7

KOİ giriş = 480 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.30. 200 mg/L fenol + 500 mg/L H₂O₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)

Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Na ₂ SO ₄ (M)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
0,5	-	31	7,88	130	17389	1,75	96,06	72,91	0,001	75,9
1	-	22	0,70	80	9019	2,00	99,65	83,33	0,013	133
5	-	28	2,12	82,43	1791	1,99	98,94	82,83	0,084	107

KOİ giriş = 480 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.31. 200 mg/L fenol + 1000 mg/L H₂O₂ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)

Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Na ₂ SO ₄ (M)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
0,5	-	160	2,73	50,00	17855	2,15	98,63	89,58	0,048	101
1	-	175	1,52	33,33	8982	2,23	99,24	93,06	0,104	114

KOİ giriş = 480 mg/L, V= 500 mL

500 mg/L fenol başlangıç derişiminde gerçekleştirilen ön deneme çalışmalarında herhangi bir destek elektrolit ilavesi olmaksızın, örneğe 500 ve 1000 mg/L H₂O₂ eklenerek, % 10 civarında fenol giderimi elde edilmiştir. Daha sonra bu derişimde gerçekleştirilen çalışmalarda 0,02 ve 0,03 M Na₂SO₄ ve 1000, 1500, 2000 ve 2500 mg/L H₂O₂ ilave edilen fenol çözeltilerine akış hızı ve akım yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır.

Çizelge 6.32. 500 mg/L fenol + 1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	112	352,67	870	13335	0,66	29,46	27,5	0,045	8,19
	1	194	238,91	610	11816	1,18	52,22	49,17	0,088	17,30
	1,5	240	236,63	630	7946	1,14	52,67	47,5	0,162	17,50
36,3	0,5	107	364,05	880	12305	0,64	27,19	26,67	0,032	10,89
	1	197	274,55	620	10203	1,16	45,09	48,33	0,071	20,57
	1,5	274	266,97	670	7030	1,06	46,60	44,17	0,146	21,54
47,8	0,5	103	374,67	1050	11344	0,30	25,07	12,5	0,025	13,00
	1	198	292,76	680	9379	1,04	41,45	43,33	0,059	24,20
	1,5	284	282,89	698	6550	1,00	43,42	41,83	0,121	25,70

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.33. 500 mg/L fenol + 1500 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	135	336,74	840	14777	0,72	32,65	30	0,049	9,27
	1	213	188,85	460	14081	1,48	62,23	61,67	0,081	22,80
	1,5	286	156,99	390	10349	1,62	68,60	67,5	0,148	27,20
36,3	0,5	126	342,81	850	14227	0,70	31,44	29,17	0,032	12,95
	1	223	228,29	570	12296	1,26	54,34	52,5	0,066	26,91
	1,5	295	174,44	450	9822	1,50	65,12	62,5	0,112	36,14
47,8	0,5	122	357,98	950	12854	0,50	28,40	20,83	0,026	15,01
	1	240	261,66	644	10786,	1,11	47,67	46,33	0,062	29,26
	1,5	299	185,06	470	9502	1,46	62,99	60,83	0,087	44,91

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.34. 500 mg/L fenol + 2000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	95	188,09	550	28232	1,30	62,38	54,17	0,018	22,90
	1	200	199,47	580	13601	1,24	60,10	51,67	0,079	21,60
	1,5	280	122,11	350	11401	1,70	75,58	70,83	0,132	33,10
36,3	0,5	97	217,67	530	25554	1,34	56,46	55,83	0,014	28,54
	1	215	160,03	500	15386	1,40	67,99	58,33	0,051	39,10
	1,5	285	116,80	380	11562	1,64	76,64	68,33	0,092	49,91
47,8	0,5	100	246,49	680	22946	1,04	50,70	43,33	0,012	31,96
	1	230	138,03	490	16381	1,42	72,39	59,17	0,039	58,16
	1,5	292	156,99	450	10349	1,50	68,60	62,5	0,079	52,34

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.35. 500 mg/L fenol + 1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	81	342,05	840	14296	0,72	31,59	30	0,030	8,91
	1	149	295,79	720	9242	0,96	40,84	40	0,086	12,30
	1,5	192	222,22	550	8381	1,30	55,55	54,16	0,123	19,00
	2	208	270,01	670	5205	1,06	45,99	44,17	0,214	14,50
	3	224	207,05	530	4419	1,34	58,59	55,83	0,272	20,70
36,3	0,5	81	337,50	850	14708	0,70	32,50	29,17	0,020	13,49
	1	160	336,74	860	7388	0,68	32,65	28,33	0,079	13,57
	1,5	194	247,25	620	7626	1,16	50,55	48,33	0,095	24,17
	2	223	262,42	680	5376	1,04	47,52	43,33	0,152	22,13
	3	239	254,83	650	3698	1,10	49,03	45,83	0,237	23,13
47,8	0,5	83	353,43	920	13266	0,56	29,31	23,33	0,017	15,67
	1	163	257,87	750	10958	0,90	48,42	37,5	0,041	29,92
	1,5	206	255,59	630	7374	1,14	48,88	47,5	0,078	30,32
	2	228	251,80	610	5616	1,18	49,64	49,17	0,113	30,99
	3	241	259,38	630	3630	1,14	48,12	47,50	0,185	29,66

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.36. 500 mg/L fenol + 1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	70	276,83	690	20199	1,02	44,63	42,50	0,019	13,90
	1	113	222,22	560	12571	1,28	55,55	53,33	0,048	19,00
	2	167	135,76	360	8242	1,68	72,85	70,00	0,109	30,60
	3	172	135,76	370	5494	1,66	72,85	69,17	0,168	30,60
	5	178	114,52	300	3489	1,80	77,09	75,00	0,273	34,60
36,3	0,5	66	299,58	750	18140	0,90	40,08	37,50	0,013	17,58
	1	116	147,14	390	15969	1,62	70,57	67,50	0,027	41,98
	2	171	149,41	440	7933	1,52	70,12	63,33	0,079	41,46
	3	176	179,75	460	4831	1,48	64,05	61,67	0,133	35,11
	5	180	163,82	430	3043	1,54	67,23	64,17	0,217	38,30
47,8	0,5	66	318,54	820	16424	0,76	36,29	31,67	0,011	20,37
	1	118	76,602	340	19161	1,72	84,68	71,67	0,017	84,77
	2	172	170,65	480	7452	1,44	65,87	60,00	0,064	48,57
	3	176	166,86	450	5025	1,50	62,50	70,83	0,097	49,60
	5	183	194,16	500	2768	1,40	61,17	58,33	0,184	42,74

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.37. 500 mg/L fenol + 2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	64	228,29	580	24593	1,24	54,34	51,67	0,014	18,40
	1	91	175,20	440	14699	1,66	64,96	63,33	0,033	24,60
	2	99	89,49	260	9289	1,88	82,10	78,33	0,057	40,40
	3	107	62,95	200	6593	2,00	87,41	83,33	0,087	48,60
	5	109	48,54	130	4086	2,14	90,29	89,17	0,143	54,70
36,3	0,5	63	269,24	680	20887	1,04	46,15	43,33	0,011	21,24
	1	87	215,39	550	12880	1,30	56,92	54,17	0,025	28,90
	2	98	81,91	390	9460	1,62	83,62	67,5	0,038	62,09
	3	105	92,53	370	6147	1,66	81,49	69,17	0,063	57,90
	5	116	119,83	420	3441	1,56	76,03	65	0,124	49,03
47,8	0,5	59	279,86	690	19925	1,02	44,03	42,50	0,008	26,22
	1	88	152,44	540	15729	1,32	69,51	55	0,016	53,67
	2	98	89,49	510	9289	1,38	82,10	57,5	0,029	77,74
	3	100	81,91	380	6307	1,64	83,62	68,33	0,044	81,74
	5	120	150,93	530	3159	1,34	69,81	55,83	0,106	54,12

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.38. 500 mg/L fenol + 2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	54	43,99	800	41275	0,80	91,20	33,33	0,007	57,00
	1	75	41,71	700	20740	1,00	91,66	41,67	0,019	58,30
	2	92	24,27	550	10765	1,30	95,14	54,17	0,046	71,00
	3	101	21,99	450	7211	1,50	95,60	62,5	0,075	73,30
	5	98	9,86	260	4436	1,88	98,03	78,33	0,118	92,10
36,3	0,5	51	11,37	570	44227	1,26	97,72	52,5	0,004	129,86
	1	74	25,03	610	21495	1,18	94,99	49,17	0,013	102,78
	2	91	15,17	540	10971	1,32	96,96	55	0,030	119,97
	3	106	18,02	450	7271	1,50	96,36	62,5	0,053	114,06
	5	99	9,10	780	4443	0,84	98,18	35	0,082	137,51
47,8	0,5	50	6,06	550	44708	1,30	98,78	54,17	0,003	199,40
	1	75	7,58	530	22285	1,34	98,48	55,83	0,009	189,29
	2	92	10,62	530	11074	1,34	97,87	55,83	0,023	174,05
	3	102	7,58	280	7428	1,84	98,48	76,67	0,038	189,29
	5	105	3,03	480	4498	1,44	99,39	60	0,065	230,72

KOİ giriş = 1200 mg/L, V= 500 mL

1500 mg/L fenol başlangıç derişiminde, ön deneme çalışmlarında, 1 mA/cm² akım yoğunluğunda çalışılırken 0,02 M Na₂SO₄ ilavesinde, 1000 mg/L H₂O₂'de % 20 fenol ve % 19 KOİ; 2000 mg/L H₂O₂'de % 28 fenol ve % 27 KOİ ve 3000 mg/L H₂O₂'de % 37 fenol ve % 35 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu veriler üzerine deneysel çalışmlara 4000 ve 5000 mg/L H₂O₂, 0,03, 0,05 ve 0,07M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde ve 0,5, 1, 2 ve 3 mA/cm² akım yoğunluklarında ve 3 farklı akış hızında devam edilmiştir.

Çizelge 6.39. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmlar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	1	285	800,15	2260	31673	0,89	46,66	37,2	0,048	14,70
36,3	1	290	785	2100	32358	1,00	47,67	41,66	0,033	22,22
47,8	1	293	826,69	2140	30472	0,97	44,88	40,55	0,027	26,92

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.40. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ + 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmlar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	169	1016,3	2640	43781	0,64	32,24	26,66	0,021	9,13
	1	228	157,37	1720	60763	1,25	89,51	52,22	0,020	52,90
36,3	0,5	174	1169,9	2916	29878	0,45	22	19,00	0,020	8,53
	1	241	147,89	1960	61192	1,09	90,14	45,55	0,0144	79,52
47,8	0,5	180	1099,7	2740	36232	0,57	26,68	23,89	0,014	14,03
	1	246	130,83	2000	61964	1,07	91,27	44,44	0,011	110,22

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.41. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	116	544,18	2060	86514	1,03	63,72	42,78	0,007	23,80
	1	177	155,48	1860	60848	1,16	89,63	48,33	0,016	53,20
	2	197	208,47	1840	29225	1,17	86,09	48,89	0,036	46,30
	3	199	299,58	1400	18109	1,47	80	61,11	0,059	37,80
36,3	0,5	125	280,6	2200	110372	0,93	81,29	38,89	0,004	57,53
	1	187	168,75	2080	60248	1,01	88,75	42,22	0,011	74,99
	2	216	200,98	1920	29394	1,12	86,6	46,67	0,027	68,99
	3	227	210,46	1540	19453	1,37	85,96	57,22	0,043	67,41
47,8	0,5	128	149,79	2080	122212	1,01	90	42,22	0,003	104,1
	1	195	134,62	2140	61792	0,97	91	40,56	0,009	108,9
	2	225	187,7	2060	29695	1,03	87,48	42,78	0,021	93,91
	3	240	225,6	1960	19225	1,09	84,96	45,56	0,035	85,60

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.42. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	158	75,84	1580	128905	1,35	94,94	56,11	0,007	70,00
	1	237	72,05	1680	64624	1,28	95,19	53,33	0,019	71,20
36,3	0,5	176	109,97	1800	125816	1,20	92,67	50	0,005	89,68
	1	250	98,59	1720	63423	1,25	93,43	52,22	0,014	93,43
47,8	0,5	180	87,22	1860	127875	1,16	94,18	48,33	0,004	128,54
	1	276	102,39	1740	63251	1,24	93,17	51,67	0,012	121,30

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.43. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m , 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	120	68,26	1600	129591	1,33	95,45	55,56	0,005	72,50
	1	200	130,83	1700	61964	1,27	91,28	52,78	0,017	57,20
	2	235	51,19	520	32784	2,05	96,59	85,56	0,038	79,20
36,3	0,5	138	91,01	1760	127532	1,23	93,93	51,11	0,004	96,18
	1	215	109,97	1740	62908	1,24	92,67	51,67	0,0125	89,68
	2	254	94,80	1820	31797	1,19	93,68	49,44	0,029	94,78
47,8	0,5	145	83,43	1800	128218	1,20	94,44	50	0,003	130,55
	1	228	89,17	1900	63849	1,13	94,06	47,22	0,010	127,55
	2	270	94,80	1720	31797	1,25	93,68	52,22	0,024	124,78

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.44. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar

Akış hızı (L/dak) x10 ⁻³	Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	Gerilim (V)	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)	k _m 10 ⁻⁶ (m/s)
							Fenol	KOİ		
24,83	0,5	83	54,99	1700	130793	1,27	96,33	52,78	0,0034	77,60
	1	167	384,91	2060	50465	1,03	74,34	42,78	0,018	31,90
	2	195	108,08	1460	31497	1,43	92,79	59,44	0,033	61,70
	3	206	34,13	360	22113	2,16	97,72	90	0,050	88,70
36,3	0,5	101	68,26	1720	129591	1,25	95,45	52,22	0,003	106,05
	1	174	109,97	1860	62908	1,16	92,67	48,33	0,010	89,68
	2	207	94,80	1640	31797	1,31	93,68	54,44	0,024	94,78
	3	233	79,6	1160	21427	1,63	94,69	67,78	0,040	100,78
47,8	0,5	102	68,26	1720	129591	1,25	95,45	52,22	0,002	139,62
	1	178	73,95	1740	64538	1,24	95,07	51,67	0,008	136,00
	2	222	100,49	1760	31668	1,23	93,30	51,11	0,0195	122,15
	3	245	106,18	1820	21026	1,19	92,92	49,44	0,032	119,66

KOİ giriş = 3600 mg/L, V= 500 mL

Çizelge 6.45. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak)

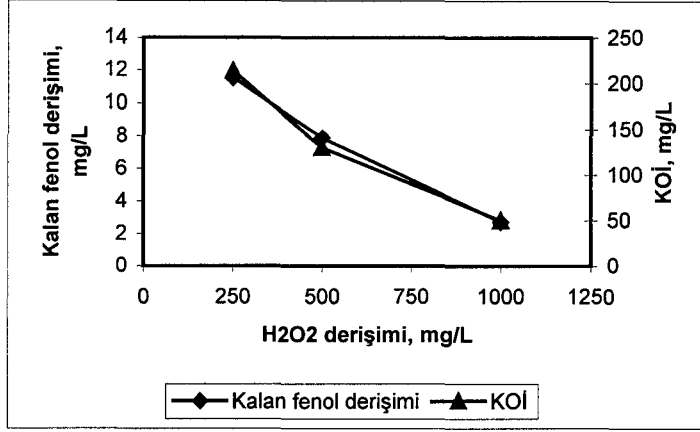
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	235	7,20	1500	3600	-	-	-	-	-
5	212	2,93	75,84	1420	32226	1,45	94,94	60,56	0,035
10	210	5,57	9,48	280	33728	2,21	99,37	92,22	0,0334
15	210	6,66	1,89	220	33899	2,25	99,87	93,89	0,033

KOİ giriş = 3600 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 157 x10⁻⁶ m/s

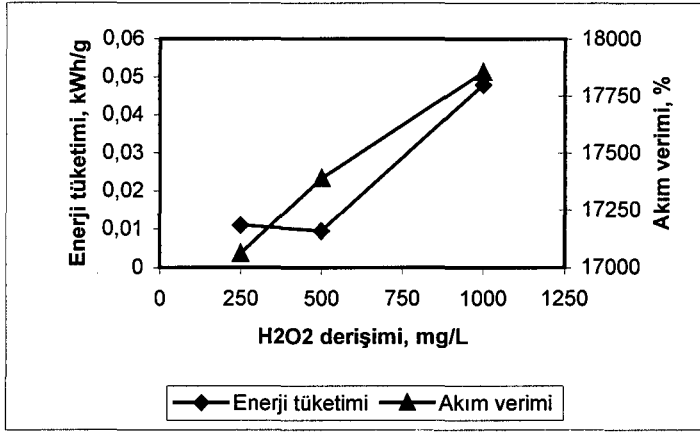
Çizelge 6.46. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q_{çözelti}= 24,83x10⁻³ L/dak, Q_{hava}= 24,83x10⁻³ L/dak)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	280	7,14	1500	3600	-	-	-	-	-
5	213	5,14	89,12	1320	31926	1,52	94,06	63,33	0,036
10	204	3,76	77,74	1280	32183	1,55	94,82	64,44	0,034
15	185	3,09	64,47	1180	32483	1,61	95,70	67,22	0,031

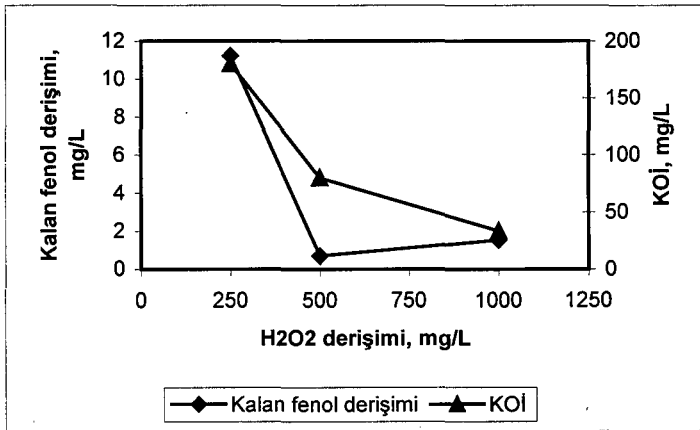
KOİ giriş = 3600 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 73,99 x10⁻⁶ m/s



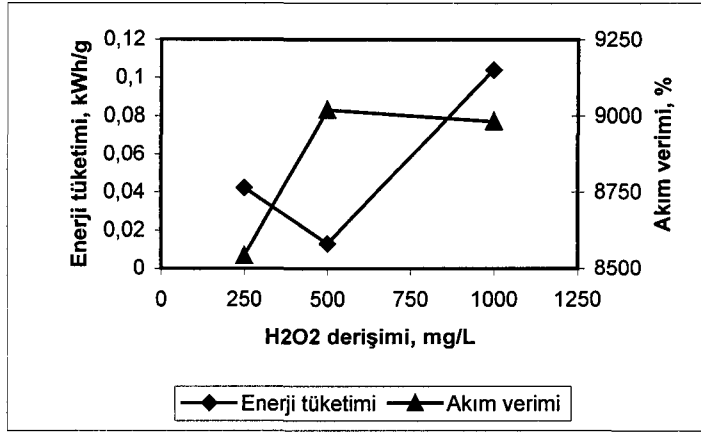
Şekil 6.27. 200 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm², Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)



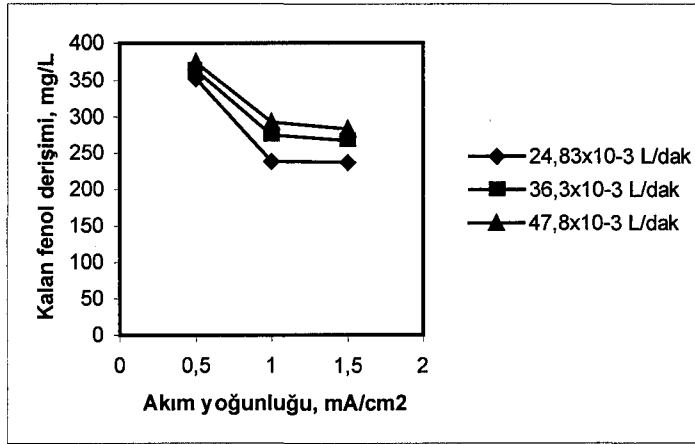
Şekil 6.28. 200 mg/L başlangıç derişiminde akım verimi ve enerji tüketiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm², Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)



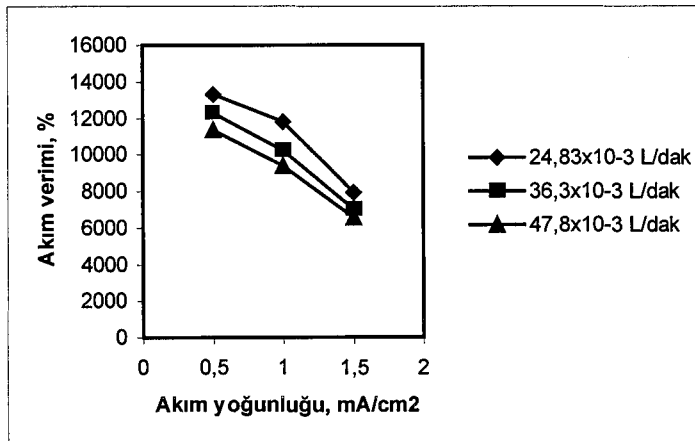
Şekil 6.29. 200 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,4 mA, i= 1 mA/cm², Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)



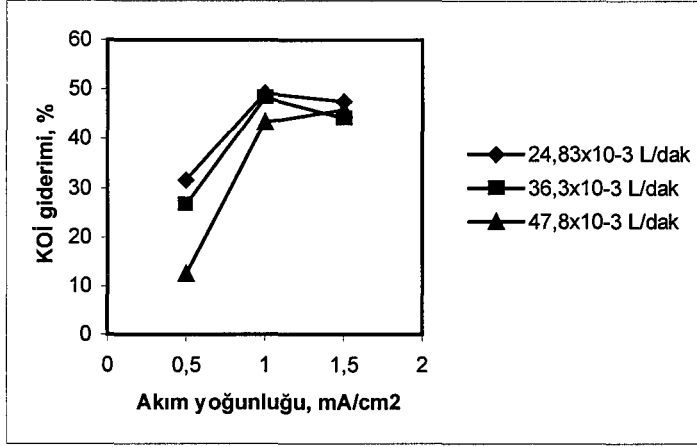
Şekil 6.30. 200 mg/L başlangıç derişiminde akım verimi ve enerji tüketiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,4 mA, i= 1 mA/cm², Q= 24,83 x10⁻³ L/dak)



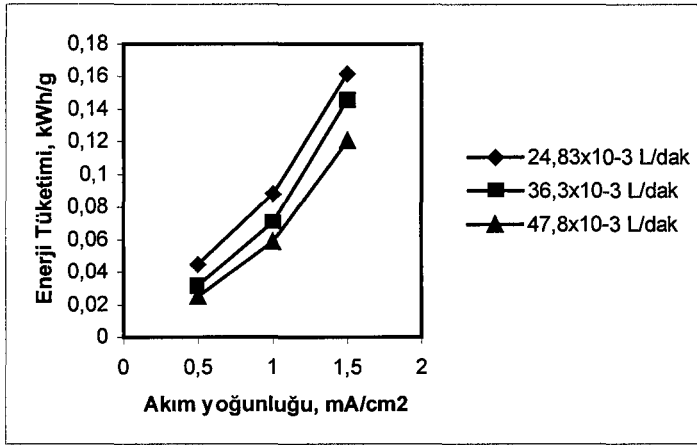
Şekil 6.31. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄)



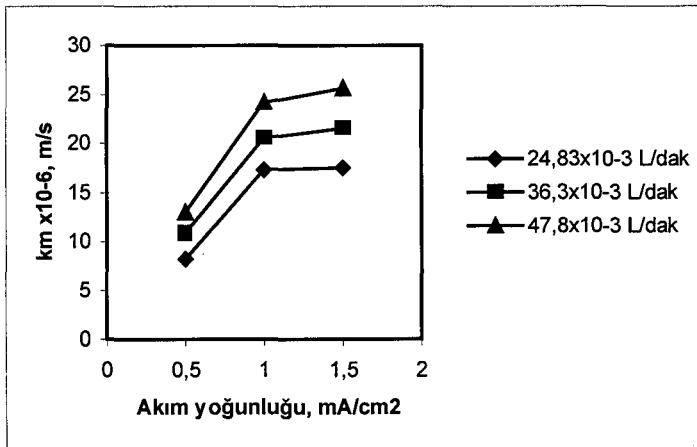
Şekil 6.32. 500 mg/L başlangıç derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄)



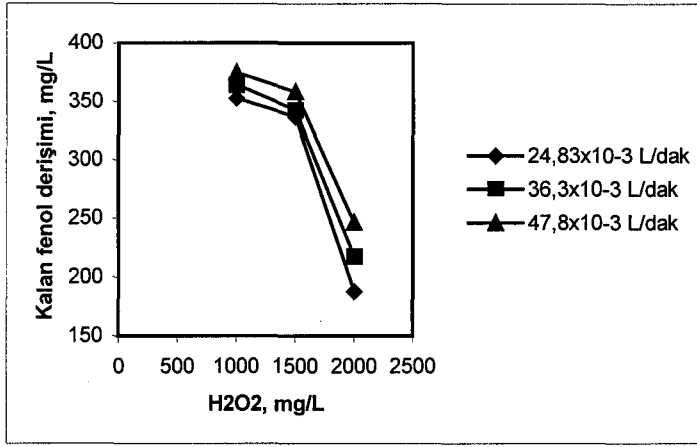
Şekil 6.33. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄)



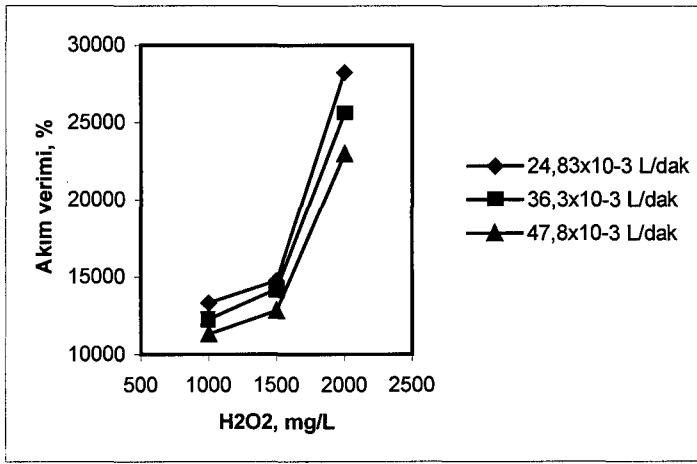
Şekil 6.34. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄)



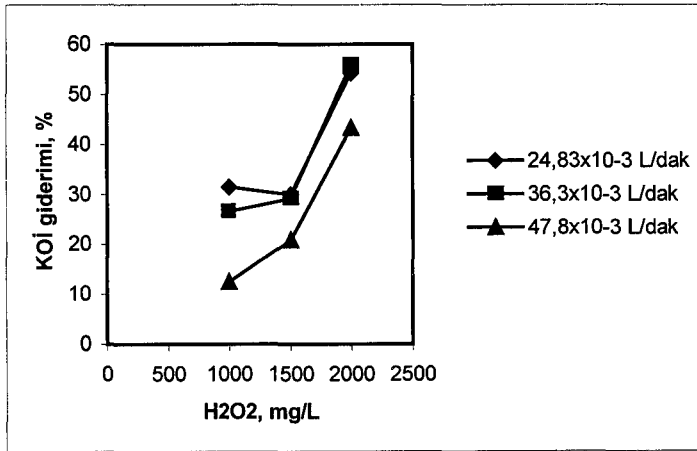
Şekil 6.35. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,02 M Na₂SO₄)



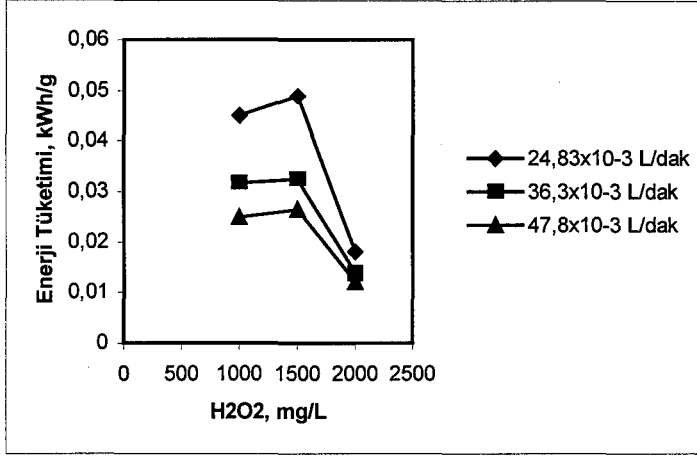
Şekil 6.36. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kalan fenol derişiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm²)



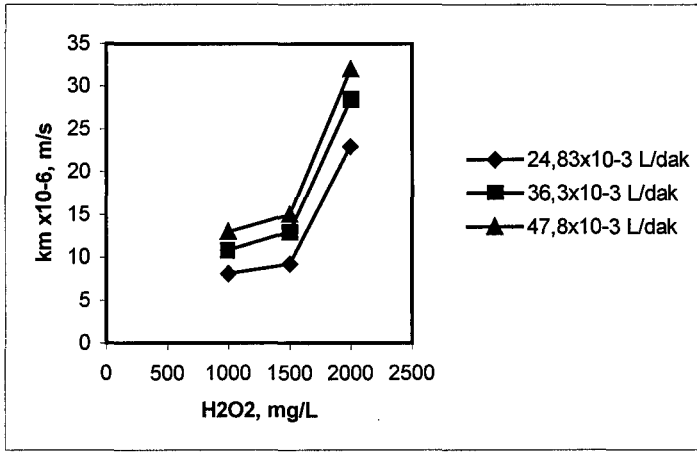
Şekil 6.37. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde akım veriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm²)



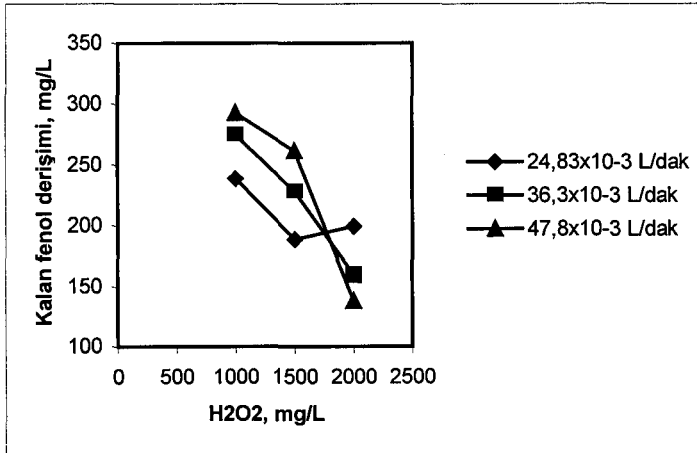
Şekil 6.38. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde KOİ gideriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm²)



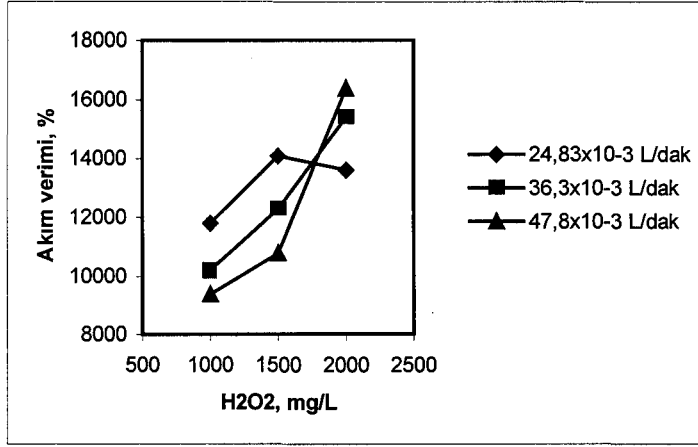
Şekil 6.39. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde enerji tüketiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm²)



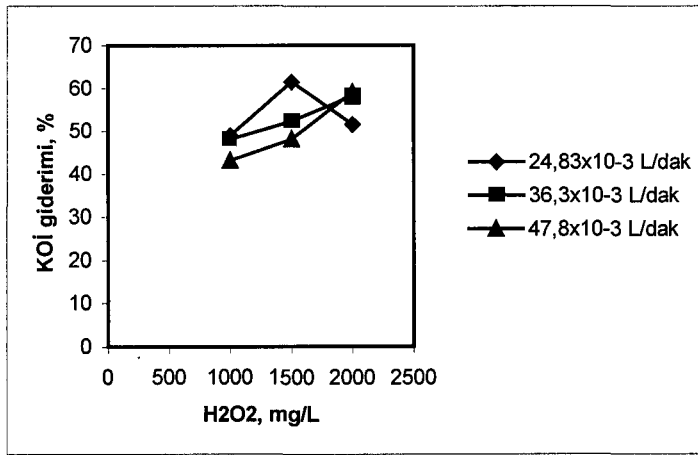
Şekil 6.40. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kütle aktarım katsayısının H₂O₂ ile değişimi (I= 88,2 mA, i= 0,5 mA/cm²)



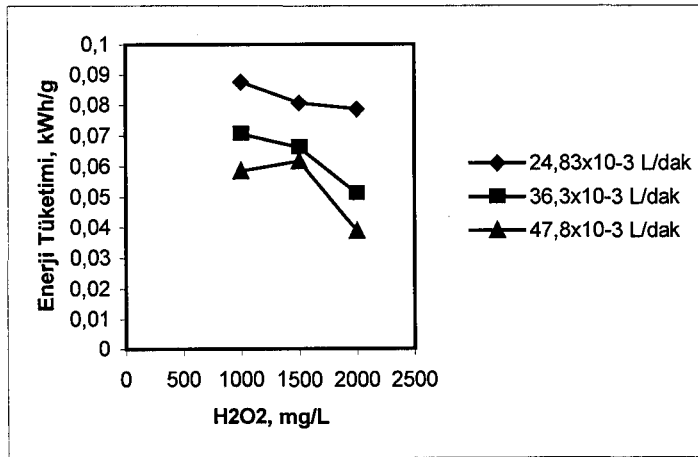
Şekil 6.41. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kalan fenol derişiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm²)



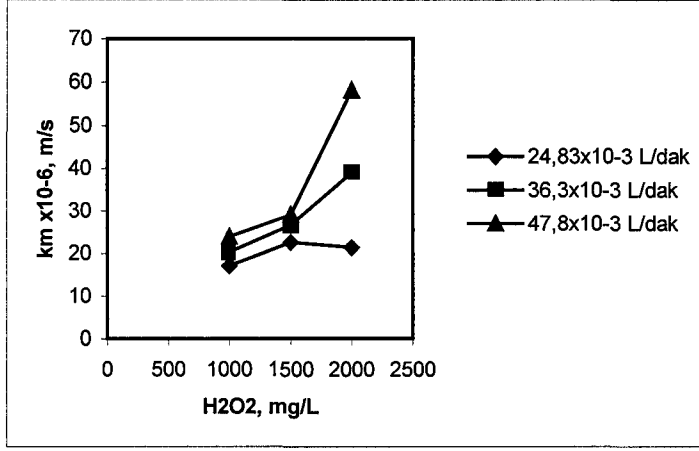
Şekil 6.42. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde akım veriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm²)



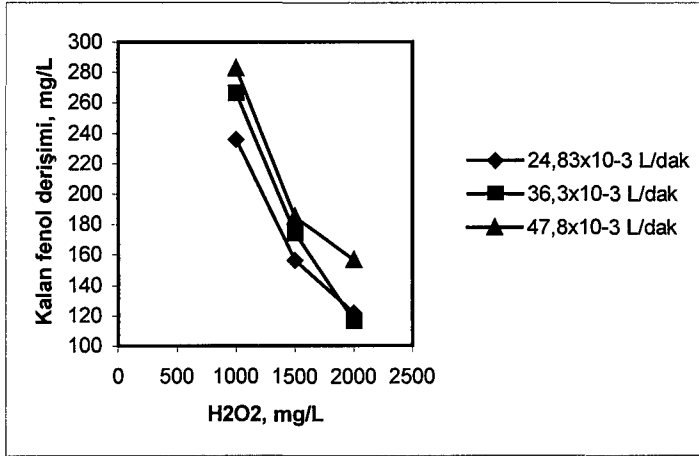
Şekil 6.43. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde KOİ gideriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm²)



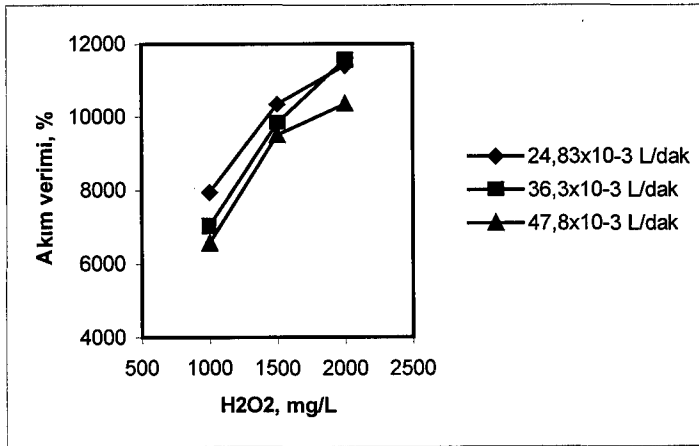
Şekil 6.44. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde enerji tüketiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm²)



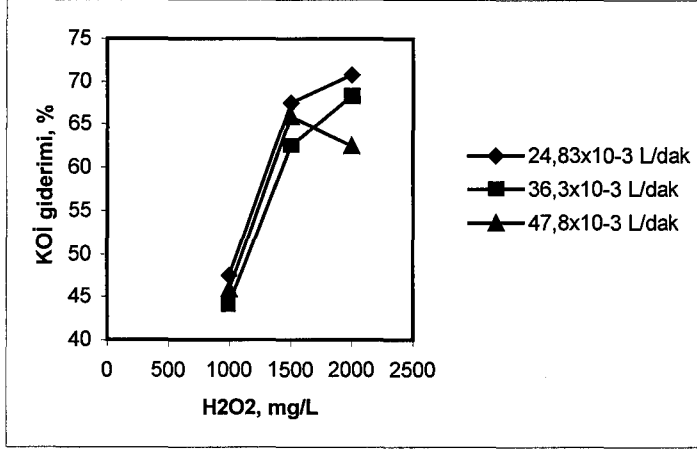
Şekil 6.45. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kütle aktarım katsayısının H₂O₂ ile değişimi (I= 176,43 mA, i= 1 mA/cm²)



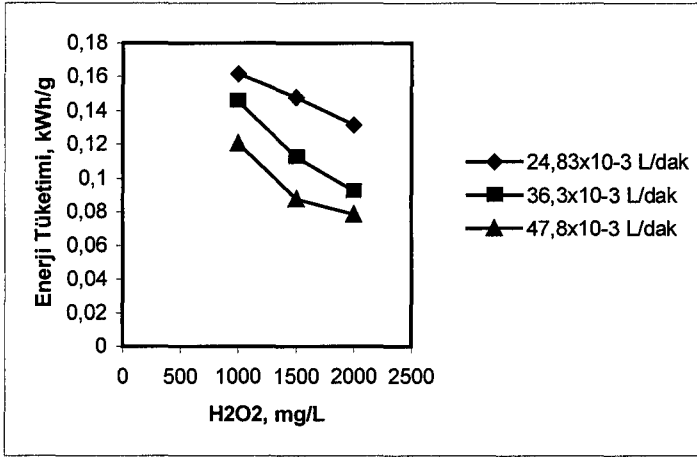
Şekil 6.46. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kalan fenol derişiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm²)



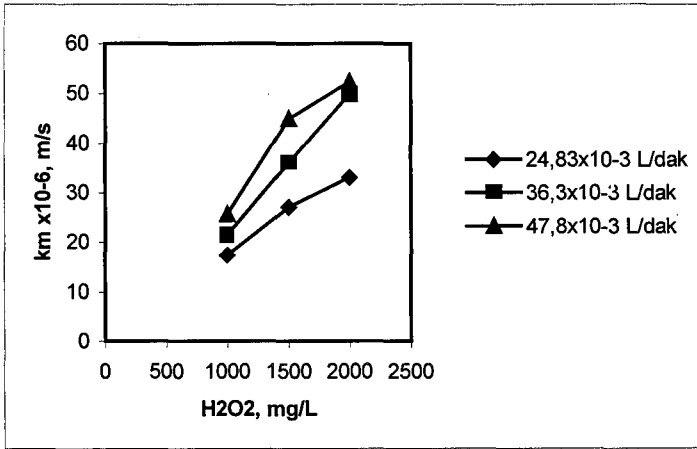
Şekil 6.47. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde akım veriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm²)



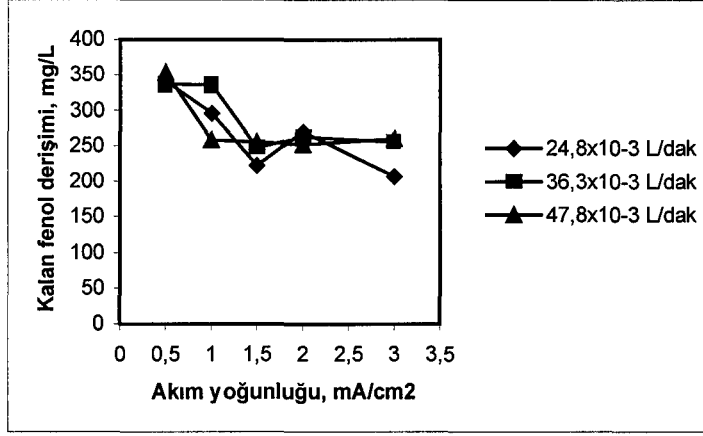
Şekil 6.48. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde KOİ gideriminin H₂O₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm²)



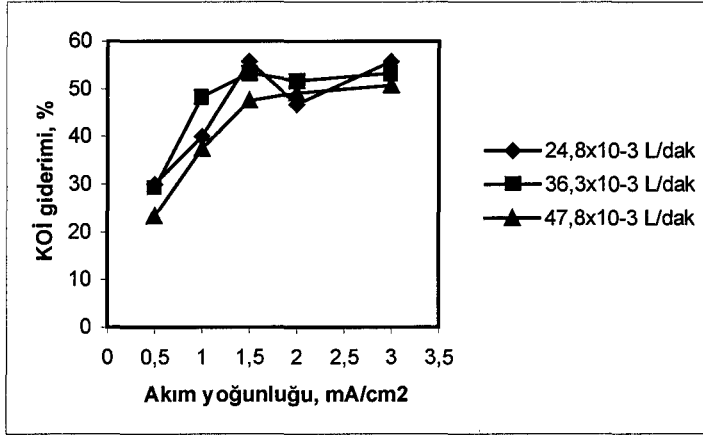
Şekil 6.49. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde enerji tüketiminin H₂O₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm²)



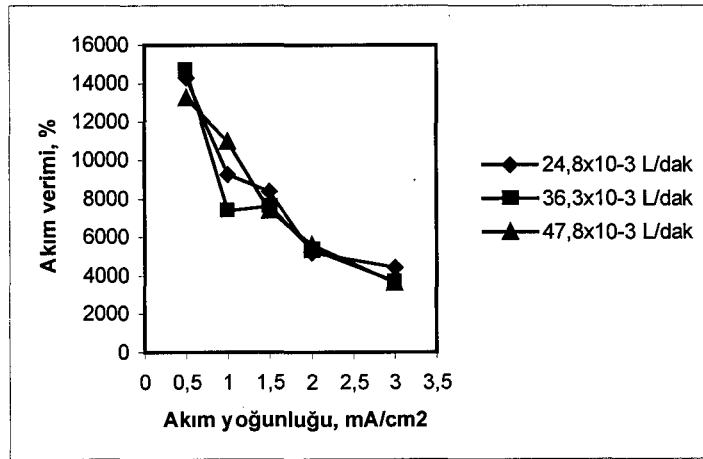
Şekil 6.50. 500 mg/L başlangıç fenol +0,02 M Na₂SO₄ derişiminde kütle aktarım katsayısının H₂O₂ ile değişimi (I= 264,64 mA, i= 1,5 mA/cm²)



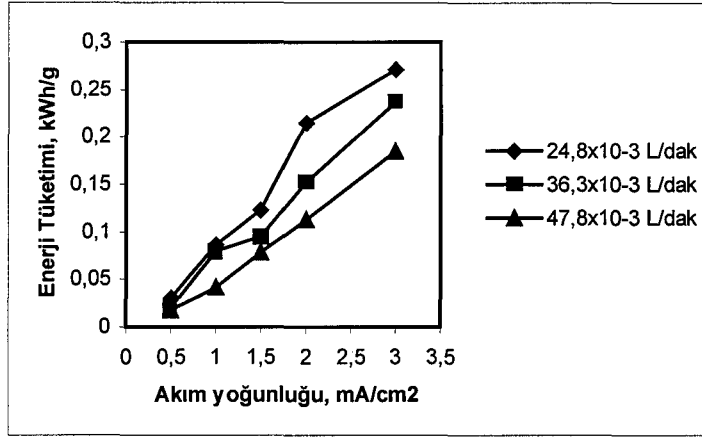
Şekil 6.51. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



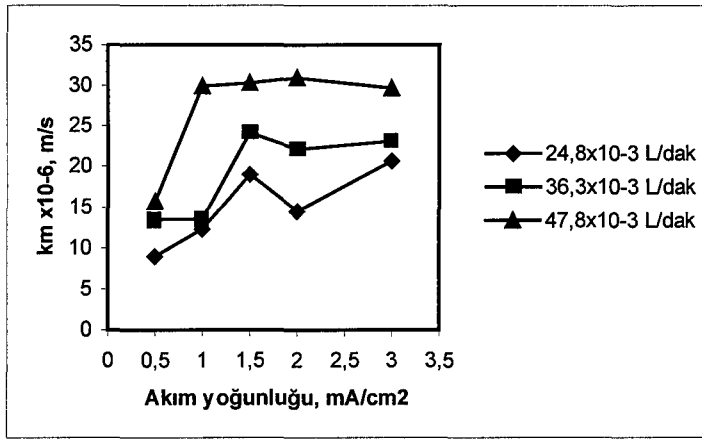
Şekil 6.52. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



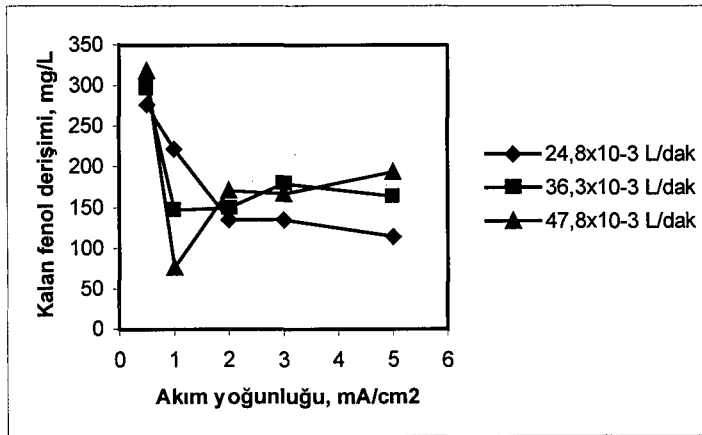
Şekil 6.53. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



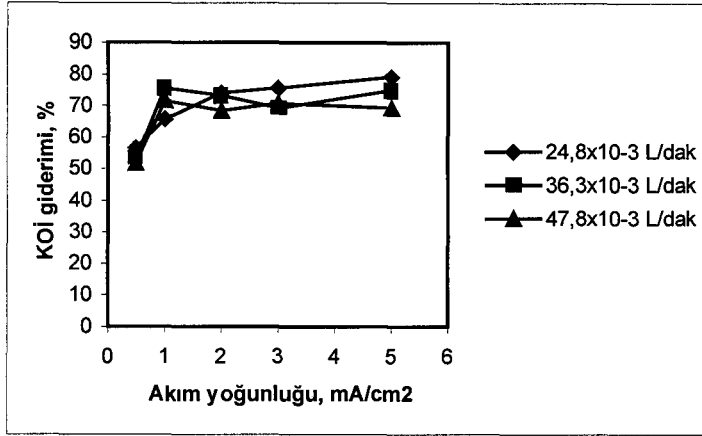
Şekil 6.54. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



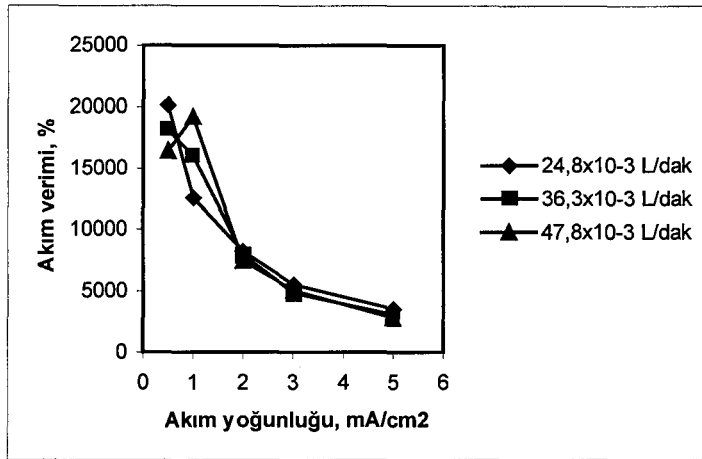
Şekil 6.55. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (1000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



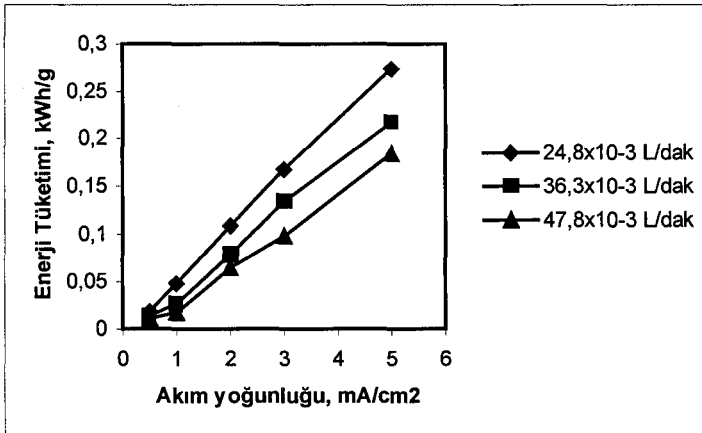
Şekil 6.56. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



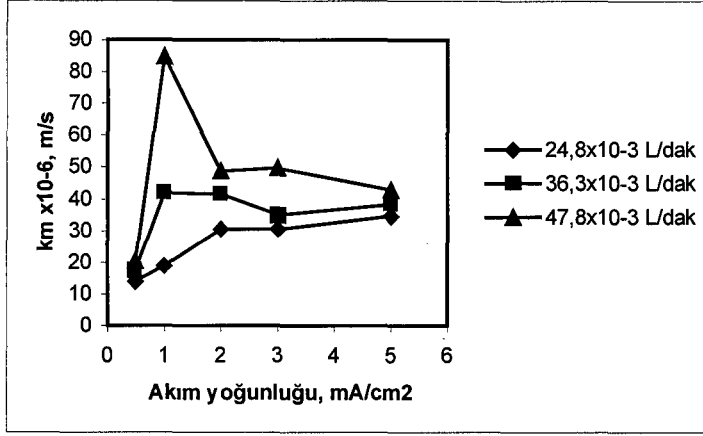
Şekil 6.57. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



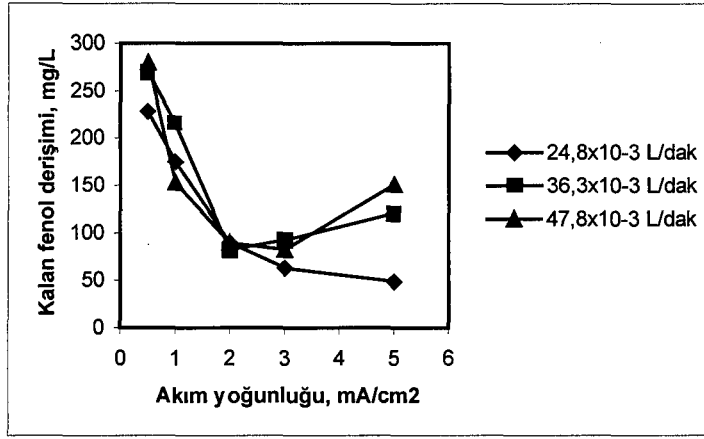
Şekil 6.58. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



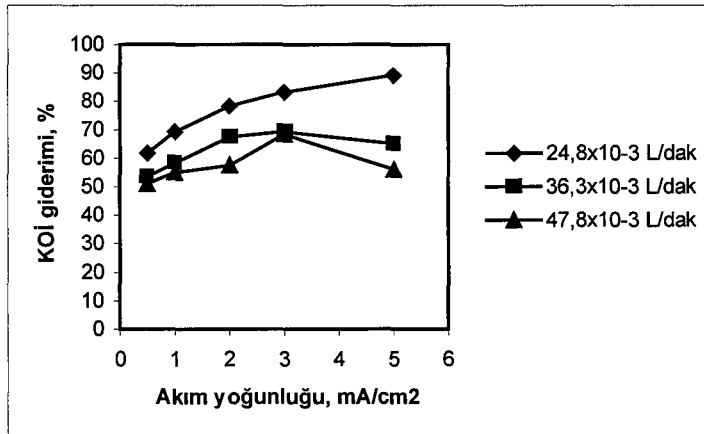
Şekil 6.59. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



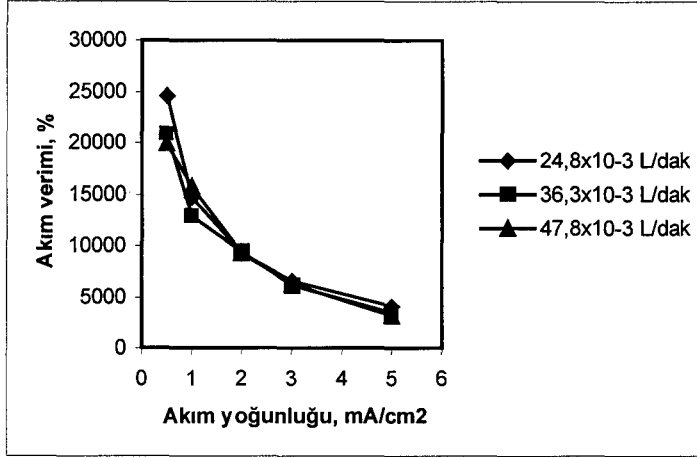
Şekil 6.60. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (1500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



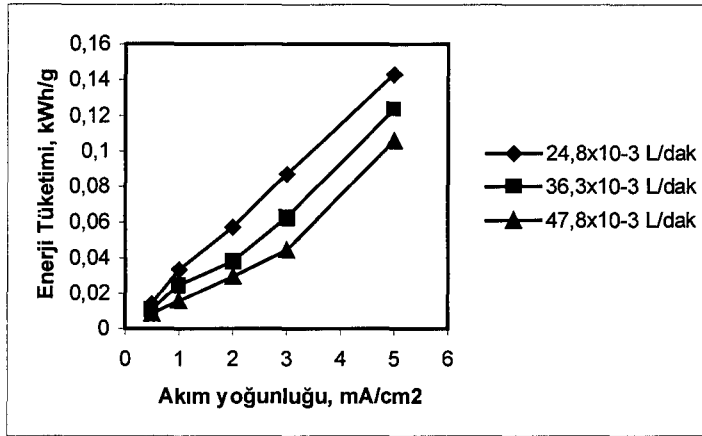
Şekil 6.61. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



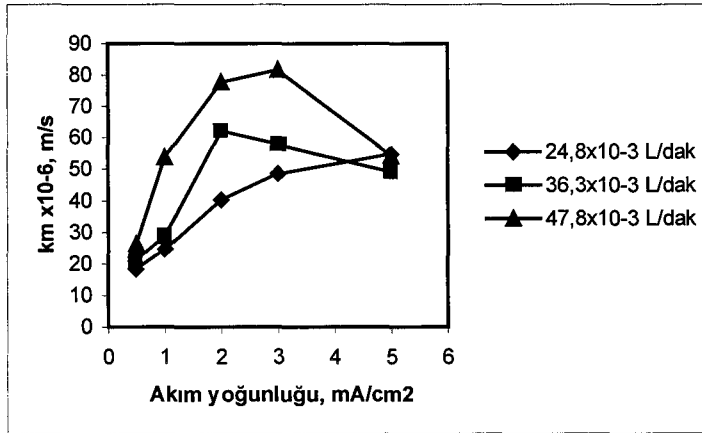
Şekil 6.62. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



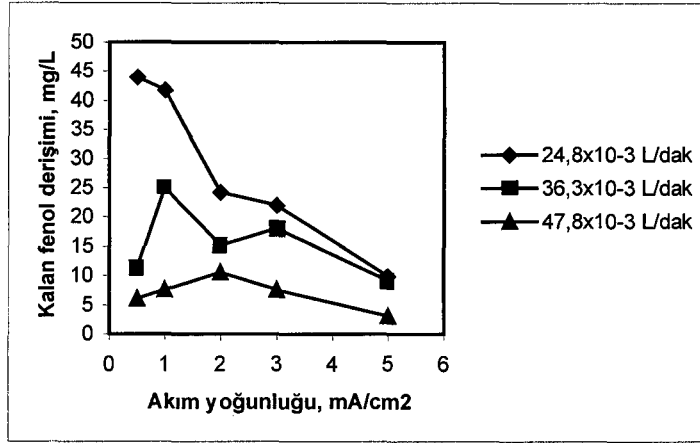
Şekil 6.63. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



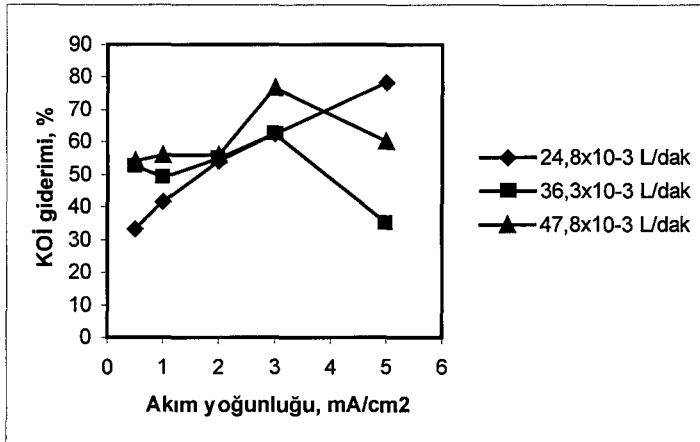
Şekil 6.64. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



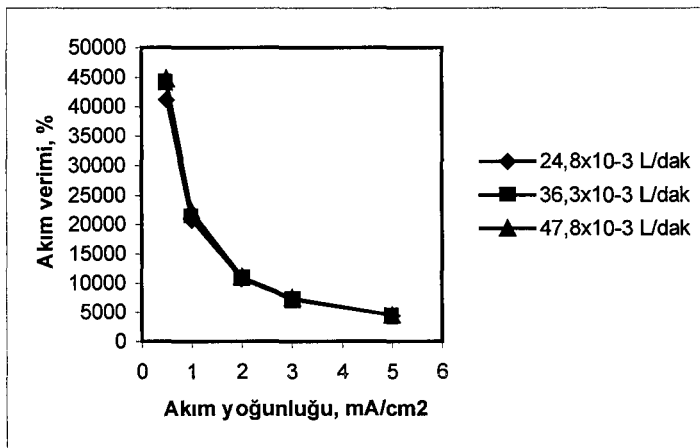
Şekil 6.65. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (2000 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



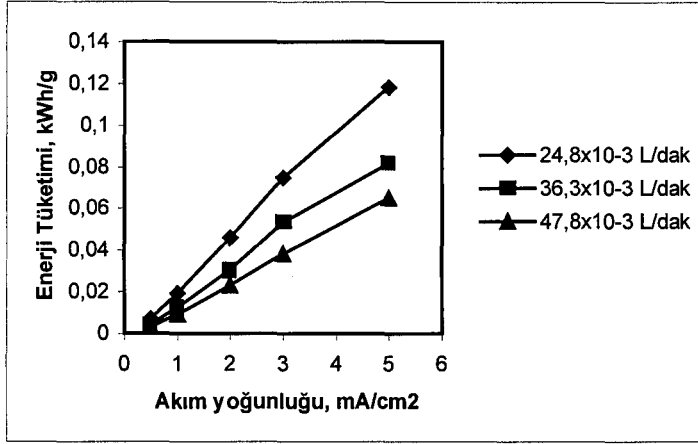
Şekil 6.66. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



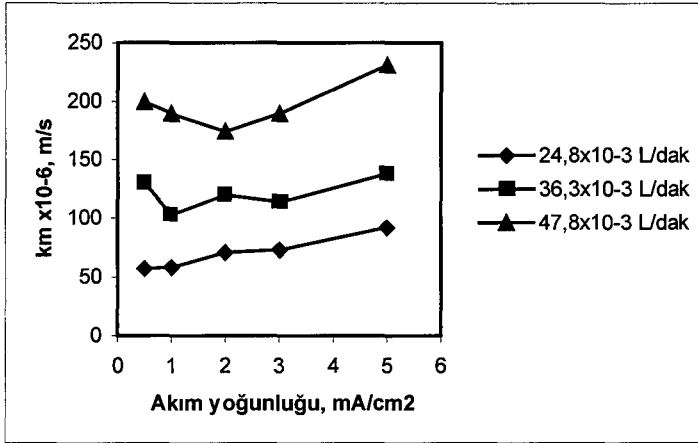
Şekil 6.67. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



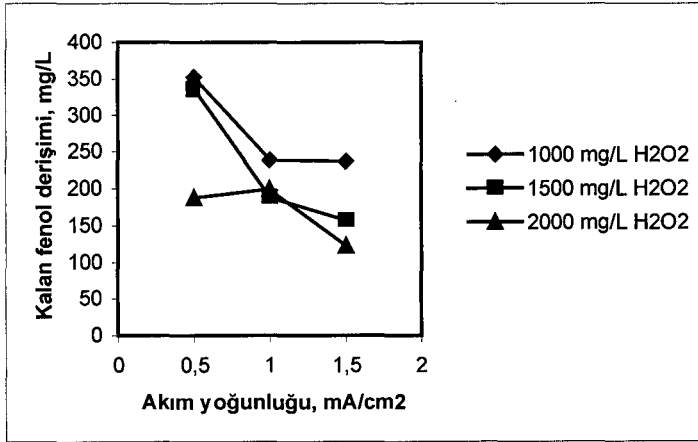
Şekil 6.68. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



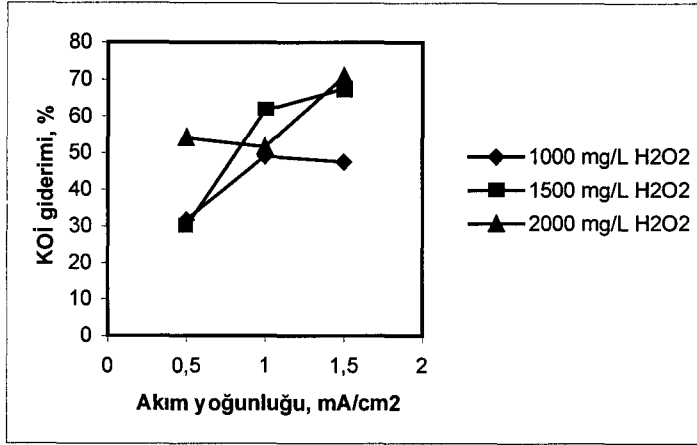
Şekil 6.69. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



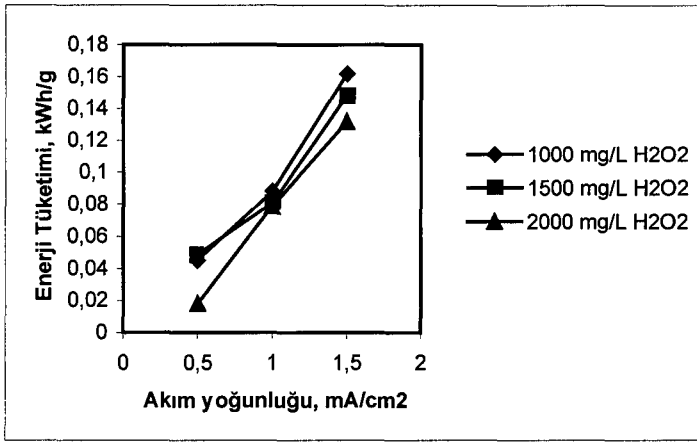
Şekil 6.70. 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (2500 mg/L H₂O₂ + 0,03 M Na₂SO₄)



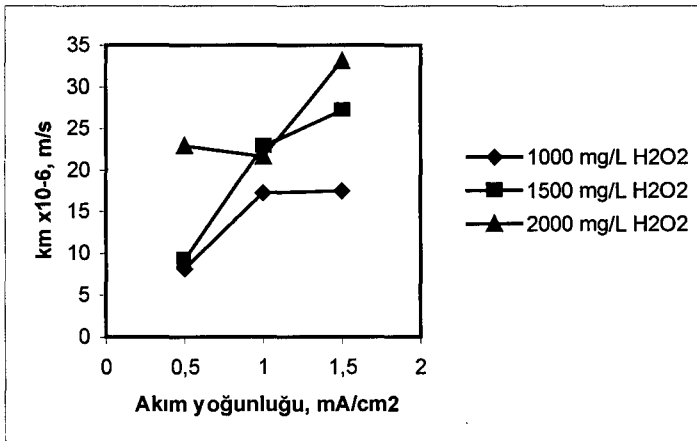
Şekil 6.71. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (Q= 24,83x10⁻³L/dak + 0,02 M Na₂SO₄)



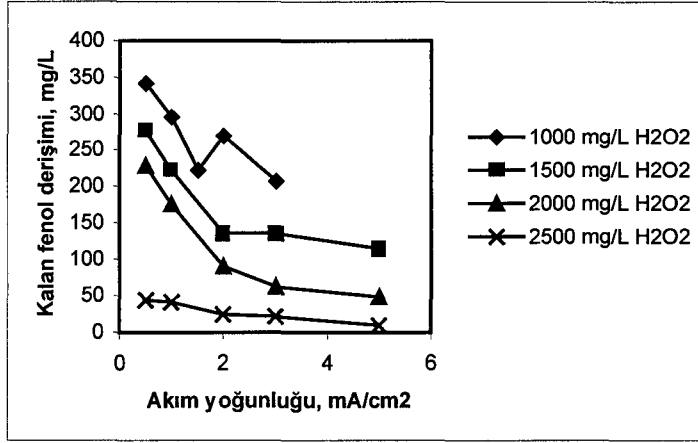
Şekil 6.72. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



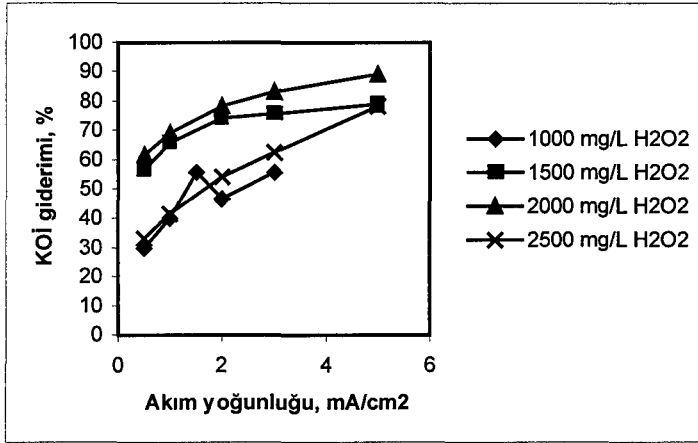
Şekil 6.73. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



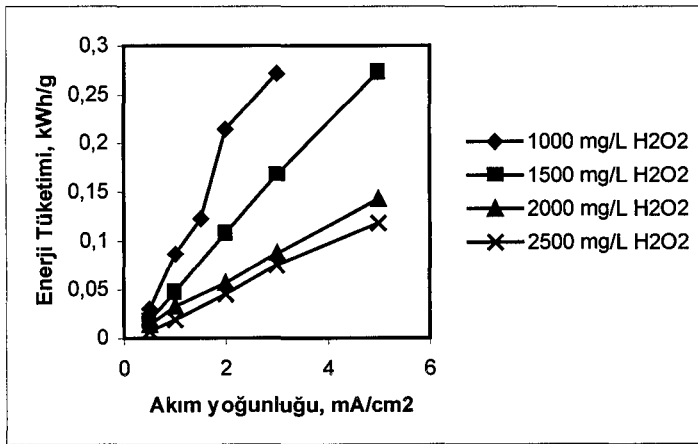
Şekil 6.74. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{L/dak} + 0,02 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



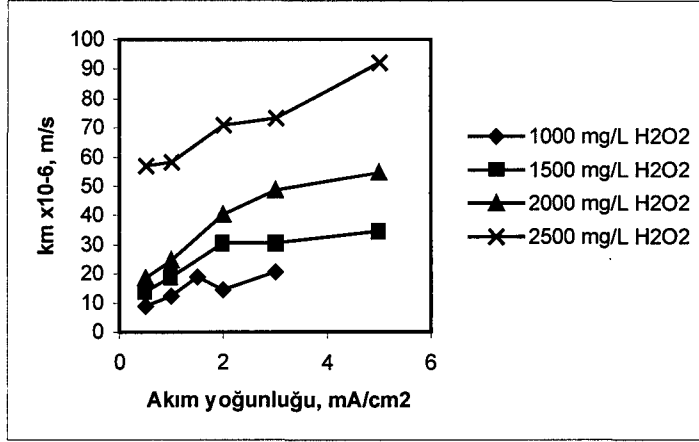
Şekil 6.75. 500 mg/L başlangıç derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



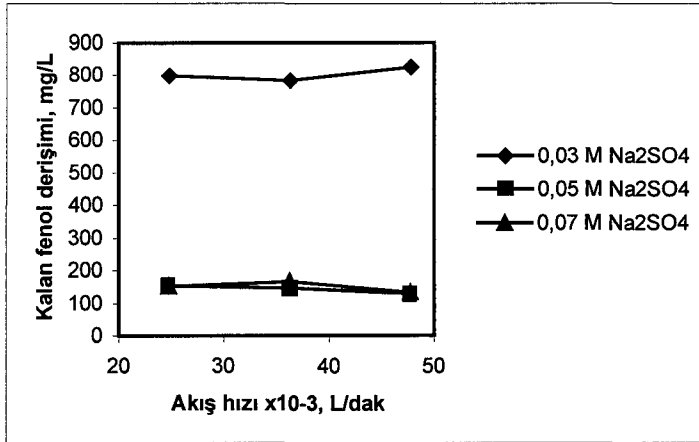
Şekil 6.76. 500 mg/L başlangıç derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



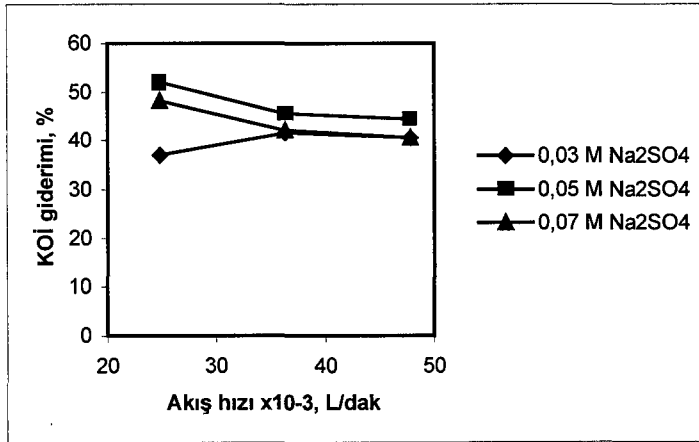
Şekil 6.77. 500 mg/L başlangıç derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($Q=24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



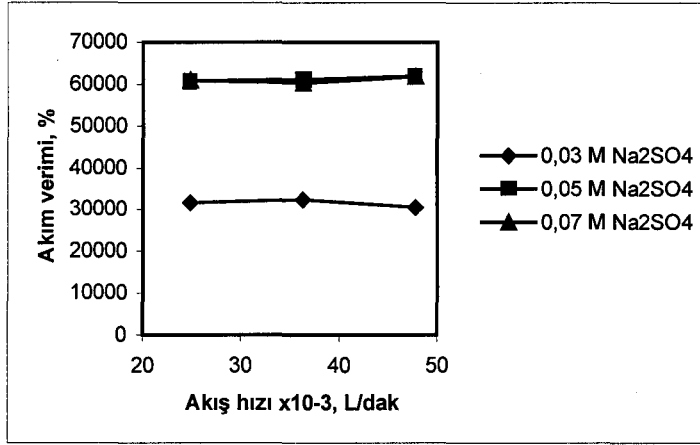
Şekil 6.78. 500 mg/L başlangıç derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi ($Q = 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak} + 0,03 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$)



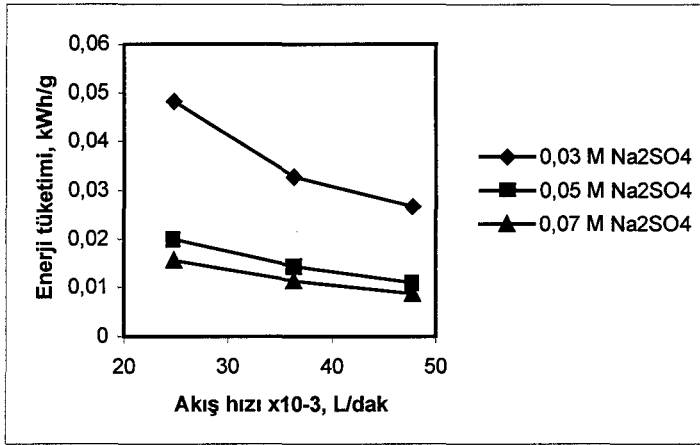
Şekil 6.79. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($I = 176,43 \text{ mA}$, $i = 1 \text{ mA/cm}^2$)



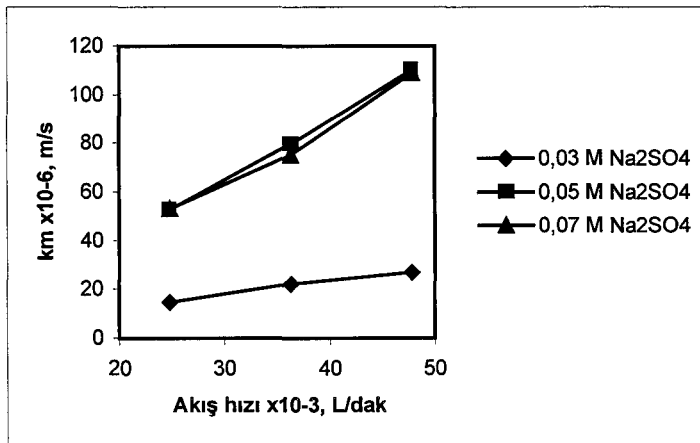
Şekil 6.80. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde KOİ gideriminin akış hızı ile değişimi ($I = 176,43 \text{ mA}$, $i = 1 \text{ mA/cm}^2$)



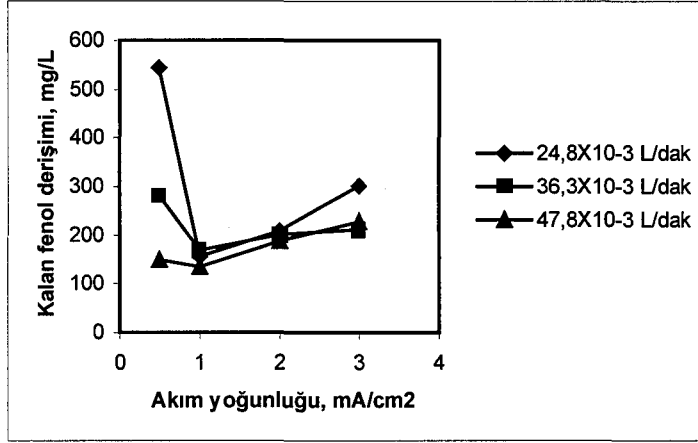
Şekil 6.81. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde akım veriminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



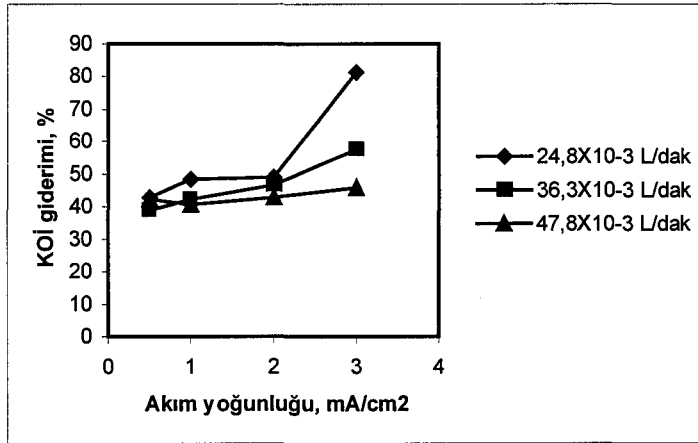
Şekil 6.82. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



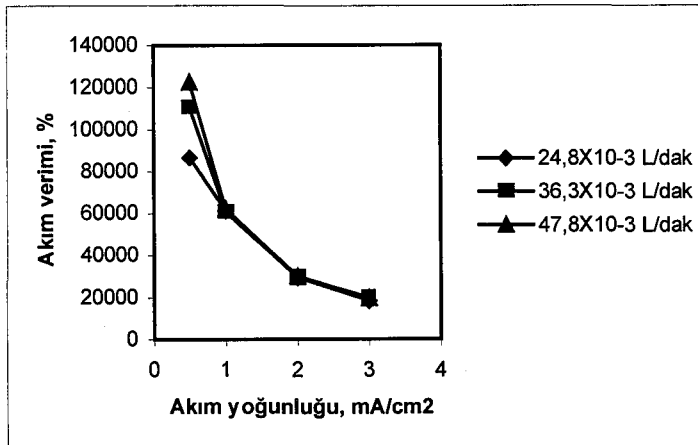
Şekil 6.83. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



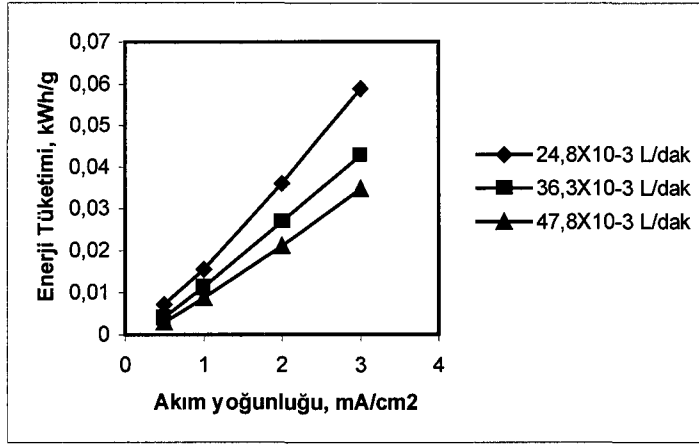
Şekil 6.84. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



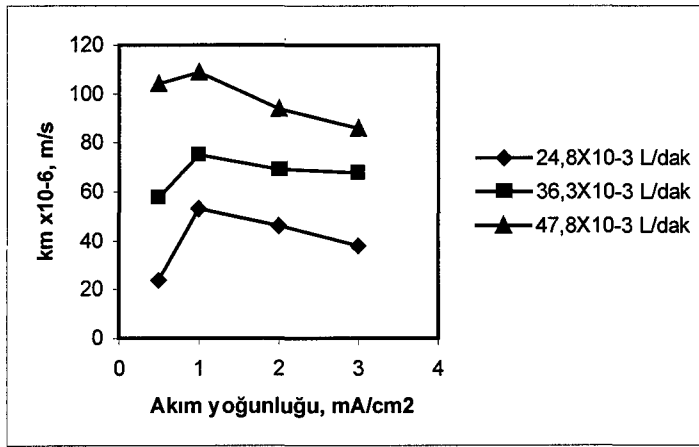
Şekil 6.85. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



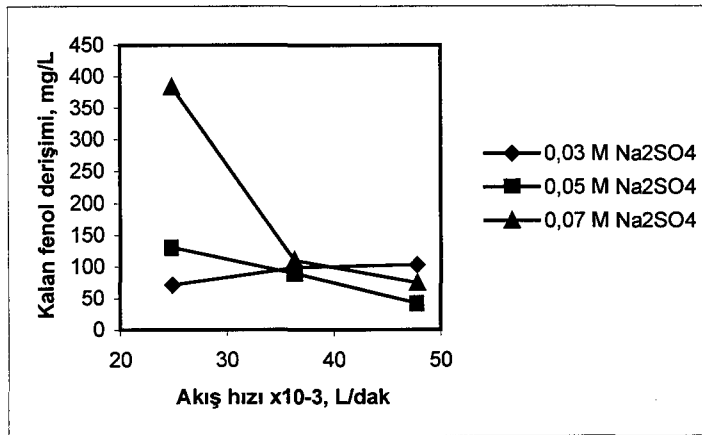
Şekil 6.86. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



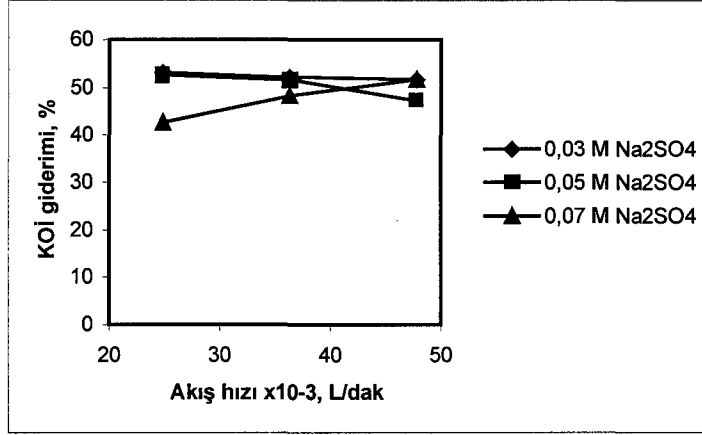
Şekil 6.87. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



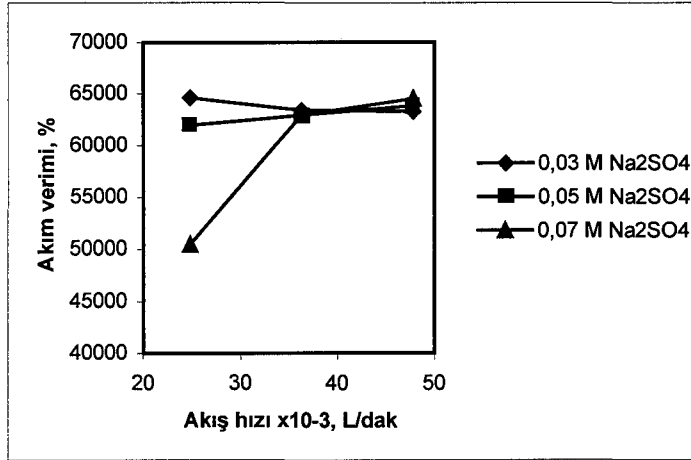
Şekil 6.88. 1500 mg/L fenol + 4000 mg/L H₂O₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



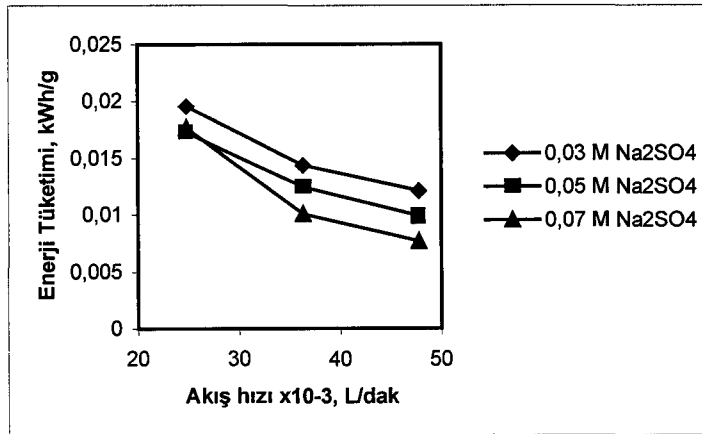
Şekil 6.89. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



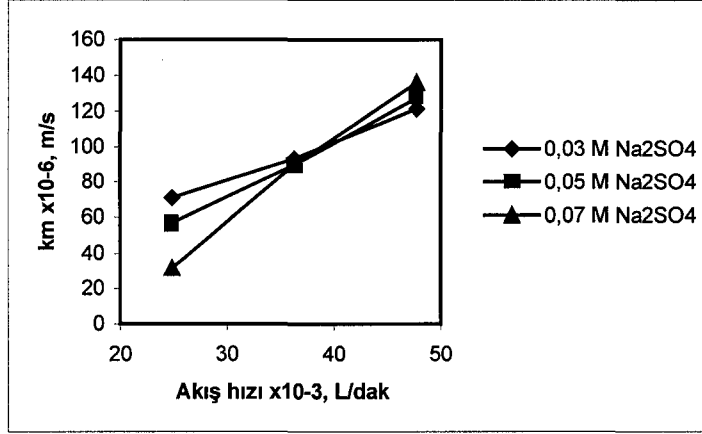
Şekil 6.90. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde KOİ gideriminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



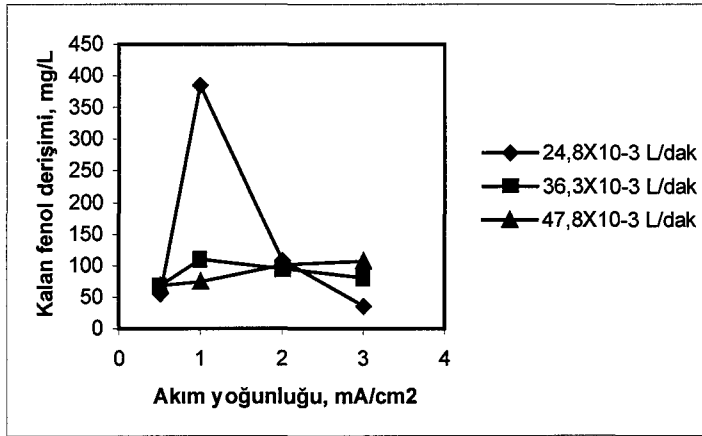
Şekil 6.91. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde akım veriminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



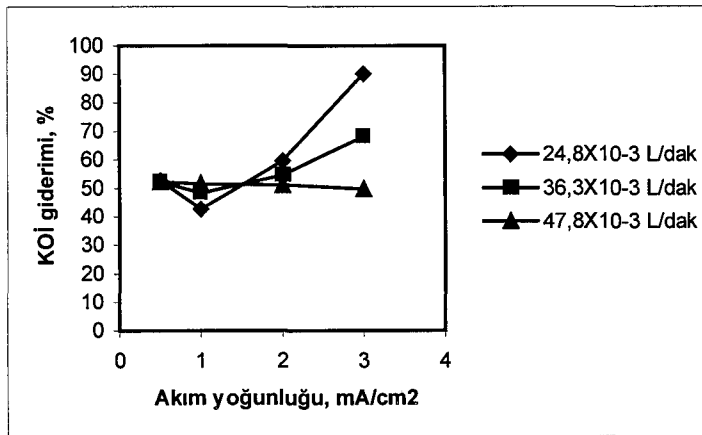
Şekil 6.92. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



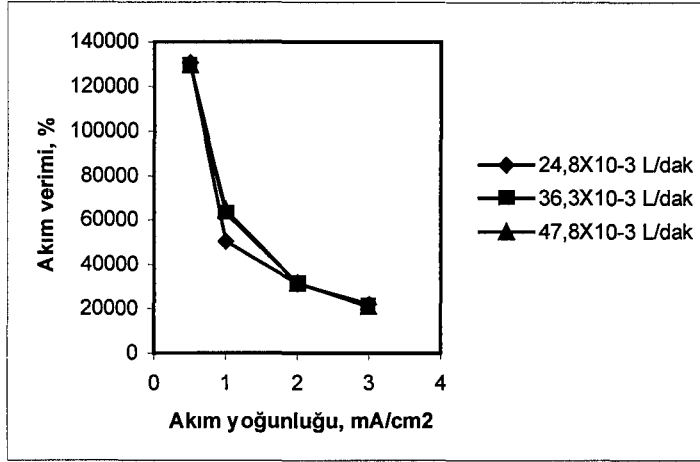
Şekil 6.93. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akış hızı ile değişimi (I= 176,43mA, i= 1 mA/cm²)



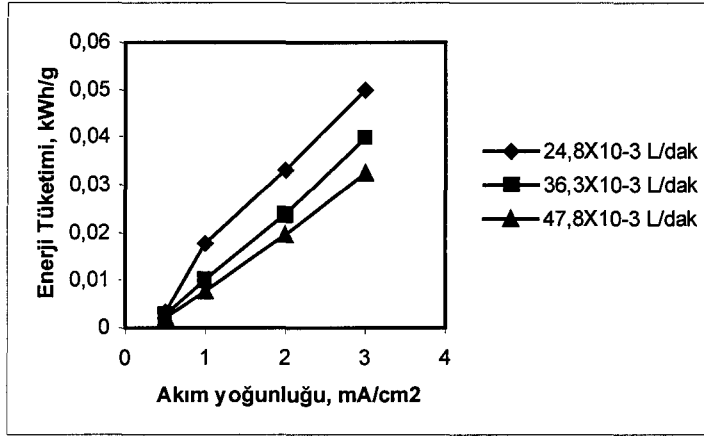
Şekil 6.94. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



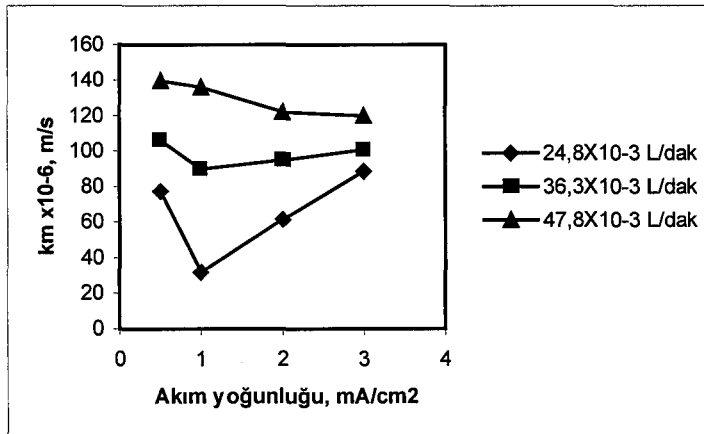
Şekil 6.95. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde KOİ gideriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



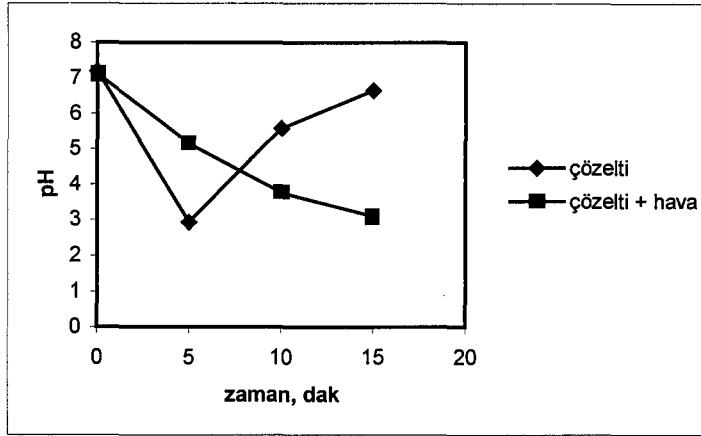
Şekil 6.96. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



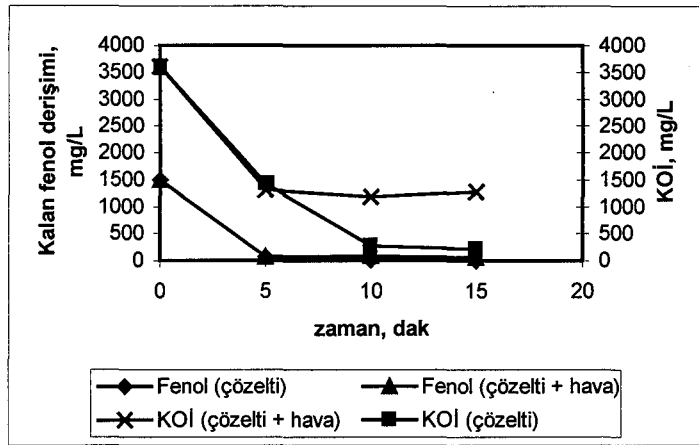
Şekil 6.97. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



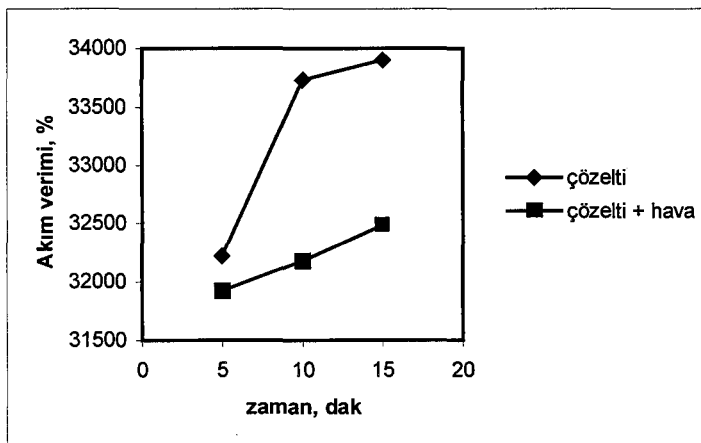
Şekil 6.98. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ derişiminde kütle aktarım katsayısının akım yoğunluğu ile değişimi (0,07 M Na₂SO₄)



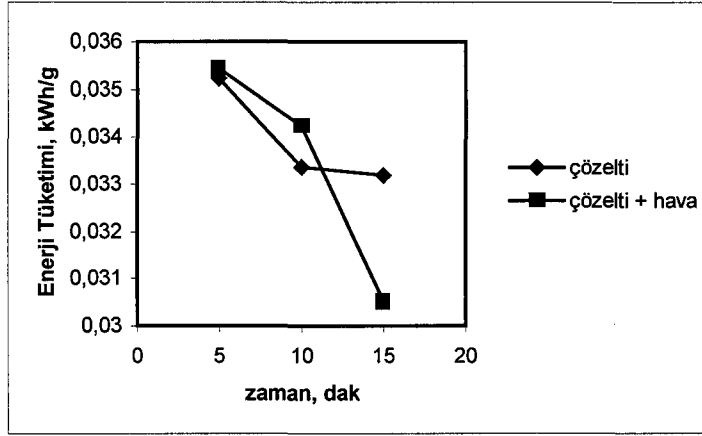
Şekil 6.99. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ derişiminde pH'ın zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)



Şekil 6.100. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ derişiminde kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)



Şekil 6.101. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ derişiminde akım veriminin zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)



Şekil 6.102. 1500 mg/L fenol + 5000 mg/L H₂O₂ + 0,07 M Na₂SO₄ derişiminde enerji tüketiminin zamanla değişimi (I= 353 mA, i= 2 mA/cm², V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, KOİ giriş = 3600 mg/L)

6.3. Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar

Bu çalışmada, RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlar kullanılarak fenolün elektrokimyasal yükseltgemesi çalışılmıştır. 50, 200 ve 500 mg/L başlangıç fenol derişimlerine sahip çözeltilerin, tıkaç akım reaktörle elektrokimyasal giderimi araştırılmıştır. Kesikli geri döngülü çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde, başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, akış hızı ve sıcaklığın giderim verimine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.47-67’de ve Şekil 6.103-136’da verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda, öncelikle herhangi bir destek elektrolit ilavesi olmaksızın 200 mg/L başlangıç derişiminde çalışılmış, ancak çözeltilerin iletkenliğinin düşük olması nedeniyle, 300V gerilimle reaktörden sadece 30 mA akım geçirilebilmiştir. Aynı çalışmada, 150. dakika sonunda %83 fenol ve %59,8 KOİ giderimi elde edilmiştir.

Çizelge 6.47. 200 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 30 mA, V= 500 mL, Q= $24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0	301	7,34	200	-	-	-
10	300	6,35	199	79,84	0,49	6,040
20	301	5,91	173,2	1069,9	13,38	0,226
30	301	5,05	160,2	1059,3	19,91	0,152
40	300	4,26	144,7	1103,9	27,60	0,109
50	300	3,58	131,9	1087,5	34,01	0,089
60	301	3,42	108	1224,3	45,99	0,066
90	301	3,31	74	1117,8	62,99	0,048
120	301	3,18	50	998,08	74,97	0,040
150	300	3,08	33,9	884,16	83,01	0,036

Giriş KOİ= 480 mgO₂/L, Çıkış KOİ= 193 mgO₂/L, KOİ giderimi= % 59,8
EOD= 1,435 g O₂/g fenol, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $41,6 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.48. 200 mg/L fenol ve 0,01 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	219	7,52	200	480	-	-	-	-	-
5	207	8,40	135	393	587,5	0,43	32,50	18,05	1,133
10	215	8,41	128,3	380	324,1	0,50	35,83	20,83	1,067
15	215	8,37	116,5	363	251,6	0,58	41,75	24,31	0,916
20	212	8,35	104,9	336	214,9	0,72	47,52	29,86	0,793
25	210	8,34	91,9	320	195,4	0,80	54,04	33,33	0,691
30	214	8,42	80,1	283	180,6	0,98	59,95	40,97	0,635
40	215	8,29	57,94	263	160,5	1,09	71,03	45,14	0,538
50	215	8,26	36,4	213	147,9	1,34	81,80	55,55	0,467
60	217	8,26	27,91	180	129,6	1,50	86,04	62,50	0,448
90	217	8,97	0,61	63,3	100,1	2,08	99,69	86,81	0,387

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 135,9 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.49. 200 mg/L fenol ve 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	235	7,19	200	480	-	-	-	-	-
5	205	8,91	120,4	363	719,5	0,58	39,78	24,30	0,916
10	208	9,09	101,3	336	446,1	0,72	49,34	29,86	0,749
15	198	9,20	92,83	320	322,9	0,80	53,58	33,33	0,657
20	197	9,29	79,18	300	273,0	0,90	60,41	37,50	0,580
25	196	9,36	66,13	270	242,0	1,05	66,93	43,75	0,521
30	194	9,38	56,12	250	216,7	1,15	71,94	47,92	0,480
40	193	9,52	33,67	200	187,9	1,40	83,16	58,33	0,413
50	190	9,69	18,20	146	164,3	1,67	90,9	69,44	0,372
60	188	9,86	12,44	122	141,3	1,79	93,78	74,58	0,356
90	187	10,22	6,07	101	97,39	1,89	96,96	78,96	0,343

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 81,99 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.50. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	175	7,37	200	480	-	-	-	-	-
10	166	8,30	62,19	263	622,8	1,08	68,90	45,14	0,428
20	161	7,48	39,74	206	362	1,37	80,13	56,94	0,357
30	160	7,78	23,97	170	265	1,55	88,02	64,58	0,323
40	160	8,50	11,83	143	213	1,68	94,08	70,14	0,302
50	161	9,09	4,85	133	176,4	1,74	97,57	72,22	0,293
60	160	9,16	0,30	86,7	150,4	1,97	99,85	81,94	0,285
90	158	9,44	-	60	-	2,10	-	87,5	(0,134)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 152,54 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.51. 200 mg/L fenol ve 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	178	7,16	200	480	-	-	-	-	-
5	178	9,55	105,3	343	856,0	0,68	47,36	28,47	0,668
10	181	9,64	84,34	310	522,7	0,85	57,83	35,42	0,556
15	180	9,89	73,42	283	381,4	0,98	63,29	40,97	0,506
20	183	10,03	59,46	256	317,6	1,12	70,27	46,53	0,463
25	180	10,14	50,06	240	271,1	1,20	74,97	50,00	0,427
30	184	10,27	42,47	220	237,3	1,30	78,76	54,17	0,415
40	184	10,47	25,78	176	196,8	1,52	87,11	63,19	0,375
50	185	10,64	14,56	153	167,6	1,64	92,72	68,05	0,355
60	179	10,77	0,667	61	150,1	2,09	99,67	87,29	0,319

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 133,8 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.52. 200 mg/L fenol ve 0,01 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD(gO ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	299	7,49	200	480	-	-	-	-	-
5	293	8,33	95,56	326	567,3	0,77	52,22	31,94	1,661
10	294	8,45	81,30	286	322,4	0,97	59,35	40,28	1,466
15	290	8,23	64,31	273	245,7	1,04	67,84	43,06	1,265
20	293	7,95	48,54	230	205,7	1,25	75,73	52,08	1,145
25	289	7,76	36,10	210	178,0	1,35	81,95	56,25	1,044
30	295	7,72	24,27	173	159,1	1,54	87,86	63,89	0,994
40	292	7,82	12,44	143	127,3	1,69	93,78	70,14	0,921

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 65,15 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.53. 200 mg/L fenol ve 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	229	7,43	200	480	-	-	-	-	-
5	216	8,80	87,67	316	610,1	0,82	56,16	34,03	1,138
10	217	9,30	69,77	276	353,7	1,02	65,11	42,36	0,986
15	215	9,42	56,73	253	259,4	1,14	71,63	47,22	0,888
20	215	9,64	41,26	216	215,5	1,32	79,37	54,86	0,802
25	214	9,76	30,64	186	184,0	1,47	84,68	61,11	0,745
30	215	9,87	22,75	170	160,5	1,55	88,62	64,58	0,718
40	217	10,17	8,49	116	130,0	1,82	95,75	75,69	0,671

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 74,1 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.54. 200 mg/L fenol ve 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	195	7,14	200	480	-	-	-	-	-
5	185	8,71	64,62	273	735,3	1,03	67,69	43,06	0,809
10	183	9,64	53,39	236	398,2	1,22	73,30	50,69	0,739
15	182	9,89	32,46	190	303,3	1,45	83,77	60,42	0,643
20	183	10,02	20,93	160	243,2	1,60	89,53	66,67	0,605
25	184	10,23	11,53	143	204,7	1,68	94,23	70,14	0,578
30	180	10,59	8,19	120	173,6	1,80	95,90	75	0,555
40	182	10,92	2,12	73	134,3	2,03	98,94	84,72	0,544

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 106,7 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.55. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	244	7,37	200	480	-	-	-	-	-
5	230	9,37	62,49	263	746,9	1,08	68,75	45,14	0,990
10	233	9,65	51,88	240	402,3	1,20	74,06	50	0,931
15	230	9,87	36,71	210	295,6	1,35	81,64	56,25	0,834
20	228	10,04	24,87	176	237,8	1,52	87,56	63,19	0,771
25	228	10,24	13,65	133	202,4	1,74	93,17	72,22	0,724
30	228	10,37	6,37	96	175,3	1,92	96,81	79,86	0,697
40	228	10,61	0,303	53	135,6	2,14	99,85	88,89	0,676

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 152,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.56. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH=3,02)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	244	3,02	200	480	-	-	-	-	-
5	228	3,40	69,47	276	709,0	1,02	65,26	42,36	1,034
10	227	4,02	54,30	236	395,7	1,22	72,85	50,70	0,922
15	225	6,10	37,31	210	294,5	1,35	81,34	56,25	0,818
20	227	7,31	25,18	173	237,4	1,53	87,41	63,89	0,768
25	229	9,06	13,04	136	203,1	1,72	93,48	71,53	0,725
30	228	9,43	5,16	90	176,4	1,95	97,42	81,25	0,693
40	226	10,03	0,91	56	135,2	2,12	99,54	88,19	0,672

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 126,5 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.57. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH=11,10)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	243	11,10	200	480	-	-	-	-	-
5	231	11,09	59,76	256	761,7	1,12	70,12	46,53	0,975
10	234	11,02	46,42	223	417,1	1,28	76,79	53,47	0,902
15	230	10,98	33,07	200	302,2	1,40	83,46	58,33	0,815
20	232	10,97	20,93	166	243,2	1,57	89,53	65,28	0,767
25	232	10,97	10,92	110	205,4	1,85	94,54	77,08	0,726
30	233	10,97	6,37	93	175,3	1,93	96,81	80,56	0,712
40	230	11,04	4,85	80	132,5	2,00	97,57	83,33	0,697

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 87,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.58. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	245	7,30	200	480	-	-	-	-	-
5	233	9,21	46,11	220	835,9	1,30	76,94	54,17	0,613
10	230	9,37	34,58	200	449,2	1,40	82,71	58,33	0,562
15	230	9,75	27,30	183	312,7	1,48	86,35	61,81	0,539
20	229	9,97	18,51	150	246,4	1,65	90,75	68,75	0,511
25	231	10,10	11,22	113	205,1	1,83	94,39	76,39	0,495
30	230	10,23	7,58	96	174,2	1,92	96,21	79,86	0,483
40	230	10,50	0,91	40	135,2	2,20	99,54	91,67	0,467

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 185,1 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.59. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 47,8x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	244	7,30	200	480	-	-	-	-	-
5	235	9,37	99,51	333	545,8	0,73	50,25	30,55	0,718
10	232	9,72	75,54	270	338,0	1,05	62,23	43,75	0,573
15	230	10,06	51,57	243	268,7	1,18	74,21	49,31	0,476
20	231	10,22	32,76	196	227,1	1,42	83,62	59,03	0,424
25	229	10,40	16,08	136	199,8	1,72	91,96	71,53	0,382
30	230	10,50	6,37	93	175,3	1,93	96,81	80,55	0,365
40	230	10,71	1,82	66	134,5	2,07	99,09	86,11	0,356

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 212,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.60. 200 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 5°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	246	7,30	200	480	-	-	-	-	-
5	232	8,99	72,51	283	692,5	0,98	63,745	40,97	0,736
10	231	8,41	56,73	243	389,1	1,18	71,63	49,30	0,652
15	230	8,38	39,13	226	291,3	1,27	80,43	52,78	0,578
20	232	8,57	27,00	183	234,9	1,48	86,50	61,80	0,542
25	231	8,74	17,29	140	198,5	1,70	91,35	70,83	0,511
30	231	8,95	9,101	116	172,8	1,82	95,45	75,69	0,489
40	231	9,04	0,91	100	135,2	1,90	99,54	79,17	0,469

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 185,1 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.61. 50 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	237	7,30	50	120	-	-	-	-	-
3	235	9,68	2,12	50	433,4	1,40	95,75	58,33	1,986
6	224	9,72	1,06	30	221,5	1,80	97,87	75,00	1,852
9	224	10,02	0,45	16,7	149,5	2,07	99,1	86,11	1,829
12	223	10,25	-	10	-	2,20	-	91,67	(0,82)*

KOİ giriş = 120 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 161,7 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.62. 50 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	205	7,27	50	120	-	-	-	-	-
3	198	8,88	11,83	76,7	575,0	0,87	76,34	36,11	1,261
6	202	9,14	8,34	66,7	313,8	1,07	83,31	44,44	1,179
9	200	9,34	6,07	60,0	220,6	1,20	87,86	50,00	1,107
12	201	9,40	3,34	53,3	175,7	1,33	93,32	55,56	1,047
15	201	9,50	1,21	43,3	147,0	1,53	97,57	63,89	1,001
20	200	9,57	0,45	30,0	111,9	1,80	99,09	75,00	0,981
25	200	9,63	-	20,0	-	2,00	-	83,33	(0,486)*

KOİ giriş = 120 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 161,7 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.63. 50 mg/L fenol ve 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	282	7,30	50	120	-	-	-	-	-
3	277	8,24	3,18	56,7	423,8	1,27	93,63	52,78	2,394
6	277	8,82	2,27	50,0	216,0	1,40	95,45	58,33	2,348
9	276	8,97	1,21	40,0	147,2	1,60	97,57	66,67	2,289
12	280	9,20	0,45	23,3	112,1	1,93	99,09	80,56	2,286
15	279	9,32	-	13,3	-	2,13	-	88,89	(1,058)*

KOİ giriş = 120 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 161,7 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.64. 50 mg/L fenol ve 0,03 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	243	7,35	50	120	-	-	-	-	-
3	239	8,67	13,95	80,0	543,1	0,80	72,09	33,33	1,612
6	238	8,93	10,01	70,0	301,2	1,00	79,98	41,67	1,447
9	237	9,05	6,52	63,3	218,3	1,13	86,95	47,22	1,325
12	236	9,17	3,79	56,7	174,0	1,27	92,41	52,78	1,241
15	238	9,24	2,43	46,7	143,3	1,47	95,14	61,11	1,216
20	238	9,34	1,97	36,7	108,5	1,67	96,06	69,44	1,205
25	239	9,46	1,52	30,0	87,64	1,80	96,96	75,00	1,198
30	238	9,58	-	16,7	-	2,07	-	86,11	(0,56)*

KOİ giriş = 120 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 119,9 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.65. 500 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	265	7,34	500	1200	-	-	-	-	-
5	254	6,40	266,2	770	1270	0,86	46,76	35,83	0,439
10	254	6,48	216,9	700	768,8	1,00	56,62	41,67	0,363
15	251	6,49	174,4	640	589,5	1,12	65,11	46,67	0,312
20	251	6,52	134,2	530	496,7	1,34	73,15	55,83	0,277
30	249	6,67	72,81	420	386,7	1,56	85,44	65,00	0,236
40	247	6,90	34,89	320	315,8	1,76	93,02	73,33	0,215
50	246	7,30	11,37	260	265,4	1,88	97,72	78,33	0,204
60	245	8,44	1,52	210	225,6	1,98	99,69	82,5	0,199
75	246	9,16	-	150	-	2,10	-	87,5	(0,095)*
90	244	9,76	-	110	-	2,18	-	90,83	(0,091)*

KOİ giriş = 1200 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 198,9 x10⁻⁶ m/s

* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

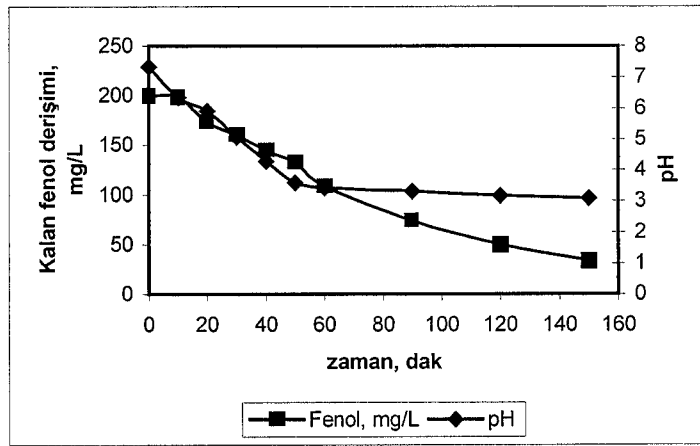
Çizelge 6.66. 500 mg/L fenol ve 0,05 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	227	7,36	500	1200	-	-	-	-	-
5	213	6,85	354,9	890	1311	0,62	29,01	25,83	0,357
10	214	6,56	323,8	850	796,3	0,70	35,23	29,17	0,295
15	213	6,46	279,1	760	665,6	0,88	44,18	36,67	0,234
20	214	6,44	250,3	710	564,3	0,98	49,94	40,83	0,208
30	214	6,46	188,8	620	468,8	1,16	62,23	48,33	0,167
40	211	6,51	139,5	540	407,3	1,32	72,09	55,00	0,142
50	209	6,61	99,35	460	362,1	1,48	80,13	61,67	0,127
60	207	6,72	65,98	370	326,9	1,66	86,80	69,17	0,116
75	207	7,04	30,33	290	283,0	1,82	93,93	75,83	0,107
90	207	7,50	12,13	220	245,0	1,96	97,57	81,67	0,103
120	205	9,09	2,27	130	187,4	2,14	99,54	89,17	0,100

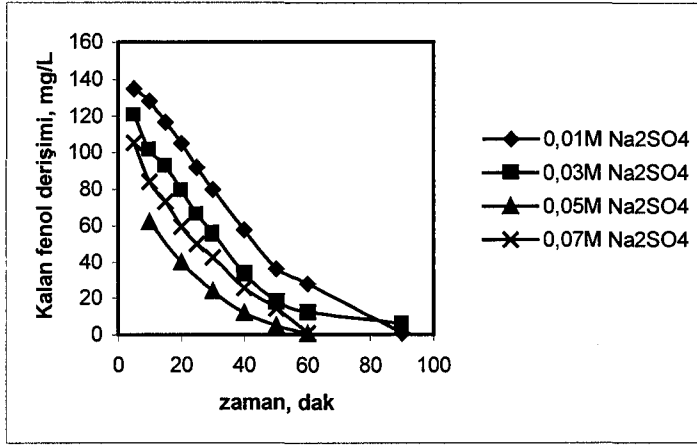
KOİ giriş = 1200 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 185,16 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.67. Kütle aktarım katsayısının deneysel çalışma parametreleri ile değişimi

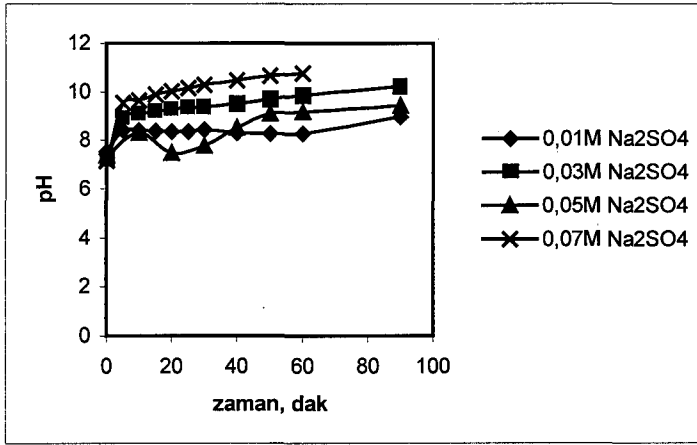
Parametre	Değer	Kütle aktarım katsayısı (k_m , 10^{-6} m/s)	
Sıcaklık (°C)	5	185,1	
	20	185,1	
Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	3	152,54	
	5	152,3	
pH	3	126,5	
	11	87,3	
	doğal	152,3	
Destek elektrolit (Na ₂ SO ₄ , M)	i=3mA/cm ²	0,01	135,9
		0,03	81,99
		0,05	152,54
		0,07	133,8
	i=5mA/cm ²	0,01	65,15
		0,03	74,1
		0,05	152,3
		0,07	106,7
Akış hızı (10 ⁻³ L/dak)	24,83	152,3	
	36,3	185,1	
	47,8	212,3	



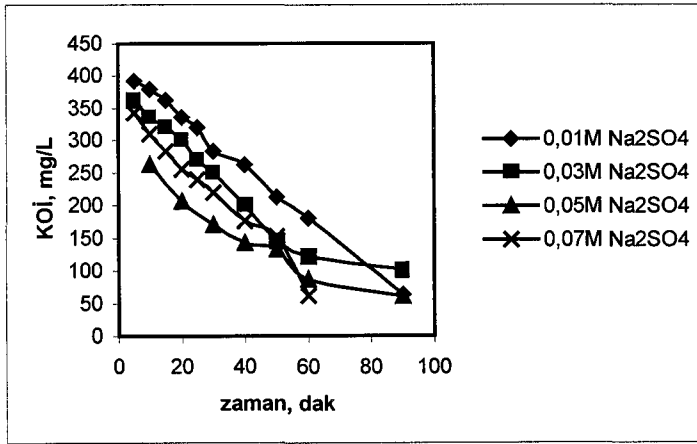
Şekil 6.103. Kalan fenol derişimi ve pH'nın zamanla değişimi (I= 30 mA, V= 500 mL, Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)



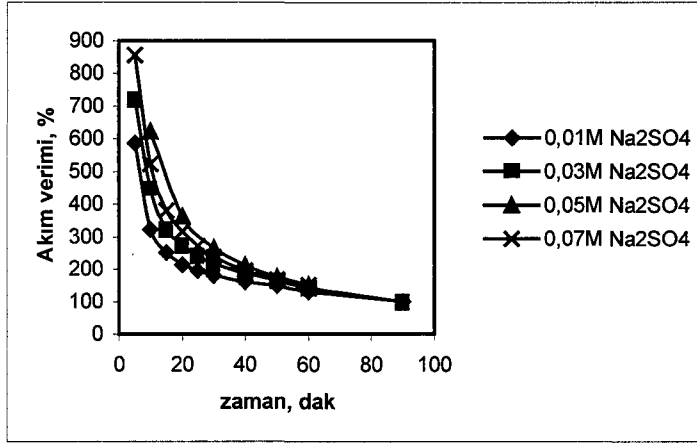
Şekil 6.104. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $I = 530\text{ mA}$, $i = 3\text{ mA/cm}^2$, $Q = 24,83 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



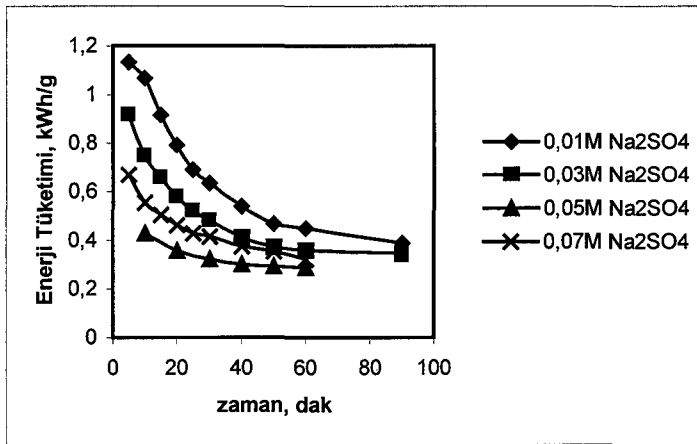
Şekil 6.105. pH'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $I = 530\text{ mA}$, $i = 3\text{ mA/cm}^2$, $Q = 24,83 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



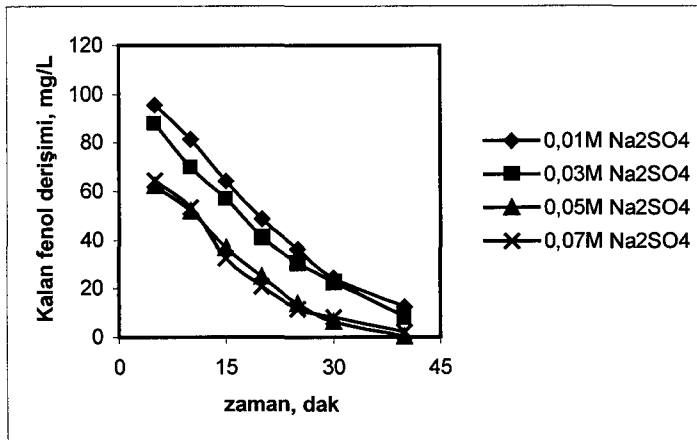
Şekil 6.106. KOI'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o = 200\text{mg/L}$, $V = 500\text{mL}$, $I = 530\text{ mA}$, $i = 3\text{ mA/cm}^2$, $Q = 24,83 \times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



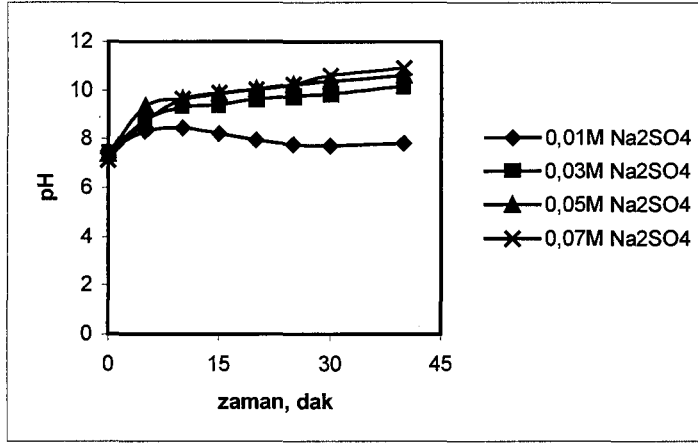
Şekil 6.107. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



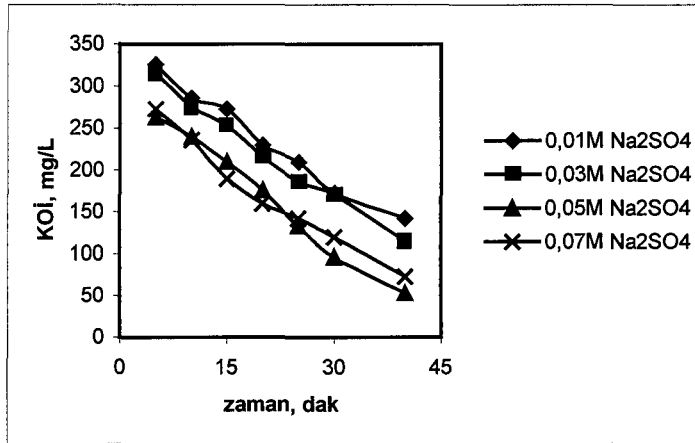
Şekil 6.108. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



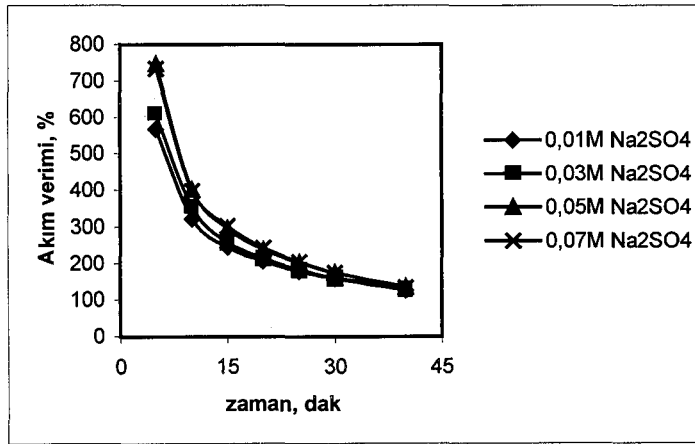
Şekil 6.109. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



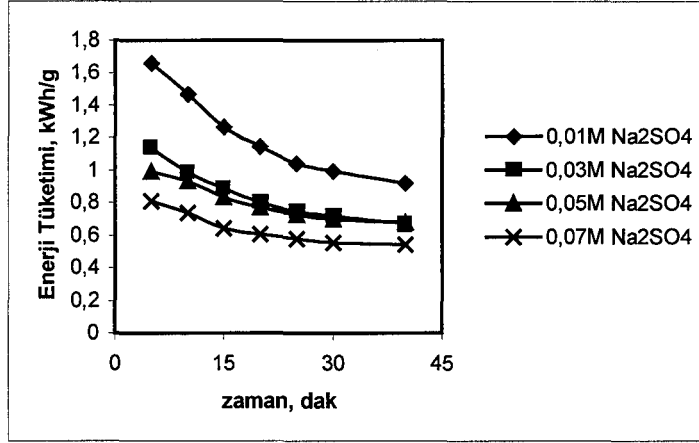
Şekil 6.110. pH'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



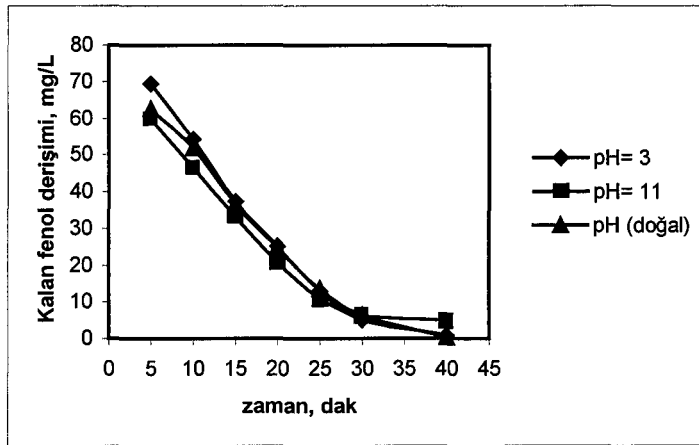
Şekil 6.111. KOİ'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



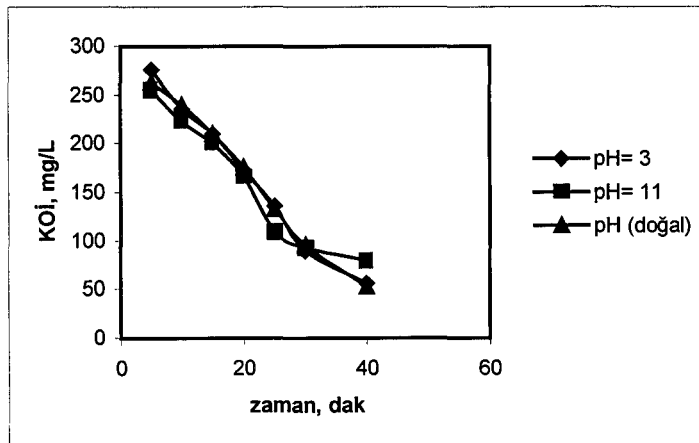
Şekil 6.112. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



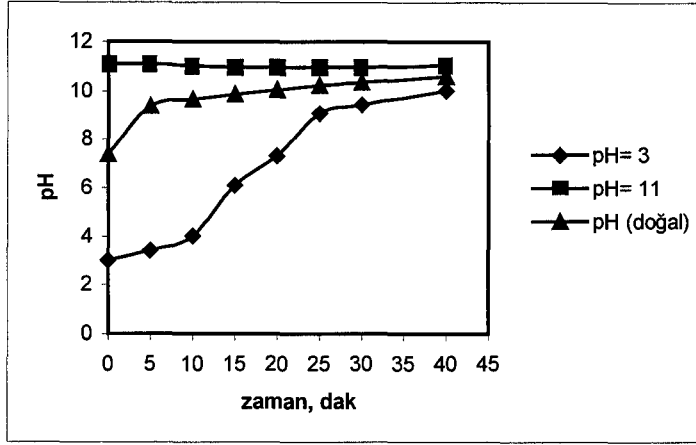
Şekil 6.113. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



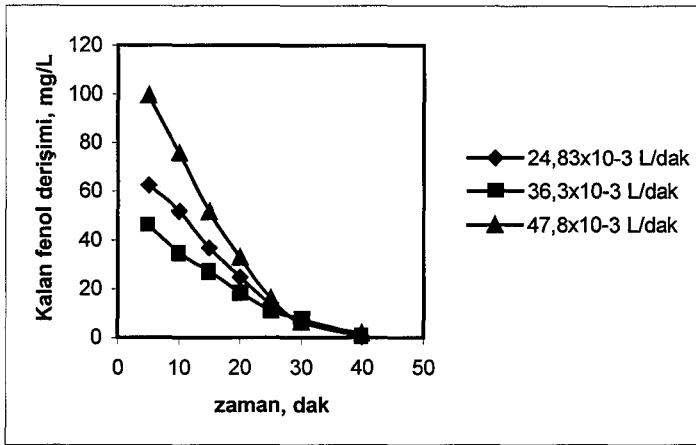
Şekil 6.114. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{ mg/L}+0,05\text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{ mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



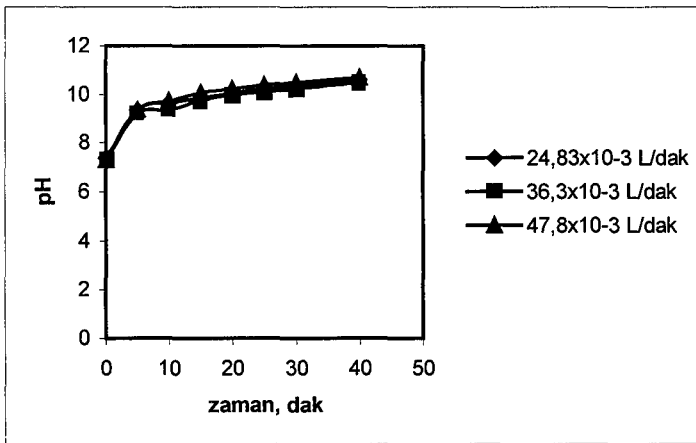
Şekil 6.115. KOİ'nin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{ mg/L}+0,05\text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V=500\text{ mL}$, $I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=24,83\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



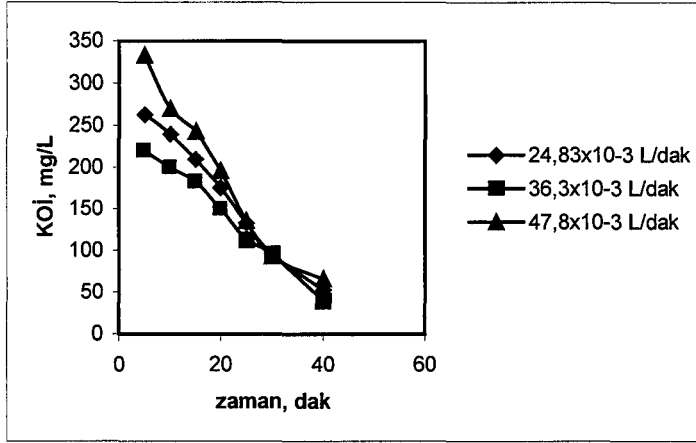
Şekil 6.116. pH'nin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 882 \text{ mA}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 24,83 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



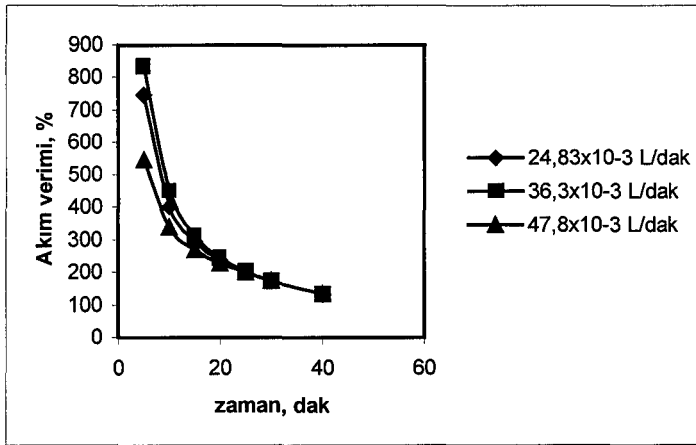
Şekil 6.117. Kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 882 \text{ mA}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, $t = 20^\circ\text{C}$, $\text{pH} = \text{doğal}$)



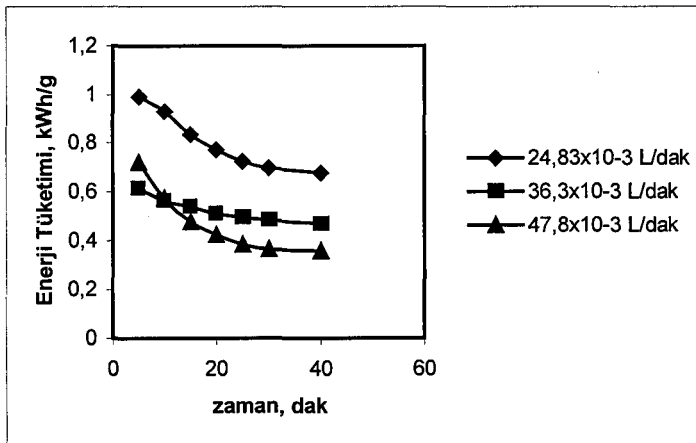
Şekil 6.118. pH'nin akış hızı ile değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 882 \text{ mA}$, $i = 5 \text{ mA/cm}^2$, $t = 20^\circ\text{C}$, $\text{pH} = \text{doğal}$)



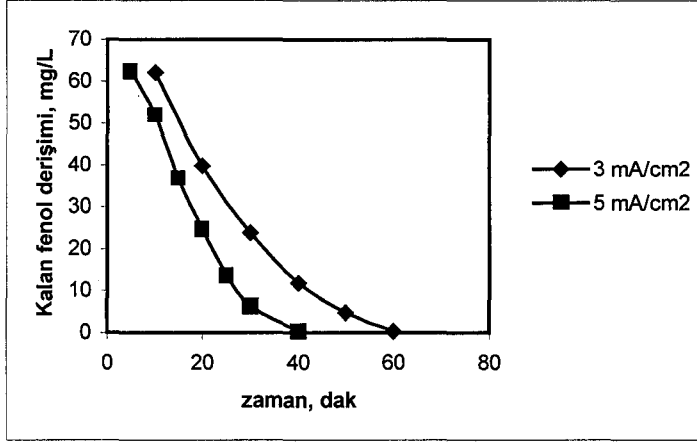
Şekil 6.119. KOİ'nin akış hızı ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal)



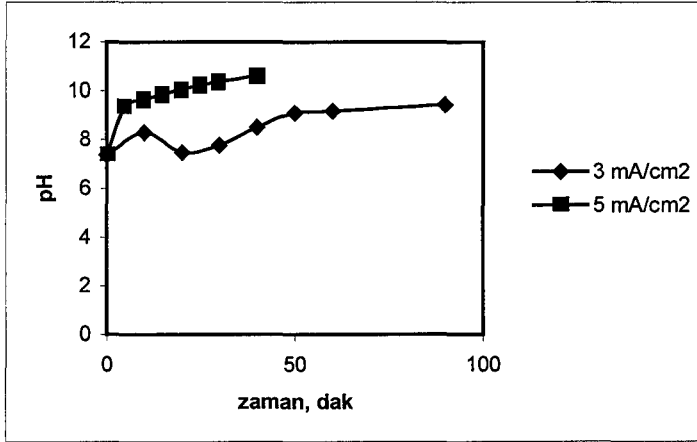
Şekil 6.120. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal)



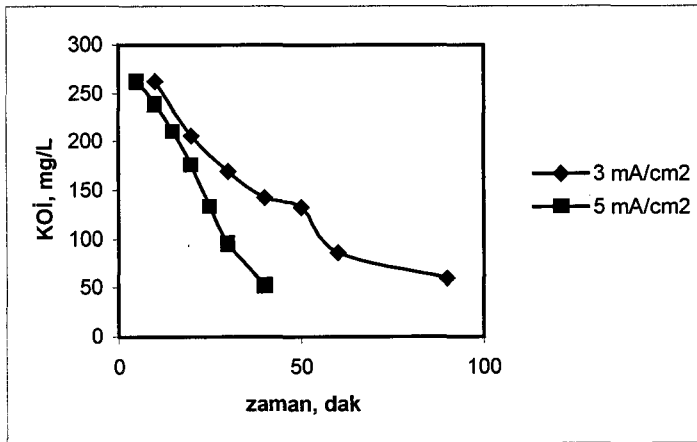
Şekil 6.121. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal)



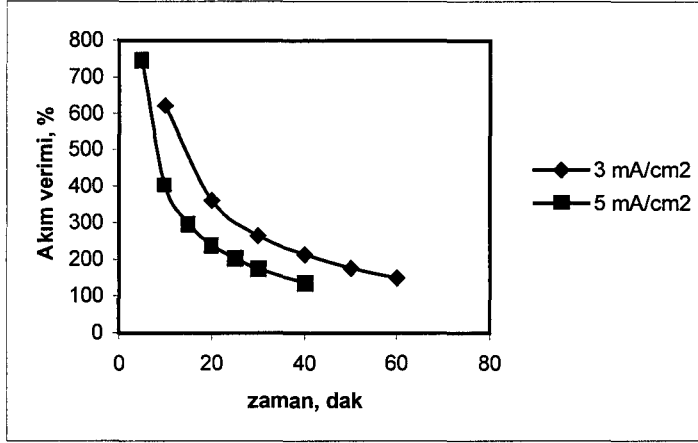
Şekil 6.122. Kalan fenol derişimini akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



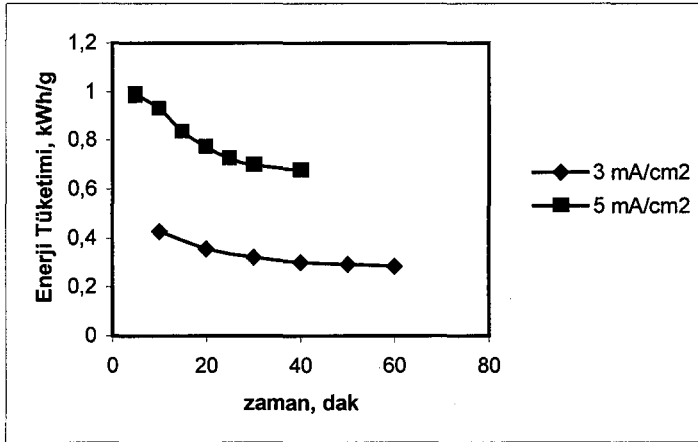
Şekil 6.123. pH'n akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



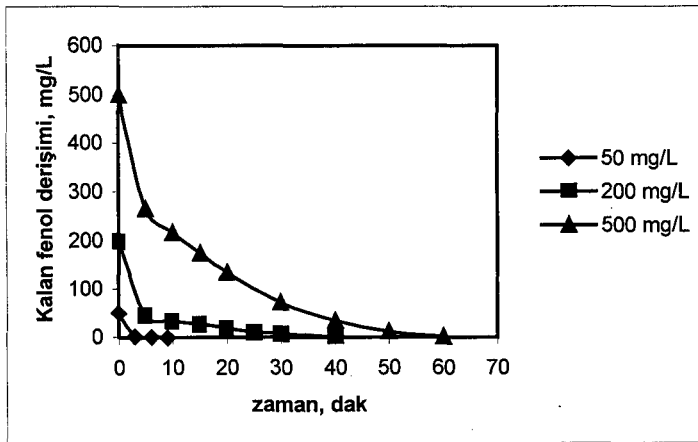
Şekil 6.124. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



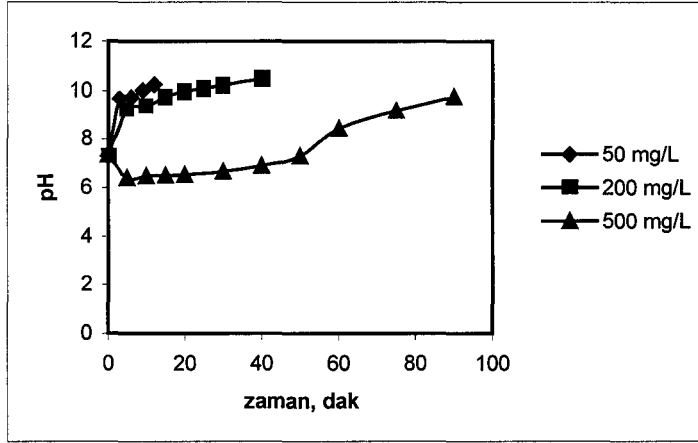
Şekil 6.125. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$, pH= doğal)



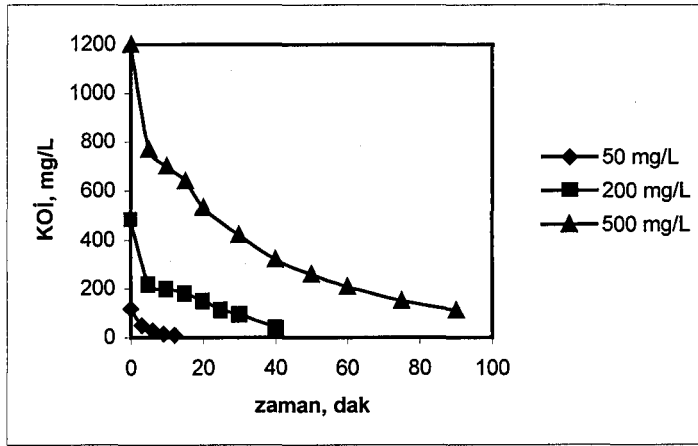
Şekil 6.126. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=24,83 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ C$, pH= doğal)



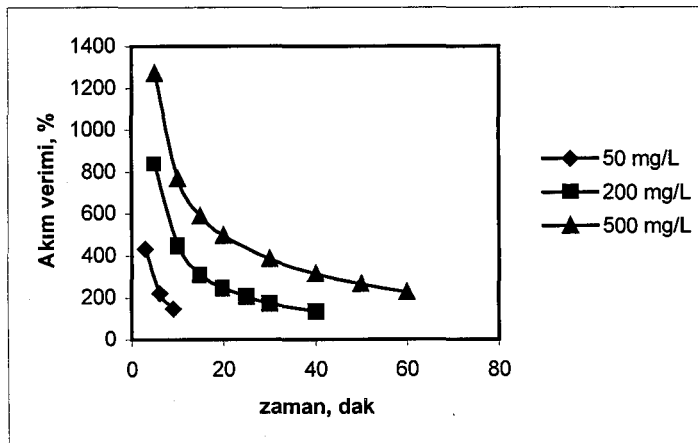
Şekil 6.127. Kalan fenol derişiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I=882$ mA, $i=5$ mA/cm², $t=20^\circ C$, pH= doğal)



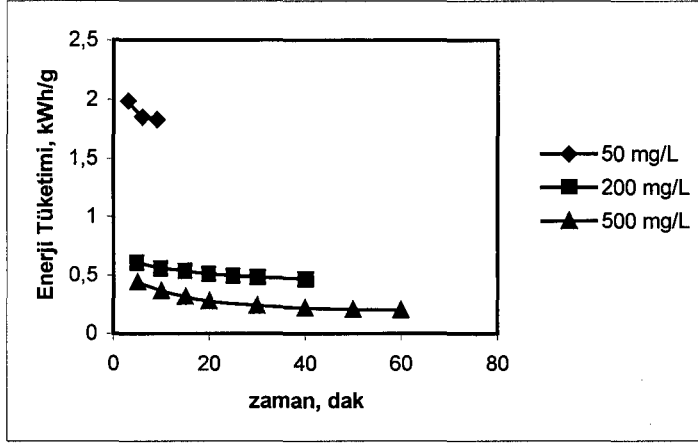
Şekil 6.128. pH'nin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal)



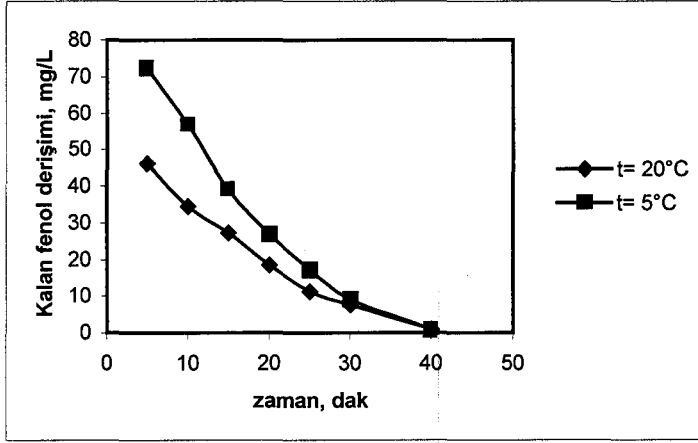
Şekil 6.129. KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal)



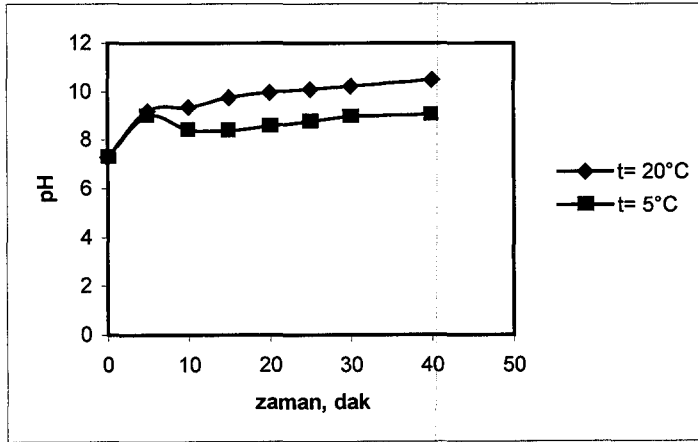
Şekil 6.130. Akım veriminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na₂SO₄, V=500mL, Q= 36,3x10⁻³ L/dak, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², t= 20°C, pH= doğal)



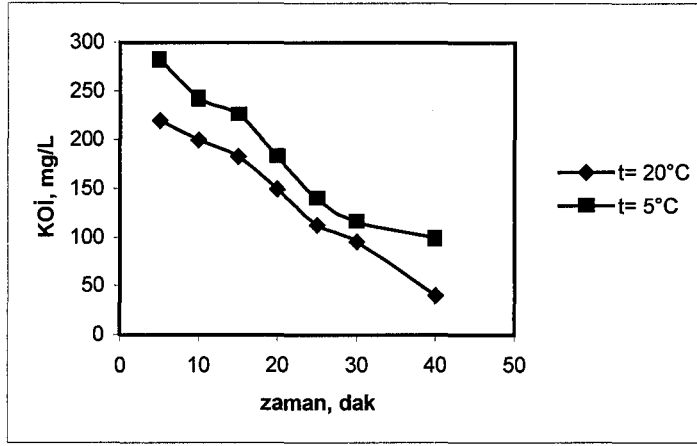
Şekil 6.131. Enerji tüketiminin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,05 M Na_2SO_4 , $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², $t= 20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



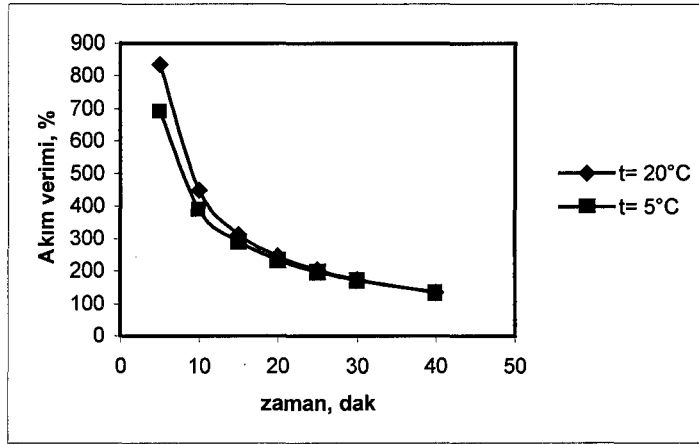
Şekil 6.132. Kalan fenol derişiminin sıcaklıkla değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², pH= doğal)



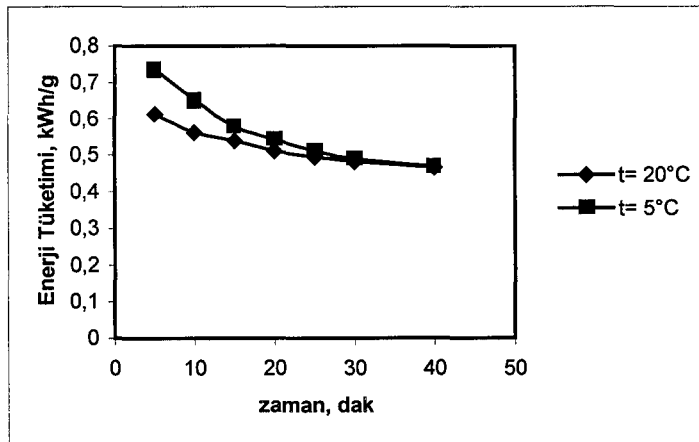
Şekil 6.133. pH'nin sıcaklıkla değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500\text{mL}$, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², pH= doğal)



Şekil 6.134. KOİ'nin sıcaklıkla değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², pH= doğal)



Şekil 6.135. Akım veriminin sıcaklıkla değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², pH= doğal)



Şekil 6.136. Enerji tüketiminin sıcaklıkla değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,05 M Na_2SO_4 , $V=500$ mL, $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $I= 882$ mA, $i= 5$ mA/cm², pH= doğal)

6.4. İndirekt Elektrokimyasal Yükseltgeme: RASHIG Halkası Şeklindeki Bor Katkılı Elmas Elektrotlar

RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotların kullanıldığı çalışmada fenolün indirekt elektrokimyasal yükseltgemesi çalışılmıştır. 200, 500 ve 1500 mg/L başlangıç fenol derişimlerine sahip çözeltilerin, tıkaç akım reaktörle elektrokimyasal giderimi araştırılmıştır. Kesikli geri döngülü çalıştırılan elektrokimyasal reaktörde, başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, NaCl derişimi, ve akış hızının giderim verimine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.68-81’de ve Şekil 6.137-161’de verilmiştir.

Çizelge 6.68. 200 mg/L fenol ve 0,03 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar ($I= 176$ mA, $i= 1$ mA/cm², $Q= 36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t= 20^\circ\text{C}$, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C_{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	194	7,36	200	480	-	-	-	-	-
10	193	8,64	174,1	430	352,5	0,25	12,93	10,41	0,602
20	196	8,52	150,8	390	335,1	0,45	24,61	18,75	0,321
30	198	8,37	128,9	330	322,5	0,75	35,53	31,25	0,225
40	199	7,91	104	253	326,6	1,13	47,97	47,22	0,167
50	201	7,30	77,3	236	334,0	1,22	61,32	50,69	0,132
60	201	6,86	54,3	180	330,5	1,50	72,85	62,5	0,111
75	202	6,54	32,4	156	304,1	1,62	83,77	67,36	0,097
90	199	6,35	19,1	113	273,5	1,83	90,44	76,39	0,089
105	199	6,11	9,10	90	247,4	1,95	95,45	81,25	0,084
120	197	6,07	3,94	70	222,4	2,05	98,03	85,41	0,081

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = $134,8 \times 10^{-6}$ m/s

Çizelge 6.69. 200 mg/L fenol ve 0,05 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	164	7,35	200	480	-	-	-	-	-
10	163	8,87	168,6	420	427,3	0,30	15,66	12,5	0,419
20	170	9,06	131,9	323	463,4	0,78	34,01	32,64	0,201
30	172	8,56	97,68	260	464,2	1,10	51,15	45,83	0,136
40	171	7,63	58,55	186	481,3	1,47	70,72	61,11	0,097
50	168	6,81	27,91	153	468,4	1,63	86,04	68,05	0,079
60	166	6,41	4,85	130	442,7	1,75	97,57	72,92	0,0687
75	167	6,30	1,51	83,3	360,2	1,98	99,24	82,64	0,0679
90	169	6,65	-	60	-	2,10	-	87,5	(0,033)*
105	169	6,80	-	50	-	2,15	-	89,58	(0,032)*
120	168	6,95	-	26,7	-	2,27	-	94,44	(0,030)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 167,7 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.70. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	150	7,38	200	480	-	-	-	-	-
10	148	9,15	167,5	416	442,3	0,32	16,27	13,19	0,367
20	149	8,78	123,5	303	520,6	0,88	38,26	36,81	0,157
30	150	8,09	77,7	200	554,8	1,40	61,17	58,33	0,099
40	152	7,38	42,17	173	537,0	1,53	78,91	63,89	0,078
50	151	6,78	13,95	136	506,4	1,72	93,02	71,53	0,065
60	152	6,48	1,52	116	450,2	1,82	99,24	75,69	0,062
75	152	6,55	-	66,7	-	2,07	-	86,11	(0,030)*
90	153	7,05	-	46,7	-	2,17	-	90,28	(0,029)*
105	155	7,30	-	33,3	-	2,23	-	93,05	(0,028)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 167,5 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.71. 200 mg/L fenol ve 0,03 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	280	7,35	200	480	-	-	-	-	-
5	266	8,12	136,2	336	576,7	0,72	31,89	29,86	1,013
10	269	8,15	108,9	273	411,7	1,03	45,54	43,05	0,718
15	270	7,50	82,2	216	354,9	1,32	58,89	54,86	0,557
20	271	7,13	62,19	186	311,4	1,47	68,90	61,11	0,478
30	272	6,54	28,21	146	258,8	1,67	85,89	69,44	0,385
40	267	6,32	10,01	123	214,7	1,78	94,99	74,30	0,342
50	268	6,05	8,19	86,7	173,4	1,97	95,90	81,94	0,339
60	269	5,84	0,91	66,7	149,9	2,07	99,54	86,11	0,328
70	270	5,76	-	63,3	-	2,08	-	86,80	(0,158)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 185,1 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimi kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.72. 200 mg/L fenol ve 0,05 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	245	7,30	200	480	-	-	-	-	-
5	243	8,62	114,1	303	776,5	0,88	42,96	36,80	0,688
10	247	8,50	85,24	223	518,7	1,28	57,37	53,47	0,523
15	240	7,70	49,14	173	454,5	1,53	75,43	63,89	0,387
20	244	7,35	32,46	156	378,6	1,62	83,77	67,36	0,354
30	243	6,41	1,82	106	298,5	1,87	99,09	77,78	0,298
40	243	6,44	0,61	76,7	225,3	2,02	99,69	84,03	0,296
50	245	6,02	-	46,7	-	2,17	-	90,28	(0,137)*
60	245	6,60	-	33,3	-	2,23	-	93,05	(0,133)*
70	246	6,89	-	23,3	-	2,28	-	95,14	(0,131)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 198,8 x10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.73. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	221	7,35	200	480	-	-	-	-	-
5	217	7,85	89,49	240	998,9	1,20	55,25	50	0,477
10	220	7,51	54,60	216	657,1	1,32	72,69	54,86	0,368
15	219	6,93	16,38	163	553,2	1,58	91,81	65,97	0,290
20	216	6,77	1,21	140	449,2	1,70	99,39	70,83	0,264
25	215	6,69	-	113	-	1,83	-	76,39	(0,142)*
30	217	6,49	-	80	-	2,00	-	83,33	(0,132)*
40	217	6,73	-	66,7	-	2,07	-	86,11	(0,128)*
50	218	7,40	-	33,3	-	2,23	-	93,05	(0,119)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 175,3 x10⁻⁶ m/s
 * Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.74. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= 3)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	224	2,94	200	480	-	-	-	-	-
5	218	3,35	97,99	260	922,1	1,10	51,00	45,83	0,519
10	219	4,20	47,93	220	687,3	1,30	76,03	54,17	0,350
15	220	4,79	11,53	186	567,9	1,47	94,23	61,11	0,284
20	219	4,87	1,52	133	448,5	1,73	99,24	72,22	0,268
25	218	4,84	-	106	-	1,87	-	77,78	(0,142)*
30	217	5,14	-	76,7	-	2,02	-	84,03	(0,131)*
40	218	6,31	-	60	-	2,10	-	87,5	(0,126)*
50	221	7,05	-	43,3	-	2,18	-	90,97	(0,123)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 167,5 x10⁻⁶ m/s
 * Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.75. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= 11)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	225	11,07	200	480	-	-	-	-	-
5	221	10,98	85,25	290	1037	0,95	57,37	39,58	0,468
10	220	10,85	52,18	206	668,1	1,37	73,91	56,94	0,362
15	220	10,55	20,63	173	540,4	1,53	89,68	63,89	0,298
20	221	10,25	6,07	156	438,2	1,62	96,96	67,36	0,277
25	219	9,84	0,30	113	361,0	1,83	99,85	76,39	0,266
30	219	9,62	-	86,7	-	1,97	-	81,94	(0,135)*
40	221	9,02	-	46,7	-	2,17	-	90,28	(0,124)*
50	221	8,74	-	23,3	-	2,28	-	95,14	(0,118)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 223,2 x 10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.76. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	225	7,35	200	480	-	-	-	-	-
5	219	7,15	40,95	200	1437	1,40	79,52	58,33	0,490
10	222	6,92	10,62	173	855,9	1,53	94,69	63,89	0,417
15	220	6,79	1,52	126	598,0	1,77	99,24	73,61	0,394
20	220	6,71	-	110	-	1,85	-	77,08	(0,211)*
25	221	6,80	-	86,7	-	1,97	-	81,94	(0,200)*
30	220	6,93	-	73,3	-	2,03	-	84,72	(0,192)*
40	220	6,98	-	46,7	-	2,17	-	90,28	(0,181)*
50	219	7,27	-	16,7	-	2,32	-	96,53	(0,168)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 114,5 x 10⁻⁶ m/s
* Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.77. 200 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 47,8x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	234	7,40	200	480	-	-	-	-	-
5	224	8,98	120,1	313	722,2	0,83	39,93	34,72	0,518
10	226	8,75	70,67	223	584,5	1,28	64,66	53,47	0,323
15	226	7,78	30,64	180	510,3	1,50	84,68	62,5	0,246
20	225	7,04	5,76	146	438,9	1,67	97,12	69,44	0,214
25	224	6,69	1,82	113	358,3	1,83	99,09	76,39	0,209
30	223	6,54	-	76,7	-	2,02	-	84,03	(0,102)*
40	221	7,24	-	50	-	2,15	-	89,58	(0,095)*
50	221	7,69	-	33,3	-	2,23	-	93,05	(0,091)*

KOİ giriş = 480 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 212,3 x10⁻⁶ m/s
 * Enerji tüketimleri kWh(KOİ)⁻¹ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 6.78. 500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	230	7,34	500	1200	-	-	-	-	-
5	222	8,03	339	830	1455	0,74	32,19	30,83	0,490
10	226	8,06	302,6	780	892,2	0,84	39,47	35,00	0,407
15	223	7,87	258	700	729,2	1,00	48,43	41,67	0,328
20	226	7,57	200,9	560	675,9	1,28	59,80	53,33	0,269
25	233	7,32	160	500	614,6	1,40	67,99	58,33	0,244
30	228	7,10	128,9	390	559,1	1,62	74,21	67,50	0,218
40	227	6,80	72,81	320	482,7	1,76	85,44	73,33	0,189
50	229	6,61	43,23	240	412,9	1,92	91,35	80,00	0,178
60	225	6,47	23,51	200	358,9	2,00	95,29	83,33	0,168
75	222	6,31	17,44	150	290,8	2,10	96,51	87,50	0,163
90	220	6,30	11,37	110	245,4	2,18	97,72	90,83	0,160
105	219	6,53	7,58	80	211,9	2,24	98,48	93,33	0,158

KOİ giriş = 1200 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 98,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.79. 500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	280	7,33	500	1200	-	-	-	-	-
5	273	6,63	199,4	550	1633	1,30	60,11	54,17	0,537
10	274	6,62	156,2	440	933,7	1,52	68,75	63,33	0,472
15	276	6,57	118,3	370	691,1	1,66	76,34	69,17	0,428
20	273	6,60	83,42	310	565,7	1,78	83,31	74,17	0,388
25	276	6,50	62,19	240	475,6	1,92	87,56	80,00	0,373
30	272	6,47	43,23	230	413,5	1,94	91,35	80,83	0,352
40	260	6,33	23,51	170	323,5	2,06	95,29	85,83	0,323
50	258	6,35	12,13	140	265,0	2,12	97,57	88,33	0,313
60	260	6,40	6,82	50	223,2	2,30	98,63	95,83	0,312

KOİ giriş = 1200 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 100,7 x10⁻⁶ m/s

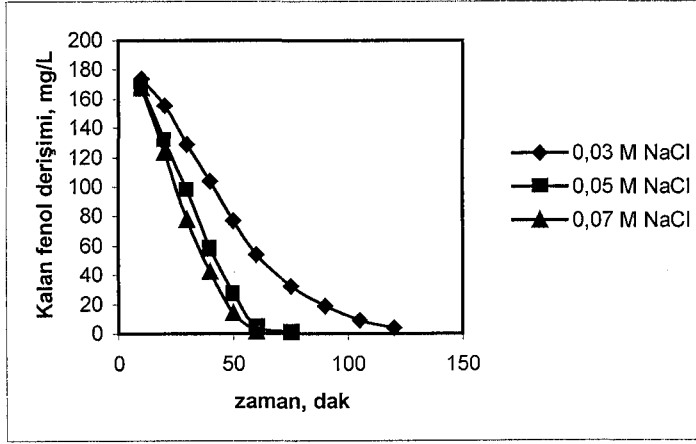
Çizelge 6.80. 1500 mg/L fenol ve 0,07 M NaCl içeren çözelti ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	EOD (g O ₂ / g fenol)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
							Fenol	KOİ	
0	288	7,28	1500	3600	-	-	-	-	-
5	282	6,85	1018	2540	2618	0,71	32,12	29,44	0,346
10	283	6,81	885	2200	1670	0,93	40,97	38,90	0,272
20	284	6,77	675	1780	1120	1,21	55,00	50,50	0,204
30	288	6,51	496	1380	908,9	1,48	66,88	61,67	0,170
40	289	6,52	360	1140	774,0	1,64	75,98	68,33	0,150
50	284	6,33	282,5	1060	661,3	1,69	81,16	70,56	0,138
60	280	5,95	199	920	588,9	1,79	86,73	74,44	0,127
75	275	5,12	121,3	660	499,2	1,96	91,91	81,67	0,118
90	275	4,18	77,7	540	429,2	2,04	94,82	85	0,114
105	265	3,80	41,7	440	377,2	2,11	97,22	87,78	0,107
120	273	3,67	24,6	400	333,9	2,13	98,35	88,89	0,109
150	271	3,77	17,07	240	268,5	2,24	98,86	93,33	0,108
180	272	3,86	11,37	80	224,6	2,35	99,24	97,78	0,108

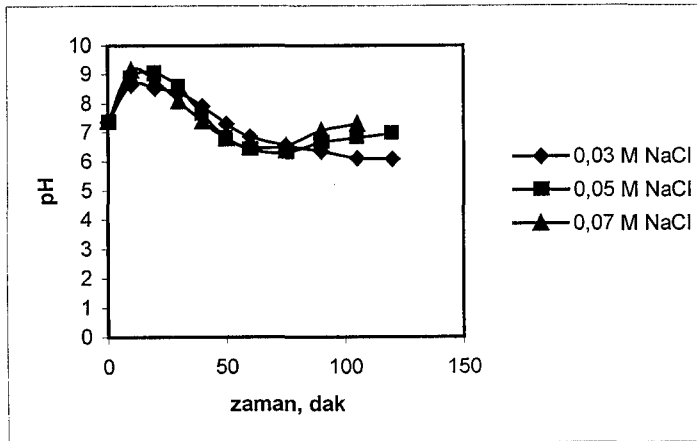
KOİ giriş = 3600 mgO₂/L, V= 500mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 114,5 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.81. Kütle aktarım katsayısının deneysel çalışma parametreleri ile değişimi

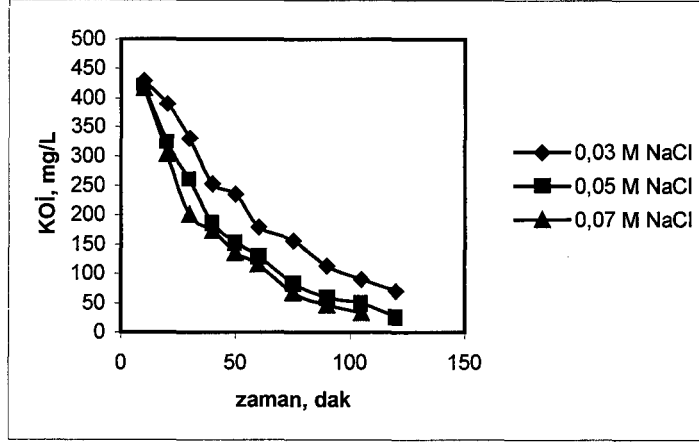
Parametre		Değer	Kütle aktarım katsayısı ($k_m, 10^{-6} \text{ m/s}$)
Akım yoğunluğu (mA/cm^2)		1	167,5
		3	175,3
pH		3	167,5
		11	223,2
		doğal	175,3
Destek elektrolit ($\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{M}$)	$i=1\text{mA/cm}^2$	0,03	134,8
		0,05	167,7
		0,07	167,5
	$i=3\text{mA/cm}^2$	0,03	185,1
		0,05	198,8
		0,07	175,3
Akış hızı (10^{-3} L/dak)		24,83	114,5
		36,3	175,3
		47,8	212,3



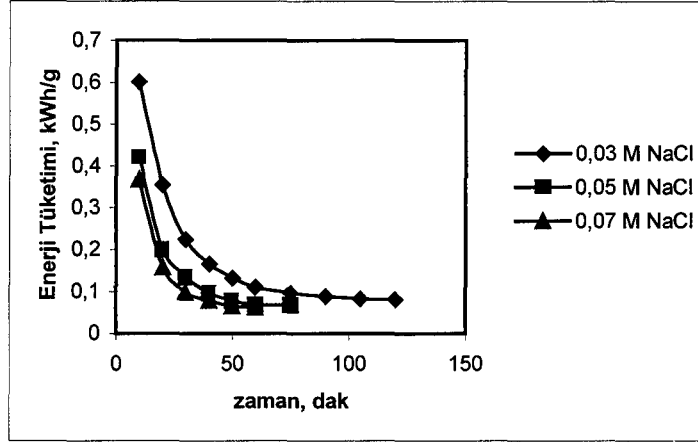
Şekil 6.137. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağı olarak zamanla değışimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=176 \text{ mA}$, $i=1 \text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



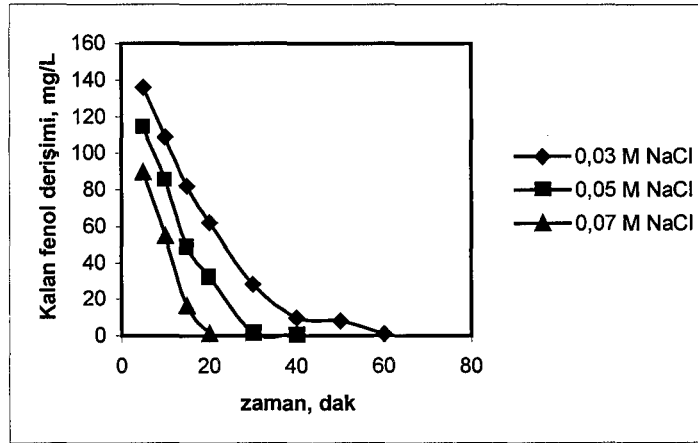
Şekil 6.138. pH'nin destek elektrolit derişimine bağı olarak zamanla değışimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=176 \text{ mA}$, $i=1 \text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



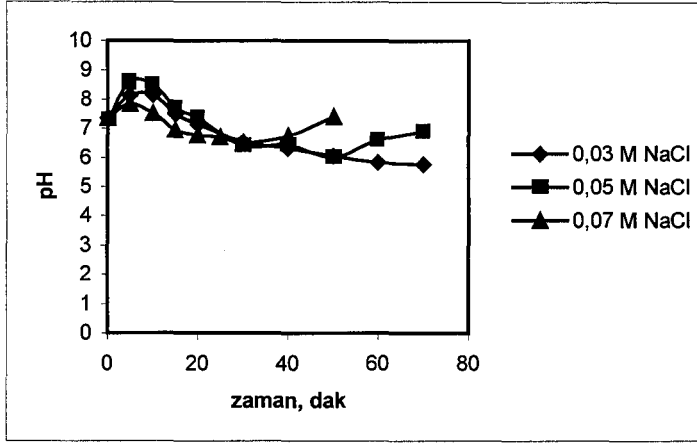
Şekil 6.139. KOİ'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=176\text{ mA}$, $i=1\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



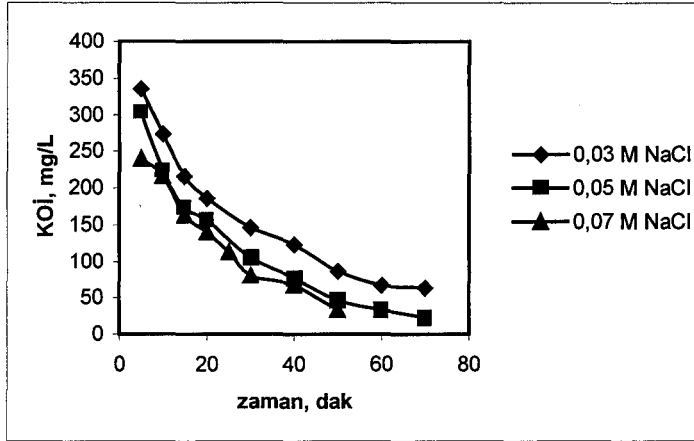
Şekil 6.140. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=176\text{ mA}$, $i=1\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



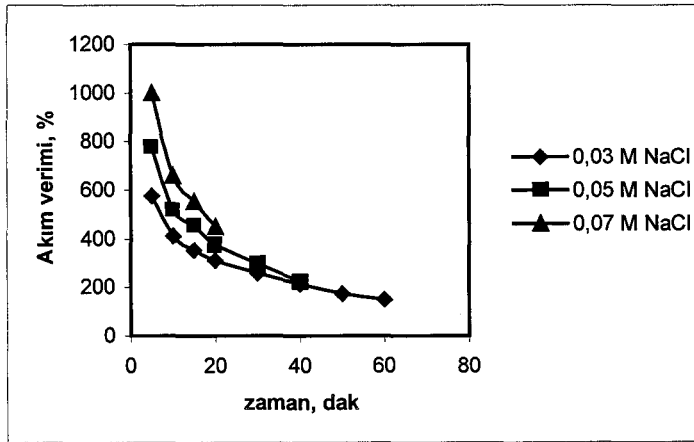
Şekil 6.141. Kalan fenol derişiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



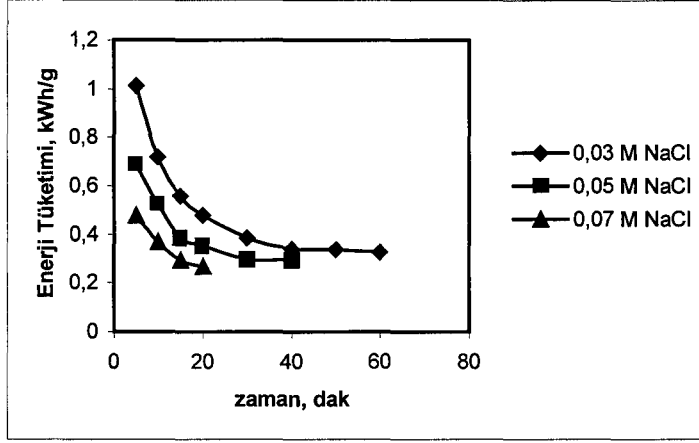
Şekil 6.142. pH'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



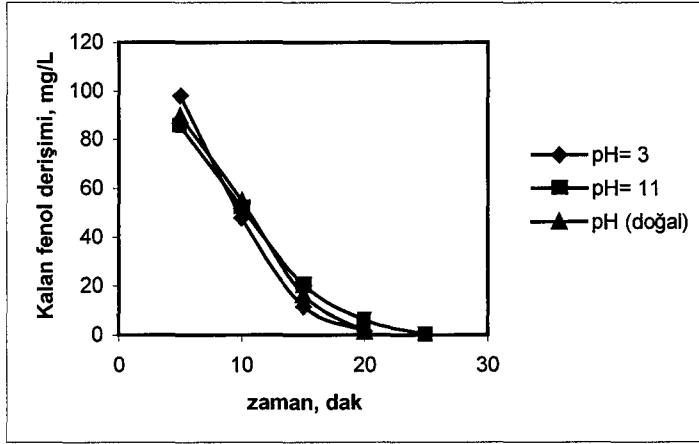
Şekil 6.143. KOİ'nin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



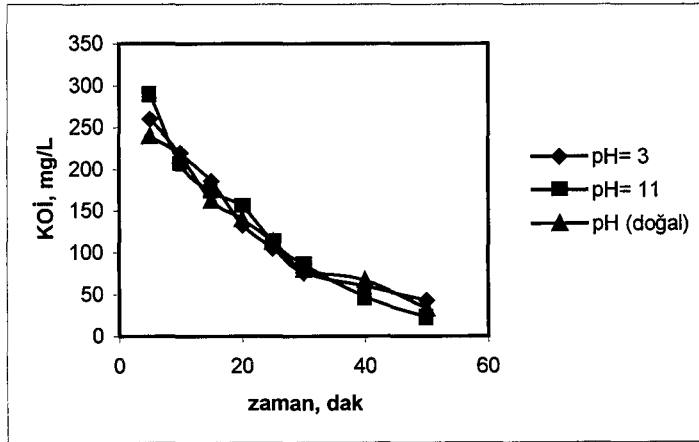
Şekil 6.144. Akım veriminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



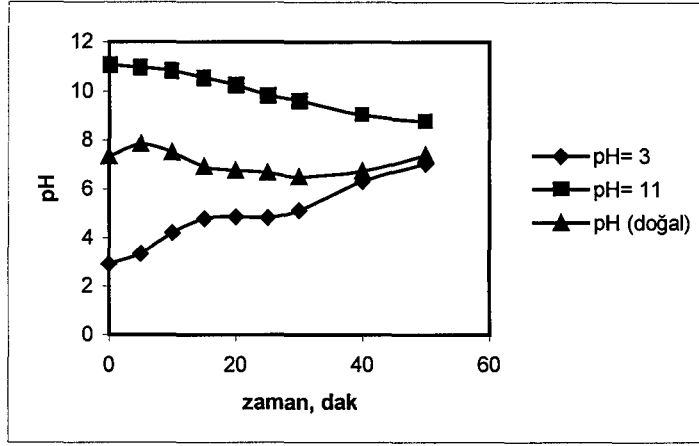
Şekil 6.145. Enerji tüketiminin destek elektrolit derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{mg/L}$, $V=500\text{mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



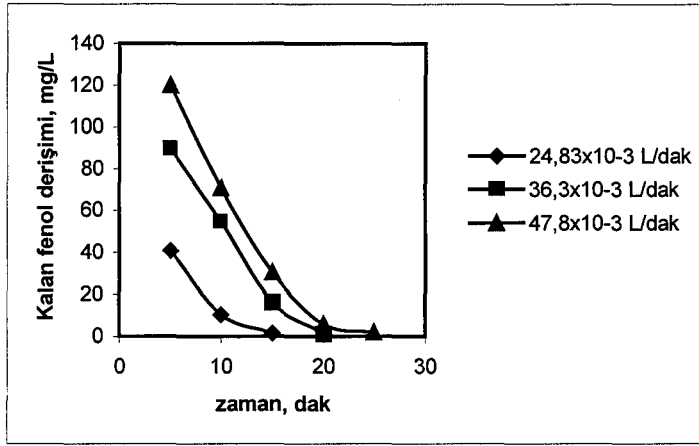
Şekil 6.146. Kalan fenol derişiminin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{ mg/L}+0,07\text{ M NaCl}$, $V=500\text{ mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



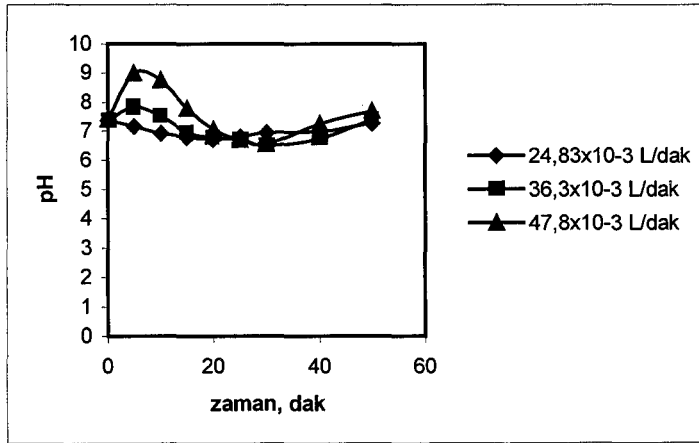
Şekil 6.147. KOİ'nin başlangıç pH'ına bağlı olarak zamanla değişimi ($C_o=200\text{ mg/L}+0,07\text{ M NaCl}$, $V=500\text{ mL}$, $I=530\text{ mA}$, $i=3\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



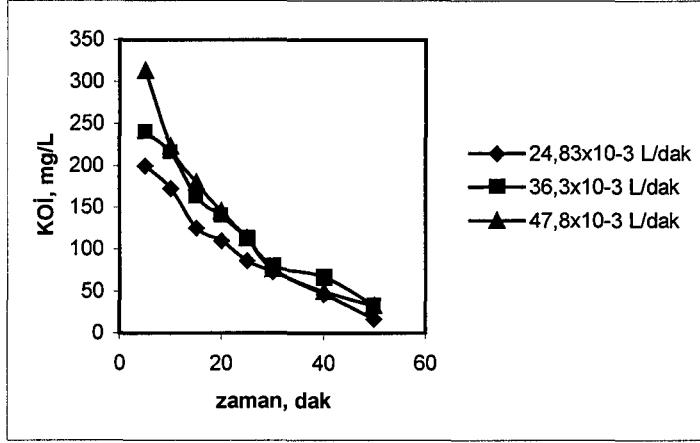
Şekil 6.148. pH'nin başlangıç pH'na bağlı olarak zamanla değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,07 \text{ M NaCl}$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 530 \text{ mA}$, $i = 3 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$)



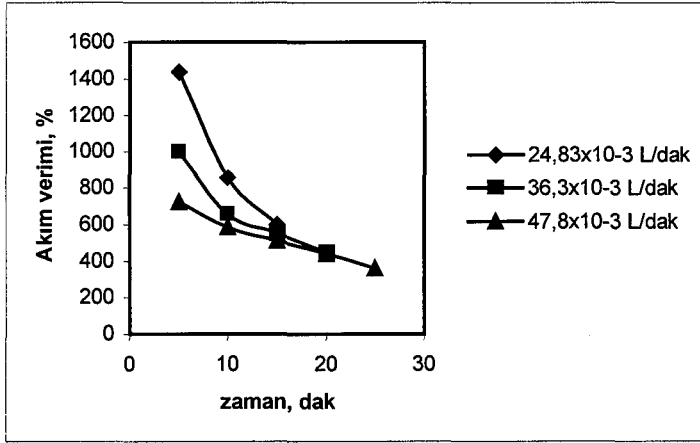
Şekil 6.149. Kalan fenol derişiminin akış hızı ile değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,07 \text{ M NaCl}$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 530 \text{ mA}$, $i = 3 \text{ mA/cm}^2$, $t = 20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



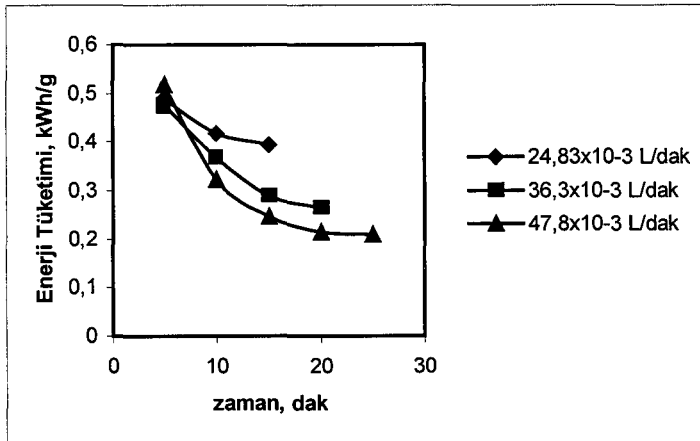
Şekil 6.150. pH'nin akış hızı ile değişimi ($C_0 = 200 \text{ mg/L} + 0,07 \text{ M NaCl}$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 530 \text{ mA}$, $i = 3 \text{ mA/cm}^2$, $t = 20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



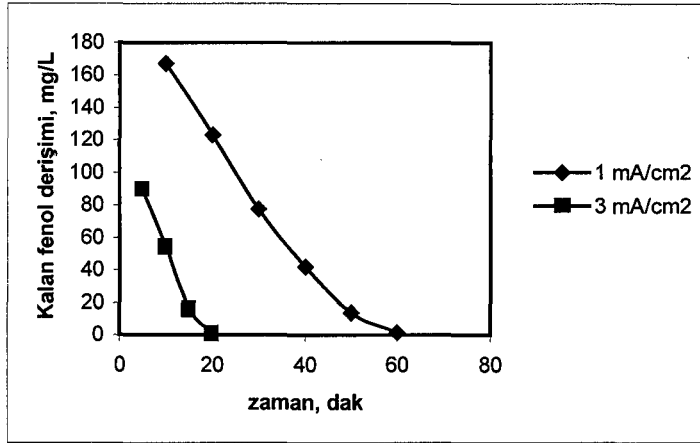
Şekil 6.151. KOİ'nin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $I=530$ mA, $i=3$ mA/cm², $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



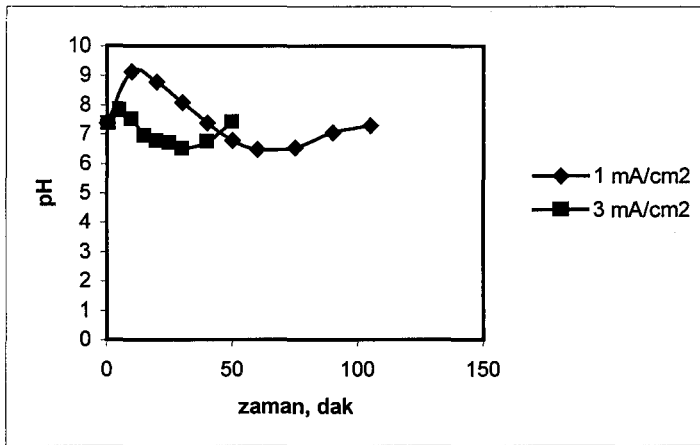
Şekil 6.152. Akım veriminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $I=530$ mA, $i=3$ mA/cm², $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



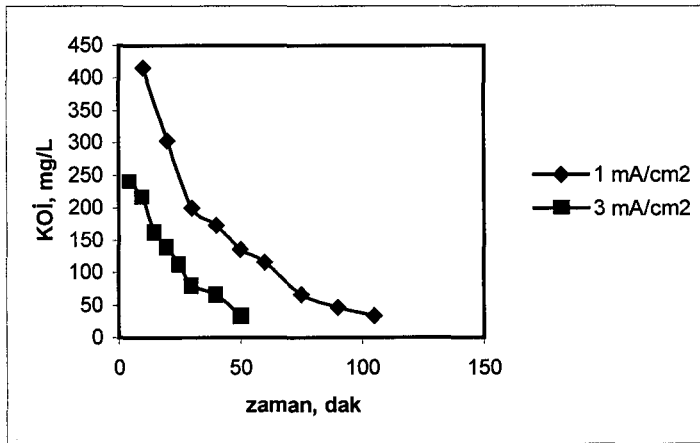
Şekil 6.153. Enerji tüketiminin akış hızı ile değişimi ($C_0=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $I=530$ mA, $i=3$ mA/cm², $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



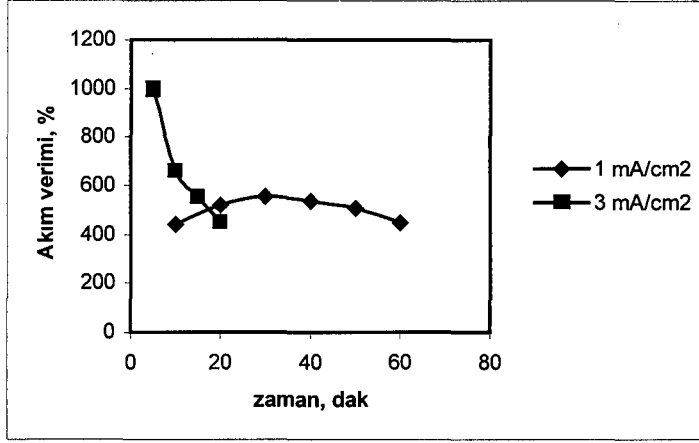
Şekil 6.154. Kalan fenol derişiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



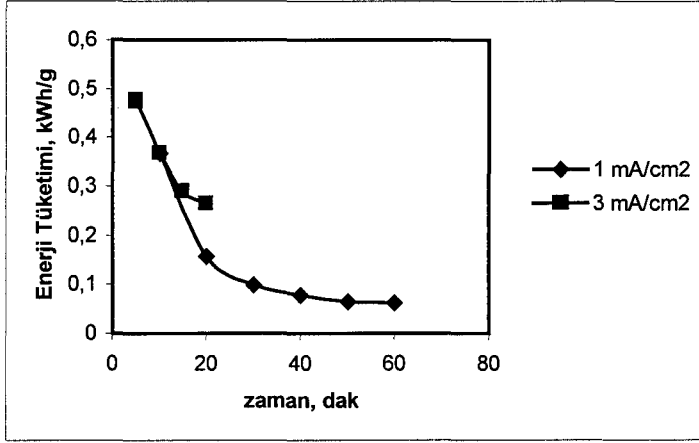
Şekil 6.155. pH'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



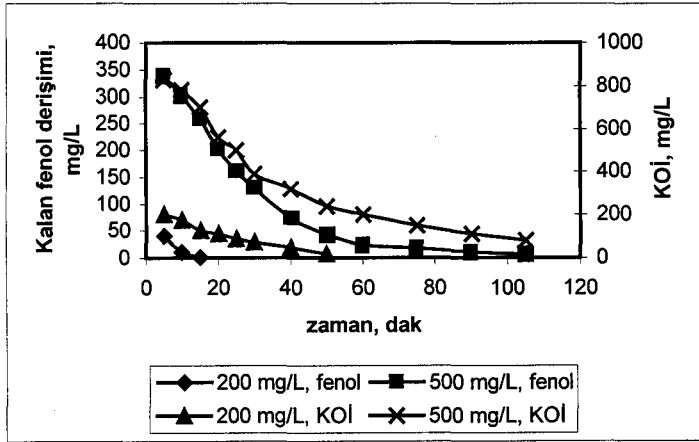
Şekil 6.156. KOİ'nin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o=200$ mg/L +0,07 M NaCl, $V=500$ mL, $Q=36,3 \times 10^{-3}$ L/dak, $t=20^\circ\text{C}$, pH= doğal)



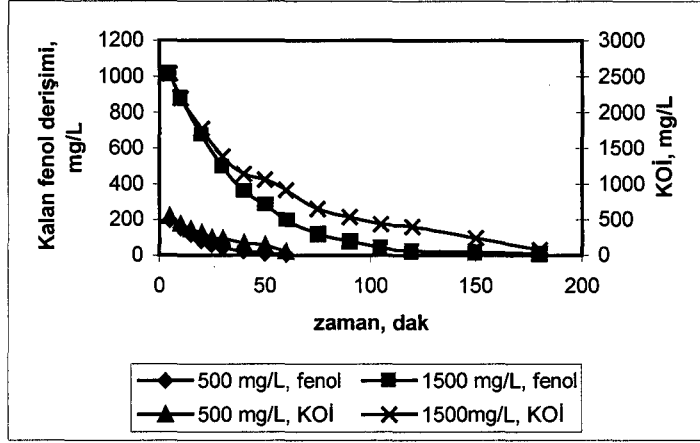
Şekil 6.157. Akım veriminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o = 200 \text{ mg/L} + 0,07 \text{ M NaCl}$, $V = 500 \text{ mL}$, $Q = 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$, $\text{pH} = \text{doğal}$)



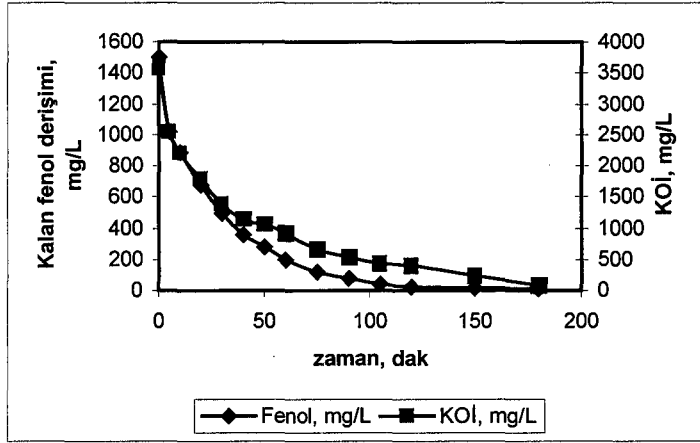
Şekil 6.158. Enerji tüketiminin akım yoğunluğu ile değişimi ($C_o = 200 \text{ mg/L} + 0,07 \text{ M NaCl}$, $V = 500 \text{ mL}$, $Q = 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$, $\text{pH} = \text{doğal}$)



Şekil 6.159. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi ($0,07 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, $V = 500 \text{ mL}$, $I = 530 \text{ mA}$, $i = 3 \text{ mA/cm}^2$, $Q = 36,3 \times 10^{-3} \text{ L/dak}$, $t = 20^\circ\text{C}$, $\text{pH} = \text{doğal}$)



Şekil 6.160. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin başlangıç fenol derişimine bağlı olarak zamanla değişimi (0,07 M Na₂SO₄, V=500mL, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)



Şekil 6.161. Kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (C₀= 1500 mg/L 0,07 M Na₂SO₄, V=500mL, I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C, pH= doğal)

6.5. Kimyasal Yükseltgeme: Fenton Ajanı

Kimyasal yükseltgeme çalışmalarında, farklı H₂O₂ ve FeSO₄ derişimlerinin, 200 ve 500 mg/L fenol içeren çözeltilerden, fenol ve KOİ giderimine etkisi araştırılmıştır. 1 dakika hızlı, 10 dakika yavaş karıştırma sonrası çözeltiler 25 dakika beklemeye bırakılmış ve daha sonra alınan örneklerde fenol ve KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir. Fenton ajanı ile kimyasal yükseltgeme çalışmalarında elde edilen veriler Çizelge 6.82-83'de ve Şekil 6.162-165'de verilmiştir.

Çizelge 6.82. 200 mg/L fenol başlangıç derişiminde gerçekleştirilen çalışmalar (V= 500 mL)

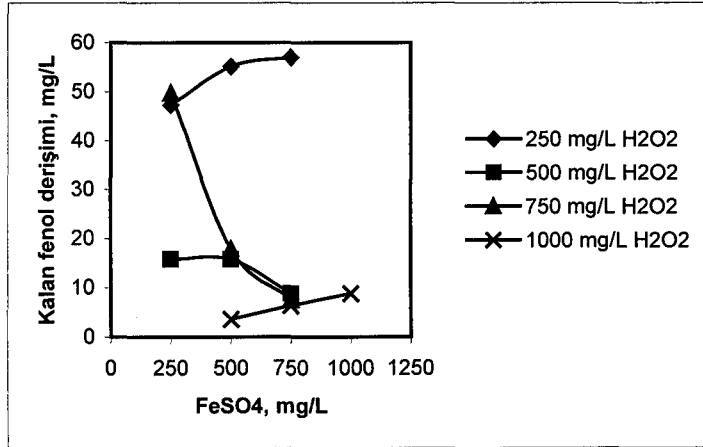
H ₂ O ₂ (mg/L)	FeSO ₄ (mg/L)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Giderim (%)	
					Fenol	KOİ
250	250	2,83	47,32	346,7	76,34	27,78
	500	2,82	55,21	380	72,39	20,83
	750	2,78	57,03	376,7	71,48	21,53
500	250	2,67	15,77	296,7	92,11	38,19
	500	2,70	15,77	300	92,11	37,5
	750	2,48	8,80	250	95,60	47,92
750	250	3,14	49,75	363,3	75,12	24,30
	500	2,84	17,90	300	91,05	37,5
	750	2,22	7,58	226,7	96,21	52,78
1000	250	2,19	3,64	140	98,18	70,83
	500	2,21	6,37	170	96,81	64,58
	750	2,26	8,80	173,3	95,60	63,89

KOİ giriş = 480 mg/L

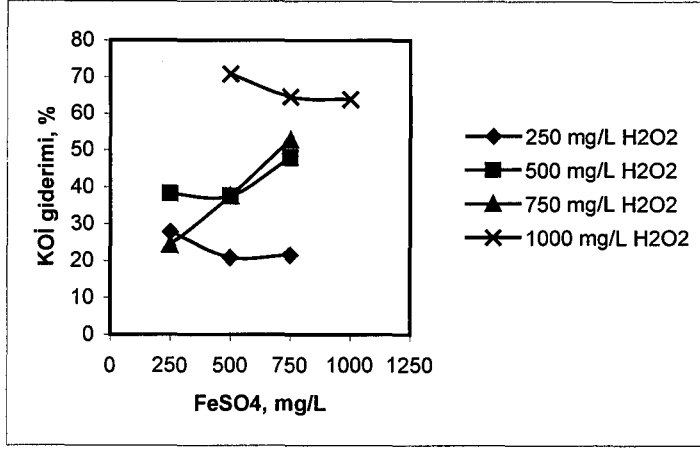
Çizelge 6.83. 500 mg/L fenol başlangıç derişiminde gerçekleştirilen çalışmalar (V= 500 mL)

H ₂ O ₂ (mg/L)	FeSO ₄ (mg/L)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Giderim (%)	
					Fenol	KOİ
1000	500	2,49	65,98	760	86,80	36,67
	750	2,68	62,95	750	87,41	37,5
	1000	2,70	64,47	730	87,11	39,17
1250	750	2,46	39,44	680	92,11	43,33
	1000	2,67	37,16	680	92,57	43,33
	1250	2,66	46,26	680	90,75	43,33
1500	1000	2,41	25,79	600	94,84	50
	1250	2,38	25,03	590	94,99	50,83
	1500	2,43	28,82	600	94,23	50
2000	1000	2,32	18,96	470	96,21	60,83
	1500	2,31	17,44	450	96,51	62,5
	2000	2,35	21,23	490	95,75	59,17

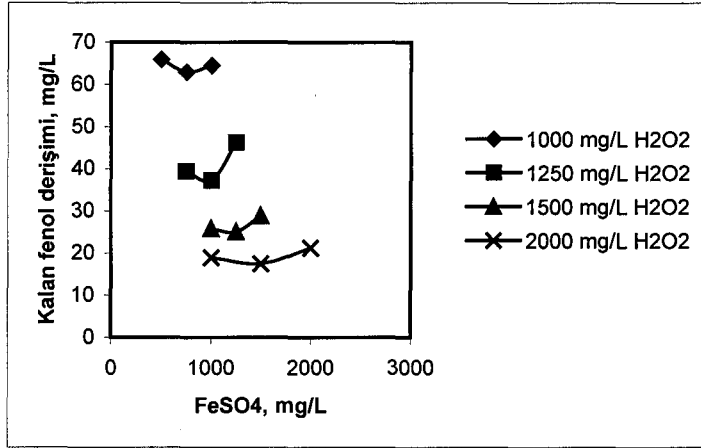
KOİ giriş = 1200 mg/L



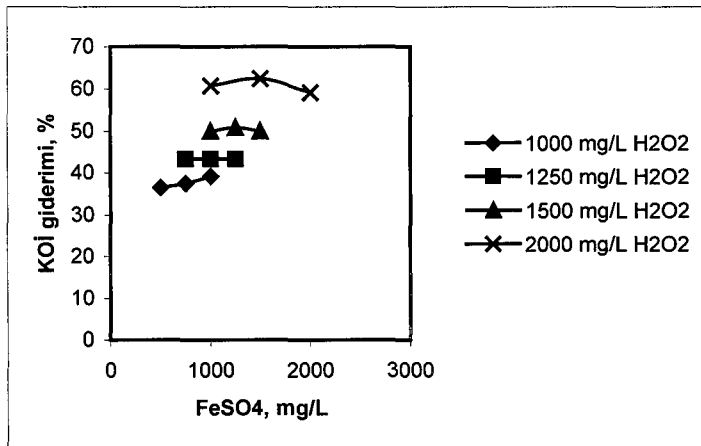
Şekil 6.162. 200 mg/L fenol başlangıç derişimi için kalan fenol derişiminin ilave edilen H₂O₂ ve FeSO₄ ile değişimi



Şekil 6.163. 200 mg/L fenol başlangıç derişimi için KOI'nin ilave edilen H₂O₂ ve FeSO₄ ile değişimi



Şekil 6.164. 500 mg/L fenol başlangıç derişimi için kalan fenol derişiminin ilave edilen H₂O₂ ve FeSO₄ ile değişimi



Şekil 6.165. 500 mg/L fenol başlangıç derişimi için KOI'nin ilave edilen H₂O₂ ve FeSO₄ ile değişimi

6.6. Petrol Rafinerisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen optimum şartlarda petrol rafinerisi atıksuyunun, paralel plaka rutenyum oksit elektrotlarda direkt elektrokimyasal yükseltgenmesi, RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlarda direkt ve indirekt elektrokimyasal yükseltgenmesi, ve RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotlarda elektrokoagülasyonu araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan petrol rafinerisi atıksuyunun fenol derişimi 192,9 mg/L, KOİ'si 590 mg/L, elektriksel iletkenliği 15,63 mS/cm'dir. Atıksu, H₂SO₄ ile korunmaya alındığı için deneysel çalışmalar sırasındaki pH'ı 1,5-2,0 civarındadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları Çizelge 6.84-88'de ve Şekil 6.166-174'de verilmiştir.

Çizelge 6.84. Paralel plaka rutenyum oksit elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 7200 mA, i= 20 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
						Fenol	KOİ	
0	7,4	1,56	192,9	590	-	-	-	-
15	6,9	1,60	136,5	503	7,51	29,23	14,69	0,591
30	6,7	1,62	98,59	476	6,28	48,89	19,21	0,343
60	6,6	1,40	27,30	383	5,51	85,84	35,03	0,193
90	7,0	1,40	23,36	350	3,76	87,89	40,68	0,199
120	7,0	1,43	19,72	333	2,88	89,78	43,50	0,195
150	6,9	1,58	16,99	313	2,34	91,19	46,89	0,189
180	6,9	1,48	14,26	283	1,98	92,61	51,98	0,187
210	6,9	1,46	10,62	260	1,73	94,49	55,93	0,183
240	6,9	1,46	-	236	-	-	59,89	
270	6,8	1,43	-	196	-	-	66,67	
300	6,8	1,40	-	176	-	-	70,06	

KOİ giriş= 590mgO₂/L, V= 300mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 33,3 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.85. Demir elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
						Fenol	KOİ	
0	299	1,55	192,9	590	-	-	-	-
5	299	1,70	189,6	586	53,89	1,71	0,56	7,322
10	300	1,93	188,1	586	39,20	2,49	0,56	5,051
20	300	4,24	187,5	586	22,05	2,81	0,56	4,489
30	301	5,27	186,0	583	18,78	3,43	1,13	3,525
40	301	6,04	184,7	583	16,74	4,22	1,13	2,966
60	300	6,23	182,9	583	13,61	5,16	1,13	2,424
75	301	5,96	181,4	580	12,52	5,95	1,69	2,115
90	300	5,68	181,1	580	10,71	6,11	1,69	2,054
120	300	5,20	180,8	576	8,23	6,27	2,26	2,003

KOİ giriş= 590 mgO₂/L, V=300mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 2,23 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.86. Demir elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (1000mg/L H₂O₂, I= 176 mA, i= 1 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
						Fenol	KOİ	
0	179	1,55	192,9	590	-	-	-	-
3	168	1,85	9,71	253	4986	94,97	57,06	0,074
6	164	2,01	2,43	170	2592	98,74	71,18	0,069
9	167	2,41	-	143	-	-	75,71	

KOİ giriş= 590 mgO₂/L, V=300mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 150 x10⁻⁶ m/s

Çizelge 6.87. Elmas elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (I= 882 mA, i= 5 mA/cm², Q= 36,3x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

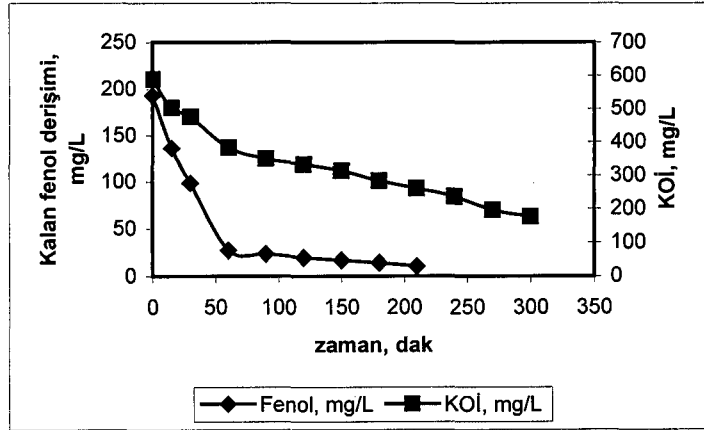
Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
						Fenol	KOİ	
0	285	1,56	192,9	590	-	-	-	-
5	285	1,52	70,1	296	400,2	63,67	49,72	0,939
10	284	1,39	38,8	266	251,1	79,87	54,80	0,746
15	283	1,23	11,5	176	197,1	94,02	70,06	0,631
20	280	1,20	4,55	126	153,4	97,64	78,53	0,601
30	270	1,22	2,73	103	103,3	98,58	82,48	0,574
40	265	1,20	0,91	60	78,21	99,53	89,83	0,558
50	260	1,07	-	50	-	-	91,52	
60	250	1,08	-	36,7	-	-	93,78	
75	247	1,06	-	23,3	-	-	96,04	

KOİ giriş=590 mgO₂/L, V=300mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m)= 184,1 x10⁻⁶ m/s

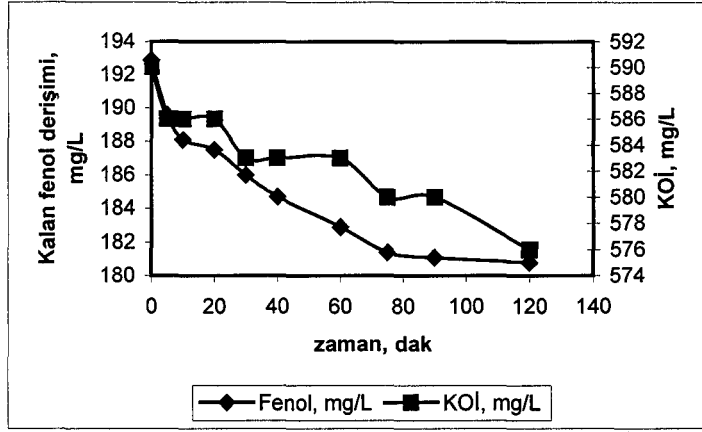
Çizelge 6.88. Elmas elektrotlar kullanılarak petrol rafinerisi atıksuyu ile yapılan çalışmalar (0,05 M NaCl, I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)

Zaman (dak)	Gerilim (V)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Akım verimi (%)	Giderim (%)		Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
						Fenol	KOİ	
0	189	1,56	192,9	590	-	-	-	-
5	185	1,70	89,19	263	562,5	53,76	55,37	0,634
10	184	1,59	43,23	193	405,9	77,59	67,23	0,437
15	189	1,59	19,42	170	313,6	89,93	71,18	0,387
20	188	1,60	15,47	143	240,6	91,98	75,71	0,377
25	185	1,60	12,44	126	195,7	93,55	78,53	0,365
30	182	1,62	7,58	106	167,5	96,07	81,92	0,349
40	179	1,51	5,46	96,7	127,1	97,17	83,62	0,340
50	180	1,46	4,25	83,3	102,3	97,80	85,87	0,339
60	176	1,43	2,12	63,3	86,22	98,90	89,26	0,328
75	174	1,43	-	43,3	-	-	92,65	
90	173	1,41	-	26,7	-	-	95,48	

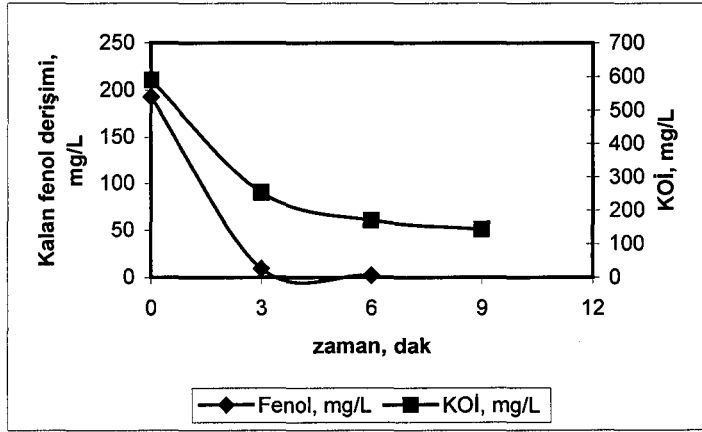
KOİ giriş= 590 mgO₂/L, V=300mL, Kütle aktarım katsayısı (k_m) = 155 x10⁻⁶ m/s



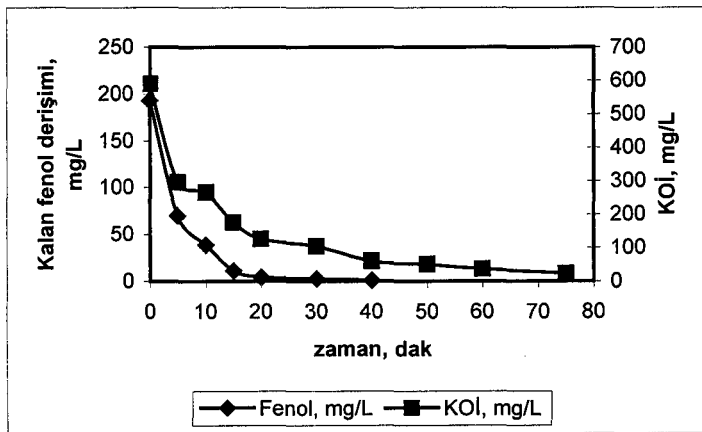
Şekil 6.166. Paralel plaka rutenyum oksit elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (I= 7200 mA, i= 20 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)



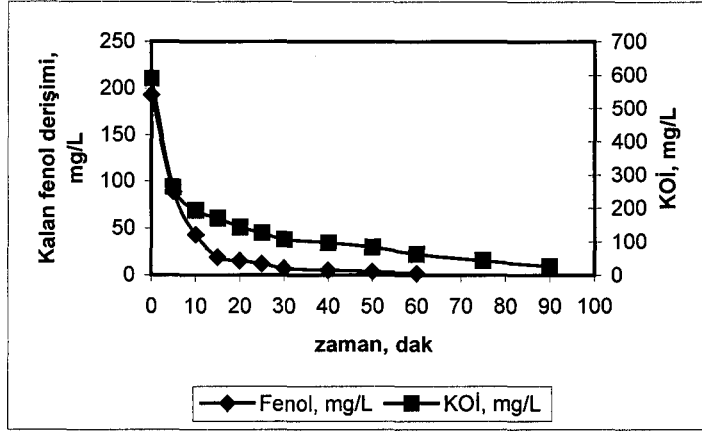
Şekil 6.167. Demir elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi ($I=176\text{ mA}$, $i=1\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



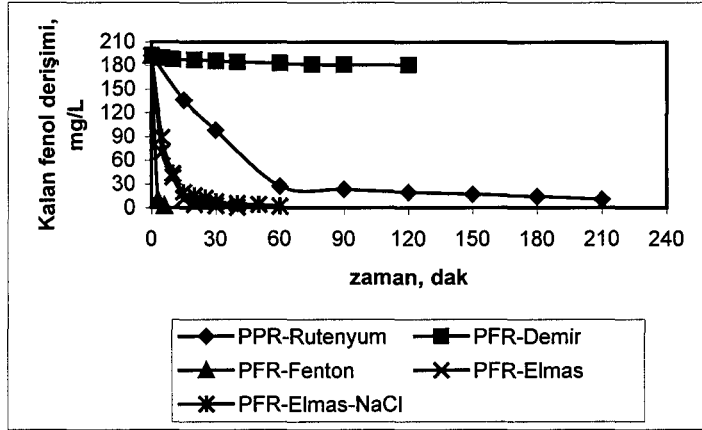
Şekil 6.168. Demir elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi ($1000\text{ mg/L H}_2\text{O}_2$, $I=176\text{ mA}$, $i=1\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



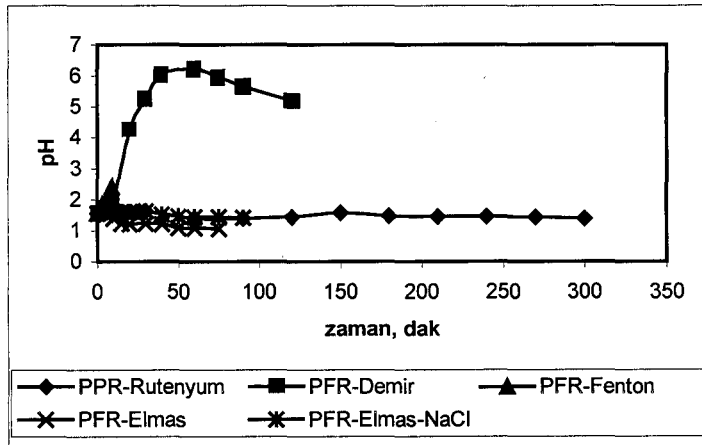
Şekil 6.169. Elmas elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi ($I=882\text{ mA}$, $i=5\text{ mA/cm}^2$, $Q=36,3\times 10^{-3}\text{ L/dak}$, $t=20^\circ\text{C}$)



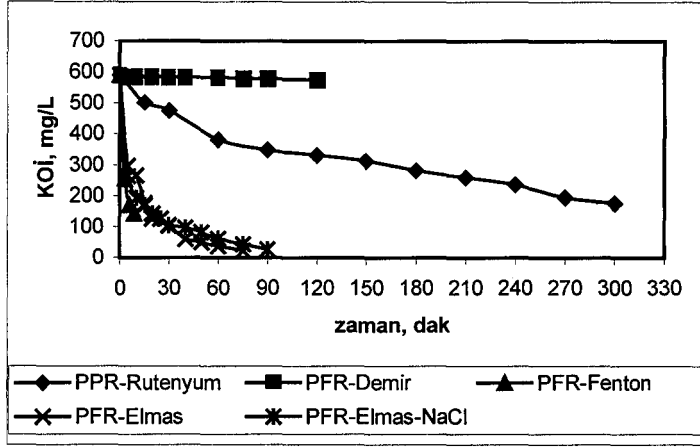
Şekil 6.170. Elmas elektrotlarla yapılan çalışmada kalan fenol derişimi ve KOİ'nin zamanla değişimi (0,05 M NaCl, I= 530 mA, i= 3 mA/cm², Q= 24,83x10⁻³ L/dak, t= 20°C)



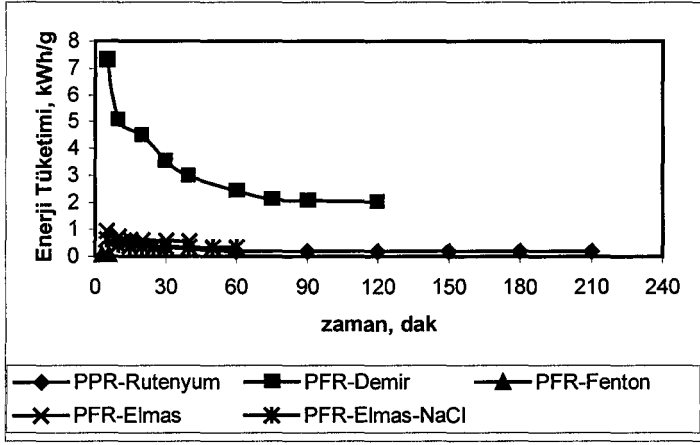
Şekil 6.171. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda kalan fenol derişiminin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi



Şekil 6.172. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda pH'nin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi



Şekil 6.173. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda KOİ'nin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi



Şekil 6.174. Petrol rafinerisi atıksuyunda yapılan çalışmalarda enerji tüketiminin elektrot malzemesine bağlı olarak zamanla değişimi

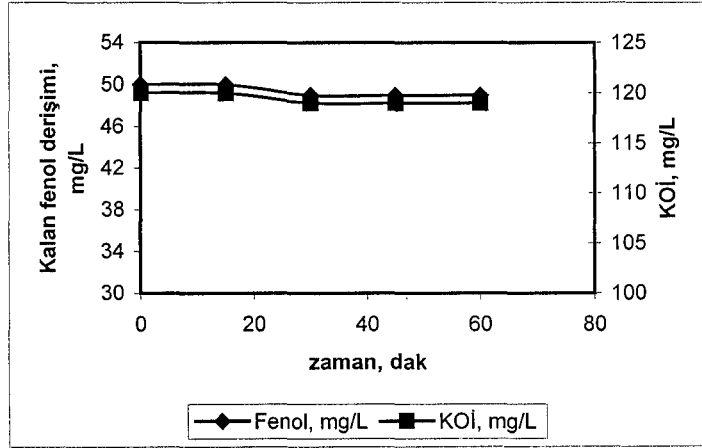
6.7. Ultrasound Çalışması

Ultrasound'un (yüksek frekanslı ses dalgaları) fenol giderimine etkisinin incelendiği çalışmada, 6 cm iç çapında, 7 cm yüksekliğinde (yaklaşık 200 cm³ iç hacimli) ve dış tarafında ısıtma/soğutma amaçlı ceketi bulunan borosilikat camdan yapılmış reaktör kullanılmıştır. Bir ultrasonik banyonun (43kHz) içine yerleştirilen reaktöre 100 mL çözelti konmuş ve dış kısmındaki ceketten 35°C sıcaklığında su geçirilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 6.89'da verilmiştir.

Çizelge 6.89. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan ultrasound çalışması (t= 35°C)

Zaman (dak)	pH	C _{son} (mg/L)	KOİ (mg/L)	Giderim (%)	
				Fenol	Fenol
0	6,63	50	120	-	-
15	6,61	50	120	0	0
30	6,62	49	119	2	0,833
45	6,59	49	119	2	0,833
60	6,61	49	119	2	0,833

KOİ giriş = 120 mgO₂/L, V= 100mL,



Şekil 6.175. 50 mg/L fenol içeren çözelti ile yapılan ultrasound çalışması (t= 35°C)

7. BULGULARIN TARTIŞILMASI

7.1. Rutenyum Oksit Kaplı Titanyum Paralel Plaka Elektrotlar

Rutenyum oksit kaplı titanyum paralel plaka elektrotlar kullanılarak fenolün elektrokimyasal yükseltgemesinin gerçekleştirildiği çalışmalarda, başlangıç pH'ı, çalışma sıcaklığı, akım yoğunluğu, başlangıç derişimi, destek elektrolit derişimi ve akış hızının giderim verimine etkileri incelenmiştir.

Rutenyum oksit elektrotlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elektroliz süresince çözelti pH'ı genel olarak düşme eğilimi göstermiştir (Bkz. Şekil 6.12 ve 6.25). Elektrolizler esnasında çözültide önce açık sarı – uçuk pembe sonra sarımsı-kahverengimsi bir renk oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca, sodyum sülfat ilave edilen destek elektrolit çalışmalarında kahverengi bir renklenme ve polimerik malzeme oluşumu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, sodyum klorür kullanılarak Körbahti ve Tanyolaç (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışma sonuçları ile polimerik malzeme oluşumu açısından uyum göstermektedir

Paralel plaka reaktörde başlangıç pH'ının fenol giderim verimine etkisini incelemek üzere, pH= 3, pH= 11 ve model atıksuyun doğal pH'ında çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, en iyi sonuçların doğal pH değerlerinde elde edildiğini göstermiştir (Bkz. Şekil 6.1).

Sıcaklığın etkisi 20, 50°C ve laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen çalışmalarla incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları sıcaklığın fenol giderimi üzerinde belirgin etkisi olduğunu göstermiştir. Laboratuvar sıcaklığı ve 50°C'de gerçekleştirilen çalışmalarda giderim verimi 20°C'dekine kıyasla daha yüksek bulunmuştur (Bkz. Şekil 6.6). Laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen çalışmalarda çözelti sıcaklığı başlangıçta 20-25°C civarında olup, elektroliz sırasında artan elektrot sıcaklığına paralel olarak artmış ve çalışma sonrası 35-50°C arasında değişen değerlere ulaşmıştır. Bu nedenle 50°C ve laboratuvar sıcaklığında gerçekleştirilen deney sonuçları birbirine paralellik göstermiştir.

Destek elektrolit ilavesi fenol giderimini olumlu yönde etkilemiştir. İlave edilen destek elektrolit miktarındaki artışla doğru orantılı olarak fenol gideriminde

artış görülmüştür (Bkz. Şekil 6.10). Destek elektrolit ilavesi aynı zamanda enerji tüketimini de önemli oranda düşürmüştür (Bkz. Şekil 6.11).

5 farklı akım yoğunluğunun incelendiği çalışmalarda, akım yoğunluğunun artışı ile elektrokimyasal süreçlerden beklenildiği gibi fenol gideriminde artış olmuştur (Bkz. Şekil 6.15).

Akış hızının artmasıyla fenol giderim verimlerinde azalma olmuştur. En iyi fenol giderim verimine reaktörde kalış süresinin artması nedeniyle en düşük akış hızında ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 6.19).

Bütün başlangıç derişimlerinde %99'un üzerinde fenol giderimi sağlanmıştır (Bkz. Şekil 6.23). 15 mA/cm² akım yoğunluğunda %99'un üzerinde fenol giderimine, 50 mg/L başlangıç fenol derişiminde 30. dakikada, 200 mg/L fenol derişiminde 50. dakikada ve 500 mg/L fenol derişiminde ise 90. dakikada ulaşılırken, 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 50 mg/L başlangıç fenol derişiminde 25. dakikada, 200 mg/L fenol derişiminde 35. dakikada ve 500 mg/L fenol derişiminde ise 60. dakikada ulaşılmıştır.

Deneylerde sıcaklığın, destek elektrolit miktarının ve akış hızının artışı ile kütle aktarım katsayısının artış gösterdiği görülmüştür (Bkz. Çizelge 6.27).

7.2. RASHIG Halkası Şeklindeki Demir Elektrotlar

RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal çöktürme çalışmalarında, H₂O₂ varlığında, fenol giderimine başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, H₂O₂ derişimi ve akış hızının etkileri incelenmiştir. Tek geçişli olarak gerçekleştirilen çalışmalarda, çözelti tıkaç akım reaktörün alt kısmından bir peristaltik pompa vasıtasıyla beslenmiş ve reaktörün üst kısmından alınan örneklerde fenol ve KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir.

200 mg/L fenol başlangıç derişiminde, herhangi bir destek elektrolit ve H₂O₂ ilavesi olmaksızın gerçekleştirilen elektrokoagülasyon çalışmasında, %22 fenol giderimine ulaşılmış ve hiç KOİ giderimi olmamıştır (Bkz. Çizelge 6.28). Daha sonra, 200 mg/L başlangıç derişimindeki çalışmalarda, çözeltiye H₂O₂ ilave edilerek çalışılmıştır. Örneğin, 200 mg/L fenol derişiminde 1000mg/L H₂O₂ ilave

edilen numunede, 1 mA/cm² akım yoğunluğunda tek geçişte %99,24 fenol ve %93,06 KOİ giderimi elde edilmiştir. Aynı, deneyde akım verimi %8982, enerji tüketimi 0,104 kWhg⁻¹ ve kütle aktarım katsayısı 1,14x10⁻⁴m/s olarak bulunmuştur (Bkz. Çizelge 6.31). 200 mg/L başlangıç fenol derişiminde, H₂O₂ derişiminin artmasıyla fenol ve KOİ giderim verimlerinde artış görülmüştür.

500 mg/L başlangıç fenol derişiminde istenilen akım yoğunluğu değerlerine ulaşmak için destek elektrolit ilavesi zorunlu olmuştur. Deneylerde, genel olarak artan akış hızı ile giderim veriminin ve akım veriminin düştüğü (Bkz. Şekil 6.36 ve 6.37) görülmüştür. Ayrıca, artan H₂O₂ derişimi ve akış hızı ile kütle aktarım katsayıları artış göstermiştir (Bkz. Şekil 6.50). Yine, artan akım yoğunluğu ile fenol ve KOİ giderimlerinin ve enerji tüketiminin arttığı (Bkz. Şekil 6.51, 6.52 ve 6.54) ve akım verimlerinin düştüğü (Bkz. Şekil 6.53) sonucuna varılmıştır.

1500 mg/L başlangıç fenol derişiminde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu kadar yüksek fenol başlangıç derişiminde çalışılırken, yüksek fenol ve KOİ giderim verimlerine ulaşabilmek için ilave edilen destek elektrolit ve H₂O₂ derişimleri de bir miktar artırılmıştır. Örneğin, 5000 mg/L H₂O₂ ve 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözeltide 3 mA/cm² akım yoğunluğunda, reaktörden tek geçişte %97,72 fenol ve % 90 KOİ giderimi gerçekleşmiştir (Bkz. Çizelge 6.44). Elektrokimyasal olarak üretilen Fe²⁺ ile çözeltide yer alan H₂O₂'nin tepkimesi (fenton ajanı) sonucu oluşan OH radikalleri çok yüksek akım verimi değerlerine ulaşmayı sağlamıştır. Destek elektrolit miktarının artmasıyla fenol gideriminin ve kütle aktarım katsayısının arttığı (Bkz. Şekil 6.79 ve 6.83), artan akım yoğunluğu ile akım veriminin azaldığı (Bkz. Şekil 6.86) ve enerji tüketimlerinin arttığı görülmüştür (Bkz. Şekil 6.87).

1500 mg/L başlangıç fenol derişiminde, optimum şartlarda, kesikli geri döngülü çalışılarak KOİ'nin zamanla değişimi incelenmiştir. 5000 mg/L H₂O₂ ve 0,07 M Na₂SO₄ içeren çözelti ile 2 mA/cm² akım yoğunluğunda yapılan çalışmada 5. dakikada %60,56, 10. dakikada %92,22 ve 15. dakikada ise %93,89 KOİ giderimi elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 6.45). Yine 1500 mg/L başlangıç fenol derişiminde gerçekleştirilen bir başka çalışmada da çözelti akış hızıyla aynı debide hava beslenerek, fazla havanın fenol ve KOİ giderim verimine etkisi gözlenmiştir. Çalışma sonucu, fazla hava beslemesinin sistemin giderim verimine

bir faydasının olmadığı anlaşılmıştır. Bu deneysel çalışmanın verileri, sadece çözelti akışı olan deney sonuçları ile birbirine yakın bulunmuştur (Bkz. Şekil 6.100).

7.3. RASHIG Halkası Şeklindeki Elmas Elektrotlarda Direkt Yükseltgeme

Kesikli geri döngülü çalıştırılan tıkaç akım reaktörde başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi, akış hızı ve sıcaklığın giderim verimine etkileri incelenmiştir.

Öncelikle herhangi bir destek elektrolit ilavesi olmaksızın 200 mg/L başlangıç derişiminde çalışılmış, ancak çözeltinin iletkenliğinin düşük olması nedeniyle, 300V gerilimle reaktörden 30 mA akım geçmiştir. Bu çalışmada, 150. dakika sonunda %83 fenol ve %59,8 KOİ giderimi elde edilmiştir. Çalışma esnasında çözelti pH'ı sürekli azalarak 150. dakika sonunda 3,08 değerine düşmüştür (Bkz. Şekil 6.103).

Orijinal çözelti düşük elektriksel iletkenliği ($C_0 = 200 \text{ mg/L}$ fenol için $95,7 \mu\text{S/cm}$) nedeniyle parametrik çalışma fırsatı vermediği için sonraki çalışmalar destek elektrolit ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Destek elektrolit olarak Na_2SO_4 kullanılan çalışmalarda, çözelti pH'ında zamanla sürekli olarak artış gözlenmiştir (Bkz. Şekil 6.105, 6.110, 6.116, 6.118, 6.123, 6.128 ve 6.133). Farklı destek elektrolit derişimlerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, en iyi fenol ve KOİ giderim verimine 0,05M Na_2SO_4 ile ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 6.104 ve 6.106).

Elmas elektrotlarda 200 mg/L fenol derişimleri için %800 gibi yüksek akım verimlerine ulaşılmıştır. Akım verimleri 50 mg/l fenol derişimleri için %450 ve 500 mg/l fenol derişimleri için %1300 civarlarına çıkmıştır (Bkz. Şekil 6.130).

Başlangıç pH'ının fenol ve KOİ giderimine belirgin bir etkisi olmadığı için (Bkz. Şekil 6.114 ve 6.115), deneyler çözeltinin doğal pH değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Başlangıç pH'ının 3 olduğu deneyde de çözelti pH'ı zamanla sürekli olarak artış göstermiş ve nihai olarak 10,03 değerine ulaşmıştır.

Elmas elektrotlarda akım yoğunluğunun artışı ile fenol ve KOİ giderim verimleri artış göstermiştir (Bkz. Şekil 6.122 ve 6.124). 3 mA/cm^2 akım

yoğunluğunda 60. dakikada %99,85 fenol giderimi elde edilirken, 5 mA/cm² akım yoğunluğunda aynı miktarda fenol giderimine 40. dakikada ulaşılmıştır.

Optimum şartlarda, başlangıç derişiminin etkisi incelenmiş 50 mg/L başlangıç fenol derişiminde 9. dakikada, 200 mg/L başlangıç fenol derişiminde 40. dakikada ve 500 mg/L başlangıç fenol derişiminde 60. dakikada %99'un üzerinde fenol giderimi sağlanmıştır.

Elmas elektrotların aktivitesinin bozulmaması için yüksek sıcaklıklarda çalışılmamış, 5 ve 20°C'de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 20°C'de, başlangıçta fenol giderimi daha yüksek olmasına rağmen, elektroliz sonlarına doğru her iki sıcaklık değerinde fenol giderim değerleri birbirine yaklaşmaktadır (Bkz. Şekil 6.132). Ancak 20°C'deki KOİ giderim verimleri, 5°C'deki KOİ giderim verimlerinden daha yüksektir. Bu nedenle 20°C daha etkin bir çalışma sıcaklığı olarak bulunmuştur.

7.4. RASHIG Halkası Şeklindeki Elmas Elektrotlarda İndirekt Yükseltgeme

Elmas elektrotların kullanıldığı çalışmada fenolün NaCl varlığında indirekt elektrokimyasal yükseltgemesi çalışılmıştır. Kesikli geri döngülü çalıştırılan tıkaç akım reaktörde, başlangıç derişimi, akım yoğunluğu, NaCl derişimi, ve akış hızının giderim verimine etkileri incelenmiştir.

Doğal pH'larda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar boyunca pH'ın önce bir miktar artış gösterdiği, sonra nötr pH değerleri civarında salınım yaptığı fark edilmiştir (Bkz. Şekil 6.138, 6.142, 6.150 ve 6.155).

1 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,05M ve 0,07M NaCl derişimleri arasındaki çok bariz bir fark olmamakla birlikte, 3 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,07M NaCl derişimi daha etkin bulunmuştur (Bkz. Şekil 6.137 ve 6.141). Destek elektrolit derişiminin artmasıyla enerji tüketimi değerlerinde de azalma olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 6.140 ve 6.145).

Başlangıç pH'ının, diğer sistemlerde olduğu gibi, fenol ve KOİ giderimi üzerinde çok etkili bir parametre olmadığı anlaşılmıştır (Bkz. Şekil 6.146 ve 6.147). 3 ve 11 başlangıç pH'larında da yine nötr pH değerlerine doğru bir gidiş gözlenmiştir (Bkz. Şekil 6.148).

Elmas elektrotlarla indirekt yükseltgemedeki akış hızının artmasıyla fenol ve KOİ giderimlerinde bir miktar azalma olmuştur (Bkz. Şekil 6.149 ve 6.151).

200mg/L başlangıç fenol derişiminde 1 ve 3 mA/cm², 500mg/L başlangıç fenol derişiminde 3 ve 5 mA/cm² ve 1500mg/L başlangıç fenol derişiminde 5 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde çalışılmıştır. Akım yoğunluğunun artmasıyla hem fenol hem de KOİ gideriminde belirgin artışlar olmuştur. 200mg/L başlangıç fenol derişimi ve 0,07M NaCl derişiminde 1 mA/cm² akım yoğunluğunda %99 fenol giderimine 60. dakikada ulaşılırken, 3 mA/cm² akım yoğunluğunda 20. dakikada ulaşmıştır (Bkz. Şekil 6.154). Benzer şekilde, 500mg/L başlangıç fenol derişimi ve 0,07M NaCl derişiminde 3 mA/cm² akım yoğunluğunda 105. dakikada %98,48 fenol giderimine ulaşılırken, 5 mA/cm² akım yoğunluğunda 60. dakikada %98,63 fenol giderimi elde edilmiştir. Ayrıca, 1500mg/L başlangıç fenol derişimi ve 0,07M NaCl derişiminde 5 mA/cm² akım yoğunluğunda 180. dakikada %99,24 fenol ve %97,78 KOİ giderimi elde edilmiştir.

7.5. Fenton Ajanı ile Kimyasal Yükseltgeme

Kimyasal yükseltgeme çalışmalarında, 200 ve 500 mg/L fenol içeren çözeltilere ilave edilen farklı derişimlerdeki H₂O₂ ve FeSO₄'ün fenol ve KOİ giderimine etkisi araştırılmıştır.

Her iki başlangıç derişimi için H₂O₂ derişiminin artışıyla fenol ve KOİ gideriminin arttığı gözlenmiştir. Yine her iki başlangıç derişiminde fenol gideriminin en az %70 civarında olduğu, ancak buna karşılık, literatür verileri ile de uyumlu olmak kaydıyla, KOİ gideriminin daha kısıtlı bir şekilde gerçekleştiği bulunmuştur (Bkz. Şekil 6.162, 6.163, 6.164 ve 6.165).

7.6. Petrol Rafinerisi Atıksuyu ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Optimum şartlarda petrol rafinerisi atıksuyunun, paralel plaka rutenyum oksit elektrotlarda direkt elektrokimyasal yükseltgenmesi, RASHIG halkası şeklindeki bor katkılı elmas elektrotlarda direkt ve indirekt elektrokimyasal

yükseltgenmesi, ve RASHIG halkası şeklindeki demir elektrotlarda H₂O₂ varlığında elektrokoagülasyonu araştırılmıştır.

Rutenyum oksit elektrotlarda destek elektrolit ilavesi olmaksızın gerçekleştirilen çalışmada, 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 210. dakikada %94,49 fenol ve 300. dakikada %70,06 KOİ giderimi gerçekleştirilmiştir.

Demir elektrotlarda yine destek elektrolit ilavesi olmaksızın gerçekleştirilen çalışmada, 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 120. dakikada %6,27 fenol ve %2,26 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Yine demir elektrotlarda 1000mg/L H₂O₂ ilavesi ile gerçekleştirilen çalışmada, 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 6.dakikada %98,74 fenol ve 9. dakikada %75,71 KOİ giderimi, yüksek akım verimi değerleri ile elde edilmiştir.

Elmas elektrotlarda herhangi bir destek elektrolit ilavesi olmaksızın, 5 mA/cm² akım yoğunluğunda 40. dakikada %99,53 fenol ve 75. dakikada %96,04 KOİ giderimine ulaşılmıştır. Elmas elektrotlarda 0,05M NaCl varlığında, 3 mA/cm² akım yoğunluğunda gerçekleştirilen çalışmada, 60.dakikada %98,9 fenol ve 90. dakikada %95,48 KOİ giderimi olmuştur.

Petrol rafinerisi atıksuyunda gerçekleştirilen elektrokimyasal arıtım çalışmalarında, en iyi giderim değerlerine H₂O₂ varlığında elektrokoagülasyon ile ulaşılmıştır. İlk 10 dakika içerisinde fenolün hemen hemen tamamı, üstelik % 5000 civarındaki yüksek akım verimleri ile giderilmiştir (Bkz. Şekil 6.168). Elmas elektrotlarda da hem direkt hem de indirekt yükseltgemedede ortalama % 500'lük akım verimleri ile fenol ve KOİ'nin %95'in üzerinde giderimi sağlanmıştır (Bkz. Şekil 6.169 ve 6.170).

7.7. Ultrasound Çalışması

50 mg/L fenol çözeltisi ile gerçekleştirilen ultrasound çalışmasında 1 saatlik süre içinde hemen hiç fenol ve KOİ giderimi gerçekleştirilememiştir (Bkz. Şekil 6.175).

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, paralel plaka ve tıkaç akım reaktörlerde, rutenyum oksit, elmas ve demir elektrotlar kullanılarak, elektrokimyasal yöntemlerle fenolün sudan giderimi araştırılmıştır.

Gerçekleştirilen bütün elektrokimyasal çalışmalarda fenolün tamamen ve KOİ'nin yüksek değerlerde giderimi sağlanmıştır. Özellikle H₂O₂ varlığında elektrokoagülasyonda, sürekli ve tek geçişli çalışıldığı için çok yüksek akım verimi değerlerine ulaşılmıştır. Elektrokoagülasyonda, giderim verimlerinin çözeltiye ilave edilen H₂O₂ miktarına aşırı derecede bağımlı olduğu ve artan H₂O₂ miktarı ile çözeltiden fenolün yanı sıra KOİ'nin de yüksek oranlarda giderilebileceği bulunmuştur. Hatta, tek geçişte fenole kıyasla daha kısıtlı giderilebilen KOİ'nin, kesikli geri döngülü çalışılarak daha etkin bir şekilde giderilebileceği gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur.

Direkt ve NaCl varlığında indirekt yükseltgeme çalışılan elmas elektrotlarda, indirekt yükseltgemedede daha yüksek verim değerleri elde edilmiştir. 200 mg/L başlangıç fenol derişiminde 3 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,03M Na₂SO₄ varlığında 90 dakikada %97 fenol giderilirken, 0,03M NaCl varlığında %99,5 fenol giderimine 60 dakika sonra ulaşılmıştır (Bkz. Çizelge 6.49 ve 6.71). İlave edilen Na₂SO₄ ve NaCl miktarları arttıkça, iki sistem arasındaki verim değerleri de artış göstermektedir. Örneğin, yine 200 mg/L başlangıç fenol derişimi ve 3 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,07M Na₂SO₄ varlığında 60 dakikada %99,67 fenol giderilirken, 0,07M NaCl varlığında %99,39 fenol giderimine ulaşılma için gerekli süre 20 dakikaya düşmektedir (Bkz. Çizelge 6.51 ve 6.73). Başka bir örnekle indirekt yükseltgemenin performansını ortaya koymak üzere, Na₂SO₄ varlığında 5 mA/cm²'de elde edilen fenol giderim değerlerine NaCl varlığında 3 mA/cm²'de ulaşılabilirdiği söylenebilir (Bkz. Çizelge 6.55 ve 6.72).

Rutenyum oksit elektrotlarda yüksek giderim verimlerine, elmas ve H₂O₂ varlığında demir elektrotlarda uygulanan akım yoğunlukları değerlerine kıyasla, ancak daha yüksek akım yoğunluklarında ulaşılabilmiştir. Buda deneysel çalışmalarda, diğer elektrotlara kıyasla, rutenyum oksit elektrotlarda daha düşük akım verimleri elde edilmesine sebep olmuştur.

Optimum şartlarda, çalışılan elektrokimyasal sistemlerle, petrol rafinesi atıksularının arıtımı araştırılmış ve destek elektrolit ilavesi olmaksızın demir elektrotlarla gerçekleştirilen elektrokoagülasyon dışında bütün sistemlerde yaklaşık %99 civarında fenol giderim verimleri elde edilmiştir. KOİ giderimi ise özellikle elmas elektrotlarda gerek direkt gerekse indirekt çalışma şartlarında %95'in üzerine çıkmıştır. Elmas elektrotlar, fenolün ve KOİ'nin eşanlı olarak gideriminde daha verimli bulunmuştur.

Fenton varlığında kimyasal yükseltgeme deneylerinde yüksek fenol giderimlerine rağmen, nispeten düşük KOİ giderimleri elde edilmiştir. Kimyasal yükseltgeme sonuçları da sistem veriminin ilave edilen H₂O₂ miktarına önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir.

Elektrokimyasal arıtım sonuçları kimyasal yükseltgeme sonuçları ile kıyaslandığında, fenol ve KOİ'nin eşanlı olarak yüksek verimlerde giderilebilmesi sağlandığından elektrokimyasal arıtım daha etkin bir arıtım yöntemi olarak görünmektedir.

Ultrasoundun, çalışmalarda kullanıldığı şekliyle, fenol ve/veya KOİ gideriminde yalnız başına yeterli olamayacağı görülmüştür.

KAYNAKLAR

Anonim, 1988, *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, Sayı: 19919, 04 Eylül 1988.

ABDO, M.S.E., NOSIER, S.A., EL-TAWIL, Y.A., FADL, S.M. ve EL-KHAIARY, M.I., *Removal of phenol from aqueous solutions by mixed adsorbents: Maghara coal and activated carbon*, J. Environ. Sci. Health, **A32 (4)**, 1159-1169 (1997).

ALVAREZ-GALLEGOS, A. ve PLETCHER, D., *The removal of low level organics via hydrogen peroxide formed in a reticulated vitreous carbon cathode cell, Part 1. The electrosynthesis of hydrogen peroxide in aqueous acidic solutions*, Electrochimica Acta, **44**, 853-861 (1998).

ALVAREZ-GALLEGOS, A. ve PLETCHER, D., *The removal of low level organics via hydrogen peroxide formed in a reticulated vitreous carbon cathode cell. Part 2: The removal of phenols and related compounds from aqueous effluents*, Electrochimica Acta, **44**, 2483-2492 (1999).

AMAT, A.M., ARQUES, A., BENEYTO, H., GARCIA, A., MIRANDA, M.A. ve SEGUI, S., *Ozonisation coupled with biological degradation for treatment of phenolic pollutants: A mechanistically based study*, Chemosphere, **53**, 79-86 (2003).

AWAD, Y.M. ve ABUZOID, N.S., *Electrochemical treatment of phenolic wastewater: Efficiency, design considerations and economic evaluation*, J. Environ. Sci. Health, **A32 (5)**, 1393-1414 (1997).

AWAD, Y.M. ve ABUZOID, N.S., *Electrochemical oxidation of phenol using graphite anodes*, Separation Science and Technology, **34 (4)**, 699-708 (1999).

BELLAGAMBA, R., MICHAUD, P.A., COMNINELLIS, Ch. ve VATISTAS, N., *Electro-combustion of polyacrylates with boron-doped diamond anodes*, Electrochemistry Communications, **4**, 171-176 (2002).

BOCK, C. ve MACDOUGALL, B., *The influence of metal oxide properties on the oxidation of organics*, Journal of Electroanalytical Chemistry, **491**, 48-54 (2000).

COMNINELLIS, C., *Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment*, Environmental Oriented Electrochemistry (Ed: Sequeira, C.A.C.), Studies in Environmental Science 59, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 77-102 (1994).

COMNINELLIS, C. ve NERINI, A., *Anodic oxidation of phenol in the presence of NaCl for waste water treatment*, Journal of Applied Electrochemistry, **25**, 23-28 (1995).

COMNINELLIS, C. ve PULGARIN, C., *Anodic oxidation of phenol for waste water treatment*, Journal of Applied Electrochemistry, **21**, 703-708 (1991).

COMNINELLIS, C. ve PULGARIN, C., *Electrochemical oxidation of phenol for waste water treatment using SnO₂ anodes*, Journal of Applied Electrochemistry, **23**, 108-112 (1993).

FUJISHIMA, A. ve RAO, T.N., *New directions in structuring and electrochemical applications of boron-doped diamond thin films*, Diamond and Related Materials, **10**, 1799-1803 (2001).

GANESAN, P.G., SHPILMAN, Z. ve EIZENBERG, M., *Chemical vapor deposited RuO_x films: annealing effects*, Thin Solid Films, **45**, 163-170 (2003).

GRIMM, J.H., BESSARABOV, D.G., SIMON, U. ve SANDERSON, R.D., *Characterization of doped tin dioxide anodes prepared by a sol-gel technique and their application in an SPE reactor*, Journal of Applied Electrochemistry, **30**, 293-302 (2000).

http-1: Phenol, http://www.chem.ox.ac.uk/mom/Air_fresh/Phenol.htm

http-2: Toxicological Profile for Phenol,

<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp115.pdf>

http-3: Toxicological Review of Phenol,

<http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0088-tr.pdf>

http-4: EPA Chemical Profile,

<http://www.epa.gov/swercepp/ehs/profile/108952p.txt>

http-5: Emergency First Aid Treatment Guide for Phenol,

<http://www.epa.gov/swercepp/ehs/firstaid/108952.txt>

http-6: Phenol, <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/phenol.html>

http-7: Pollution Prevention and Abatement Handbook: Coke Manufacturing,

[http://wbln0018.worldbank.org/essd/essd.nsf/%20GlobalView/PPAH/\\$File/53_coke.pdf](http://wbln0018.worldbank.org/essd/essd.nsf/%20GlobalView/PPAH/$File/53_coke.pdf)

http-8: Pollution Prevention and Abatement Handbook: Petroleum Refining, [http://wbln0018.worldbank.org/essd/essd.nsf/%20GlobalView/PPAH/\\$File/74_petroleum.pdf](http://wbln0018.worldbank.org/essd/essd.nsf/%20GlobalView/PPAH/$File/74_petroleum.pdf)

http-9: Diamond Electrodes For Electrochemistry, http://www.csem.ch/detailed/b_441-diam-electrodes.htm

INIESTA, J., MICHAUD, P.A., PANIZZA, M., CERISOLA, G., ALDAZ, A. ve COMNINELLIS, Ch., *Electrochemical oxidation of phenol at boron-doped diamond electrode*, *Electrochimica Acta*, **46**, 3573-3578 (2001).

IOTOV, P.I. ve KALCHEVA, S.V., *Mechanistic approach to the oxidation of phenol at a platinum/gold electrode in an acid medium*, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **443**, 19-26 (1998).

JEDRAL, W., MERICA, S.G. ve BUNCE, N.J., *Electrochemical oxidation of chlorinated benzenes*, *Electrochemistry Communications*, **1**, 108-110 (1999).

JOHNSON, D.C., FENG, J. ve HOUK, L.L., *Direct electrochemical oxidation of organic wastes in aqueous media*, *Electrochimica Acta*, **46**, 323-330 (2000).

KARTAL, Ö.E., SUYADAL, Y., EROL, M. ve OĞUZ, H., *Endüstriyel atıksularda bulunan 2,4,6-triklorofenolün fotokatalitik oksidasyon yöntemi ile giderimi*, IV. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İstanbul, Türkiye, 146-151 (2000).

KOTZ, R., STUCKI, S. ve CARCER, B., *Electrochemical waste water treatment using high overvoltage anodes. Part I: Physical and electrochemical properties of SnO₂ anodes*, *Journal of Applied Electrochemistry*, **21**, 14-20 (1991).

KÖRBAHTİ, B.K. ve TANYOLAÇ, A., *Continuous electrochemical treatment of phenolic wastewater in a tubular reactor*, *Water Research*, **37**, 1505-1514 (2003).

KRAFT, A., STADELMANN, M. ve BLASCHKE, M., *Anodic oxidation with doped diamond electrodes: a new advanced oxidation process*, Journal of Hazardous Materials, **B103**, 247-261 (2003).

LISTER, T.E., TOLMACHEV, Y.V., CHU, Y., CULLEN, W.G., YOU, H., YONCO, R. ve NAGY, Z., *Cathodic activation of RuO₂ single crystal surfaces for hydrogen-evolution reaction*, Journal of Electroanalytical Chemistry, **554-555**, 71-76 (2003).

MAMERI, N., YEDDOU, A.R., LOUNICI, H., BELHOCINE, D., GRIB, H. ve BARIOU, B., *Deflouridation of sepsentrional sahara water of north africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes*, Water Research, **32** (5), 1604-1612 (1998).

MCGUIRE, J., DWIGGINS, C.F. ve FEDKIW, P.S., *The Electrosorption of phenol onto activated carbon*, Journal of Applied Electrochemistry, **15**, 53-62 (1985).

MOLLAH, M.Y.A., SCHENNACH, R., PARGA, J.R. ve COCKE, D.L., *Electrocoagulation (EC) – Science and applications*, Journal of Hazardous Materials, **B84**, 29-41 (2001).

PANIZZA, M., MICHAUD, P.A., CERISOLA, G. ve COMNINELLIS, Ch., *Electrochemical treatment of wastewaters containing pollutants on boron-doped diamond electrodes: Prediction of specific energy consumption and required electrode area*, Electrochemistry Communications, **3**, 336-339 (2001).

PIERNA A.R., SISTIAGA, M., NAVASCUES, C. ve LORENZO, A., *Electrochemical treatment of toxic compounds on the surface of amorphous Ni-Nb-Pt-Sn Alloys*, Journal of Non-Crystalline Solids, **287**, 432-436 (2001).

POLCARO, A.M., PALMAS, S., RENOLDI, F. ve MASCIA, M., *On the performance of Ti / SnO₂ and Ti / PbO₂ anodes in electrochemical degradation of 2-chlorophenol for waste water treatment*, Journal of Applied Electrochemistry, **29**, 147-151 (1999).

QIANG, Z., CHANG, J. ve HUANG, C., *Electrochemical generation of hydrogen peroxide from dissolved oxygen in acidic solutions*, Water Research, **36**, 85-94 (2002).

RODGERS, J.D., JEDRAL, W. ve BUNCE, N.J., *Electrochemical oxidation of chlorinated phenols*, Environ. Sci. Technol., **33**, 1453-1457 (1999).

ROOSTAEI, N.F. ve TEZEL, F.H., *Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption*, Journal of Environmental Management, **70**, 157-164 (2004).

SAHA, N.C., BHUNIA, F. ve KAVIRAJ, A., *Toxicity of phenol to fish and aquatic ecosystems*, Bull. Environ. Contam. Toxicol., **63**, 195-202 (1999).

SHARIFIAN, H. ve KIRK, D.W., *Electrochemical oxidation of phenol*, J. Electrochem. Soc.: Electrochemical Science and Technology, **133**, 5, 921-924 (1986).

SISTIAGA, M., PIERNA, A.R., MARZO, F.F., ALTUBE, A. ve LORENZO, A., *Electrooxidation of phenol on amorphous Ni-40Nb-(1-x)Pt-xSn alloys*, Applied Surface Science, **133**, 124-128 (1998).

SUSARLA, S., BHAMIDIMARRI, S.M.R. ve BHASKAR, G.V., *Adsorption and desorption characteristics of phenoxyacetic acids and chlorophenols in volcanic soil: Single component fixed bed studies*, Environmental Technology, **20**, 1-9, (1999).

STUCKI, S., KOTZ, R., CARCER, B. ve SUTER, W., *Electrochemical waste water treatment using high overvoltage anodes. Part II: Anode performance and applications*, Journal of Applied Electrochemistry, **21**, 99-104 (1991).

SUCRE, V.S. ve WATKINSON, A.P., *Anodic oxidation of phenol for waste water treatment*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, **59**, 52-59 (1981).

SZPYRKOWICZ, L., JUZZOLINO, C. ve KAUL, S.N., *A Comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, hypochlorite and fenton reagent*, Water Research, **35** (9), 2129-2136 (2001).

TAHAR, N.B. ve SAVALL, A., *Electrochemical degradation of phenol in aqueous solution on bismuth doped lead dioxide: A comparison of the activities of various electrode formulations*, Journal of Applied Electrochemistry, **29**, 277-283 (1999).

TEREZO, A.J. ve PEREIRA, E.C., *Preparation and characterisation of Ti/RuO₂ anodes obtained by sol-gel and conventional routes*, Materials Letters, **53**, 339-345 (2002).

TRÖSTER, I., FRYDA, M., HERRMANN, D., SCHÄFER, L., HÄNNI, W., PERRET, A., BLASCHKE, M., KRAFT, A. ve STADELMANN, M., *Electrochemical advanced oxidation process for water treatment using DiaChem[®] electrodes*, Diamond and Related Materials, **11** (3-6), 640-645 (2002).

WALSH, F.C., *A First course in electrochemical engineering*, Alresford Press Ltd., Hants, Great Britain (1993).

YILDIZ, N., KAPUCU, H. ve ÇALIMLI, A., *HDTMA – bentonitine fenol adsorpsiyonununun incelenmesi*, IV. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İstanbul, Türkiye, 117-122 (2000).

BOR KATKILI ELMAS ELEKTROTUN SEM GÖRÜNTÜLERİ VE ELEMENTEL ANALİZİ

SEMQuant results. Listed at 15:43:03 on 11/12/01

Operator: 1

Client: none

Job: 1

Spectrum label:

System resolution = 107 eV

Quantitative method: ZAF (4 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

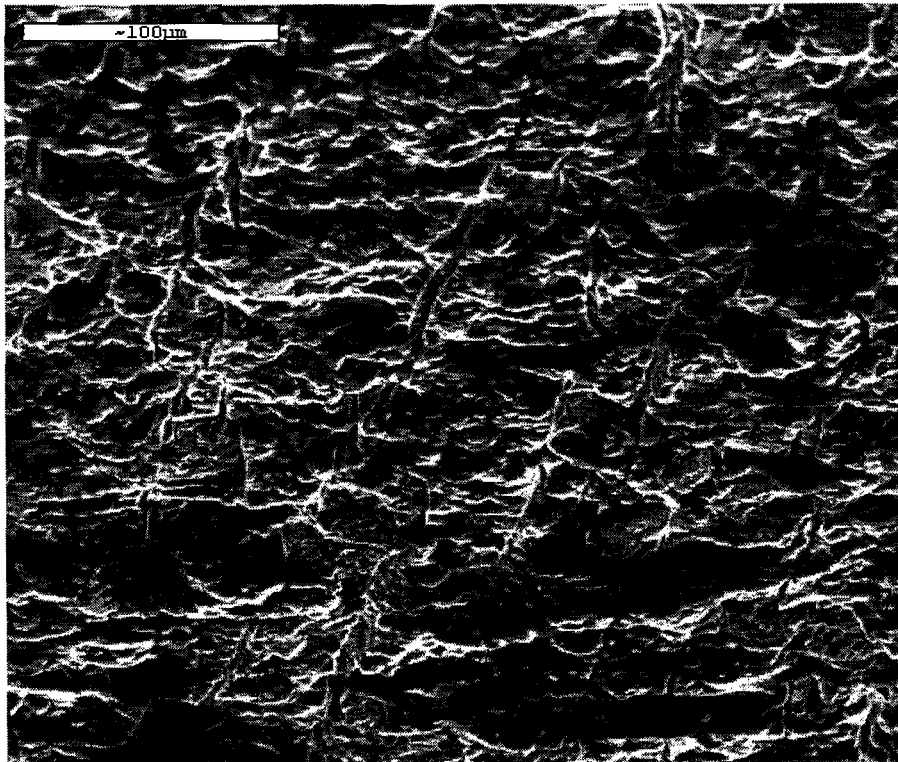
Standards :

C K CaCO3 01/12/93

O K Quartz 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	56.35	63.23
O K	ED	43.65	36.77
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



Şekil EK.1.1. Raşing halkasının dış kısmının elektron mikroskobunda (SEM) görünümü

SEMQuant results. Listed at 15:47:06 on 11/12/01

Operator: 1

Client: none

Job: 2

Spectrum label:

System resolution = 108 eV

Quantitative method: ZAF (5 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

2 peaks possibly omitted: 1.48, 6.40 keV

Standards :

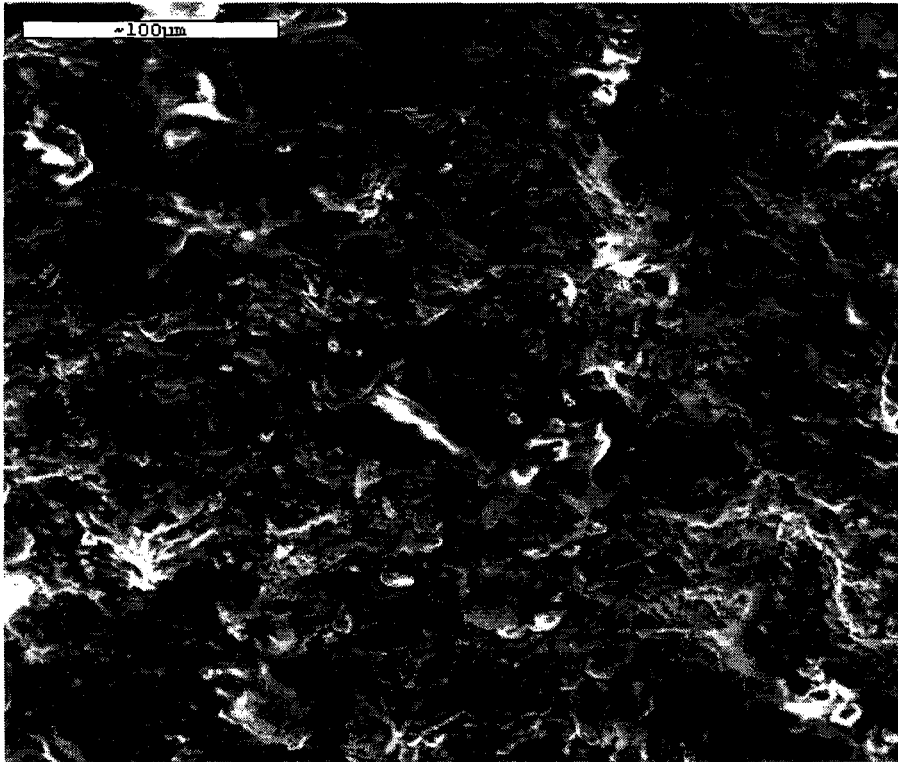
C K CaCO3 01/12/93

O K Quartz 01/12/93

Nb L Nb 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	64.43	71.71
O K	ED	33.50	27.99
Nb L	ED	2.07	0.30
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



Şekil EK.1.2. Raşing halkasının iç kısmının elektron mikroskopunda (SEM) görünümü

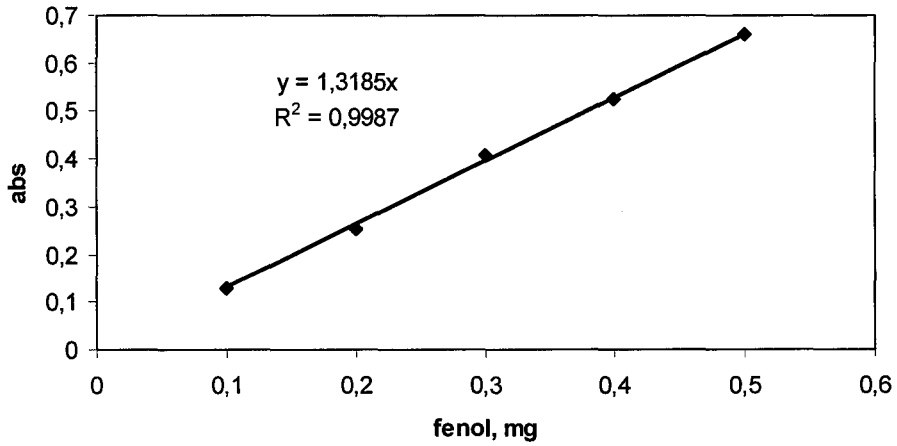
STANDART ÇALIŞMA DOĞRUSU VE DERİŞİM HESABI

EK 2.1. Standart Çalışma Doğrusu

Belirli derişimlerdeki fenol çözeltilerinin, spektrofotometrede 500 nm dalga boyunda absorbands değerleri okunmuş ve derişime karşı grafiğe geçirilerek standart çalışma doğrusu elde edilmiştir.

Çizelge EK 2.1. Derişim değerlerine karşı spektrofotometrede okunan absorbands değerleri

Derişim (mg)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Absorbans	0,129	0,253	0,406	0,526	0,659



Şekil EK 2.1. Fenol için standart çalışma doğrusu

EK 2.2. Derişim Hesabı

Şekil EK 2.1’de görülen standart çalışma doğrusunun denklemi

$$y = 1,3185x \quad (\text{EK 2.1})$$

şeklindedir. Önce EK 2.1 eşitliği yardımıyla numunedeki fenol miktarı mg olarak hesaplanır. Daha sonra EK 2.2 eşitliği kullanılarak çözeltilinin fenol derişimi mg/L olarak hesaplanır.

$$\text{mg fenol} / L = \frac{x}{z} 1000 \quad (\text{EK 2.2})$$

Bu formülde; x = mg olarak numunedeki fenol miktarı
 z = mL orijinal numune hacmi

Örneğin; absorbansı (y) 0,015 olarak ölçülmüş bir çözeltildeki fenol miktarı EK 2.1 eşitliği kullanılarak;

$$0,015 = 1,3185x$$
$$x = 0,011376 \text{ mg fenol olarak hesaplanır.}$$

Bu x değeri, orijinal numune hacmi 5 mL kabul edilerek EK 2.2 eşitliğinde yerine konursa,

$$\text{mg fenol} / L = \frac{0,011376}{5} 1000 = 2,275 \text{ mg} / L \text{ olarak bulunur.}$$

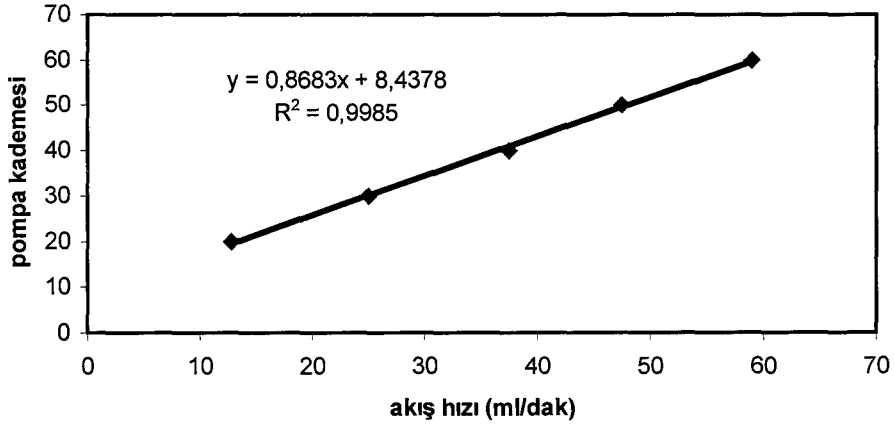
PERİSTALTİK POMPA KALİBRASYONU

EK 3.1. Peristaltik Pompa Kalibrasyonu

Değişik kademelere ayarlanmış peristaltik pompadan belirli zaman aralıklarında geçen çözelti hacimleri kaydedilmiş ve bu değerler grafiğe geçirilerek standart çalışma doğrusu (Şekil EK 3.1) elde edilmiştir.

Çizelge EK 3.1. Peristaltik pompa kalibrasyonunda kullanılan veriler

Kademe	20	30	40	50	60
Akış hızı (ml/dak)	12,75	25	37,5	47,5	59



Şekil EK 3.1. Peristaltik pompa için standart çalışma doğrusu

ÖRNEK HESAPLAMALAR

Örnek hesaplamalarda, Çizelge 6.8'de yer alan deneysel çalışma sonuçlarının verileri kullanılmıştır. 200 mg/L başlangıç fenol derişimine sahip 500 mL çözeltinin, 15 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 36,3x10⁻³ L/dak akış hızında reaktörden geçirilmesi durumunda 90. dakikadaki yüzde giderim, enerji tüketimi, akım verimi ve 120. dakikadaki kütle aktarım katsayısı değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

EK 4.1. Yüzde Giderim

Yüzde giderim eşitlik (5.2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_o - C)}{C_o} 100$$

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(200 - 6,98)}{200} 100 = \%96,51$$

EK 4.2. Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi eşitlik (5.3 ve 5.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$(kWhm^{-3}) = \frac{I \cdot V}{Q \cdot 1000} = \frac{5,4A \cdot 11,8V}{2,18 \times 10^{-3} m^3 / h \cdot 1000} = 29,229 kWhm^{-3}$$

$$(kWhg^{-1}) = \frac{I \cdot V}{(C_o - C) \cdot Q \cdot 1000}$$

$$= \frac{5,4A \cdot 11,8V}{(200 - 6,98 mg / L) \cdot 2,18 \times 10^{-3} m^3 / h \cdot 1000} = 0,151 kWhg^{-1}$$

EK 4.3. Kütle Aktarım Katsayısı

Kütle Aktarım katsayısı eşitlik (5.5) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$k_m = -\frac{Q}{A} \ln\left(\frac{C}{C_o}\right)$$

$$k_m = -\frac{Q}{A} \ln\left(\frac{C}{C_o}\right) = -\frac{6,055 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s}}{360 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \ln\left(\frac{1,82 \text{ mg} / \text{L}}{200 \text{ mg} / \text{L}}\right)$$

$$k_m = 7,9 \times 10^{-5} \text{ m} / \text{s}$$

EK 4.4. Akım Verimi

Akım verimi eşitlik (5.8) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Akım verimi} &= \frac{(C_o - C) \cdot v \cdot n \cdot F}{M \cdot I \cdot t} \\ &= \frac{(200 \text{ mg} / \text{L} - 6,98 \text{ mg} / \text{L}) \cdot (1 \text{ g} / 1000 \text{ mg}) \cdot 0,5 \text{ L} \cdot 28 \cdot 96500 \text{ As} / \text{mol}}{94 \text{ g} / \text{mol} \cdot 5,4 \text{ A} \cdot 5400 \text{ s}} \end{aligned}$$

$$\text{Akım verimi} = 0,095 = \% 9,5$$

İKİ KUTUPLU TİKAÇ AKIM REAKTÖRÜN HACMİ VE ANOT YÜZEY ALANI HESABI

EK 5.1. Reaktör Hacmi Hesabı

Her biri 4 elektrot içeren 26 tabakadan oluşan reaktörün hacmi elektrotların toplam hacmine eşittir. Reaktör hacmini bulabilmek için, dış çapı, $D_d = 0,8$ cm, iç çapı, $D_e = 0,55$ cm ve yüksekliği, $D_L = 0,8$ cm olan bir elektrotun kapladığı alanı buluruz.

Reaktör hacmi (V_R) = Elektrot hacmi . Elektrot sayısı

Elektrot hacmi (A_z) = Elektrot alanı . Elektrot yüksekliği

Elektrot alanı (A) = Eşkenar üçgen alanı . 2

$$\text{Elektrot alanı} = \frac{0,8 \cdot \sin 60 \cdot 0,8}{2} \cdot 2 = 0,554 \text{ cm}^2 \quad (\text{EK 5.1})$$

$$\text{Elektrot hacmi} = 0,554 \text{ cm}^2 \cdot 0,8 \text{ cm} = 0,443 \text{ cm}^3$$

$$\text{Reaktör hacmi} = 0,443 \text{ cm}^3 \cdot 26 \cdot 4 = 46,1 \text{ cm}^3 = 46,1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

EK 6.2. Anot Yüzey Alanı Hesabı

Anot, 0,8 cm yüksekliğindeki bir elektrotun yarısıdır. Elektrotun yüzey alanı, dış ve iç yanal yüzeylerin toplamına eşittir.

$$\text{Elektrotun dış yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} D_d \pi \quad (\text{EK 5.2})$$

$$\text{Elektrotun iç yüzey alanı} = \frac{D_L}{2} D_e \pi \quad (\text{EK 5.3})$$

Bir elektrotun yüzey alanı =

$$\frac{D_L}{2} D_d \pi + \frac{D_L}{2} D_e \pi = \frac{0,8}{2} 0,8 \pi + \frac{0,8}{2} 0,55 \pi = 1,696 \text{ cm}^2$$

$$\text{Toplam anot yüzey alanı} = 1,696 \text{ cm}^2 \times 26 \times 4 = 176,43 \text{ cm}^2 = 176,43 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ELEKTROKİMYASAL OKSİJEN İSTEMİNİN HESAPLANMASI

EK 6.1. Elektrokimyasal Oksijen İstemi Formülünün Çıkarılışı

Elektrokimyasal çalışma sonucu elde edilen KOİ değerlerinden yola çıkılarak Anlık (Ayrımsal) Akım Verimi (Instantaneous Current Efficiency, ICE), (EK 6.1) denkleminle hesaplanır;

$$ICE = \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{8 I \Delta t} F V \quad (\text{EK 6.1})$$

$(KOİ)_t, (KOİ)_{t+\Delta t} = t$ ve $t+\Delta t$ zamanlarındaki KOİ (g O₂/L)

I = Akım (Amper)

F = Faraday Sabiti (96487 C/mol)

V = Elektrolit hacmi (L)

ICE, elektroliz esnasında zamanla azalarak, sonuçta sıfıra yakın bir değere ulaşır. Bu şekilde ICE-t eğrisinden hesaplanan ortalama değer (Bkz EK 6.2) “Elektrokimyasal Yükseltgeme İndisi, EOİ” olarak tanımlanır;

$$EOI = \frac{\int_0^{\tau} ICE \cdot dt}{\tau} \quad (\text{EK 6.2})$$

EOI = Ortalama akım verimini göstermektedir ve gerçekleştirilen deneysel çalışma koşullarında fenolün (ya da diğer organik bileşiklerin) elektrokimyasal yükseltgenmesinin bir ölçüsüdür.

τ = ICE'nin ~ 0 olduğu noktadaki elektroliz süresi

Elektrokimyasal Oksijen İhtiyacı (EOD) değeri ise EOİ değerinden faydalanılarak (EK 6.3) eşitliğiyle hesaplanır (Comninellis, 1991);

$$EOD = \frac{8 (EOI \times I \tau)}{F [PhOH]} \quad (\text{g O}_2 / \text{g fenol}) \quad (\text{EK 6.3})$$

[PhOH] = Elektrolitteki fenol miktarı (g)

EK 6.2 eşitliğinde yer alan integral denklemi açılırsa;

$$EOI = \frac{\int_0^{\tau} ICE \cdot dt}{\tau} = \frac{1}{\tau} ICE \cdot (t_{\tau} - t_0) \quad (\text{EK 6.4})$$

EK 6.1 eşitliğinde yer alan ICE değeri EK 6.4 eşitliğinde yerine konulursa;

$$EOI = \frac{1}{\tau} \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{8 I \Delta t} F V (t_{\tau} - t_0) \quad (\text{EK 6.5})$$

$\Delta t = t_{\tau} - t_0$ olduğu için

$$EOI = \frac{1}{\tau} \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{8 I} F V \quad (\text{EK 6.6})$$

eşitliği elde edilir. EK 6.6 eşitliğindeki EOI değeri EK 6.3 eşitliğinde yerine konursa;

$$EOD = \frac{8 \left[\frac{1}{\tau} \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{8 I} \right] F V I \tau}{F [PhOH]} \quad (\text{EK 6.7})$$

$$EOD = \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{[PhOH]} V \quad (\text{EK 6.8})$$

eşitliği bulunur.

EK 6.2. Örnek Hesaplama

Elektrokimyasal Oksijen İstemi eşitlik (5.9) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$[PhOH] = 200 \text{ mg/L} \times 0,5 \text{ L} \times (1\text{g}/1000\text{mg}) = 0,1 \text{ g}$$

$$V = 0,5 \text{ L}$$

$$EOD = \frac{[(KOİ)_t - (KOİ)_{t+\Delta t}]}{[PhOH]} V = \frac{(0,48\text{gO}_2 / \text{L} - 0,09333\text{gO}_2 / \text{L})}{0,1\text{g fenol}} 0,5\text{L}$$

$$EOD = 1,93 \text{ g O}_2/\text{g fenol}$$