

**YÜZEY AKTİF MADDELERİN
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE
SUDAN UZAKLAŞTIRILMASI**

Ebru Önder

**Yüksek Lisans Tezi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
2001**

**Bu Tez Çalışması Anadolu Üniversitesi Araştırma Fonunca Desteklenmiştir.
Proje No: AÜAF 00 29 30**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ebru Önder'in Yüzey aktif maddelerin elektrokimyasal yöntemlerle sudan uzaklaştırılması başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 10.07.2001 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof.Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Arzu ÇİÇEK

Üye : Yrd.Doç.Dr. Nezihe AZCAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 11.07.2001 tarih ve 23/6 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

"Yüzey Aktif Maddelerin Elektrokimyasal Yöntemlerle Sudan Uzaklaştırılması " başlıklı bu çalışma, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Çevre Teknolojileri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmalarım sırasında yardım ve desteğini esirgemeyerek beni her zaman destekleyen, Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezinin her türlü imkanlarından yararlanmamı sağlayan danışman hocam Sn. Prof.Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN'e,

Görüş ve önerileri ile çalışmaya katkıda bulunan hocalarım Yrd.Doç.Dr. Arzu Çiçek'e ve Yrd.Doç.Dr. Nezihe VARGAN,

Çalışmamın her aşamasına bilgi, hoşgörü ve anlayışıyla katkıda bulunan, değerli görüşlerinden yararlandığım, bu çalışmanın oluşmasında çok önemli bir yere sahip olduğuna inandığım değerli hocam Sn. Yrd.Doç.Dr. A.Savaş KOPARAL'a,

İlgi ve destekleriyle her zaman yanımda olan Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışma arkadaşlarıma,

Yaşantım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen, elde ettiğim başarılarda en büyük paya sahip, daima yanımda olacaklarına inandığım sevgili aileme
en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ebru ÖNDER

Haziran 2001

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜZEY AKTİF MADDELERİN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE SUDAN UZAKLAŞTIRILMASI

EBRU ÖNDER

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
İkinci danışman: Yrd.Doç.Dr. A.Savaş KOPARAL
2001, 125 Sayfa

Bu çalışmada yüzey aktif maddelerin sudan uzaklaştırılması için iki farklı elektrokimyasal yöntem olan elektrokimyasal yükseltgeme ve elektrokimyasal çöktürme kullanılmıştır. Elektrokimyasal yükseltgeme ile yapılan çalışmalarda değişik yüzey aktif madde derişimlerinde çalışılmış, uygulanan akım yoğunluğu ve çözelti akış hızları değiştirilerek giderim, enerji tüketimi ve akım verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca destek elektrolit olarak kullanılan Na_2SO_4 derişimi ile pH'nın giderime etkileri de incelenmiştir. Elektrokimyasal çöktürme ile yapılan çalışmalarda demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmış ve kesikli sistemde çalışılmıştır. Farklı başlangıç yüzey aktif madde derişimleri kullanılarak uygulanan akım, polarizasyon, destek elektrolit miktarı ve pH'nın giderime, enerji tüketimine ve akım verimine etkileri incelenmiştir. Ayrıca non iyonik yüzey aktif madde olan sodyum loril eter sülfat (SLES) model çözeltisi ile çalışılmış, % 90 oranında giderim sağlanmıştır. Bununla birlikte mevcut yüzey aktif madde içeriğine 10 mgL^{-1} LAS ilave edilen porsuk nehrinden alınan su örneği elektrokimyasal çöktürmeye tabi tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler: yüzey aktif madde, deterjan, elektrokimyasal yükseltgeme, elektrokimyasal çöktürme

ABSTRACT**Master of Science Thesis****REMOVAL OF SURFACTANTS FROM WATER BY
ELECTROCHEMICAL METHODS****EBRU ÖNDER****Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Environmental Engineering Program****Supervisor: Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
Co Advisor: Assoc.Prof. Dr. A.Savaş KOPARAL
2001, Page 125**

In this study, two different electrochemical methods, electrochemical oxidation and electrochemical precipitation, have been used for the removal of surface active agents from water. Various surfactant concentrations have been used in electrochemical oxidation and the effects of applied current density and solution flow rates on energy consumption and current efficiency have been investigated. The effects of the concentration of Na_2SO_4 used as supporting electrolyte and pH on removal rate have also been examined. Electrochemical precipitation studies in which iron and aluminium electrodes were used have been carried out in the batch mode. Different initial surfactant concentrations have been used and the effects of the applied current, polarisation, amount of supporting electrolyte and pH on removal rate, energy consumption and current efficiency have been determined. Moreover, removal efficiency of 90 % has been achieved with a model solution of SLES as non ionic surfactant. A water sample from Porsuk river with additional 10 mgL^{-1} of LAS to its existing surfactant content has been subjected to electrochemical precipitation.

Keywords: surfactant, detergent, electrochemical oxidation, electrochemical precipitation

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜZEY AKTİF MADDELER	2
3. YÜZEY AKTİF MADDE ÇEŞİTLERİ.....	5
3.1. Anyonik Yüzey Aktif Maddeler.....	5
3.1.1. Sabunlar.....	6
3.1.2. Alkilbenzen sülfonatlar.....	7
3.1.3. Alken sülfonatlar.....	8
3.1.4. Olefin sülfonatlar	8
3.1.5. Birincil alkil sülfatlar	9
3.1.6. İkincil alkil sülfatlar	9
3.1.7. Ester ve amid sülfonatlar	9
3.1.8. Sülfö yağ asitleri	9
3.1.9. Sülfatlı polioksietilen eterler	9
3.2. Katyonik Yüzey Aktif Maddeler.....	10
3.3. Non İyonik Yüzey Aktif Maddeler	10
3.3.1. Alkol etoksilatlar	11
3.4. Amfoterik Yüzey Aktif Maddeler	11
4. YÜZEY AKTİF MADDELERİN İNSAN VE ÇEVRE SAĞLIĞINA ETKİLERİ.....	12
4.1. Yasal Düzenlemeler.....	15
5. YÜZEY AKTİF MADDELERİN KLASİK YÖNTEMLERLE GİDERİLMESİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	18

İÇİNDEKİLER

Sayfa

6.	ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ.....	20
	6.1. Elektrokimyasal Yöntemlerle Yüzey Aktif Maddelerin Giderimi.....	20
	6.1.1. Elektrokimyasal yükseltgeme	21
	6.1.1.1. Direkt yükseltgeme	21
	6.1.1.2. İndirekt yükseltgeme	21
	6.1.2. Elektrokimyasal çöktürme (Elektrokoagülasyon).....	22
	6.1.3. Elektrokimyasal yüzdürme (Elektroflotasyon)	23
	6.2. Yüzey Aktif Maddelerin Elektrokimyasal Giderimi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	24
7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
	7.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar	27
	7.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler	27
	7.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar	28
	7.1.3. Tayin.....	29
	7.1.4. Deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler	29
	7.2. Elektrokimyasal Çöktürme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar	30
	7.2.1. Demir ve alüminyum reaktörde kesikli çalışma	30
8.	DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	31
	8.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar	31
	8.1.1. Akımın etkisinin incelendiği deney sonuçları	31
	8.1.2. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	31
	8.1.3. Akış hızının etkisinin incelendiği deney sonuçları	32
	8.1.4. pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları	32
	8.1.5. Destek elektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	32
	8.1.6. Kütle aktarım katsayısının değişimi	49
	8.2. Elektrokimyasal Çöktürme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi Çalışmalarından Elde Edilen Deney Sonuçları	50

İÇİNDEKİLER

Sayfa

8.2.1. Demir reaktörde kesikli sistemde yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar.....	50
8.2.1.1. Uygulanan akımın etkisinin incelendiği deney sonuçları	50
8.2.1.2. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	51
8.2.1.3. Reaktörün katot karıştırıcının anot olduğu durumun etkisinin incelendiği deney sonuçları	51
8.2.1.4. Destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	51
8.2.1.5. pH'ın giderime etkisinin araştırıldığı deney sonuçları.....	52
8.2.1.6. Kütle aktarım katsayısının değışimi	72
8.2.2. Alüminyum reaktörde kesikli sistemde yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar.....	73
8.2.2.1. Uygulanan akımın etkisinin incelendiği deney sonuçları	73
8.2.2.2. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	73
8.2.2.3. Reaktörün katot karıştırıcının anot olduğu durumun etkisinin incelendiği deney sonuçları	73
8.2.2.4. Destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları	74
8.2.2.5. pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları	74
8.2.2.6. Kütle aktarım katsayısının değışimi	113
9. BULGULARIN TARTIŞILMASI.....	114
9.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme ile Yüzey Aktif Madde Giderimi için Deneysel Bulguların Tartışılması.....	114
9.2. Elektrokimyasal Çöktürme ile Yüzey Aktif Madde Giderimi için Deneysel Bulguların Tartışılması.....	116
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	120
11. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	121
12. EK AÇIKLAMALAR	124

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sodyum dodesil sülfat yüzey aktif madde monomeri	3
3.1. a) Bir sodyum sabunu b) Nonpolar (hidrofobik) hidrokarbon zincirlerini içine gizleyen ve polar (hidrofilik) karboksil grubu yüzeyinde bulunduran misel yapısı	7
3.4. LAS'ın yapısı	8
4.1. Ana ekolojik çevre birimlerinin birbirleri arasındaki ilişkiler	13
4.2. LAS'ın çeşitli çevresel ortamlarda dağılımını gösteren akış diyagramı	14
7.1. Elektrokimyasal yükseltgeme deney düzeneği	28
7.2 Elektrokimyasal çöktürme deney düzeneği	30
8.1. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)	35
8.2. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)	36
8.3. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)	37
8.4. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)	38
8.5. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)	39
8.6. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)	40
8.7. 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.8. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	42
8.9. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	43
8.10. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	44
8.11. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	45
8.12. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)	46
8.13. 0,1 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde, uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ /h)	47
8.14. 0,1 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ /h)	47
8.15. 0,1 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ /h)	47
8.16. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ /h)	48
8.17. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹)	48
8.18. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹)	48
8.19. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	56
8.20. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.21. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	56
8.22. Demir reaktörde farklı akım değerlerinde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi	57
8.23. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	58
8.24. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	59
8.25. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	59
8.26. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	59
8.27. Demir reaktörde farklı akım değerlerinde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi	60
8.28. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	61
8.29. Demir reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın 0,25 A'de zamanla değişimi	62
8.30. Demir reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,25 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	62
8.31. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ derişimlerinin 0,25 A'de zamanla değişimi	63
8.32. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ çözeltilerinde 0,25 A'de akım veriminin zamanla değişimi	63
8.33. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ çözeltilerinde 0,25 A'de enerji tüketiminin zamanla değişimi	63
8.34. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.35. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	64
8.36. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi	65
8.37. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	65
8.38. Demir reaktörde 10 mgL^{-1} ve $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, 10 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,15 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	66
8.39. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,15 \text{ A}'$ de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	66
8.40. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} ve $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, 50 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,25 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	67
8.41. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}'$ de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	67
8.42. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Fe}_2\text{SO}_4$ ve $0,05 \text{ M H}_2\text{O}_2$ 300 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın $0,25 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	68
8.43. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Fe}_2\text{SO}_4$ ve $0,05 \text{ M H}_2\text{O}_2$, 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	68
8.44. Demir reaktörde farklı pH değerlerinde 50 mgL^{-1} LAS derişimininin $0,20 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	69
8.45. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde akım veriminin $0,20 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	69
8.46. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin $0,20 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	69
8.47. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin pH 3,9 ve 11'de $0,20 \text{ A}'$ de zamanla değişimi	70
8.48. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde pH 3,9 ve 11'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.49. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	82
8.50. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	82
8.51. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	82
8.52. Alüminyum reaktörde farklı akım değerlerinde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi	83
8.53. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	84
8.54. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	85
8.55. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	85
8.56. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	85
8.57. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	86
8.58. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi	87
8.59. Alüminyum reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın 0,25 A'de zamanla değişimi	88
8.60. Alüminyum reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,25 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	88
8.61. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ LAS derişimlerinin 0,25 A'de zamanla değişimi	89
8.62. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilerinde 0,25 A'de akım veriminin zamanla değişimi	89

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.63. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilerinde 0,25 A'de enerji tüketiminin zamanla değişimi	89
8.64. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'nın 0,25 A'de zamanla değişimi	90
8.65. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	90
8.66. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'nın 0,25 A'de zamanla değişimi	91
8.67. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	91
8.68. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS ve 0,01M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS derişimlerinin 0,15 A'de zamanla değişimi	92
8.69. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ , 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,15 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	92
8.70. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS ve 0,01 M Na ₂ SO ₄ 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,25 A'de zamanla değişimi	93
8.71. Alüminyum reaktörde 0,01M Na ₂ SO ₄ 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,25A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	93
8.72. Alüminyum reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS ve 0,01M Na ₂ SO ₄ , 300 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,25 A'de zamanla değişimi	94
8.73. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ 300 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,25 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	94
8.74. Alüminyum reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS ve 0,05 M Na ₂ SO ₄ 300 mgL ⁻¹ LAS derişimlerinin 0,25 A'de zamanla değişimi	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.75. Alüminyum reaktörde 0,05 M Na ₂ SO ₄ 'lü 300 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde 0,25 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	95
8.76. Alüminyum reaktörde farklı pH değerlerinde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,20 A'de zamanla değişimi	96
8.77. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde farklı pH değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	96
8.78. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	96
8.79. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın farklı pH değerlerinde 0,20 A'de zamanla değişimi	97
8.80. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde farklı pH değerlerinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	98
8.81. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin farklı pH değerlerinde 0,20 A'de zamanla değişimi	99
8.82. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde farklı pH değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi	99
8.83. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi	99
8.84. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın farklı pH değerlerinde 0,20 A'de zamanla değişimi	100
8.85. Alüminyum reaktörde farklı pH değerlerinde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	101
8.86. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,15 A'de zamanla değişimi	102
8.87. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,15 A'de zamanla değişimi	102
8.88. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS derişiminin 0,20 A'de zamanla değişimi	103

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.89. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin 0,20 A'de zamanla değişimi	103
8.90. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin 0,25 A'de zamanla değişimi	104
8.91. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin 0,25 A'de zamanla değişimi	104
8.92. 10 mgL^{-1} SLES çözeltilisinde demir reaktörde 0,25 A'de (pH 7,2) SLES derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	105
8.93. 50 mgL^{-1} SLES çözeltilisinde demir reaktörde 0,25 A'de SLES derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	106
8.94. 10 mgL^{-1} SLES çözeltilisinde alüminyum reaktörde 0,25 A'de SLES derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	107
8.95. 50 mgL^{-1} SLES çözeltilisinde alüminyum reaktörde 0,25 A'de SLES derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	108
8.96. $12,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,4) LAS içeren porsuk suyu için demir reaktörde 0,25 A'de yüzey aktif madde derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	109
8.97. $52,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,32) LAS içeren porsuk suyu için demir reaktörde 0,25 A'de yüzey aktif madde derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	110
8.98. $12,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,42) LAS içeren porsuk suyu için alüminyum reaktörde 0,25 A'de yüzey aktif madde derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	111
8.99. $52,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,42) LAS içeren porsuk suyu için alüminyum reaktörde 0,25 A'de yüzey aktif madde derişimi ve pH ile akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi	112

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Katyonik ve non iyonik yüzey aktif maddelerin biyolojik olarak parçalanmasının çevreye olan etkisi	12
6.1. Kıta içi su kaynaklarında alıcı ortam kalite kriterleri	17
8.1. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilerinin farklı akış hızlarında elde edilen deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme)	33
8.2. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilerinin farklı akış hızlarında elde edilen deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme)	33
8.3. 0,1 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS içeren çözeltide pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36x10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹)	34
8.4. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde destek elektrolit (Na ₂ SO ₄) derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36x10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹)	34
8.5. Elektrokimyasal yükseltgeme ile elde edilen en iyi çalışma koşulları	34
8.6. 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ başlangıç derişimlerinin kütle aktarım katsayısına etkisi	49
8.7. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde akış hızının kütle aktarım katsayısına etkisi	49
8.8. 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi	49
8.9. 10 mgL ⁻¹ için 0,07 M, 0,1 M 0,15 M sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄) derişimlerinin kütle aktarım katsayısına etkisi	50
8.10. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS (pH 4,5) çözeltisinde farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları	52
8.11. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS (pH 5,5) çözeltisinde farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları	53
8.12. Demir reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS (pH 4,24) çözeltisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	53
8.13. Demir reaktörde reaktörün katot olduğu durumda 0,25 A'de başlangıç derişimlerinin etkisinin incelendiği deney sonuçları	54

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.14. Demir reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinin (pH 6,34) 0,15 A'de zamanla değişimi	54
8.15. Demir reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinin (pH 4,84) 0,25 A'de zamanla değişimi	54
8.16. Demir reaktörde 0,01 M FeII SO ₄ ve 0,05 M H ₂ O ₂ 300 mgL ⁻¹ LAS (pH 3,11) çözeltilisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	55
8.17. Demir reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,20 A'de farklı başlangıç çözeltisi pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları	55
8.18. 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ başlangıç derişimlerinin 0,20 A'de kütle aktarım katsayısına etkisi	72
8.19. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına etkisi	72
8.20. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,2 A'de pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi	72
8.21. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinde 0,25 A'de sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄) derişiminin kütle aktarım katsayısına etkisi	72
8.22. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS (pH 5,5) çözeltilisinde farklı akım değerlerinde edilen deney sonuçları	75
8.23. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS (pH 4,5) çözeltilisinde farklı akım değerlerinde elde edilen deney sonuçları	76
8.24. Alüminyum reaktörde 300 mgL ⁻¹ LAS (pH 4,24) çözeltilisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	76
8.25. Alüminyum reaktörün katot olduğu durumda başlangıç derişimlerinin etkisinin incelendiği deney sonuçları	77
8.26. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinin (pH 6,53) 0,15 A'de zamanla değişimi	77
8.27. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na ₂ SO ₄ içeren 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltilisinin (pH 4,92) 0,25 A'de zamanla değişimi	77

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
8.28. Alüminyum reaktörde 0,01 M ve 0,05 M Na ₂ SO ₄ 300 mgL ⁻¹ LAS (pH 4,27) çözeltilerinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	78
8.29. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde 0,20 A'de farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları	78
8.30. Alüminyum reaktörde 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde 0,20 A'de farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları	79
8.31. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ SLES (pH 7,2) çözeltilerinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	80
8.32. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ SLES (pH 7,2) çözeltilerinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	80
8.33. Demir reaktörde 10 mgL ⁻¹ 50 mgL ⁻¹ LAS içeren porsuk suyunda 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	80
8.34. Alüminyum reaktörde 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ LAS içeren porsuk suyunda 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları	81
8.35. 10 mgL ⁻¹ ve 50 mgL ⁻¹ başlangıç derişimlerinin 0,20 A'de kütle aktarım katsayısına etkisi	113
8.36. 50mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına etkisi	113
8.37. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde 0,20 A'de pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi	113
8.38. 50 mgL ⁻¹ LAS çözeltisinde 0,25 A'de sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄) derişiminin kütle aktarım katsayısına etkisi	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Elektrot alanı (m^2)
A_z	Elektrot hacmi (m^3)
ABS	Alkilbenzen sülfonat
C	Derişim (mgL^{-1})
C_0	Başlangıç derişimi (mgL^{-1})
CMC	Kritik misel derişimi (mgL^{-1})
D_d	Elektrot dış çapı (cm)
D_e	Elektrot iç çapı (cm)
D_L	Elektrot yüksekliği (cm)
DDB	Dodesil benzen
HLB	Hidrofil lipofil denge
I	Akım (amper)
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı ($mg O_2L^{-1}$)
K_{ow}	Oktan-ol-su kısmi katsayısı
k	Kütle aktarım katsayısı
LAS	Lineer alkilbenzen sülfonat
NTU	Nefelometrik bulanıklık birimi
SLES	Sodyum loril eter sülfat
V	Gerilim (volt)
V_R	Reaktör hacmi (m^3)
Q	Akış hızı (m^3h^{-1})

1. GİRİŞ

En genel anlamda kirlilik herhangi bir alıcı ortamda (hava, su, toprak vb.) normal koşullarda bulunmayan veya çok az miktarda bulunan kirletici maddelerin doğal olaylar ve insan faaliyetleri sonucu artması durumudur. Enerji kaynaklarının hızlı tüketimi, insan nüfusundaki hızlı artış, gelişen teknoloji gibi faktörler bu alıcı ortamların daha fazla kirlenmesini de beraberinde getirmiştir. Bu yüzden çevre kirliliğini minimize etmek için yapılanlar artık yetersiz hale gelmeye başlamış ve yeni çözüm yolları bulmaya çalışılmıştır.

Suya deşarj edilen atıkları ve özellikle yüzey aktif maddeleri zararsız hale getirmek için uygulanacak biyolojik arıtım yöntemlerinin etkili olmaması, arıtım için uzun süreye ihtiyaç duyulması ve beraberinde maliyet artışını getirmesi nedeniyle ileri arıtım teknolojilerinin uygulanmasını gerek duyulmuştur. Son on yılda biyolojik olarak parçalanması zor olan yüzey aktif maddeler için ozonlama ve fotokatalitik yükseltgeme gibi ileri kimyasal yöntemler kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerin maliyeti yüksek olduğu için fazla tercih edilmemiş ve bu gereksinimi karşılayacak etkinliğe sahip elektrokimyasal yöntemler uygulamaya başlanmıştır.

Elektrokimyasal arıtım suların içerdiği kirletici bileşenlerin uygulanan elektrik akımıyla çoğu durumda bir ön arıtım gerektirmeden güvenli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlayan bir yöntemdir.

İlk bakışta en büyük dezavantajının elektrik kullanımı olduğu düşünülen elektrokimyasal atıksu arıtımı; giderimi güç olan maddelerin (yüzey aktif maddeler, organik maddeler, mikroorganizmalar, ağır metaller) gideriminde ve geri kazanımında geniş ve etkin bir uygulama alanına sahiptir.

Bu çalışmada yüzey aktif maddelerin sudan uzaklaştırılması için iki farklı elektrokimyasal yöntem olan elektrokimyasal yükseltgeme ve elektrokimyasal çöktürme kullanılmıştır.

2. YÜZEY AKTİF MADDELER

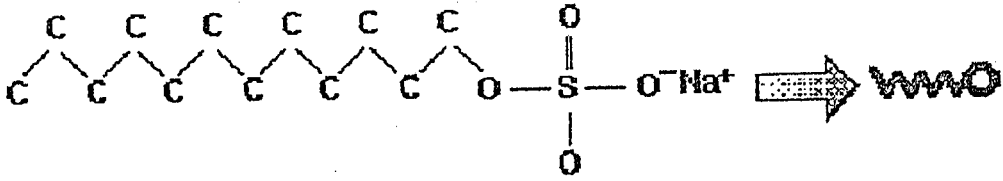
Yüzey aktif maddeler, sabun, deterjan ve emülsiyon yapıcılar gibi suyun yüzey gerilimini düşüren maddelerdir. Bu maddelerden en önemlileri ve en çok kullanılanları deterjanlardır. Genellikle evsel atıksu sistemlerinden çevreye deşarj edilen organik ve inorganik ürünlerin temel kaynaklarından birisi olan sentetik deterjanlar, sabunun dezavantajlarını ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. ABD’de 1932 yılında kullanılmaya başlanan deterjanlar, II. Dünya Savaşından sonra giderek daha yaygınlaşmıştır. 1953 yılında sabun üretimiyle aynı miktarda üretilen deterjanlar, 1970 yılında toplam temizleme maddelerinin % 85’ini oluşturacak kadar hızla yayılmıştır.

Bir çok üstün özellikleri nedeniyle sabuna tercih edilen sentetik deterjanlar, evlerde, çamaşırhanelerde, deri, kağıt, tekstil, kozmetik, lastik ve gıda endüstrisinde büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Ekonomik gelişme ve nüfus artışı sonucunda deterjanların yarattığı çevre sorunları her geçen gün büyük boyutlara ulaşmaktadır.

2.1. Kimyasal Özellikleri

Yüzey aktif madde molekülü hidrofilik ve hidrofobik grubun bileşiminden oluşur. İlk yüzey aktif madde monomeri, çift yapısı gereği amfilik olarak bilinir. Yüzey aktif maddenin hidrofobik son kısmı uzun bir hidrokarbon zinciridir. Hidrofilik ilk kısmı ise sodyum, klorür veya bromür gibi anyon veya katyonları içerir. Suda iki grubun birbirlerine karşı zıt davranışı, temizlenecek madde üzerindeki hidrofobik özellikteki kirleri uzaklaştırır. Molekülün hidrofobik kısmı yağ ve kirlere yapışmakta, hidrofilik kısmı ise kir moleküllerini dokudan uzaklaştırarak suya geçirmektedir [1].

Şekil 2.1’de yüzey aktif madde monomeri bir tadpole yapı olarak verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey aktif maddelerin molekül ağırlığının 200 gmol^{-1} - 2000 gmol^{-1} arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Sodyum dodesil sülfat yüzey aktif madde monomeri

Sulu çözeltiye ilave edilen yüzey aktif maddeler, emülsiyon oluşumunu kolaylaştırıp yüzey gerilimini azaltarak su-hava ve yağ-su ara yüzeyinde birikmeye eğilimlidirler ve biraraya gelerek miselleri oluştururlar. Misellerin oluştuğu eşik derişimi kritik misel derişimi (CMC) olarak ifade edilir. CMC'den daha fazla miktarda sulu çözeltiye ilave edilen yüzey aktif maddeler çözeltideki monomerlerin sayısını arttırmayıp ek misellerin oluşumuna katkıda bulunmaktadır.

Sulu çözeltide misel oluşumunu sağlayan yüzey aktif madde monomerleri miselin içinde yer alan hidrofobik gruba doğru yönelir ve hidrofobik grubun, organik moleküllerin bağlı olduğu misele dönüşmesini sağlayarak kirleticilerin sudaki çözünürlüğünün artmasına neden olurlar. Bu durum misellerin çözünmesi olarak tanımlanmaktadır.

Misellerin oluşması için gerekli yüzey aktif madde derişimi küçüktür ve yüzey aktif maddenin tipi, sıcaklık ve su sertliği gibi faktörlere bağlıdır. Genel olarak yüzey aktif maddenin nonpolar molekül ağırlığının artmasıyla, hidrofobik zincirin dallarının ve hidrofilik grubun sayısının azalması, çözeltideki organiklerin çözünürlüğünü artırır ve sulu çözeltide yüzey aktif maddenin hidrofobisitesi arttığı için CMC azalır. CMC tipik olarak 10-2000 mgL⁻¹ arasında değişir.

İyonik yüzey aktif maddenin sudaki çözünürlüğünün CMC'ye eşit olduğu sıcaklık krafft noktası olarak adlandırılır. Krafft noktasının altında miseller oluşmamakta ve yüzey aktif madde çözeltisi çözündürme etkinliğine sahip olmamaktadır. Krafft noktası laboratuvar denemeleriyle belirlenir.

Bulanma noktasında (cloud point) ayrı bir yüzey aktif maddece zengin faz oluşmaktadır. Böyle bir ortamda yüzey aktif maddelerin çökmesi istenmemektedir. Çünkü misellerin çözünmesi için sulu çözeltide çok az yüzey aktif madde oluşmaktadır. Bulanma noktası laboratuvar denemeleriyle hesaplanır.

Kirleticilerin tipine ve sıcaklığa, yüzey aktif maddenin yapısına, çözeltide bulunan elektrolitlerin derişimine ve tipine bağı olarak termodinamik olarak dengede sıvı kristaller de oluşmaktadır.

Yüzey aktif maddenin hidrofilik ve hidrofobik kısımlarının göreceli etkisi yüzey aktif maddenin etkinliğinin bir göstergesidir. Bu etki yüzey aktif madde yükü olarak tanımlanır ve molekül başına ayrılan iyon sayısının molekülün boyutuna oranı şeklinde ifade edilir. Sulu çözeltide yüzey aktif maddenin çözünürlüğü artan yüzey aktif madde yüküyle artmaktadır.

Hidrofil-lipofil denge (HLB) sayısı, molekülün hidrofilik ve hidrofobik kısımlarının göreceli etkilerinin bir göstergesidir ve yüzey aktif madde içeren çözelti ve organik fazların göreceli benzerliği olarak tanımlanır. Düşük HLB sayısı, organik fazların göreceli benzerliğinin daha yüksek ve sudaki çözünürlüğün daha düşük olduğunu gösterirken yüksek HLB sayısı yüzey aktif madde çözünürlüğünün fazla olduğunu gösterir. Düşük HLB sayılı yüzey aktif maddeler hidrofilik iç kısım ve hidrofobik dış kısma sahip ters faz miselleri oluşturur.

Sulu çözeltiye yüzey aktif madde ilave edildiğinde çözeltide bir seri özellik değişmesi gerçekleşir. Örneğin ortamdaki hava-su yüzey gerilimi azalır ve bu gerilim, CMC'de minimuma ulaşır.

CMC'den sonra ek miseller oluştuğu için çözeltideki organiklerin çözünürlüğü önemli derecede artmaktadır. Gerçekte bu çözünürlük toplam çözünürlüktür. Toplam çözünürlük misellere giren kirletici molekülleri ve serbest sulu çözeltideki kirletici molekülleri içermektedir. Bazı durumlarda miseller kirleticilerin oluşturduğu ayrı bir faz olarak düşünülebilir. Genellikle özel bir kirleticinin K_{ow} 'si (oktanol-su kısmi katsayı) ne kadar büyük ise misel fazında parçalanmaya eğilimi o kadar yüksektir. Misellerin çözündürme süreci yaygın organik kirleticilerin sudaki çözünürlüğünü 10-100 kat arttırmaktadır.

3. YÜZEY AKTİF MADDE ÇEŞİTLERİ

Yüzey aktif maddeler genel olarak hidrofilik ilk grubun yapısına göre anyonik, katyonik, non iyonik ve amfoterik olarak dört grupta sınıflandırılır. Katyonik, non iyonik ve amfoterik yüzey aktif maddelerin kullanımı anyonik yüzey aktif maddelere göre daha sınırlıdır [2]. 1987 yılından itibaren batı ülkelerinde üretilen yüzey aktif maddelerin %62'si anyonik, %29'u non iyonik, %9'u katyonik ve %5'i amfoterik özelliktedir.

3.1. Anyonik yüzey aktif maddeler

Genellikle sülfonat, sülfat veya karboksil grubundan türetilen anyonik yüzey aktif maddeler, negatif yüklü yüzey aktif madde iyonlarını çözeltiye veren bileşiklerdir. Anyonik yüzey aktif maddelere örnek olarak sülfonik asit tuzlar, alkol sülfatlar, alkilbenzen sülfonatlar, fosforik asit esterler ve karboksil asit tuzları verilebilir. Bu maddeler iyi bir çözücü olmaya eğilimli ve toksik özelliğe sahip değildir.

Dallanmış hidrokarbon zincirine sahip yüzey aktif maddeler, ABS (alkil benzen sülfonat), düz hidrokarbon zincirine sahip yüzey aktif maddeler, LAS (lineer alkilbenzen sülfonatlar) olarak adlandırılır. LAS bileşiklerine örnek olarak 12 karbonlu hidrokarbon zincirinin 9. karbon atomuna benzen halkasının bağlı olduğu formül verilebilir.

Sert sularda daha kararlı olmaları, gösterdikleri performans ve maliyeti gözönüne alındığında anyonik yüzey aktif maddeler, diğer yüzey aktif maddelere göre daha fazla kullanım alanına sahiptirler. Alkil benzen sülfonat (ABS) bu grubun en çok kullanılan üyesidir ve 10-16 karbonlu hidrokarbon zincirinin benzen halkasına eklenmesi ve sülfolanmasından sonra sodyum hidroksit veya sodyum karbonat ile nötrale edilmesiyle elde edilir. ABS'nin temeli dodesil benzenin sülfolanmış tuzu olan alkil aril sülfonatlarıdır.

Bu grupta yer alan diğer bir yüzey aktif madde ise uzun zincirli alkollerin sülfatları olan alkol sülfatlarıdır. Genel formülü 3.1 eşitliğinde gösterilmiştir. Alkol sülfatlar biyolojik olarak kolay parçalanır ve bol köpük oluşumuna neden olur.

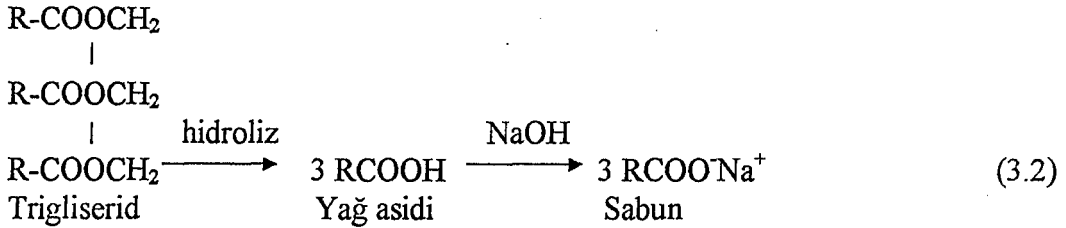
Şampuan yapımı gibi özel kullanım alanı olmakla birlikte diğer deterjanlara da karıştırılır.



3.1.1. Sabunlar

20. yy'ın ortalarına kadar en önemli yüzey aktif madde olan sabunlar, bugün bile gelişen dünyada konumlarını korumaya devam etmektedirler. Endüstri bölgelerinde genellikle yumuşak deterjanların kullanımı tercih edildiği için sabunların kullanım alanları sınırlanmıştır. Örneğin Birleşik Devletlerde kişisel temizlik için kullanılan tablet sabunlar, yüzey aktif maddenin ancak %15'ni oluşturmaktadır.

Sabunlar, hayvan veya bitki yağlarından (trigliseridler) elde edilen yağ asitlerin bir bazla nötralize edilmesiyle hazırlanır.

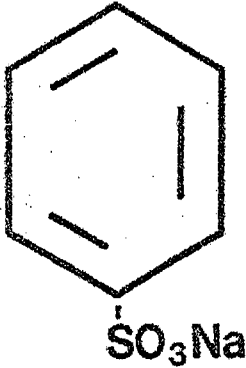
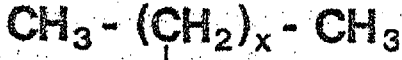


Sabunun suda çözünmeyen hidrokarbon zinciri su moleküllerinden uzaklaşıp kendi arasında kümeler oluştururken baş kısmını oluşturan polar karboksil grubu ortamdaki su molekülleri ile birleşerek misel halinde kümeler oluşturur. Sonuçta sabun miselinde karboksil grubu negatif yüklü yüzey oluşturur ve non polar hidrokarbon zinciri miselde gizlenir (Şekil 3.1).

Petrol, yağ ve diğer suda çözünmeyen organik maddeler apolardır. Yıkama suyu içinde sabun ve bu tip kirleticiler birbirine karıştığında sabun misellerinin apolar hidrokarbon kısmı, apolar kirlilik yapıcı molekülleri çözer. Bu durumda merkezde apolar kirlilik moleküllerinin olduğu yeni sabun miselleri oluşur.

Uzun yıllar kullanılmış etkili bir madde olan ABS'ye göre daha kolay parçalanan LAS, %96,5 saflıktadır ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi 320 g mol^{-1} molekül ağırlığına sahiptir. Hemen hemen aynı temizlik etkisi göstermesi nedeniyle son yıllarda ABS'nin yerini almış ve deterjan yapımında en çok kullanılan ham maddelerden biri haline gelmiştir.

$C_{11.9}$ LAS



İzomerler:

$$C_{10} = 9\%$$

$$C_{11} = 30\%$$

$$C_{12} = 34\%$$

$$C_{13} = 19\%$$

$$C_{14} = 9\%$$

Şekil 3.2. LAS'ın yapısı

3.1.3. Alken sülfonatlar

Alken sülfonatlar, alkilbenzen sülfonatla karşılaştırıldığında daha pahalı ve genellikle en az temizleme özelliğine sahip maddelerdir. Bu maddeler alkenlerin kükürt dioksit ve oksijenle tepkimeye girdikten sonra sülfonik asitle nötralizasyonu ile üretilirler.

3.1.4. Olefin sülfonatlar

Bu tür yüzey aktif maddeler 1969 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Kükürt dioksitin lineer α olefinlerle nötralizasyonu ile üretilirler.

3.1.5. Birincil alkil sülfatlar

Alkilbenzen sülfonatlardan daha ucuz üretilmelerine ve pek çok amaç için etkisiz olmalarına karşın geniş oranda kullanılırlar ve birincil alkollerin sülfürik asitle nötralizasyonu ile üretilirler.

3.1.6. İkincil alkil sülfatlar

Alkenlerin sülfürik asitle tepkimeye girmesiyle hazırlanırlar. Lineer alken kullanıldığında karbon atomlarının konumlarının dışındaki herhangi bir yere sülfat ester grubu eklenir ve kompleks bir izomer karışımı oluşturulur.

3.1.7. Ester ve amid sülfonatlar

Oldukça pahalı olmasına karşın diğer anyonik yüzey aktif maddelere göre daha fazla kullanım alanları vardır. Açıl klorürlerin kısa hidroksisülfonik tuzlarının zinciriyle veya amino sülfonik tuzlarla tepkimeye girmesiyle üretilirler.

3.1.8. Sülfo-yağ asitleri

Üretimleri pahalı olduğu için az miktarlarda kullanılırlar. Sülfonat ve karboksil gruplarının nötralizasyonu ile sonuçlanan yağ asidinin kükürt trioksitle sülfonatlanmasıyla üretilirler. Sülfonik grup daima α - konumunda bulunur.

3.1.9. Sülfatlı polioksietilen eterler

Polioksietilen non iyonik yüzey aktif maddelerden türetilir ve genel bir formüle sahiptir. Burada n, genellikle 6 veya 7'dir (3.5).



3.2 Katyonik Yüzey Aktif Maddeler

Çözeltiye pozitif yüklü yüzey aktif madde iyonları veren bileşiklerdir. Poliaminler ve tuzları, kuaterner amonyum tuzları ve amin oksitler örnek olarak verilebilir. Toksik özelliğe sahiptirler ve bu nedenle yaygın olarak kullanılmazlar. Ayrıca anyonik yüzeyleri soğurmaya da eğilimlidirler.

Katyonik yüzey aktif maddeler, yapı olarak değiştirilmiş kuaterner amonyum (alkil aril amonyum) bileşikleridir ve pahalı olduklarından kullanım alanları sınırlıdır. Antiseptik özelliklerinden dolayı hastane ve benzeri yerlerde kullanılırlar. Birbirleriyle nötralize oldukları ve suda çözünmeyen tuzlar oluşturdukları için anyonik yüzey aktif maddelerle birlikte kullanılmazlar.

3.3. Non İyonik Yüzey Aktif Maddeler

Suda iyonize olmayan hidrofilik ilk gruptur ve suda iyonize olan hidrofilik grubu içeren yüzey aktif maddelere göre bu tür yüzey aktif maddelerin ancak %25'i kullanılmaktadır. Polietilenli alkilfenoller, alkol etoksilatlar, alkil fenol etoksilatlar ve alkanolamidler örnek olarak verilebilir. İyi çözücüdür ve toksik özelliğe sahip değildir. Anyonik yüzey aktif maddeler gibi performansları çözeltideki tuzların varlığından etkilenmez.

Daha önceleri endüstride emülsiyon aracı olarak geliştirilen non-iyonik yüzey aktif maddeler, yüksek afinitelerinden dolayı suda tamamen iyonize olmazlar. Hidrofilik ve hidrofobik grupların uzunluklarını değiştirebilme özelliği avantajlarından biridir. Köpüksüz olmaları nedeniyle otomatik yıkayıcılarda kullanılırlar. En çok kullanılan türü nonilfenil etoksilatlardır. Türkiye'de kullanılan türü ise polietilen glikol yağ asiti esterleridir.

Biyolojik olarak parçalanan non-iyonik aktif maddeler, viskoz, likit veya yumuşak kremlerdir, toz deterjan formüllerinde pek kullanılmazlar. Ayrıca tekstil sanayiinde elyaf temizleyici ve kabartıcı olarak kullanılırlar [3].

3.3.1. Alkol etoksilatlar

Alifatik alkollerle etilen oksitlerin tepkimeye girmesiyle üretilirler. Bu maddelerin ilk üretim tipi C₁₃ birincil alkol zincirinden hazırlanmıştır. Fakat alkol etoksilatlar yavaş bir hızda biyolojik olarak parçalandıkları için bugünlerde lineer alkoller daha fazla oranda kullanılmaya başlanmıştır.

3.4. Amfoterik Yüzey Aktif Maddeler

Amfoterik yüzey aktif maddeler, hem asidik hem de bazik özellikleri gösterirler. İçinde buldukları çözeltinin pH değerine göre anyonik veya katyonik madde gibi davranırlar. Polipeptitlerden üretilen yüzey aktif maddeler pahalı olduklarından kullanım alanları kısıtlıdır. Başlıca üyeleri betainler, sülfabetainler ve sülfobetainlerdir.

4. YÜZEY AKTİF MADDELERİN İNSAN VE ÇEVRE SAĞLIĞINA ETKİLERİ

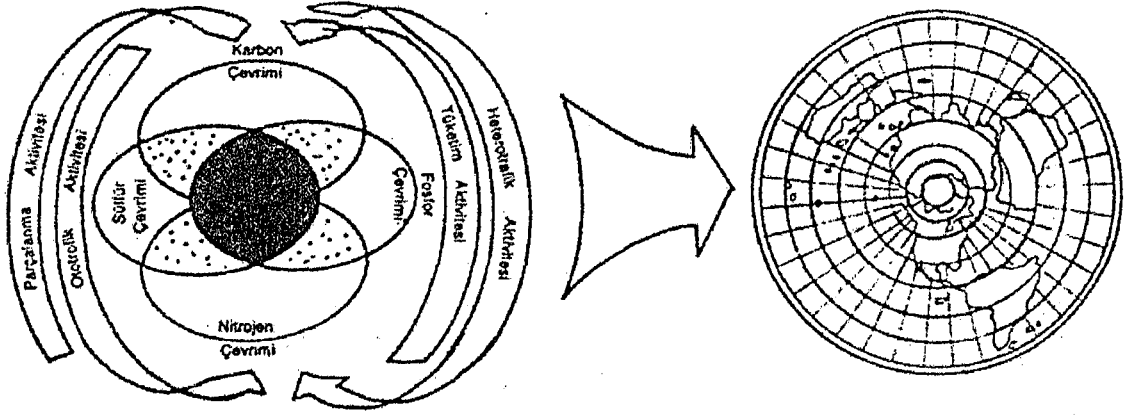
Sentetik deterjanlara temizleme özelliği veren yüzey aktif maddeler; toz deterjanlarda sodyum dodesil benzen sülfonat DDB, primer ve sekonder alkil sülfonatlar; etilen oksit türevleri, alkoller; alkil fenol ve aminleri, sıvı deterjanlarda ise potasyum amonyum, mono ve tri etanolamin tuzlarıdır.

Anyonik yüzey aktif maddelerin fonksiyonel grubu genelde sülfat veya sülfonatları içerir ve hidrokarbon zincirleri düz olduğundan biyolojik olarak parçalanırlar. Katyonik ve non iyonik yüzey aktif maddelerin biyolojik olarak parçalanmasının çevreye olan etkisi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Katyonik ve non iyonik yüzey aktif maddelerin biyolojik olarak parçalanmasının çevreye olan etkisi

Yüzey aktif madde türü	Fonksiyonel grup içeriği	Çevreye etkisi
Katyonik yüzey aktif maddeler	a) tetrametil amonyum	biyolojik olarak parçalanmaz, bakterileri olumsuz yönde etkiler (hastahane ve gıda sanayiinde kullanılır.)
	b) diterildimetil	genellikle parçalanır, bakterileri olumsuz yönde etkileme özelliği azdır veya hiç yoktur (çamaşır yumuşatıcısı olarak kullanılır).
İyonik olmayan yüzey aktif maddeler	a) etilen oksit polimerleri b) amidler (NH ₂) ve karboksiller(-COOH)v.d.	genelde sıvı olduklarından çok az köpük yaparlar, biyolojik parçalanmaya hem uğrama hem de uğramama özelliği gösterebilirler, (az köpük istenen yerlerde pH ve sertlik bakımından yüksek oranda değişken özelliğe sahip sularda kullanılırlar).

Doğada birinin çıktısı diğerinin girdisi olan birbiriyle bağlantılı biyolojik ve kimyasal sayısız çevrimler oluşmakta ve çevre kalitesi, bu çevrimler arasında sağlanan denge ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.1. Ana ekolojik çevre birimlerinin birbirleri arasındaki ilişkiler

Karbon çevrimine dahil olan birincil deterjan girdileri organik kısımdan yani yüzey aktif maddeden oluşmaktadır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bu organik kirleticiler artılmadığı zaman parçalanma ve tüketim aktivitesi aracılığıyla organik karbonu etkilemekte ve karbon çevrimi ile sürekli taşınmaktadır.

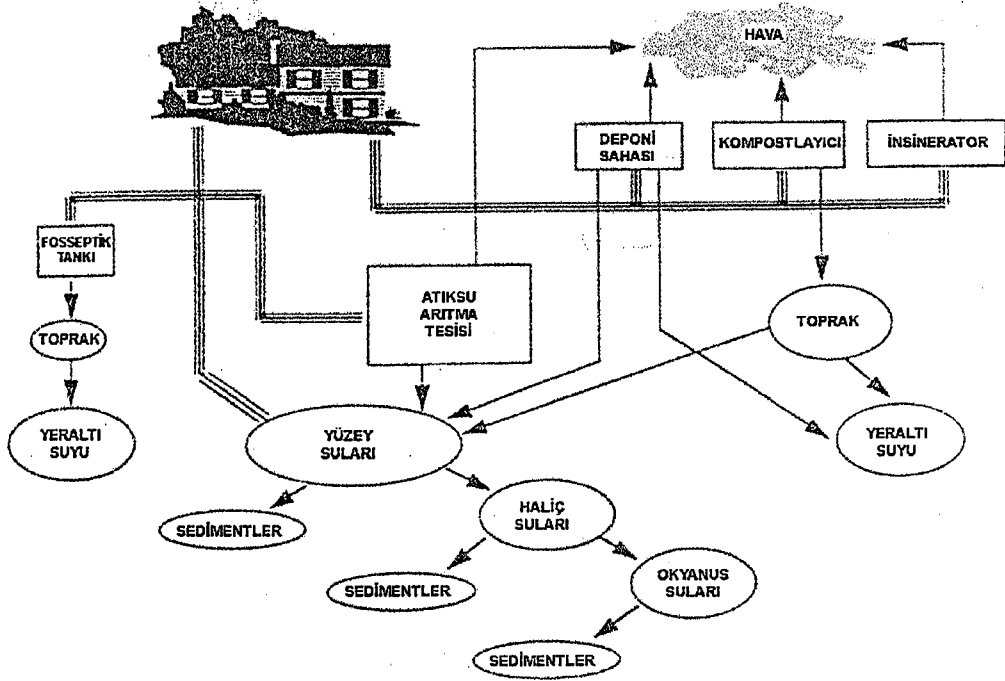
Dallanmış hidrokarbon zincirli yüzey aktif maddeler düz zincirli yüzey aktif maddelere göre biyolojik olarak 5-10 kat daha az parçalanıp doğada daha çok birikirler. Örneğin DDB bir çeşit dallanmış alkil zincirli alkil benzen sülfonat (ABS) olup biyolojik olarak çok zor parçalanırken alkil zincirinin düz olduğu lineer alkil benzen sülfonatlar (LAS) biyolojik olarak çok kolay parçalanır.

Biyolojik olarak parçalanması zor olan yüzey aktif maddelerin oluşturduğu köpük problemini çözmek için ABD’de ve Avrupa’da 1964-65 yıllarında tümüyle LAS kullanılmaya başlanmıştır. Değişik tuzluluk derecesine sahip alıcı ortam analizlerinde LAS’ın %80-90 oranında parçalandığı, bir atıksu numunesinde ise $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ derişimin altına 2 aylık bir periyod içinde ulaştığı belirlenmiştir. Aynı miktarda zor parçalanan ABS’li atıksu numunesinde ise ABS derişimi 5,5 yıllık bir periyotta dahi $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ ’e ulaşmamıştır.

Aerobik arıtma tesislerinde LAS'ın yarattığı toksisite önemli miktarda olmamaktadır (LAS'ın $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ 'e kadar ufak tatlı su balıkları üzerindeki toksisite etkisinin çok düşük olduğu belirlenmiştir). Bunun nedeni biyolojik parçalanma sırasında atmosferle su arasındaki ara kesitte gerçekleşen gaz transferi ile alıcı ortamda tüketilen çözülmüş oksijenin yeniden kazanılmasıdır.

Yüzey aktif maddenin çoğu canlılara karşı çok az tehlike oluşturmasına karşın deterjanlardaki bazı non iyonik yüzey aktif maddeler çevresel problemlere neden olurlar. Doğal suda biriken pek çok polifosfat (su yumuşatıcısı olarak ilave edilen ve alkaliniteyi koruyan) alg kümelerinin patlamasına ve ötrofikasyona neden olur.

Deterjan içeren tüketim maddelerinin kullanılması ve sularda birikmesi sonucu oluşan LAS'ın çevreye ulaşmasının temel yolları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. LAS'ın çeşitli çevresel ortamlarda dağılımını gösteren akış diyagramı

Deterjanların derin sulara ulaşmaları özellikle kanalizasyon sisteminin bulunmadığı kırsal bölgelerde sık rastlanan bir durumdur. Atıksuyu yerleşim bölgesinden uzağa taşıyan kanalizasyon sistemi yoksa deterjan içeren evsel ve endüstriyel atıksu, septik çukurlarından veya birikinti sularından toprağa sızmaktadır. Yeraltı sularından yararlanmak için açılan kuyulardan da yüzey aktif maddeler insan, hayvan ve bitkilere ulaşabilmektedir.

Yüzey aktif maddelerin toksik etkilerinin yanında sulara toksik dozun altında dahi bulunması biyolojik yaşam üzerinde bir çok olumsuz etkiye neden olmaktadır. Sucul hayvanlar üzerinde patolojik, fizyolojik ve biyokimyasal etkilere sebep olurken sucul bitki türlerinde klorofil-protein kompleksinin parçalanması, membrana zarar vererek hücre ölümü, metabolizma ve büyümenin geciktirilmesi gibi etkilere neden olmaktadır [4].

Yüzey sularında fazla miktarda bulunmaları ve yaygın oranda kullanımlarından dolayı ABS'nin toksikolojik özelliği üzerine araştırmalar yapılmıştır. Özellikle balık türlerinin ABS'nin toksik etkisinden belli koşullar altında kolayca etkilendiği belirlenmiştir [5].

LAS'ın su ortamında yaşayan canlılara toksisitesinin, alkil zinciri daha kısa olduğu için düşük olduğu belirlenmiştir. Ticari LAS'ın akut toksisitesi 1-10 mgL⁻¹ arasındadır ve kronik toksisite bakımından nehir suyundaki derişimi eşik seviyesinden daha düşüktür.

Yapılan bir çalışmaya göre bazı durumlarda su sertliği ve sıcaklığın artmasıyla yüzey aktif maddenin toksisitesi artmış ve çözünmüş ve askıda katıların varlığı katyonik yüzey aktif maddelerin miktarını azaltırken anyonik ve non iyonik yüzey aktif maddelere herhangi bir etkisi olmamıştır [6].

4.1. Yasal Düzenlemeler

Deterjanlarda bulunan dodesilbenzen (DDB) yüzey aktif maddesi, doğada yüzyıllarca kalabilen biyolojik olarak parçalanamayan "sert deterjan" hammaddesidir. DDB'nin parçalanamayan aromatik halkasının kanserojen olmasından dolayı başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere tüm Avrupa ülkelerinde deterjanla ilgili çıkan yasal düzenlemelerle kullanımı yasaklanmıştır. Bunun yerine yumuşak deterjan hammaddesi olan LAS üretilmektedir.

DDB içeren deterjanların kanserojen olma tehlikesi Türkiye’de gündeme gelince, 10 Kasım 1980 tarih ve 17156 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan Bakanlar Kurulu Kararnamesi ile deterjanların toplam yüzey aktif madde miktarının en az % 50’sinin parçalanabilir cinsten olması zorunluluğu getirilmiştir. 1987 yılından beri ise Türkiye’de üretilen deterjanlarda % 100 LAS kullanılmaktadır.

Merkezi Londra’da bulunan “Sentetik Deterjanlar Daimi Komitesi” 4. Gelişim Raporun’da aldığı kararla deterjanların da bir kirlilik indikatörü olarak kabul edilmelerini, biyolojik ve fiziksel özellikleriyle temiz görünen suda $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ ’den fazla deterjan bulunması halinde o suyun kirli kabul edilmesini önermiştir. Deterjanların suda bulunmasına izin verilen miktarı Amerika ve Avrupa’nın bir çok ülkesinde $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ olmasına rağmen Dünya Sağlık Örgütü’nün temkinli yaklaşımı ile bu seviye $0,2 \text{ mgL}^{-1}$ ’de tutulmaktadır [7].

Ülkemizdeki deterjan ile ilgili standart ve düzenlemeleri kısaca şu şekilde özetleyebiliriz.

TS 266 içme suları standardında izin verilebilir ABS miktarı, $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ ve maksimum ABS miktarı, $1,0 \text{ mgL}^{-1}$ olarak sınırlanmıştır.

DSİ tarafından hazırlanan Kıta içi Su Kaynaklarının Kirlenmesinin kontrolü hakkında teknik şartnamede, IA ve IB sınıfı sularda ABS miktarı $0,5 \text{ mgL}^{-1}$, II sınıf sularda ise ABS miktarı $0,1 \text{ mgL}^{-1}$ olarak sınırlanmıştır.

1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu EK-5’de yüzey aktif maddelerle ilgili sınırlamalar μgL^{-1} düzeyinde geliştirilmiştir.

İSKİ Atıksuların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliği, kanalizasyona deşarj edilecek atıksulardaki ABS miktarını $0,5 \text{ mgL}^{-1}$ olarak sınırlamıştır. Atıksulardaki ABS miktarını belirleyen bu sınırlama İSKİ’nin yetki alanları içindedir.

2872 sayılı Çevre Kanununa dayalı olarak çıkarılan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde, ABS alıcı ortam ve deşarj limitleri getirilmiştir. Yönetmelikteki değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Deterjanlarla ilgili en önemli mevzuat Sağlık ve Sosyal Yardım Bakanlığı (SSYB) tarafından 10.11.1980’de yapılan tüzük değişikliğidir. Bu tüzük

değişikliği ile deterjanlara katılan yüzey aktif maddelerin %50'sinin parçalanabilir cinsten (LAS) olması mecburiyeti getirilmiştir.

Çizelge 6.1. Kıta içi su kaynaklarında alıcı ortam kalite kriterleri

Sınıf	Alkil Benzen Sülfonat Derişim Sınırı (mgL ⁻¹)
I. Sınıf	0,05
II. Sınıf	0,20
III. Sınıf	1,00
IV. Sınıf	1,50
Derin Deniz Deşarjında Anyonik yüzey aktif maddeler	7,00

5. YÜZEY AKTİF MADDELERİN KLASİK YÖNTEMLERLE GİDERİLMESİYLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Endüstriyel uygulamada olduğu kadar evsel kullanımda da yüzey aktif maddelerin pek çok uygulaması vardır. Bu maddeler genellikle temizlik maddesi olarak kullanılır ve büyük miktarlarda evsel ve endüstriyel atıksularla deşarj edilirler. Doğal su kaynaklarına karıştıklarından olumsuz etkilere neden olurlar. Biyolojik atıksu arıtım tesislerinin verimini büyük oranda azaltırlar.

Yapılan bir çalışmada alkil-polieter-sülfat grubuna ait (kritik misel derişimi = 300 mgL^{-1}) anyonik yüzey aktif maddenin nanofiltrasyonla ayrılması araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, bir membranda çeşitli yüzey aktif madde derişiminde, farklı sıcaklıklarda ve akış hızlarında yapılmıştır. Deney sonuçları ayırmanın, yüzey aktif maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, sulu çözeltideki iyonik türlerle membran arasındaki elektrostatik etkileşime bağlı olduğunu göstermiştir [8].

Diğer bir çalışmada etoksilli non iyonik ve biyolojik parçalanmaya dayanıklı yüzey aktif maddelerin ozonla birlikte H_2O_2 kullanarak aerobik olarak parçalanması incelenmiştir. Bu yöntemle ozon ve H_2O_2 'nin hem lineer ikincil alkol etoksilat hem de etilen oksit/propilen oksit yüzey aktif maddelerin biyolojik parçalanmalarını önemli derecede artırdığı belirlenmiştir [9].

Bir başka çalışmada ise %0,01'den daha büyük derişimlerdeki yüzey aktif maddelerin, biyolojik parçalanması araştırılmıştır. İki non iyonik polietoksilli yüzey aktif madde, Nedol 91-8 ve Makon 12, hidrofobik organik bileşikleri çözebilme yeteneğine sahip oldukları için bu çalışmada kullanılmıştır. % 0,01, 0,025 ve 0,05'lik yüzey aktif madde başlangıç derişimlerinde bir seri kesikli reaktörde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda iki non iyonik yüzey aktif maddenin biyolojik olarak parçalanmadan kalan derişimleri, $0,35 \text{ mgL}^{-1}$ ve $0,15 \text{ mgL}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Arıtım verimi, başlangıç yüzey aktif madde derişimiyle değişmemesine karşın kalan derişim başlangıç derişimiyle artmaktadır [10].

İkincil alken sülfonatların (SAS) kütleli akış hızını belirlemek için yapılan bir çalışmada ham ve anaerobik olarak çürütülmüş çamurda SAS'ın

derişimi iyon çifti/süperkritik akışkan ekstraksiyonu ve GC/MS (Gaz Kromatografisi/Kütle spektrometrisi)sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda atıksuda yaklaşık % 99,7 oranında SAS giderimine ulaşılmıştır [11].

Yapılan bir diğer çalışmada ise yüzey aktif madde içeren atıksuyun fenton ajanıyla arıtımı araştırılmıştır. Kullanılan yüzey aktif maddeler anyonik alkilbenzen sülfonat (ABS) ve lineer alkilbenzen sülfonattır (LAS). pH'nın, hidrojen peroksit (H_2O_2), demir sülfat ($FeSO_4$) miktarının ve sıcaklığın yüzey aktif maddenin giderimi üzerine etkisi belirlenmiştir. Uygun koşullar altında %95'in üzerinde ABS ve LAS giderimine ulaşılmıştır [12].

6. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ

6.1. Elektrokimyasal Yöntemlerle Yüzey Aktif Maddelerin Giderimi

Evsel atıksular dünyadaki pek çok gelişmiş ülkenin su kalitesini olumsuz yönde etkileyen önemli kirletici kaynaklardan biridir. Evsel atıksuda bulunan sentetik deterjanlar lineeralkilbenzensülfonat (LAS) ve izomerlerinin bir karışımıdır. Lineeralkilbenzensülfonat bir yüzey aktif maddedir ve tekstil, tabaklama, elyaf, gıda, boya, polimer, bitki üretimi, kozmetik, eczacılık, maden, yağ geri kazanımı ve kağıt ve kağıt hamuru üretim endüstrilerinden deşarj edilen atıksularda da büyük miktarda bulunur[13].

Evsel atıksuların içerdiği yüzey aktif maddeler, tüm temizlik etkinlikleri için kullanılan deterjanlar nedeniyle devamlı olarak ve önemli miktarda oluşmakta ve büyük çevresel problemlere neden olmaktadır [14]. Bundan dolayı deterjanlı suların deşarj edilmeden önce arıtılması gerekir.

Biyolojik arıtım organik kirleticilerin arıtımında en çok kullanılan ve ekonomik bir yöntemdir. Ancak birçok yüzey aktif maddenin biyolojik olarak parçalanması zor olduğu için bu yöntemin maliyeti oldukça yüksektir. Bu yüzden yüzey aktif maddeyi içeren atıksuyun birincil arıtımı, biyolojik arıtıma dayanıklı yüzey aktif maddelerin parçalanmasını sağlayacak şekilde olmalıdır.

Son on yılda biyolojik olarak parçalanması zor olan yüzey aktif maddeler için ozonlama ve fotokatalitik yükseltgeme gibi ileri kimyasal yöntemler kullanılmıştır. Ancak bu yöntemlerin maliyeti yüksek olduğu için fazla tercih edilmemiş ve bu gereksinimi karşılayacak etkinliğe sahip elektrokimyasal yöntemler uygulanmaya başlanmıştır.

Yüzey aktif maddelerin elektrokimyasal arıtımı için genellikle üç yöntem kullanılabilir. Bu yöntemlerden ilki çözünmeyen anotun kullanıldığı elektrokimyasal yükseltgeme, diğerleri çözünen anotun kullanıldığı elektrokimyasal çöktürme ve elektrokimyasal yüzdürmedir.

6.1.1. Elektrokimyasal yükseltgeme

Elektrokimyasal yükseltgeme ile yüzey aktif maddelerin anotta yükseltgenmesi gerçekleşmektedir. Yükseltgeme tepkimesi termodinamik sınırlamalardan çok kinetik sınırlama ile yavaş gerçekleşir. Elektrokimyasal yükseltgemenin hızını arttırmak için elektrokatalitik anot tercih edilir.

Organik maddelerin elektrokimyasal olarak yükseltgenmesinde en çok kullanılan elektrotlar, Pt, Ti/CrO₂, Ti/SnO₂, PbO₂, Ti/Sn, O₂/PbO₂'dir. Bu tür elektrotlarda anodik yükseltgeme elektrodun yükseltgen yüzeyinde oluşmaktadır. Organik bileşiğin yüzey üzerinde adsorpsiyon kinetikleri, adsorplanan yüzeyin kimyasal yapısı ve özellikleriyle ilgilidir [15].

Elektrokimyasal yükseltgeme birçok organik bileşiğin uzaklaştırılması için etkili bir yöntemdir. Bu arıtım yöntemi yüzey aktif maddeler, tiyosiyanat, siyanür ve fenol içeren atıksuların arıtılmasında başarı ile kullanılmıştır [16].

Genel olarak katotta indirgeme, anotta ise elektrot yüzeyinde direkt veya elektrokimyasal reaktörde üretilen bir yükseltgen ile indirekt yükseltgeme gerçekleştirilir.

6.1.1.1. Direkt yükseltgeme

Birçok organik bileşiğin gideriminde uygulanan direkt anodik yükseltgeme elektrot yüzeyinde elektron alışverişi ile gerçekleşir.

6.1.1.2. İndirekt yükseltgeme

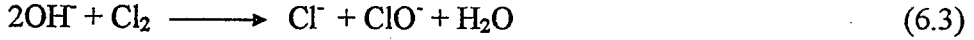
Bu yöntem özellikle seyreltik atıksularla çalışıldığında tercih edilir. Sodyum klorür ilavesi ile elektrokimyasal olarak üretilen klor veya hipoklorit kirleticilerin dezenfeksiyonunda veya arıtımında kullanılabilir ve oluşan anot tepkimesi aşağıdaki gibidir.



Katot tepkimesi ise



şeklindedir. Çözeltide gerçekleşen tepkime,



şeklindedir. Hipoklorit ve serbest klorun her ikisi de dezenfektandır ve yükseltgen özellik taşırlar.

Atıksu deşarjları genellikle düşük derişimlerde kirletici içerir. Böylece seyreltik atıksu için elektrotta gerçekleşen tepkime kütle aktarımı ile sınırlıdır. Eğer atıksuya yemek tuzu gibi pahalı olmayan maddeler eklenirse anotta 6.1 tepkimesi gerçekleşir ve oluşan yükseltgenler seyreltik atıksu ile tepkimeye girerler. Böylece arıtım sadece hücrede değil depolama tanklarında da sürer.

6.1.2. Elektrokimyasal çöktürme

Çöktürme, kolloidal ve askıda katı maddelerin bazı kimyasal maddelerin ilavesi ile biraraya getirilmesi işlemidir. Bu işlem sonucunda kolloidal taneciklerin etrafındaki elektriksel çift tabakanın kararlılığı bozulur. Bu arıtım yönteminde kullanılan kimyasal maddeler; alüminyum sülfat, sodyum alüminat, ferri klorür, ferri sülfat, sönmüş kireç ve sönmemiş kireçtir. Klasik çöktürmenin en büyük dezavantajı, koagülanların maliyetlerinin fazla olması ve işlem sonrası oldukça fazla oluşan ve kimyasal madde içeren çamurdur.

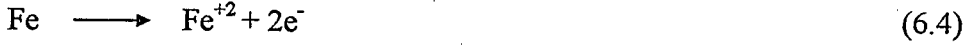
Elektrokimyasal çöktürme ise anot ve katot içeren bir reaktörde istenmeyen maddelerin, reaktörden geçirilen elektrik akımıyla sudan çöktürülerek uzaklaştırılmasıdır.

Elektrokimyasal çöktürme yönteminde yüzey aktif madde içeren atıksu bir elektrokimyasal reaktöre beslenir. Bu yöntemin yükseltgeme tepkimelerinden farkı, elektrot olarak Fe ve Al gibi çözünen anot materyallerinin kullanılmasıdır.

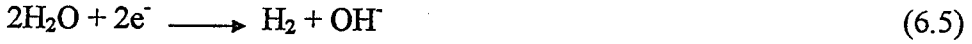
Örneğin anot olarak demir kullanıldığında, demirin yükseltgenmesiyle çözeltide Fe^{+2} iyonu verilir. Çözeltide O_2 olduğunda Fe^{+2} iyonları Fe^{+3} iyonlarına

yükseltgenir. Katotta ise hidrojen gazı ve OH^- iyonları oluşur. Fe^{+3} ve OH^- iyonlarının tepkimesiyle $\text{Fe}(\text{OH})_3$ oluşur. Bu süreç sırasında anot ve katot tepkimeleri aşağıdaki gibidir:

Anotta,



Katotta,



Çözeltide,



Anot materyali olarak alüminyum kullanıldığında anot ve katot tepkimelerinden $\text{Al}(\text{OH})_3$ oluşur.

Pletcher ve Walsh [17]'a göre elektrokimyasal çöktürme süreci sırasında oluşan küçük floklar kimyasal oksijen istemi (KOİ), bulanıklık (NTU), absorbans ve metal iyonu ölçümlerini engelleyecektir. Bu sorunun üstesinden gelmek için çözelti santrifüjlenir veya çözeltiyeye kimyasal koagülan ilavesi yapılır.

Elektrokimyasal çöktürme ile yüzey aktif maddelerin, boyar maddelerin ve ağır metallerin giderimi yapılmaktadır.

6.1.3. Elektrokimyasal yüzdürme

Yüzdürme, katı ve sıvı fazların bir sıvı fazdan ayrılması için kullanılan ve çökelmenin tersi olan bir işlemdir. Çözelti fazında çok ince dağılmış kolloidlerin, askıda katı maddelerin, yağların ve özellikle de yüzey aktif maddelerin ayrılmasında kullanılır. Yüzdürme yöntemi, sıvı ortamına verilen gaz (genelde hava) kabarcıklarının katı parçacıklar etrafında tutunarak, onları yukarı doğru hareket ettirmeleri şeklinde gerçekleşir ve bu işlemin sonunda ortamdaki uzaklaştırılacak maddeler köpük şeklinde yüzeyde toplanarak sıyrılır. Bu yolla yoğunluğu sıvı yoğunluğundan fazla olan taneciklerin de yüzdürülmesi mümkün

hale gelir. Suda yağ emülsiyonları gibi yoğunluğu sıvı yoğunluğundan az olan tanecikler kendiliğinden sıvı yüzeyine yükselirler.

Elektrokimyasal yüzdürme, yüzdürme için kullanılan kabarcıkların elektrotlarda üretilmesi ile gerçekleştirilir ve bu yöntem ile 8-15 μm çapından küçük gaz kabarcıkları oluşturulabilir. Bu kabarcıklar çok küçük parçacıkların uzaklaştırılmasına izin verir. Akım yoğunluğu değiştirilerek kabarcık-parçacık buluşması ve birbirine yapışma olasılığı arttırılabilir.

Elektrokimyasal yüzdürmede elektrot materyali, akım yoğunluğu, pH ve sıcaklık değiştirilerek değişik ölçekte çalışılabilir. Atıksu akış hızı kabarcıkların parçacıklar tarafından yakalanma mekanizmasını bozmayacak şekilde yavaş olmalıdır.

Bu yöntem yüzey aktif maddelerin, ağır metallerin, yağların ve diğer hidrokarbonların sudan uzaklaştırılmasında ve atıksulardan florür gideriminde uygulanır.

6.2. Yüzey Aktif Maddelerin Elektrokimyasal Giderimi ile İlgili Yapılan

Çalışmalar

Sudan yüzey aktif maddelerin geleneksel yöntemlerle uzaklaştırılması ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına karşın elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Kaynaklar, elektrokimyasal yöntemle yüzey aktif madde gideriminin az sayıda araştırmacı tarafından incelendiği ve bu konuyla ilgili çalışmaların uygun çalışma parametrelerini belirleme aşamasında olduğunu göstermektedir.

Leu ve ark. [18] tarafından yapılan bir çalışmada hidrojen peroksitli veya hidrojen peroksitsiz, elektrokimyasal çöktürme ile birlikte uygulanan elektrokimyasal yükseltgemeyle yüzey aktif madde içeren atıksuların arıtımı araştırılmıştır. Burada çalışılan iki anyonik yüzey aktif madde, alkilbenzen sülfonat (ABS) ve lineeralkilbenzen sülfonattır (LAS). Bu çalışmada çözeltinin iletkenliği önemli derecede yüksekse elektrokimyasal yükseltgeme sürecinin etkin bir şekilde ilerlediği belirtilmiştir. Yüzey aktif madde içeren çözeltinin iletkenliği $300 \mu\text{mho cm}^{-1}$ 'den daha küçüktür. Bu nedenle yüzey aktif madde içeren çözeltiliye

iletkenliği artırmak için tuz ilave edilir. Tuzun eklenmesiyle çözeltide hipokloröz asit gibi güçlü bir yükseltgenin oluşması ve dolayısıyla sudaki yüzey aktif maddelerin yükseltgenmesi gerçekleşir.

Yüzey aktif maddelerin elektrokimyasal yükseltgenmesi ile birlikte gerçekleşen elektrokimyasal çöktürme sırasında demir plaka elektrotların çözünmesiyle sulu çözeltiliye sürekli olarak belirli miktarda Fe iyonları verilir. Eğer dışarıdan , hidrojen peroksit (H_2O_2) de eklenirse Fe iyonundan daha fazla yararlanır. Fe iyonu ile H_2O_2 arasında sulu çözeltide Fenton benzeri tepkime gerçekleşir. Bu ise kirlilik gideriminde güçlü bir yükseltgeme sürecidir [19].

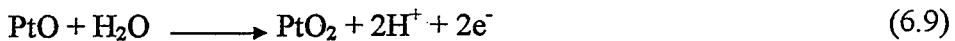
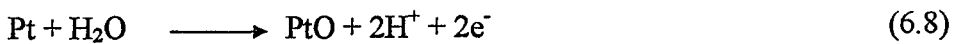
pH'in, elektrolit derişiminin, elektrokimyasal yükseltgeme zamanının, güç girişinin, hidrojen peroksit (H_2O_2) miktarının etkileri parametrik olarak incelenmiş ve optimum çalışma koşulları deneysel olarak belirlenmiştir.

Yeterli tuz derişimiyle yüzey aktif madde içeren atıksuyun elektrokimyasal yükseltgenmesinin çok hızlı bir şekilde ilerlediği ve yaklaşık 8 dk.'da maksimum bir yüzey aktif madde giderimine ulaşıldığı sonucuna varılmıştır. Çözeltide yükseltgemenin etkin bir şekilde gerçekleşmesi için pH'ın 8 civarlarında tutulması uygun görülmüştür.

Sisteme eklenen az miktarda H_2O_2 (100 mgL^{-1}) yüzey aktif madde giderimini ve arıtılan atıksuyun kalitesini önemli derecede arttırmıştır.

Zor ve ark. [20] tarafından yapılan çalışmada ise $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ ve $0,1 \text{ M NaCl}$ 'lü çözeltilerde elektroliz ve potansiyokinetik yöntemlerle LAS'ın Pt elektrotta elektrokimyasal olarak parçalanması incelenmiş ve Pt-oksit oluşumu ile elektrokimyasal parçalanma süreci belirlenmiştir.

Pt elektrotta gerçekleşen katodik olaylar O_2 ve/veya H^+ iyonlarının indirgenmesidir. Akım yoğunluğunun değişmediği pasivasyon bölgesinde aşağıdaki tepkimeler gerçekleşmektedir [21].



Bu tepkime $0,7\text{V}-1\text{V}$ gerilimi aralığında gerçekleşmekte ve Pt yüzeyi PtO ve PtO₂ ile kaplanmaktadır. Sülfat çözeltisinde gerçekleşen bu süreç, klorür

çözeltisinde oluşmamaktadır. Bunun nedeni ise Pt yüzeyde oluşan oksit birikiminin klorür iyonlarının adsorpsiyonuyla kısmen engellenmesidir.

LAS içeren çözeltilerde 0,3V-1,0V gerilim aralığında 0,013 mAcm⁻²'lik akım yoğunluğu sabit kalmakta ve 5.10 ve 5.11 nolu tepkimeler oluşmaktadır. Bu gerilim aralığında LAS içeren birimde platinin yüzeyi Pt/LAS , PtO₂ ve PtO ile kaplanmaktadır.

LAS sülfat çözeltisine ilave edildiğinde $Pt + LAS \longrightarrow Pt(LAS)$ tepkimesi ile LAS molekülleri Pt yüzeyinde adsorblanmaktadır.

pH 8'de 0,1 M NaCl ve 0,05 M Na₂SO₄ çözeltilerinde katotta hidrojen, sülfat çözeltisinde anotta O₂ oluşur. Klorür çözeltisinde ise anotta oksijene ek olarak klor çıkışı gerçekleşir.

Sonuçta tüm koşullar aynı olduğunda (sıcaklık, çözünmüş oksijen ve pH) LAS'ın parçalanmasını etkileyen en önemli faktörlerin; çözeltinin tipi, LAS'ın derişimi ve uygulanan gerilim olduğu belirtilmiştir [22].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar

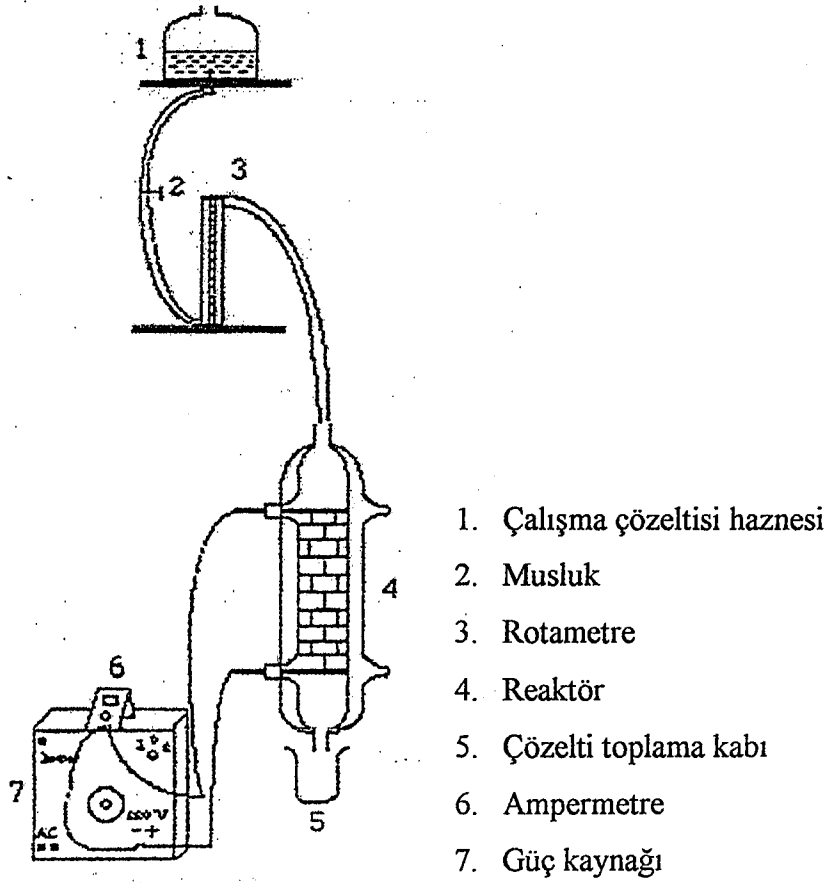
Çalışmalarda laboratuvar koşullarında hazırlanan ve yüzey aktif madde içeren model çözelti kullanılmıştır. Bu amaçla farklı başlangıç derişimleri (10; 50 mgL^{-1}) ve farklı pH değerlerinde (3 ve 9) LAS çözeltileri hazırlanmıştır. Deneyler elektrot olarak rutenyum oksit raschig halkalarının kullanıldığı iki kutuplu elektrokimyasal reaktörde gerçekleştirilmiştir. Bu reaktörle çözünmeyen anotta elektrokimyasal yükseltgeme yöntemi uygulanmıştır. Reaktör, 4 cm iç çapında, 21,5 cm uzunluğunda iç içe iki cam borunun içteki kısmına rutenyum oksit raschig halkaları doldurularak hazırlanmıştır. Organik maddeleri yükseltgeme özelliğine sahip bir elektrot malzemesi olan rutenyum oksit raschig halkaları, 8,2 mm dış, 6,5 mm iç çapında olup yükseklikleri 7 mm'dir. Dolgulu kısım, her biri dört raschig halkasından oluşan ve birbirlerinden yalıtkan polyesterle ayrılarak iki kutupluluk sağlanan 28 tabaka içermektedir. reaktörün iki ucunda, gerilimin uygulandığı iki grafit çubuktan oluşan anot ve katot bağlantıları bulunmaktadır. Reaktöre gerilim uygulandığında, her bir raschig halkası bir ucu (-), diğer ucu (+) olan küçük bir hücre haline gelmektedir. Reaktör hacmi ve anot yüzey alanı hesabı Ek Açıklamalar A'da verilmiştir.

Reaktöre çözeltiyi beslemek amacıyla 5 L'lik cam hazne ve bu hazneye bağlı rotametre kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği düzenek Şekil 7.1'de verilmiştir.

7.1.1. Kullanılan kimyasal maddeler

Yüzey aktif madde içeren model çözelti ve Porsuk nehrinden alınan belli derişimde (2,66 mgL^{-1}) LAS içeren çözelti ile yapılan çalışmalarda destek elektrolit olarak sodyum sülfat (Na_2SO_4), pH ile ilgili çalışmalarda pH ayarlaması yapmak için NaOH ve H_2SO_4 kullanılmıştır.

Yüzey aktif maddelerin Cole-Parmer marka yüzey aktif madde seçici elektrot ile analizi sırasında Seyreltik Triton X-100, sodyum dodesil sülfat, potasyum klorür (KCl) ve hidroklorik asit (HCl) çözeltileri kullanılmıştır.



Şekil 7.1. Elektrokimyasal yükseltgeme deney düzeneği

7.1.2. Kullanılan yardımcı araçlar

Çalışmalarda akım 220 V girişli Elsim marka güç kaynağından sağlanmış, geçen akım DT-3800 B model dijital ampermetre kullanılarak ölçülmüştür. Çalışma çözeltisi akış hızları rota 870909-3601 rotametre ile ölçülmüştür.

7.1.3. Tayin

Sudaki yüzey aktif madde derişimini belirlemek amacıyla Orion marka pH-metre-iyonmetre ve Cole-Parmer marka yüzey aktif madde seçici elektrot kullanılmıştır.

7.1.4. Deney sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler

Yüzde Giderim

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(C_0 - C)}{C} * 100 \quad (7.1)$$

C_0 , başlangıç derişimi (mgL^{-1})
 C , son Derişim (mgL^{-1})

Akım Verimi

$$\text{Akım Verimi} = \% \text{ Giderim} * [(C_0 * Q * F) / (I * \text{tabaka sayısı}) * 4] \quad (7.2)$$

C_0 , başlangıç derişimi (molm^{-3})
 Q , çözelti debisi (m^3s^{-1})
 I , akım, (Amper)
 F , faraday sabiti ($\text{couleşdeğer gram}^{-1}$)

Enerji Tüketimi

$$\text{Enerji tüketimi } \text{kWhg}^{-1} = V * I / [(C_0 - C) * Q] \quad (7.3)$$

V , gerilim (Volt)

Kütle Aktarım Katsayısı

$$\% \text{ Giderim} = 1 - \exp[-(k * A) / Q] \quad (7.4)$$

A , anot alanı, m^2
 k , kütle aktarım katsayısı, ms^{-1}

Yukarıdaki eşitlikler ile ilgili örnek hesaplamalar Ek Açıklamalar B.1-3'de verilmiştir.

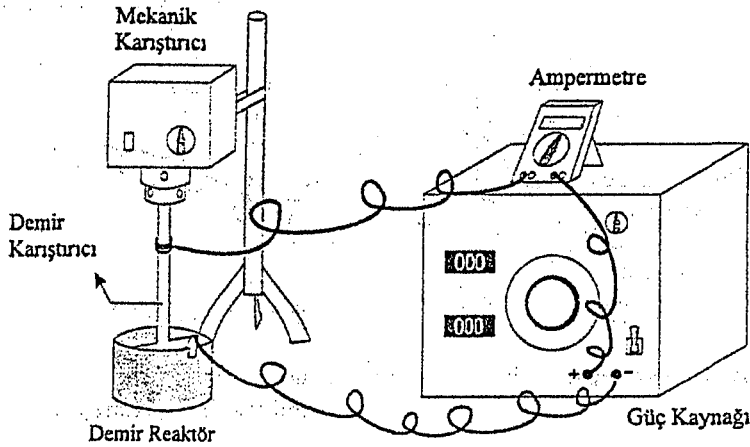
7.2. Elektrokimyasal Çöktürme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar

7.2.1. Demir ve alüminyum reaktörde kesikli çalışma

Çalışmalarda demir ve alüminyum reaktör ile bileşiminde demir ve alüminyum olan karıştırıcılar kullanılmıştır (Şekil 7.2). Demir reaktörün çapı 11 cm, yüksekliği 13 cm'dir ve toplam 1 L'lik hacme sahiptir. Alüminyum reaktörün ise çapı 12 cm, yüksekliği 11 cm olup 1 L'lik hacme sahiptir.

Deneysel reaktöre konulan belli miktarda çözüldüden belirli sürelerde akım geçirilerek gerçekleştirilmiştir. Reaktörde işlem görmüş çözelti filtre kağıdından süzülükten sonra süzütünde yüzey aktif madde tayini yapılmıştır.

10, 50 ve 300 mgL⁻¹ başlangıç derişimine sahip yüzey aktif madde çözeltileri kullanılmış, 0,15 A, 0,20 A ve 0,25 A akım değerlerinde 1 saat boyunca yüzey aktif madde giderimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2 Elektrokimyasal çöktürme deney düzeneği

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR DAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

8.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada Denizli Sodyum Sanayi A.Ş. (SODAŞ)' den temin edilen LAS içeren çözeltilerin rutenyum oksit elektrotta elektrokimyasal yükseltgeme ile giderilebilirliği araştırılmıştır. Uygulanan akımın, başlangıç derişiminin, çözelti akış hızının, pH'nın ve destek elektrolit derişiminin yüzey aktif madde giderimine, enerji tüketimine ve akım verimine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı başlangıç derişiminde (10 ve 50 mgL⁻¹) hazırlanan çözeltilerle pH 3 ve 9'da çalışılmıştır. Sisteme 0,50; 0,75 ve 1,00 A'lik akımlar uygulanmış, bu akım değerlerine karşılık sırasıyla 0,075; 0,114 ve 0,152 Acm⁻²'lik akım yoğunluklarında çalışılmıştır.

8.1.1. Akımın etkisinin incelendiği deney sonuçları

Uygulanan akımın yüzey aktif madde giderimi ve enerji tüketimine etkisinin incelendiği deney sonuçları Çizelge 8.1-8'de verilmiştir. Uygulanan akım ile % giderimin, akım veriminin ve enerji tüketiminin değişimi Şekil 8.1-16'da verilmiştir.

8.1.2. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

10 mgL⁻¹ (pH 5,5) ve 50 mgL⁻¹ (pH 4,5) başlangıç derişimlerinde hazırlanan çözeltiler ile farklı akış hızlarında çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.1-4'de verilmiştir. Başlangıç derişimlerinin % giderime, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 8.1-6'da göstermiştir.

8.1.3. Akış hızının etkisinin incelendiği deney sonuçları

Farklı akış hızlarında 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS derişimli çözeltiler ile çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.5 ve 8.6'da verilmiştir. Akış hızının % giderime, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 8.7-8.12'de gösterilmiştir.

8.1.4. pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları

$0,1 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $3,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ 'lik akış hızında, farklı akım değerlerinde pH değerleri değiştirilerek çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.7'de verilmiştir. pH'nın % giderime, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi Şekil 8.13-15'de gösterilmiştir.

8.1.5. Destek elektrolit derişiminin (Na_2SO_4) etkisinin incelendiği deney sonuçları

Farklı derişimlerde Na_2SO_4 içeren 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.8 de verilmiştir. Destek elektrolit derişiminin % giderime etkisi Şekil 8.16'da, akım verimi ve enerji tüketimine etkisi Şekil 8.17-18'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.1. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltilerinin farklı akış hızlarında elde edilen deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme)

	Na ₂ SO ₄ Miktarı	Gerilim (V)	Akım (A)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim %	Akım Verimi	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
3,36x10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹	0,07 M	150	0,50	4,0	60	0,0024	37,2024
		173	0,75	3,8	62	0,0016	62,2840
		190	1,00	2,7	73	0,0014	77,4625
	0,1 M	138	0,50	1,2	88	0,0035	23,3360
		162	0,75	0,6	94	0,0025	38,4688
		185	1,00	0,3	97	0,0019	56,7624
	0,15 M	102	0,50	0,9	91	0,0036	16,6797
		139	0,75	0,5	95	0,0025	32,6598
		176	1,00	0,3	97	0,0019	54,0010
6x10 ⁻³ m ³ h ⁻¹	0,07 M	115	0,50	5,3	47	0,0331	2,0390
		138	0,75	4,6	54	0,0253	3,1944
		152	1,00	3,2	68	0,0239	3,7255
	0,1 M	100	0,50	2,9	71	0,0500	1,1737
		126	0,75	2,1	79	0,0371	1,9937
		145	1,00	1,7	83	0,0292	2,9116
	0,15 M	70	0,50	2,8	72	0,0507	0,8102
		105	0,75	2,1	79	0,0371	1,6614
		125	1,00	1,7	83	0,0292	2,5100

Çizelge 8.2. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltilerinin farklı akış hızlarında elde edilen deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme)

	Na ₂ SO ₄ Derişimi	Gerilim (V)	Akım (A)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim %	Akım Verimi	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
3,36x10 ⁻⁴ m ³ h ⁻¹	0,07 M	132	0,50	22,0	50	0,0110	7,0153
		165	0,75	20,5	59	0,0077	12,4849
		190	1,00	16,0	68	0,0067	16,6317
	0,1 M	120	0,50	7,5	85	0,0167	4,2017
		152	0,75	5,5	89	0,0117	7,6244
		175	1,00	4,0	92	0,0091	11,3225
	0,15 M	114	0,50	6,0	88	0,0173	3,8555
		147	0,75	4,0	92	0,0121	7,1332
		160	1,00	2,5	95	0,0094	10,0251
6x10 ⁻³ m ³ h ⁻¹	0,07 M	104	0,50	15,0	70	0,2463	0,2476
		136	0,75	11,0	78	0,1829	0,4359
		158	1,00	9,5	81	0,1425	0,6502
	0,1 M	95	0,50	11,0	78	0,2744	0,2030
		122	0,75	8,5	83	0,1947	0,3675
		146	1,00	7,0	86	0,1513	0,5659
	0,15 M	89	0,50	10,0	80	0,2815	0,1854
		117	0,75	7,5	85	0,1994	0,3441
		138	1,00	6,0	88	0,1548	0,5227

Çizelge 8.3. 0,1 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36x10⁻⁴ m³h⁻¹)

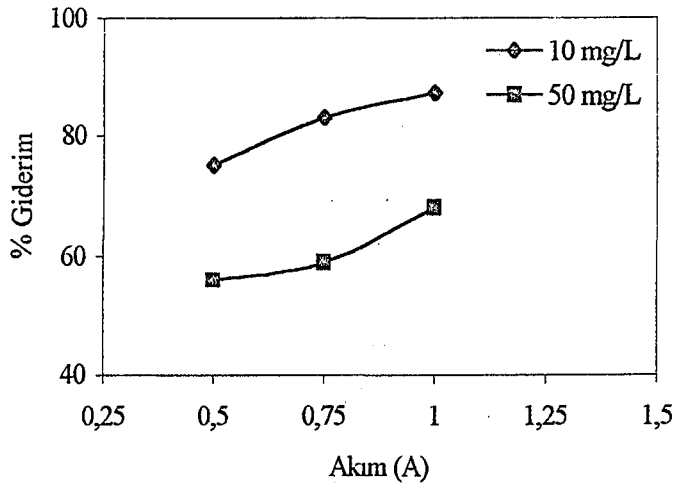
PH	Gerilim (V)	Akım (A)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim %	Akım Verimi	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
pH 3	140	0,50	2,5	75	0,0030	27,7778
	154	0,75	1,7	83	0,0022	56,3525
	179	1,00	1,3	87	0,0017	78,3438
pH 5,5 (orijinal)	135	0,50	1,2	88	0,0035	22,8287
	163	0,75	0,6	94	0,0025	38,2989
	187	1,00	0,3	97	0,0019	57,3760
pH 9	151	0,50	1,8	82	0,0032	25,8279
	178	0,75	1,0	90	0,0024	41,8233
	190	1,00	0,5	95	0,0019	58,2965

Çizelge 8.4. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde destek elektrolit (Na₂SO₄) derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)

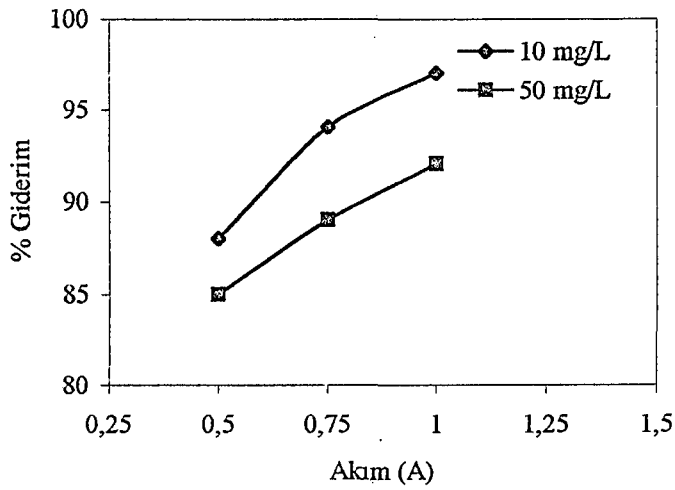
Destek Elektrolit Derişimi	Gerilim (V)	Akım (A)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim %	Akım Verimi	Enerji Tüketimi (kWhg ⁻¹)
0,07 M	150	0,50	4,0	60	0,0024	37,2024
	173	0,75	3,8	62	0,0016	62,2840
	190	1,00	2,7	73	0,0014	77,4625
0,1 M	138	0,50	1,2	88	0,0035	23,3360
	162	0,75	0,6	94	0,0025	38,4688
	185	1,00	0,3	97	0,0019	56,7624
0,15 M	102	0,50	0,9	91	0,0036	16,6797
	139	0,75	0,5	95	0,0025	32,6598
	176	1,00	0,3	97	0,0019	54,0010

Çizelge 8.5. Elektrokimyasal yükseltgeme ile elde edilen en iyi çalışma koşulları

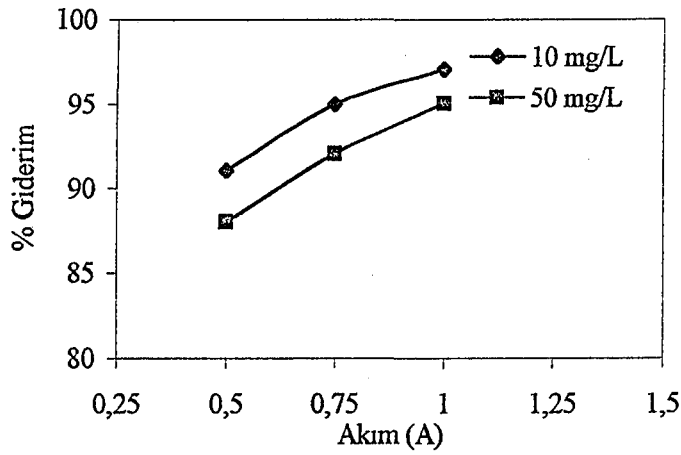
Uygulana Akım (A)	Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	Akış Hızı (m ³ h ⁻¹)	pH	Destek Elektrolit Derişimi (M)
0,25	10	3,36*10 ⁻⁴	5,5	0,1



(a)



(b)



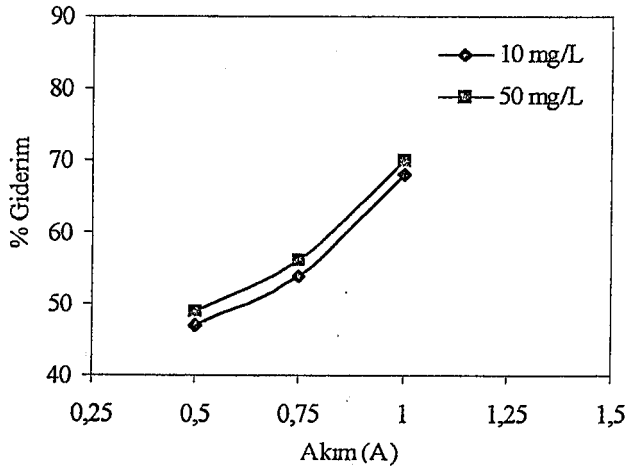
(c)

Şekil 8.1. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)

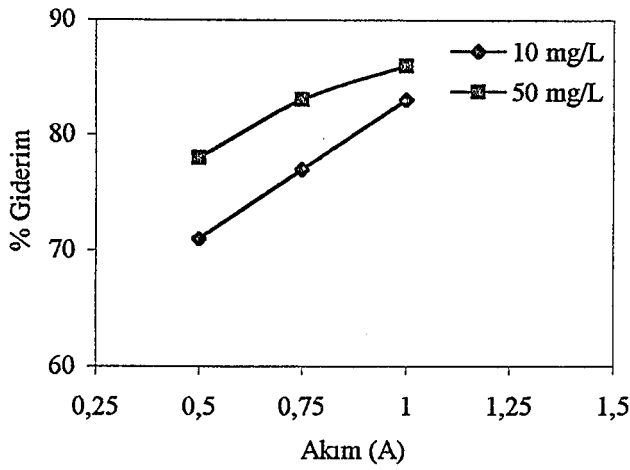
a) 0,07 M Na_2SO_4

b) 0,10 M Na_2SO_4

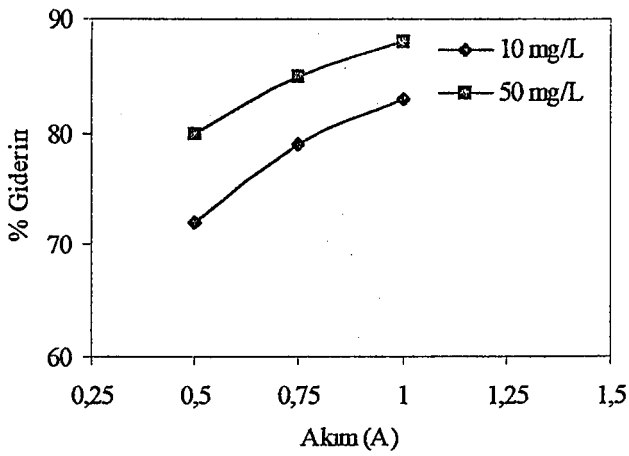
c) 0,15 M Na_2SO_4 destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



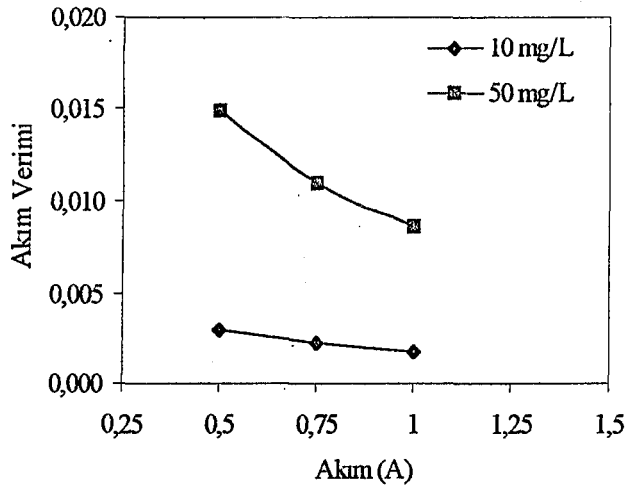
(c)

Şekil 8.2. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)

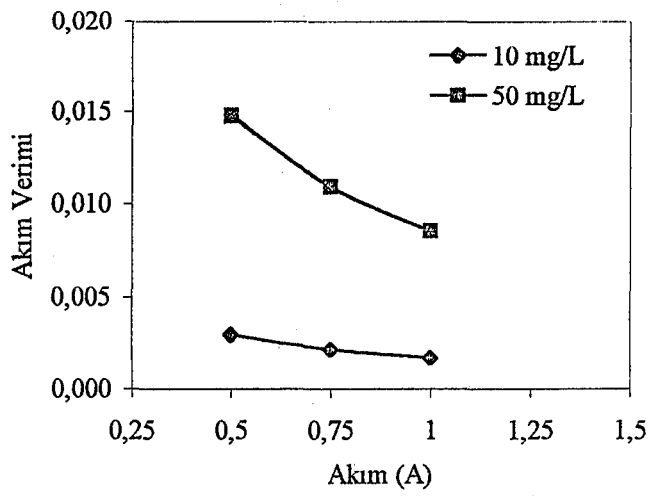
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,10 M Na₂SO₄

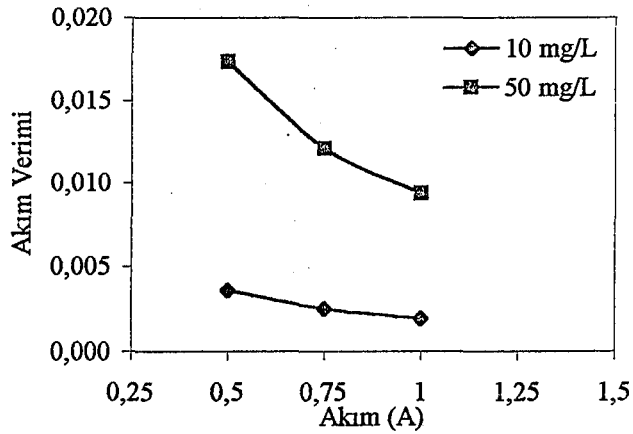
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



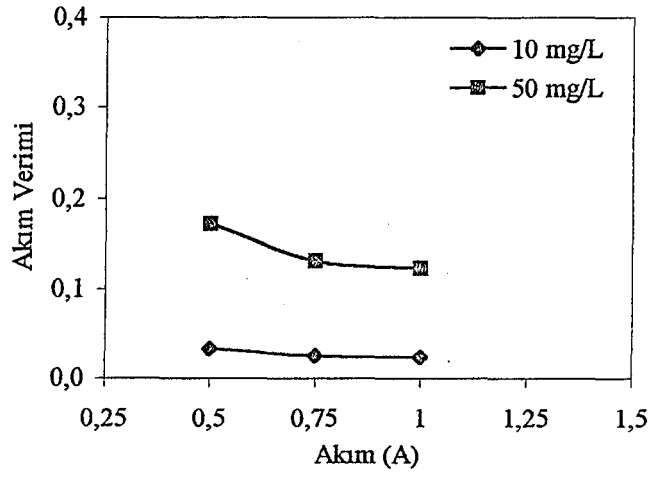
(c)

Şekil 8.3. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)

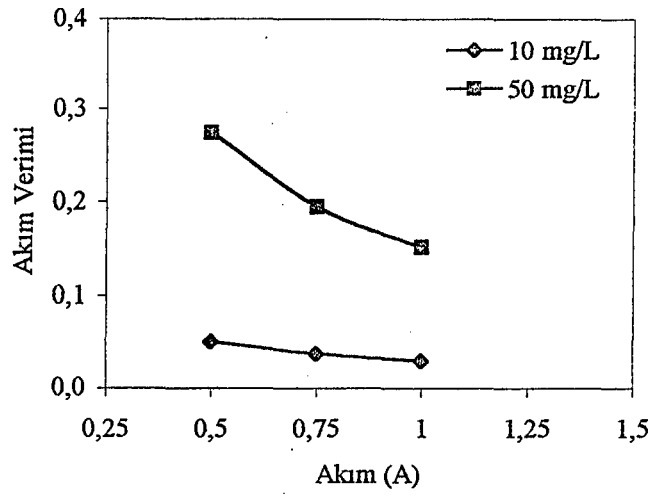
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,10 M Na₂SO₄

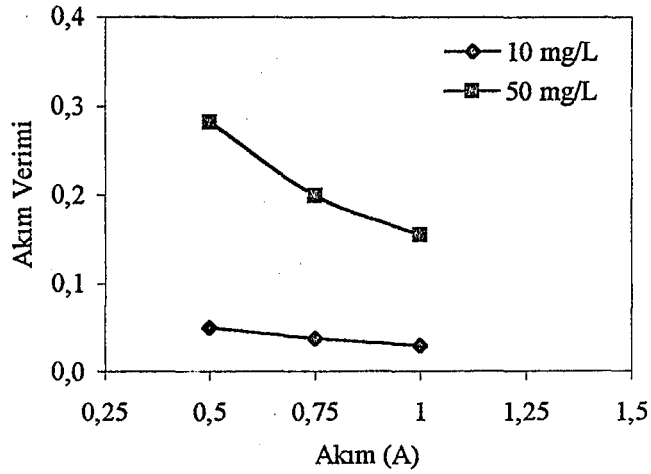
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



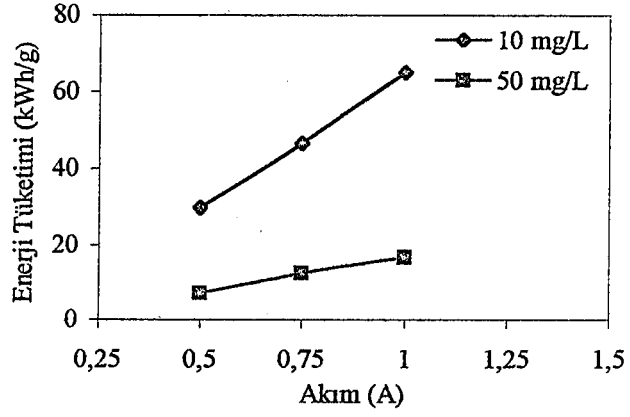
(c)

Şekil 8.4. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)

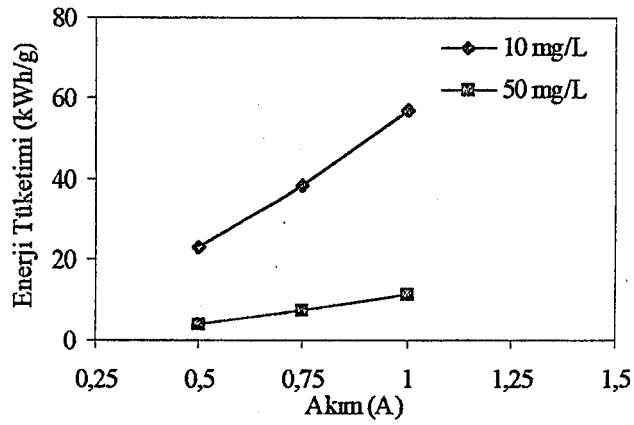
a) 0,07 M Na_2SO_4

b) 0,10 M Na_2SO_4

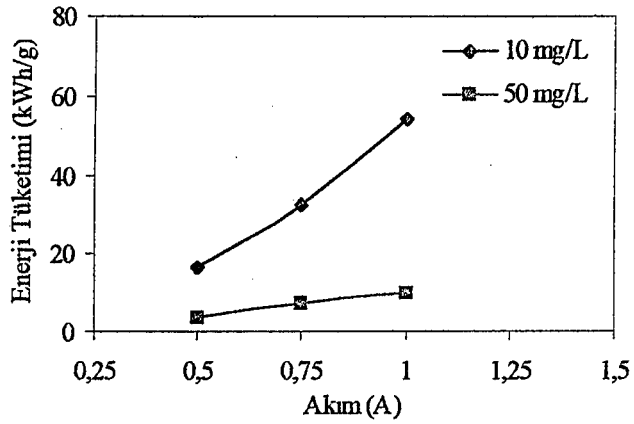
c) 0,15 M Na_2SO_4 destek elektrolit derişimlerinde



(a)



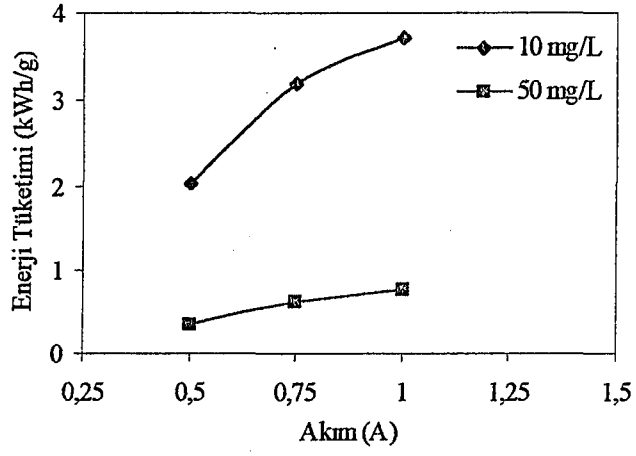
(b)



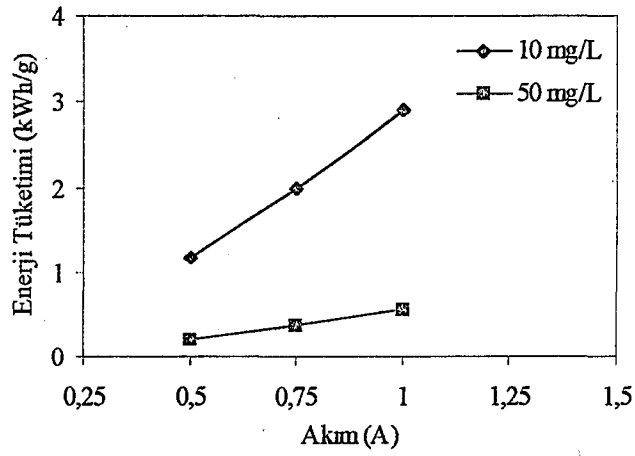
(c)

Şekil 8.5. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile enerji tüketiminin değışimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $3,36 \cdot 10^{-4}$)

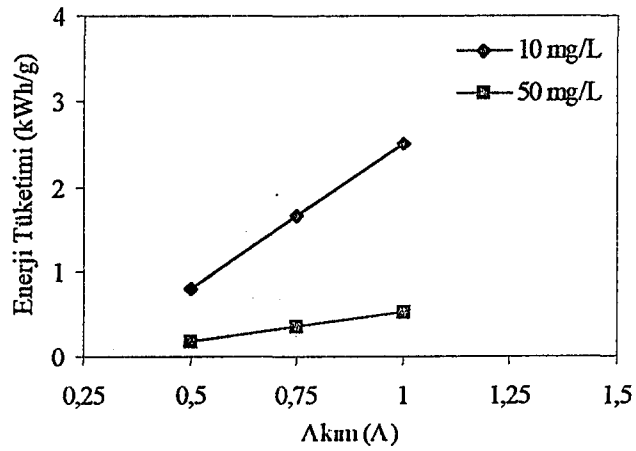
- 0,07 M Na_2SO_4
- 0,10 M Na_2SO_4
- 0,15 M Na_2SO_4 destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



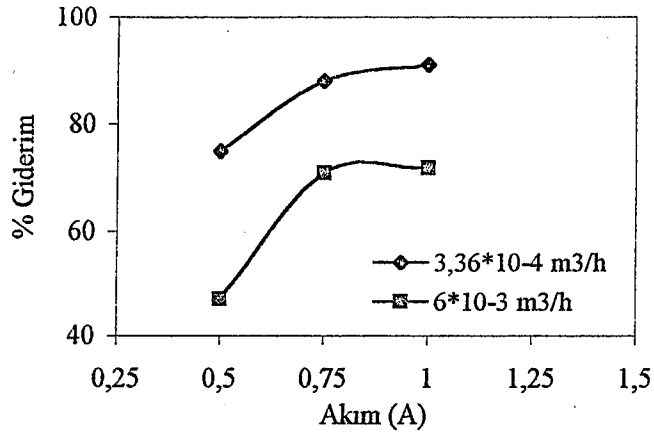
(c)

Şekil 8.6. LAS'ın farklı başlangıç derişimleri için uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: $6 \cdot 10^{-3}$)

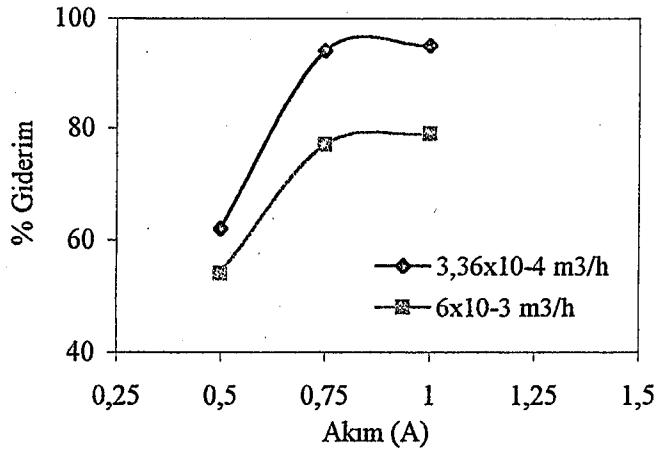
a) 0,07 M Na_2SO_4

b) 0,10 M Na_2SO_4

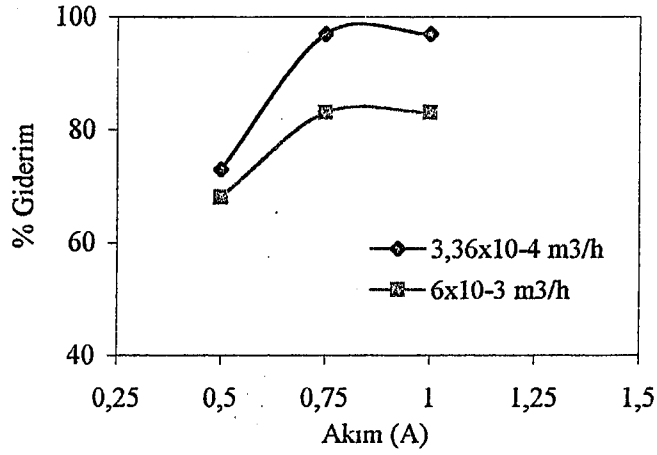
c) 0,15 M Na_2SO_4 destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



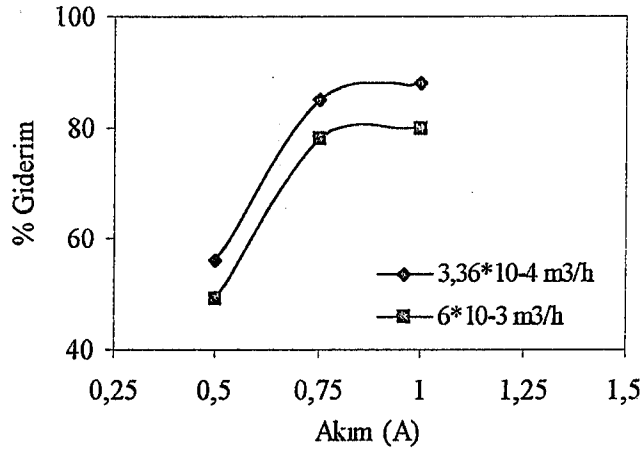
(c)

Şekil 8.7. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltme)

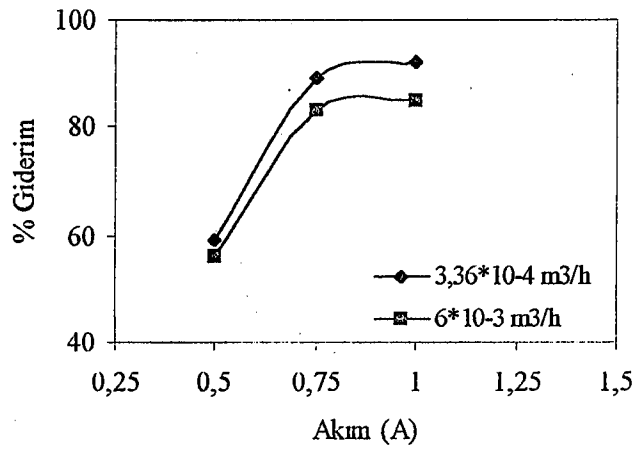
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,1 M Na₂SO₄

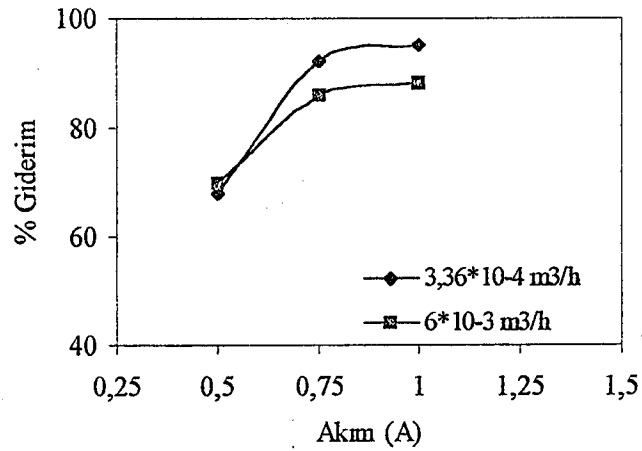
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



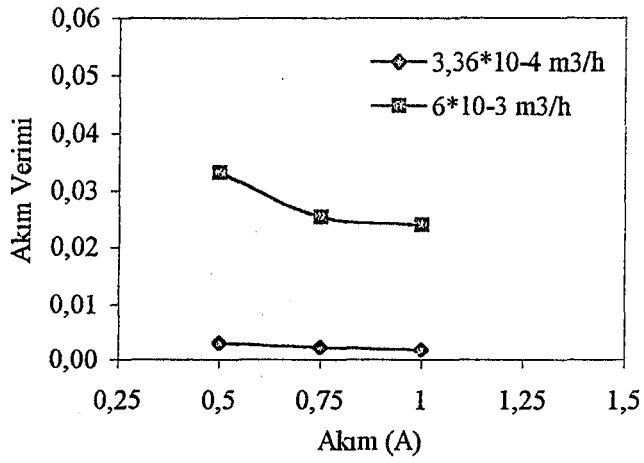
(b)



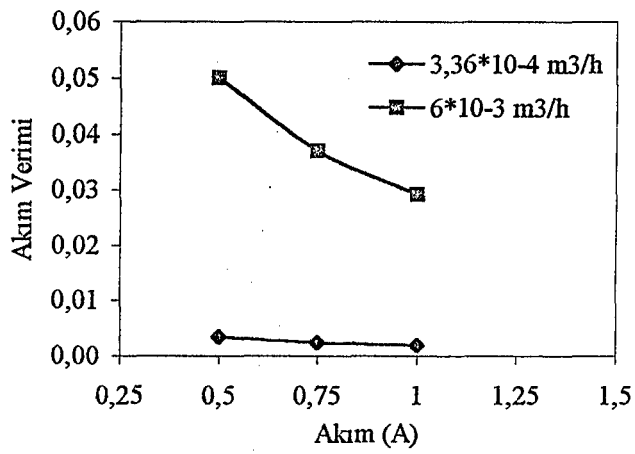
(c)

Şekil 8.8. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)

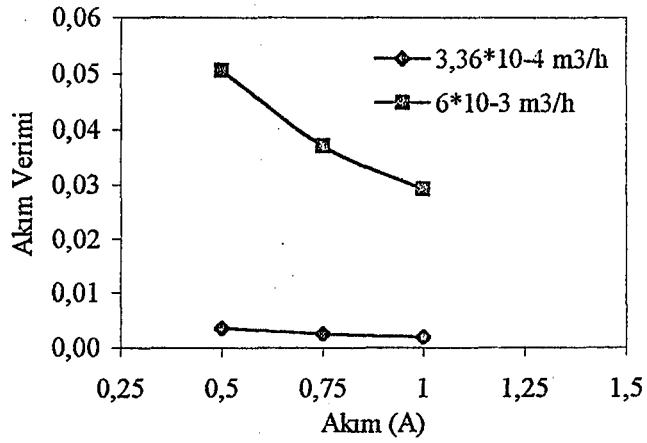
- 0,07 M Na₂SO₄
- 0,1 M Na₂SO₄
- 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



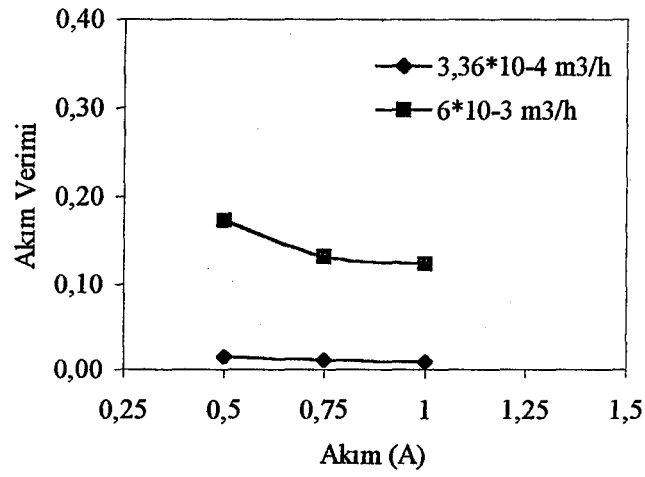
(c)

Şekil 8.9. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)

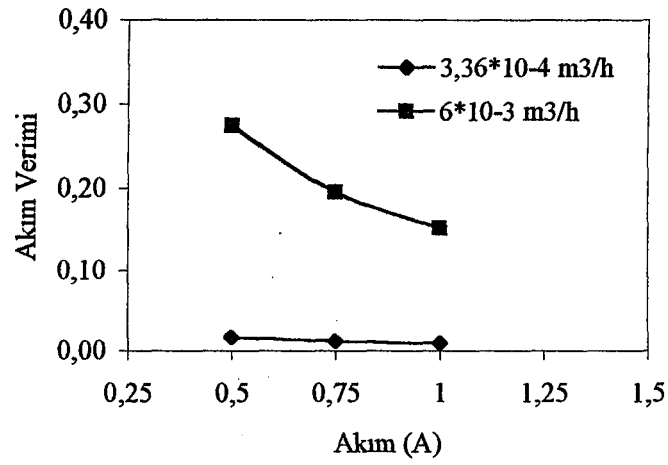
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,1 M Na₂SO₄

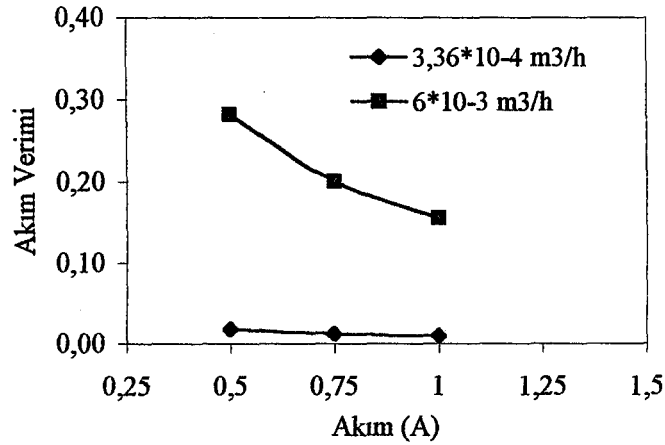
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



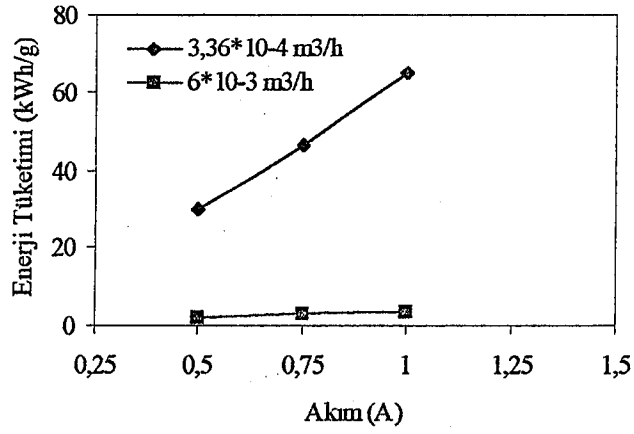
(c)

Şekil 8.10. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)

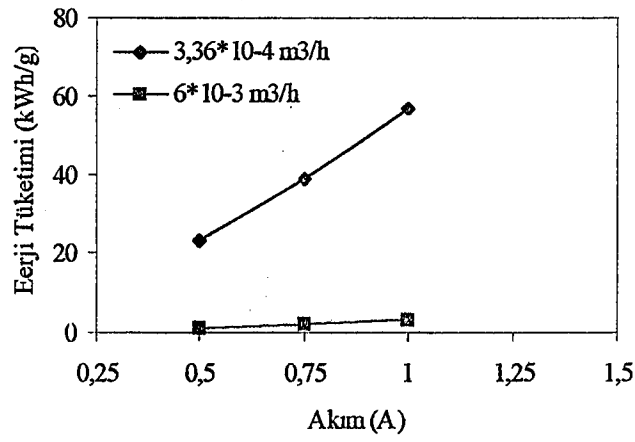
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,1 M Na₂SO₄

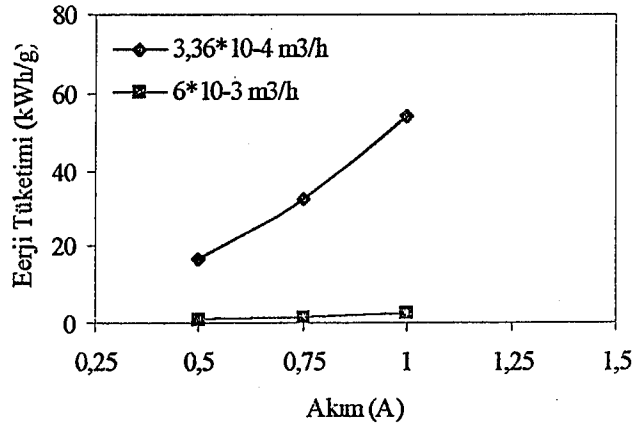
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



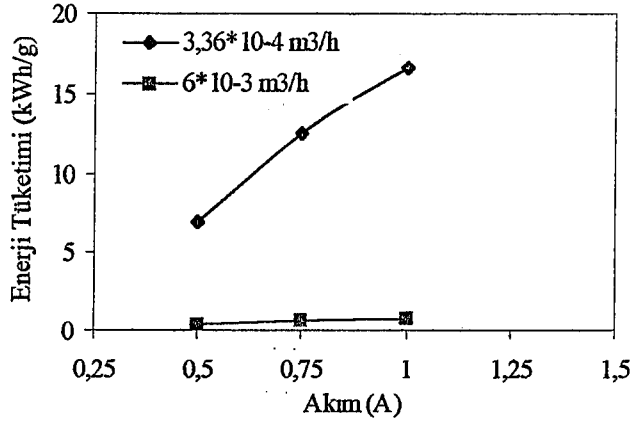
(c)

Şekil 8.11. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)

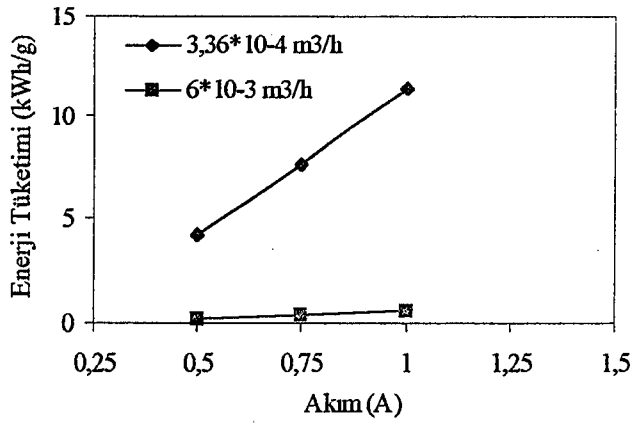
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,1 M Na₂SO₄

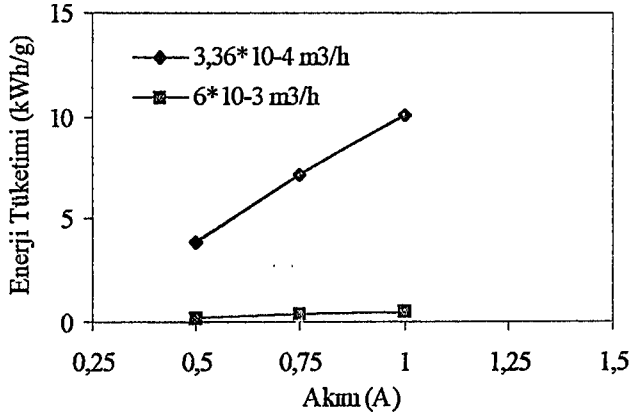
0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



(a)



(b)



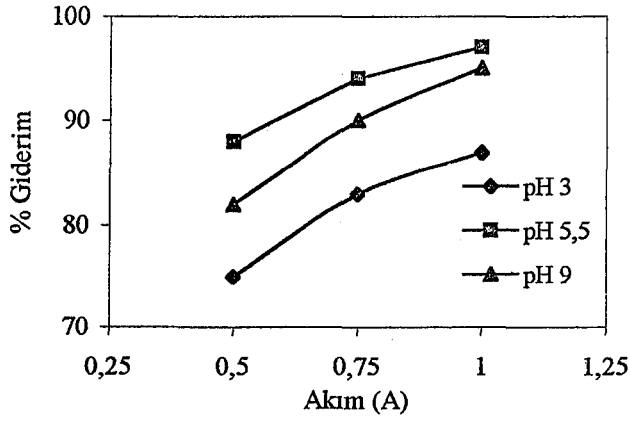
(c)

Şekil 8.12. 50 mg⁻¹L LAS çözeltisinde farklı akış hızlarında, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme)

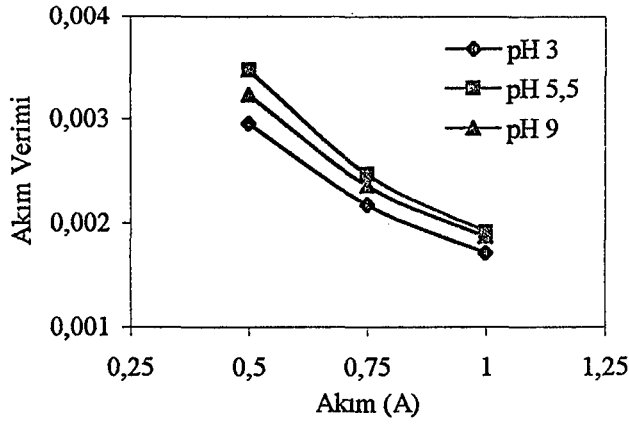
a) 0,07 M Na₂SO₄

b) 0,1 M Na₂SO₄

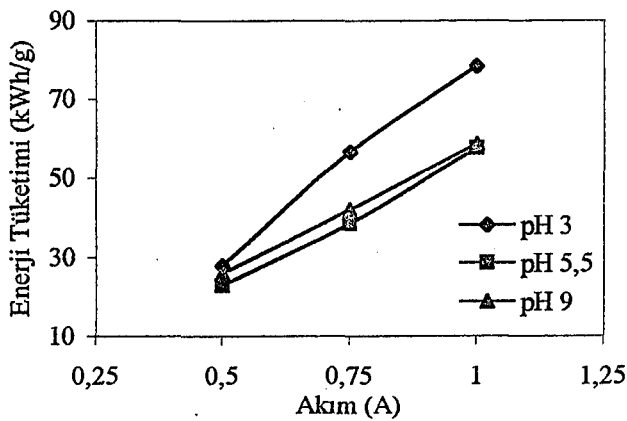
c) 0,15 M Na₂SO₄ destek elektrolit derişimlerinde



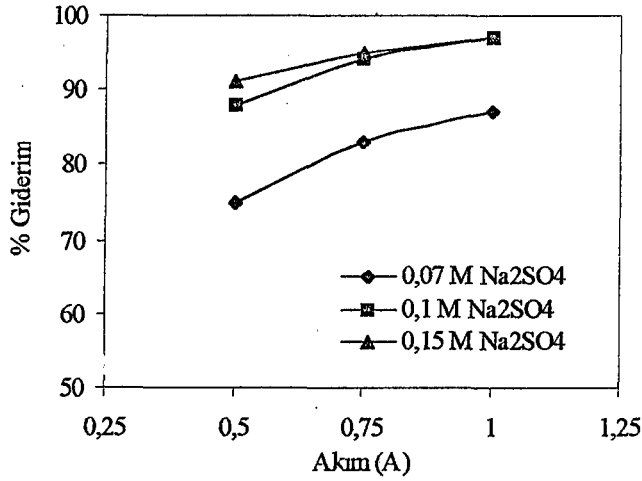
Şekil 8.13. 0,1 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde, uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeci, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)



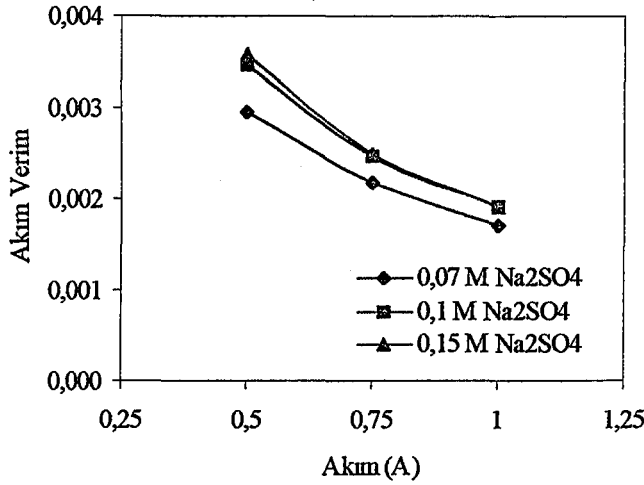
Şekil 8.14. 0,1 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)



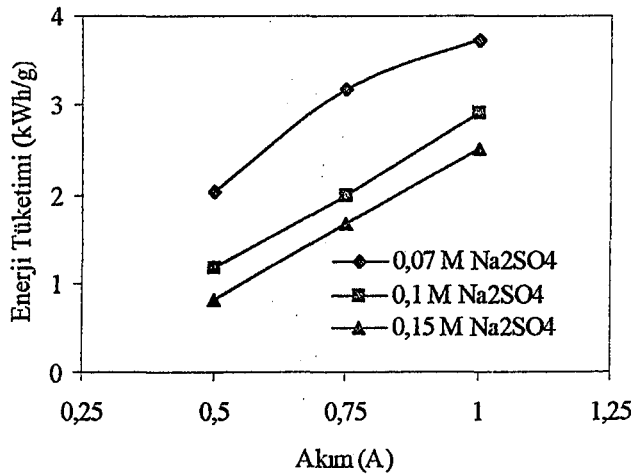
Şekil 8.15. 0,1 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)



Şekil 8.16. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na₂SO₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile % giderimin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)



Şekil 8.17. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na₂SO₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile akım veriminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)



Şekil 8.18. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı destek elektrolit (Na₂SO₄) derişimlerinde, uygulanan akım ile enerji tüketiminin değişimi (elektrokimyasal yükseltgeme, akış hızı: 3,36*10⁻⁴ m³h⁻¹)

8.1.6. Kütle aktarım katsayısının (k) değişimi

Yapılan deneysel çalışmaların sonunda başlangıç derişiminin, akış hızının, pH'nın ve Na_2SO_4 derişiminin kütle aktarım katsayısına etkisi incelenmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.9-12'de verilmiştir.

Başlangıç Derişiminin kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.6. 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} başlangıç derişimlerinin kütle aktarım katsayısına etkisi

Başlangıç Derişimi (mgL^{-1})	Akım (A)	Son Derişim (mgL^{-1})	k, (10^{-3} ms^{-1})
10	0,50	1,2	0,7124
	0,75	0,6	0,9453
	1,00	0,3	1,1782
50	0,50	7,5	7,4272
	0,75	5,5	9,3639
	1,00	4,0	10,6317

Akış hızının kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.7. 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akış hızının kütle aktarım katsayısına etkisi

Akış hızı (m^3h^{-1})	Akım (A)	Son Derişim (mgL^{-1})	k, (10^{-3} ms^{-1})
$3,36 \cdot 10^{-4}$	0,50	1,2	0,7124
	0,75	0,6	0,9453
	1,00	0,3	1,1782
$6 \cdot 10^{-3}$	0,50	2,9	7,4272
	0,75	2,1	9,3639
	1,00	1,7	10,6317

pH'nin kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.8. 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi

pH	Akım (A)	Son Derişim (mgL^{-1})	k, (10^{-3} ms^{-1})
3	0,50	2,5	0,4658
	0,75	1,7	0,5954
	1,00	1,3	0,6855
5,5	0,50	1,2	0,7124
	0,75	0,6	0,9453
	1,00	0,3	1,1782
9	0,50	1,8	0,5762
	0,75	1,0	0,7737
	1,00	0,5	1,0066

Destek elektrolit derişiminin kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.9. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisi için sodyum sülfat (Na₂SO₄) derişimlerinin kütle aktarım katsayısına etkisi

Na ₂ SO ₄ Derişimi	Akım (A)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	k (10 ⁻³ ms ⁻¹)
0,07 M	0,50	4,0	0,3079
	0,75	3,8	0,3251
	1,00	2,7	0,4399
0,1 M	0,50	1,2	0,7124
	0,75	0,6	0,9453
	1,00	0,3	1,1782
0,15 M	0,50	0,9	0,8091
	0,75	0,5	1,0066
	1,00	0,3	1,1782

8.2. Elektrokimyasal Çöktürme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi Çalışmalarından Elde Edilen Deney Sonuçları

Yapılan çalışmalarda, uygulanan akımın, işlem süresinin, başlangıç derişiminin, pH'nın ve destek elektrolit derişiminin, enerji tüketimine ve akım verimine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı başlangıç derişiminde (10 ve 50 mgL⁻¹) hazırlanan çözeltilerle pH 3, 9 ve 11'de çalışılmıştır. Sisteme 0,15; 0,20 ve 0,25 A'lik akım uygulanmış, bu akım değerlerine karşılık 6,54; 8,72 ve 10,89 Acm⁻² lik akım yoğunluklarında çalışılmıştır.

8.2.1. Demir reaktörde kesikli sistemde yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları

8.2.1.1. Uygulanan akımın giderime etkisinin incelendiği deney sonuçları

Demir reaktör anot, karıştırıcının katot olduğu durumda 10, 50 ve 300 mgL⁻¹ LAS içeren çözeltiler ile farklı akım değerlerinde işlem süresine bağlı olarak çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.13-27'de ve Şekil 8.19-48'de verilmiştir.

8.2.1.2. Başlangıç derişiminin giderime etkisinin incelendiği deney sonuçları

Başlangıç derişimlerinin LAS giderimine etkisinin incelendiği deney sonuçları Çizelge 8.13-19'da verilmiştir. 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS derişimlerinin giderime etkisi Şekil 8.31'de, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 8.32-33'de gösterilmiştir.

8.2.1.3. Reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda elde edilen deney sonuçları

Reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda işlem süresinin ve başlangıç derişiminin giderime etkisi ile ilgili sonuçlar Çizelge 8.20-21'de verilmiştir.

LAS gideriminin zamanla değişimi Şekil 8.34 ve 36'da, akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi ise Şekil 8.35 ve 37'de, gösterilmiştir.

8.2.1.4. Destek elektrolit (Na_2SO_4) derişiminin giderime etkisinin incelendiği deney sonuçları

Farklı akım değerlerinde çalışma çözeltiline ilave edilen destek elektrolit derişiminin giderime etkisinin incelendiği sonuçlar Çizelge 8.22-24'de verilmiştir.

Na_2SO_4 derişiminin giderime etkisi Şekil 8.38, 40 ve 42'de, akım verimi ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 8.39, 41 ve 43'de gösterilmiştir.

8.2.1.5. pH'ın giderime etkisinin incelendiği deney sonuçları

50 mgL^{-1} LAS içeren çözeltide $0,20 \text{ A}$ akım değerinde pH'nın giderime etkisi ile ilgili sonuçlar Çizelge 8.25-27'de verilmiştir. Şekil 8.44'de pH'nın LAS giderimine etkisi, Şekil 8.45-46'da ise akım verimine ve enerji tüketimine etkisi gösterilmiştir.

Çizelge 8.10. Demir reaktörde 10 mgL^{-1} LAS (pH 4,5) çözeltisinde farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL^{-1})	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg^{-1}
0,15	2	90	6,4	36	7,28	0,1250	0,1250
	4	107	5,2	48	7,30	0,2229	0,2229
	6	108	4,8	52	7,37	0,3115	0,3115
	8	109	4,5	55	7,42	0,3964	0,3964
	10	110	4,2	58	7,44	0,4741	0,4741
	30	120	3,2	68	7,46	1,3235	1,3235
	60	125	2,6	74	7,89	2,5338	2,5338
0,20	2	137	4,2	58	7,18	0,0900	0,1575
	4	159	3,8	62	7,24	0,0481	0,3419
	6	163	3,5	65	7,28	0,0336	0,5015
	8	164	2,9	71	7,34	0,0275	0,6160
	10	170	2,6	74	7,40	0,0230	0,7658
	30	179	1,3	87	7,54	0,0090	2,0575
	60	180	0,6	94	7,77	0,0049	3,8298
0,25	2	156	3,2	68	7,14	0,0844	0,1912
	4	147	2,6	74	7,28	0,0459	0,3311
	6	149	1,9	81	7,3	0,0335	0,4599
	8	150	1,6	84	7,36	0,0261	0,5952
	10	152	1,3	87	7,40	0,0216	0,7280
	30	156	0,6	94	7,60	0,0078	2,0745
	60	161	0,0	100	7,99	0,0055	3,0188

Çizelge 8.11. Demir reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS (pH 5,5) çözeltisinde farklı pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,15	2	17	33,0	34	5,86	0,3517	0,0050
	4	20	32,0	36	6,28	0,1862	0,0111
	6	25	30,5	39	6,55	0,1345	0,0192
	8	35	29,0	42	6,64	0,1086	0,0333
	10	50	26,0	48	6,93	0,0993	0,0521
	30	58	16,5	67	7,18	0,0462	0,1299
	60	60	12,5	75	7,27	0,0259	0,2400
0,20	2	18	31,5	37	5,72	0,2871	0,0065
	4	19	29,0	42	5,81	0,1629	0,0121
	6	21	27,5	45	5,90	0,1164	0,0187
	8	23	23,5	53	5,92	0,1028	0,0231
	10	25	20,5	59	6,13	0,0916	0,0282
	30	52	7,0	86	6,52	0,0445	0,1209
	60	105	4,0	92	7,11	0,0238	0,4565
0,25	2	29	29,0	42	5,93	0,2607	0,0115
	4	35	26,0	48	5,94	0,1490	0,0243
	6	43	24,0	52	6,08	0,1076	0,0413
	8	57	20,5	59	6,44	0,0916	0,0644
	10	71	17,5	65	6,52	0,0807	0,0910
	30	112	5,0	90	7,11	0,0372	0,3111
	60	134	3,0	94	7,50	0,0194	0,7128

Çizelge 8.12. Demir reaktörde 300 mgL⁻¹ LAS (pH 4,24) çözeltisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Çözelti Hacmi, L	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,25	2	4,3	33,0	34,0	4,37	1,00	0,0001
	4	5,0	30,5	39,0	4,37	0,95	0,0003
	6	5,9	28,5	43,0	4,44	0,90	0,0005
	8	7,0	26,0	48,0	4,5	0,85	0,0009
	10	8,3	23,0	54,0	4,86	0,80	0,0012
	30	18,0	16,0	68,0	6,10	0,75	0,0079
	40	19,4	12,8	74,5	6,66	0,70	0,0113

Çizelge 8.13. Demir reaktörün katot olduğu durumda 0,25 A'de başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
10	2	137	7,2	28	6,98	0,0348	0,4077
	4	135	6,7	33	7,15	0,0205	0,6818
	6	125	5,7	43	7,20	0,0178	0,7267
	8	123	5,5	45	7,37	0,0140	0,9111
	10	121	4,8	52	7,53	0,0129	0,9696
	30	98	2,6	74	7,57	0,0061	1,6554
	60	70	1,3	87	7,85	0,0036	2,0115
50	2	32	28,0	44	6,27	0,2731	0,0121
	4	43	26,0	48	6,48	0,1490	0,0299
	6	57	23,5	53	6,59	0,1097	0,0538
	8	79	21,5	57	6,69	0,0885	0,0924
	10	88	18,0	64	6,75	0,0795	0,1146
	30	72	12,5	75	6,93	0,0310	0,2400
	60	77	4,0	92	7,40	0,0190	0,4185

Çizelge 8.14. Demir reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinin (pH 6,34) 0,15 A'de zamanla değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,15	2	0,25	6,0	40	6,40	0,0828	0,0003
	4	0,30	4,8	52	6,65	0,0538	0,0006
	6	0,35	4,5	55	6,72	0,0379	0,0010
	8	0,40	4,2	58	6,96	0,0300	0,0014
	10	0,50	3,9	61	7,17	0,0252	0,0020
	30	0,60	2,9	71	7,96	0,0098	0,0063
	60	0,65	2,3	77	9,46	0,0053	0,0127

Çizelge 8.15. Demir reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinin (pH 4,84) 0,25 A'de zamanla değişimi

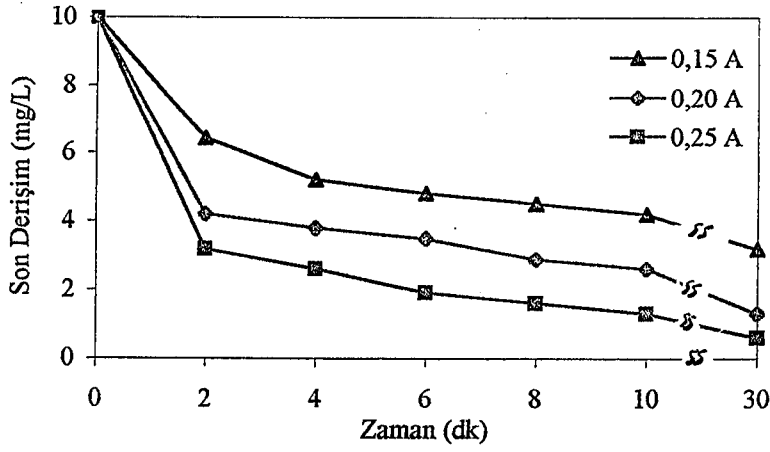
Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,25	2	0,4	26,2	48	6,31	0,2979	0,0001
	4	0,5	23,8	52	6,42	0,1614	0,0003
	6	0,6	22,0	56	6,43	0,1159	0,0005
	8	0,7	18,9	62	6,52	0,0962	0,0008
	10	0,8	15,3	70	6,67	0,0869	0,0010
	30	0,9	6,0	88	7,23	0,0364	0,0026
	60	1,2	1,5	97	7,84	0,0201	0,0062

Çizelge 8.16. Demir reaktörde 0,01 M FeII SO_4 ve 0,05 M H $_2$ O $_2$ 300 mgL $^{-1}$ LAS (pH 3,11) çözeltisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları

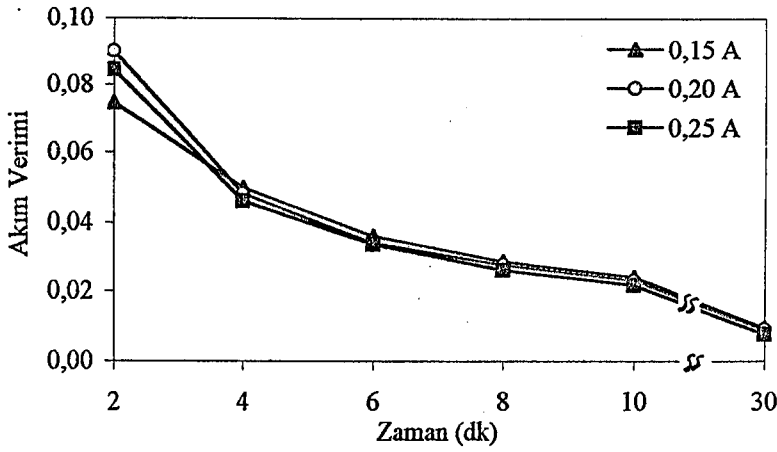
Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL $^{-1}$)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg $^{-1}$
0,25	1	0,9	2,76	94,48	3,24	7,0374	0,00013
	2	0,9	2,36	95,28	3,28	3,5485	0,00025
	3	1	1,11	97,78	3,32	2,4277	0,00042
	4	1,1	0,89	98,22	3,38	1,8290	0,00061
	5	1,1	0,755	98,49	3,55	1,4672	0,00077
	6	1,1	0,63	98,74	3,65	1,2258	0,00092
	8	1,1	0	100	3,70	0,9311	0,00122
	10	1,2	0	100	3,80	0,7449	0,00167

Çizelge 8.17. Demir reaktörde 50 mgL $^{-1}$ LAS çözeltisinde 0,20 A'de farklı başlangıç çözeltisi pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları

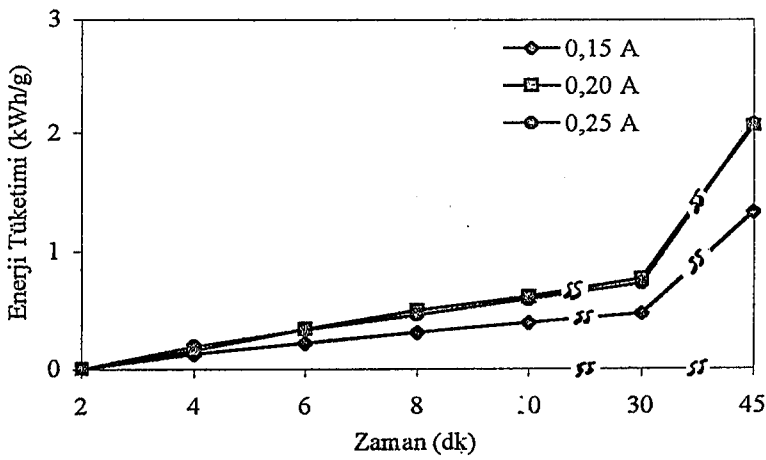
Başlangıç Çözelti pH'sı	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL $^{-1}$)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg $^{-1}$
3	2	0,4	28,0	44	3,15	0,3414	0,0001
	4	0,5	25,6	49	3,23	0,1901	0,0003
	6	0,6	21,7	56	3,30	0,1448	0,0004
	8	0,7	19,5	61	3,36	0,1183	0,0006
	10	0,8	18,8	64	3,45	0,0993	0,0009
	30	1,6	12,5	75	3,50	0,0388	0,0043
	60	1,8	9,5	81	5,47	0,0209	0,0089
9	2	24,8	26,5	47	7,77	0,3647	0,0070
	4	25,4	24,0	52	7,64	0,2017	0,0130
	6	26,3	20,9	58	7,44	0,1500	0,0181
	8	27,4	17,5	65	7,41	0,1261	0,0225
	10	28,3	14,5	71	7,33	0,1102	0,0266
	30	27,2	11,3	77	7,25	0,0398	0,0703
	60	27,6	5,48	89	7,51	0,0230	0,1240
11	2	6,9	34,0	32	10,35	0,2483	0,0029
	4	7,1	31,5	37	10,31	0,1435	0,0051
	6	7,4	30,5	39	10,29	0,1009	0,0076
	8	7,7	29,0	42	10,25	0,0815	0,0098
	10	8,1	26,0	48	10,21	0,0745	0,0113
	30	8,6	21,8	56	10,08	0,0290	0,0305
	40	9,0	14,0	72	10,25	0,0186	0,0500



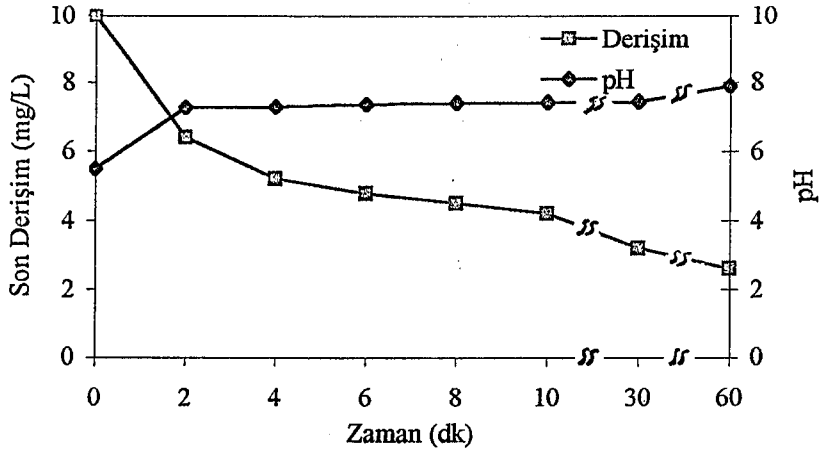
Şekil 8.19. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS derişiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi



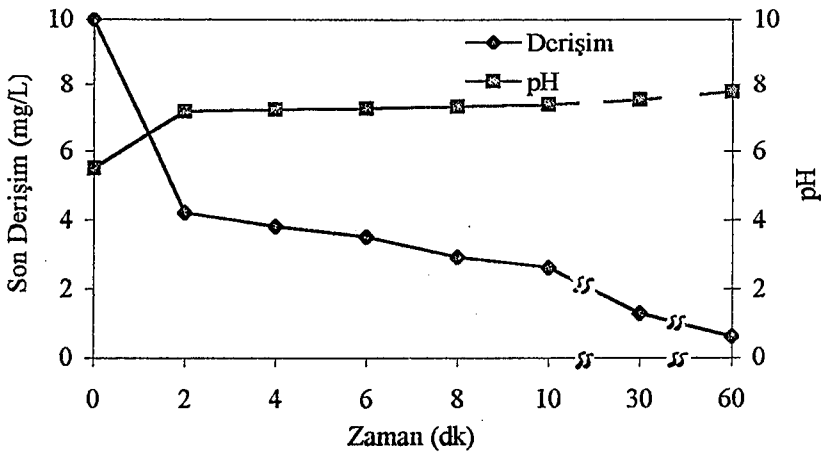
Şekil 8.20. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



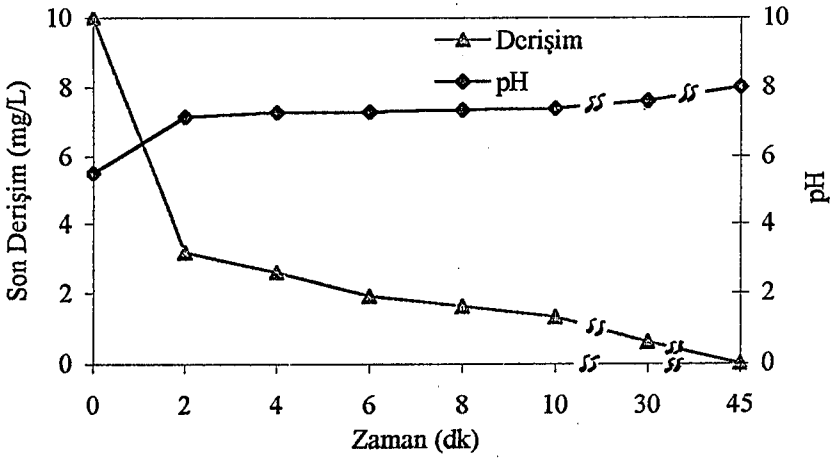
Şekil 8.21. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



(b)



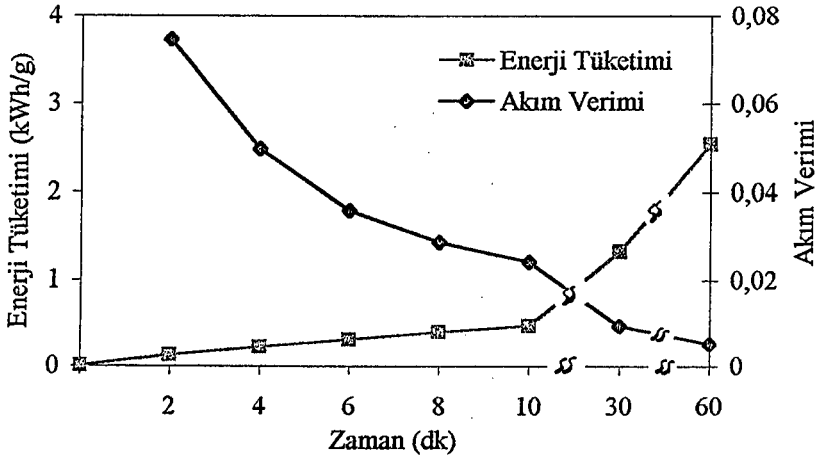
(c)

Şekil 8.22. Demir reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nın zamanla değişimi

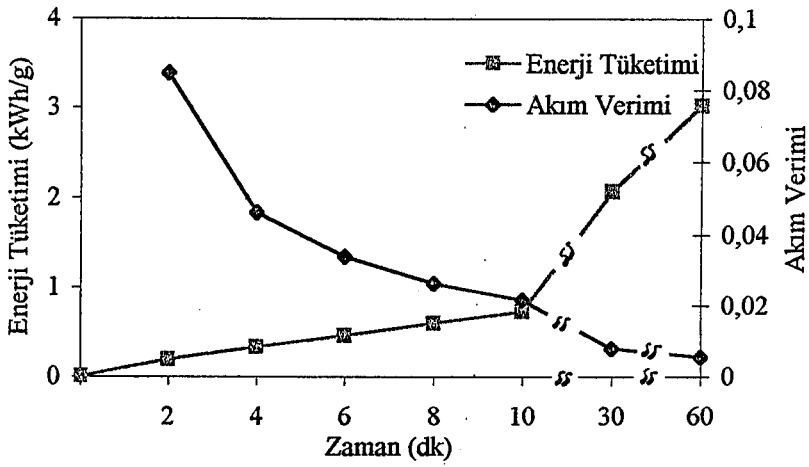
a) 0,15 A

b) 0,20 A

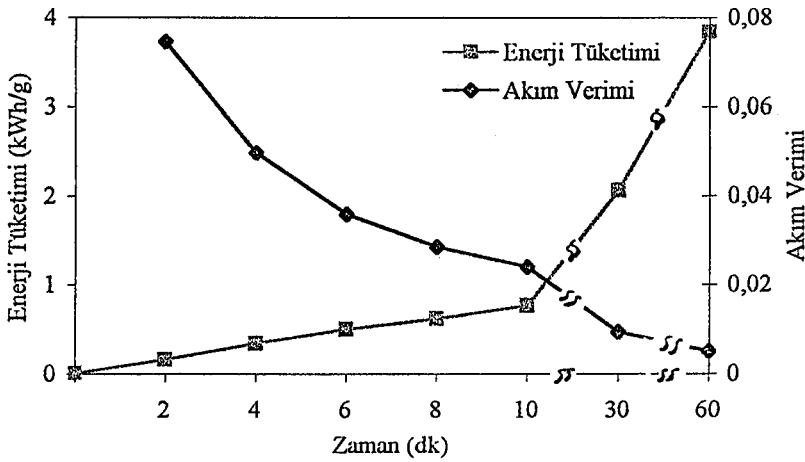
c) 0,25 A akım değerlerinde



(a)



(b)



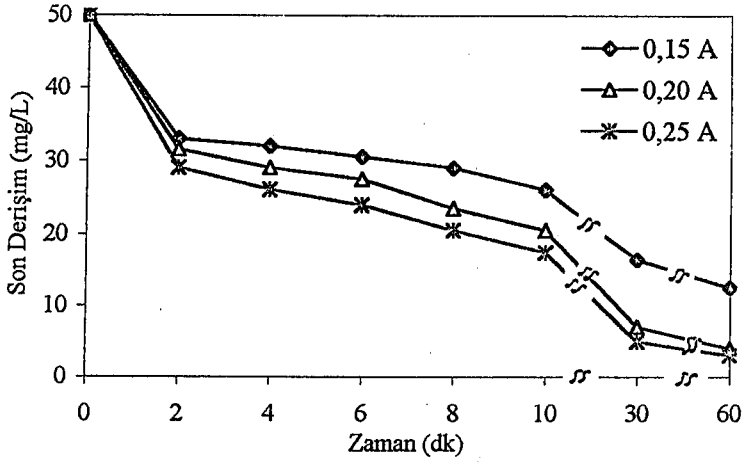
(c)

Şekil 8.23. 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

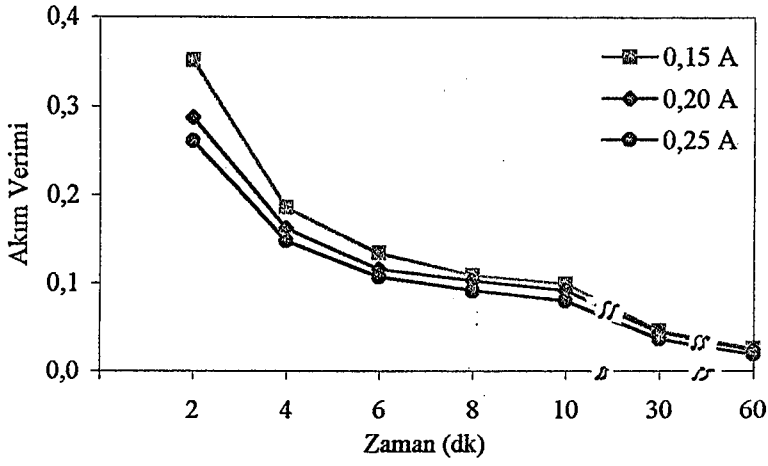
a) 0,15 A

b) 0,20 A

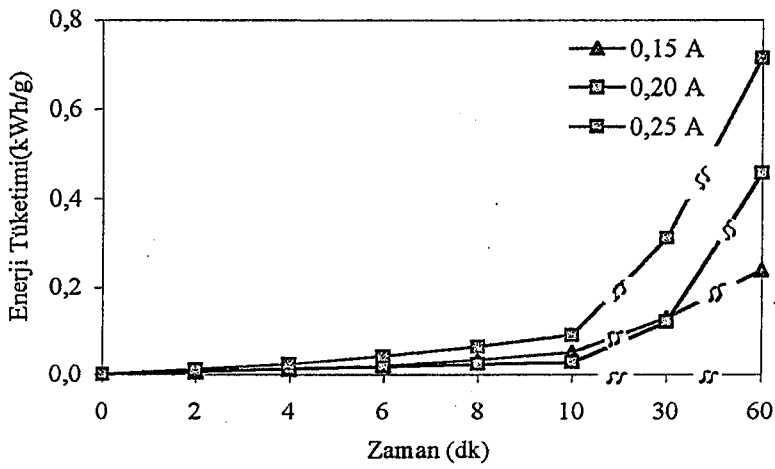
c) 0,25 A akım değerlerinde (demir reaktör)



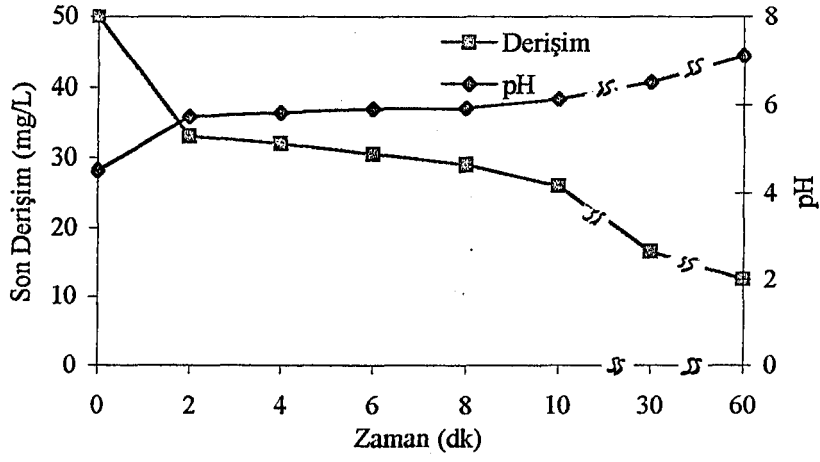
Şekil 8.24. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin farklı akım değerlerinde zamanla değişimi



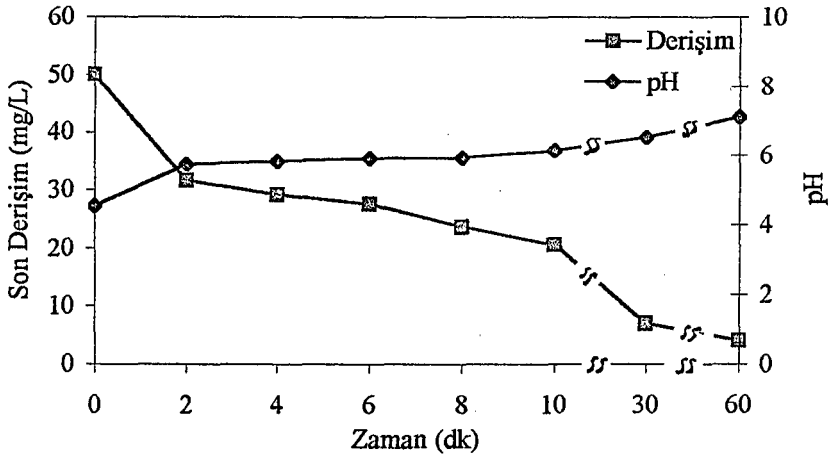
Şekil 8.25. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



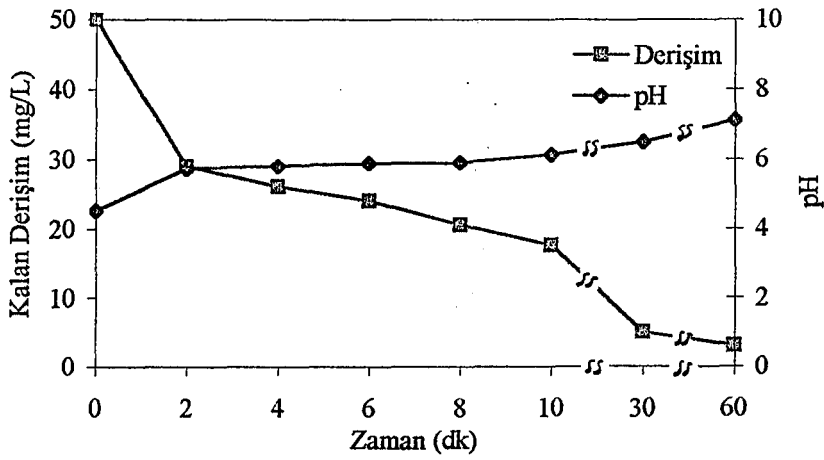
Şekil 8.26. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



(b)



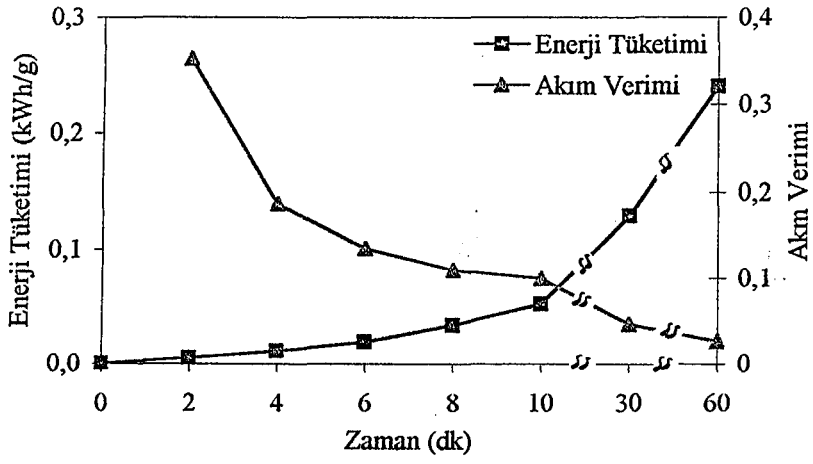
(c)

Şekil 8.27. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi

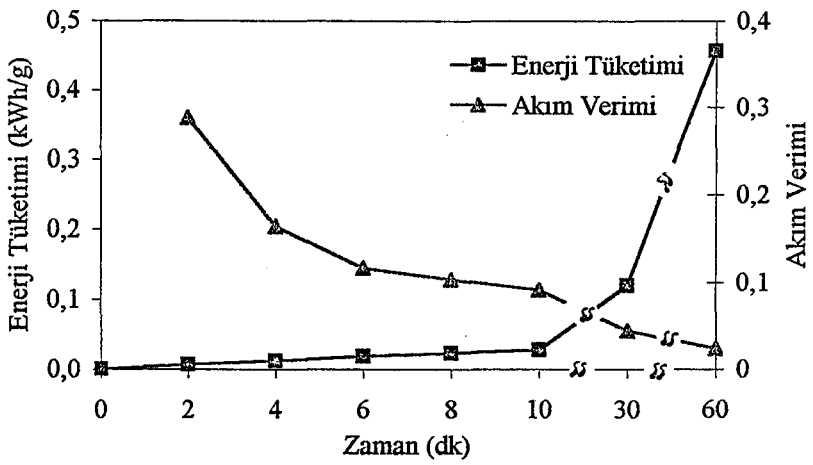
a) 0,15 A

b) 0,20 A

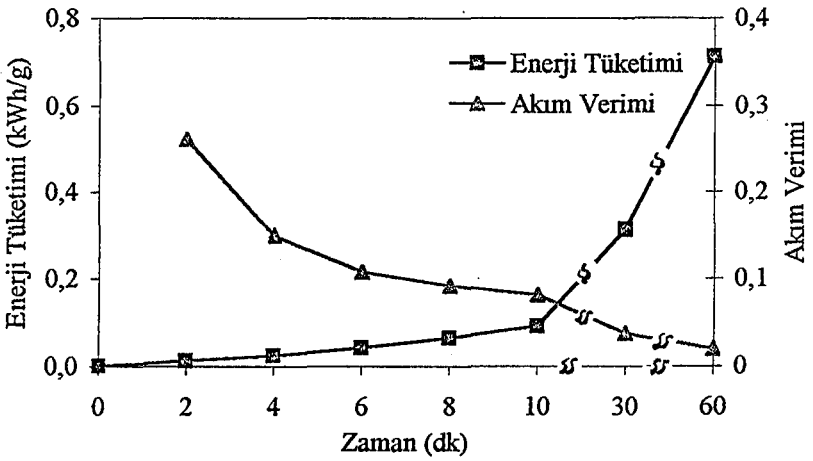
c) 0,25 A akım değerlerinde



(a)



(b)



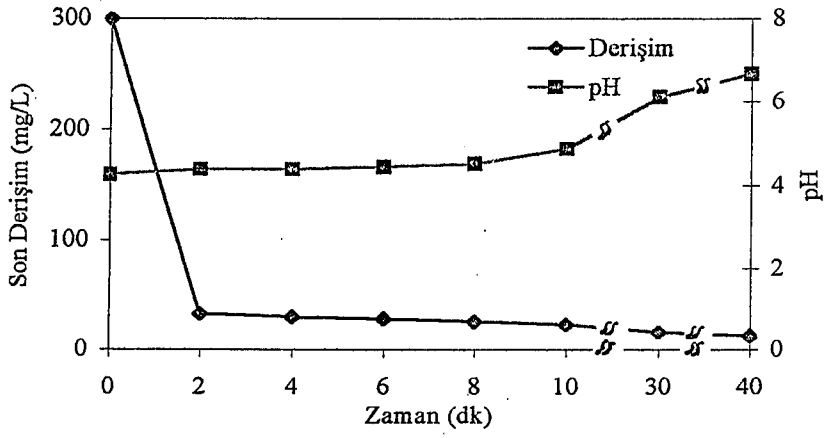
(c)

Şekil 8.28. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

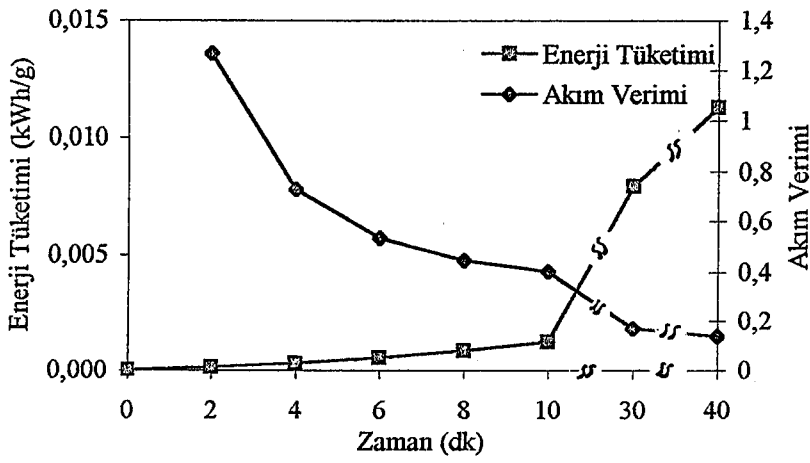
a) 0,15 A

b) 0,20 A

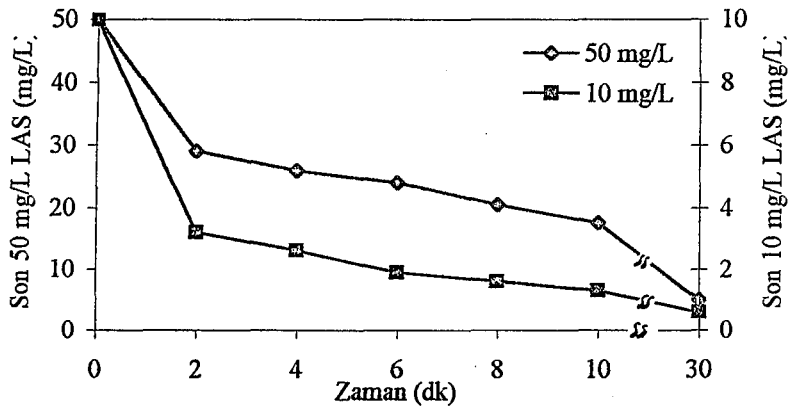
c) 0,25 A akım değerlerinde (demir reaktör)



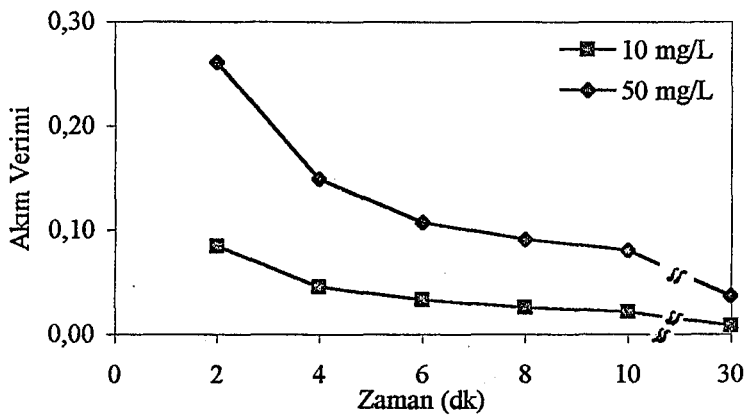
Şekil 8.29. Demir reaktörde 300 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



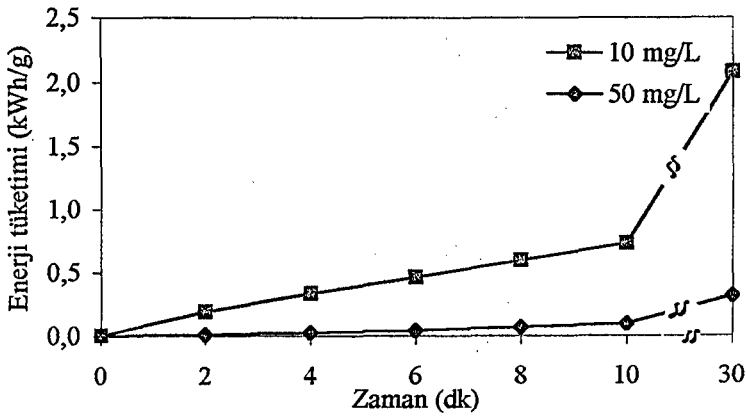
Şekil 8.30. Demir reaktörde 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



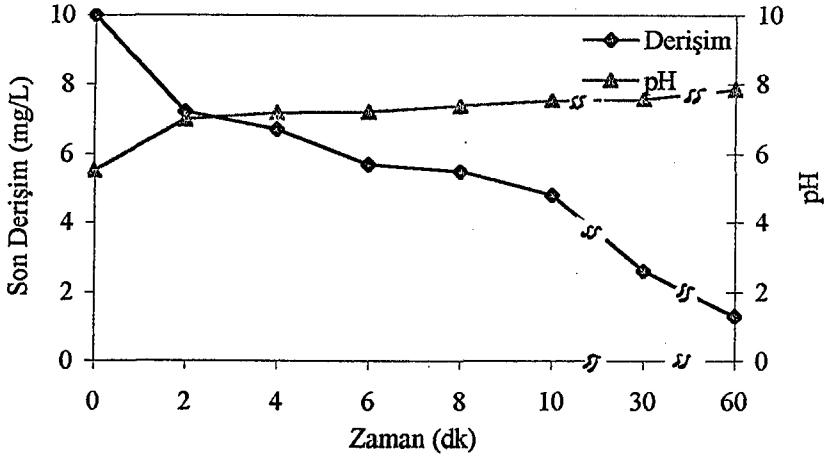
Şekil 8.31. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ derişimlerinin 0,25 A'de zamanla değişimi



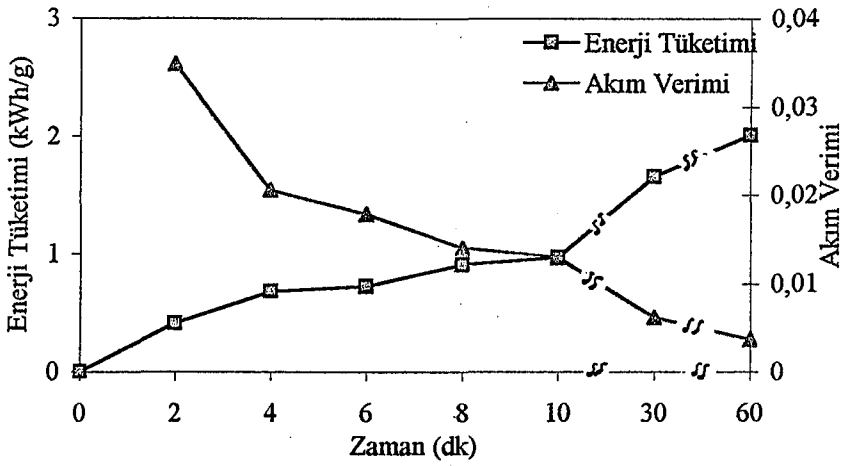
Şekil 8.32. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ çözeltilerinde 0,25 A'de akım veriminin zamanla değişimi



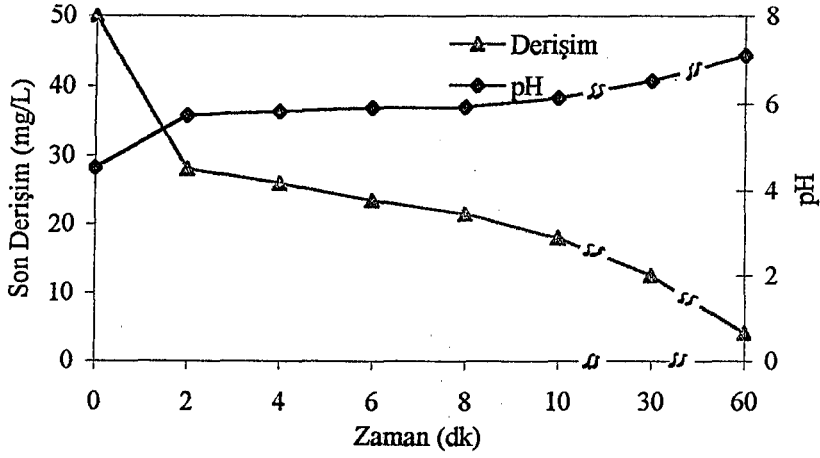
Şekil 8.33. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ çözeltilerinde 0,25 A'de enerji tüketiminin zamanla değişimi



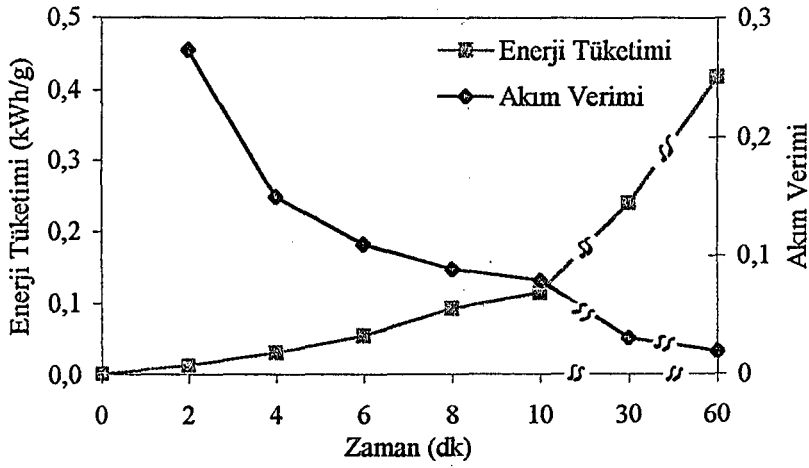
Şekil 8.34. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi



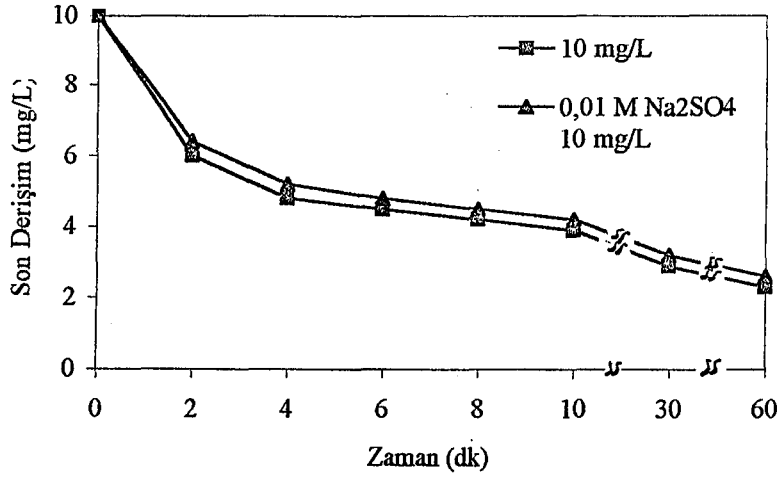
Şekil 8.35. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



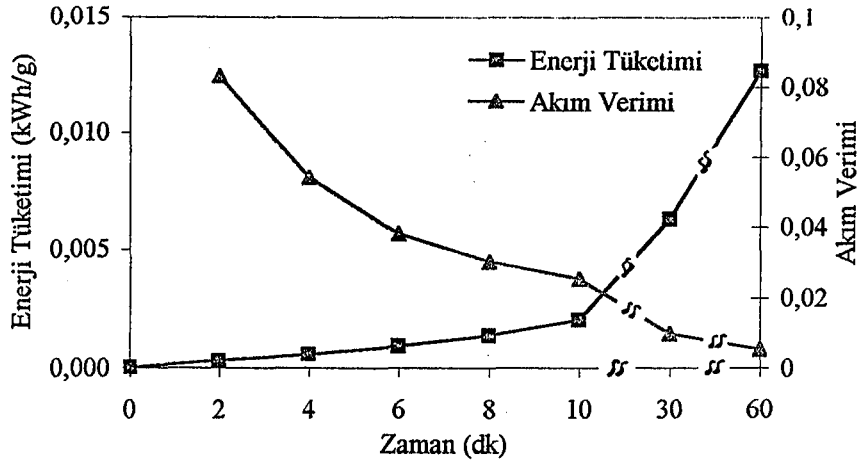
Şekil 8.36. Demir reaktörün anot, karıştırıcının katot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nin zamanla değişimi



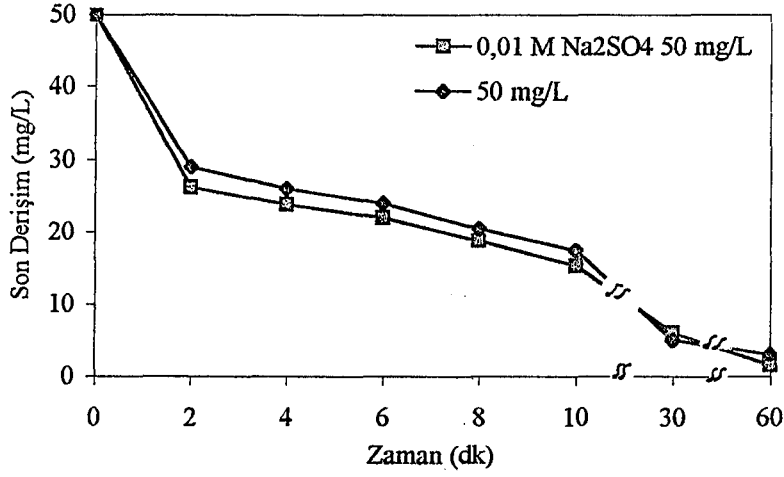
Şekil 8.37. Demir reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



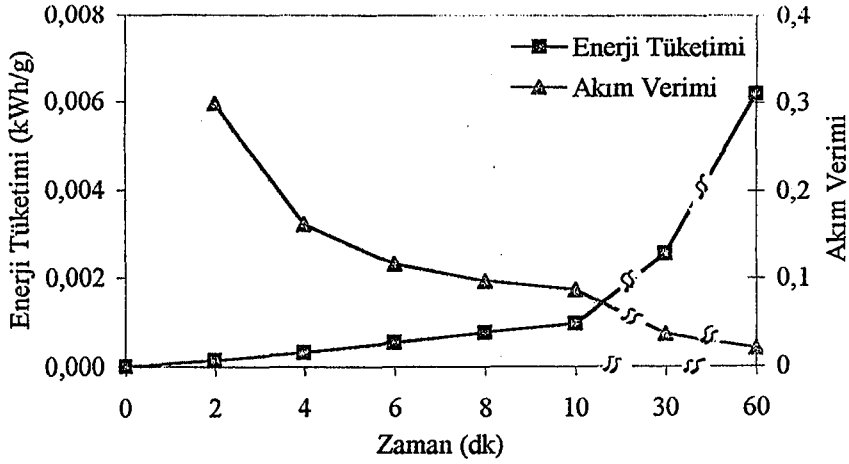
Şekil 8.38. Demir reaktörde 10 mgL^{-1} ve $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 10 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,15 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



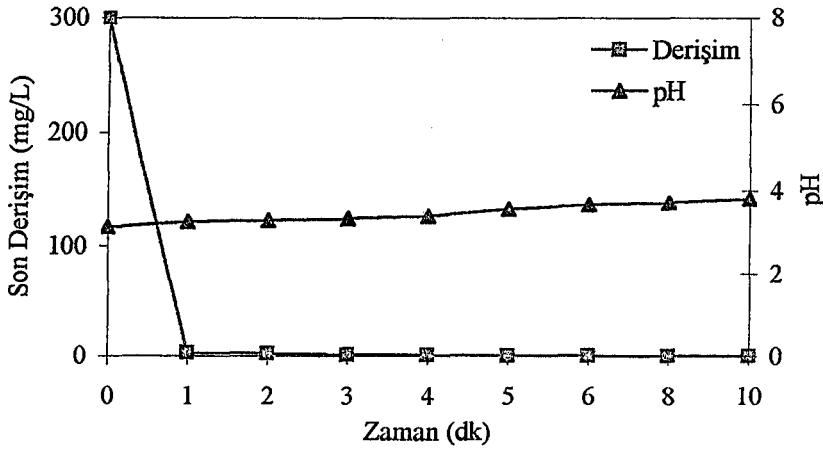
Şekil 8.39. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,15 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



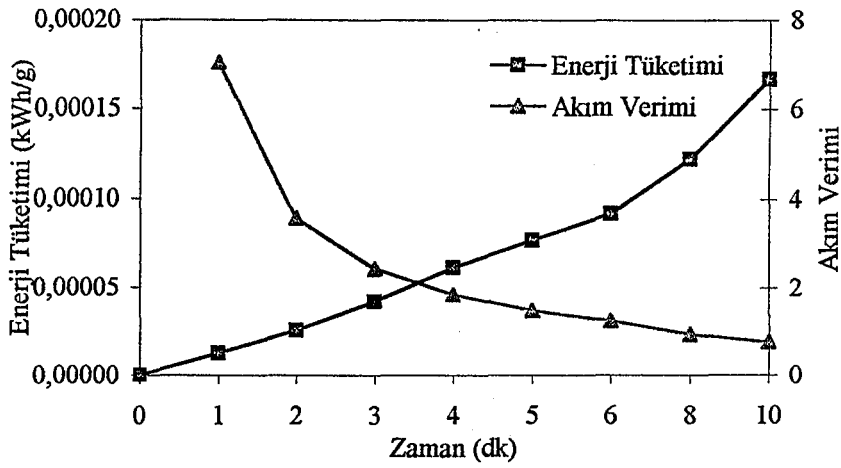
Şekil 8.40. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} ve $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 'lü 50 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



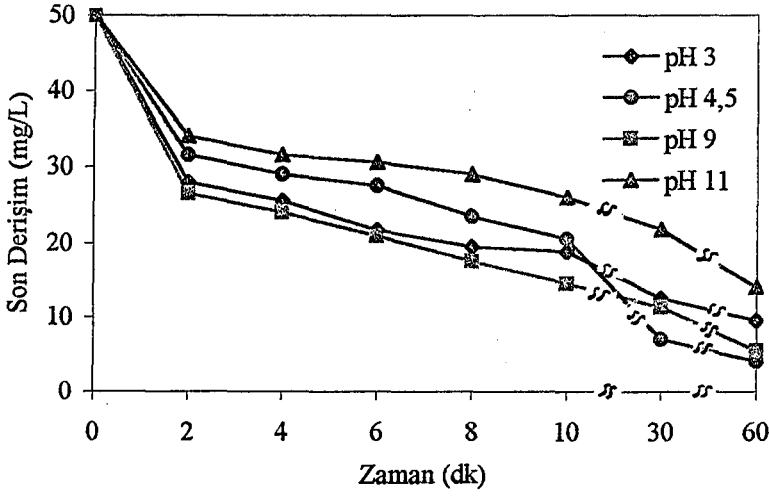
Şekil 8.41. Demir reaktörde $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



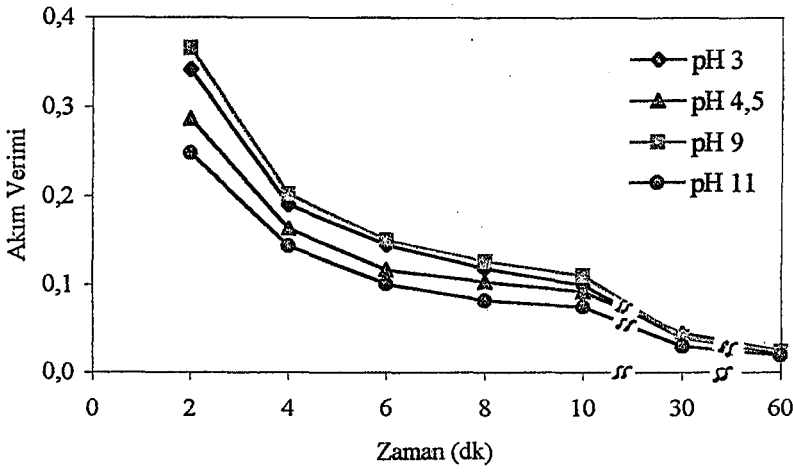
Şekil 8.42. Demir reaktörde 0,25 A'de 0,01M Fe_2SO_4 ve 0,05 M H_2O_2 300 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi



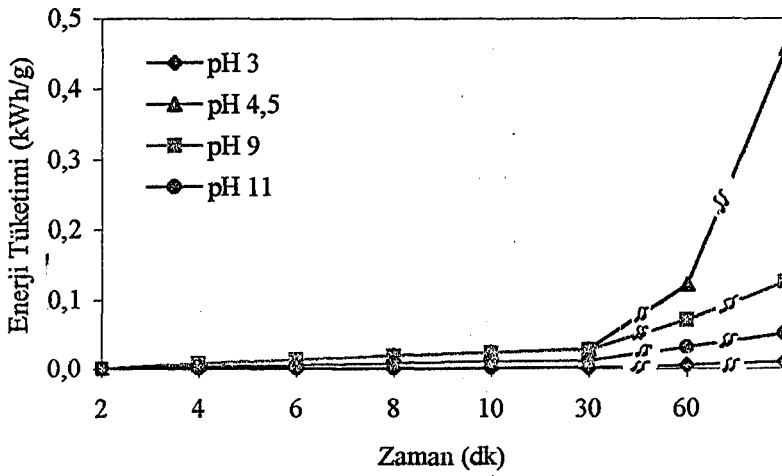
Şekil 8.43. Demir reaktörde 0,01M Fe_2SO_4 ve 0,05 M H_2O_2 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



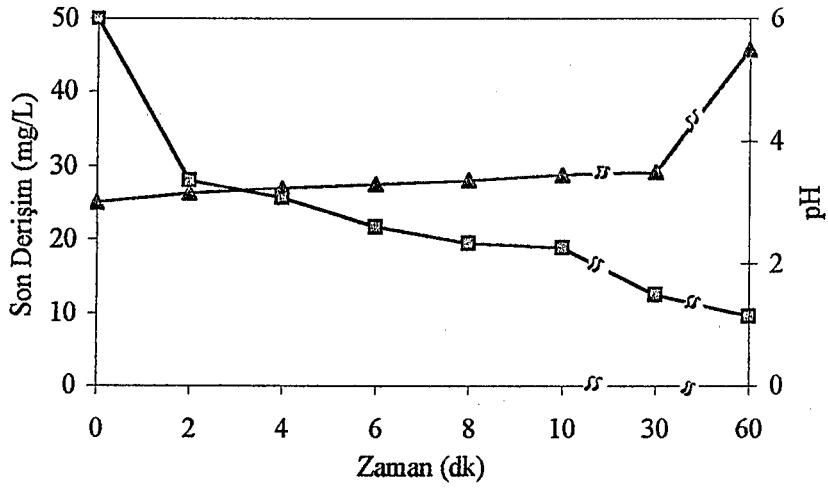
Şekil 8.44. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin farklı pH değerlerinde $0,20 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



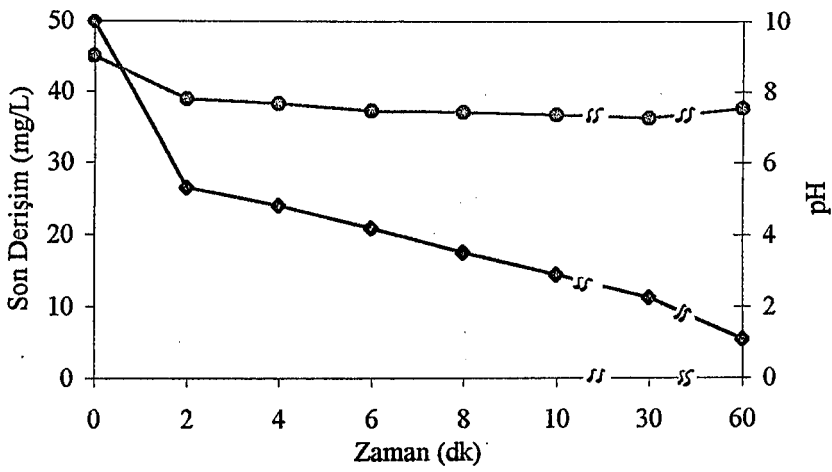
Şekil 8.45. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde akım veriminin $0,20 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



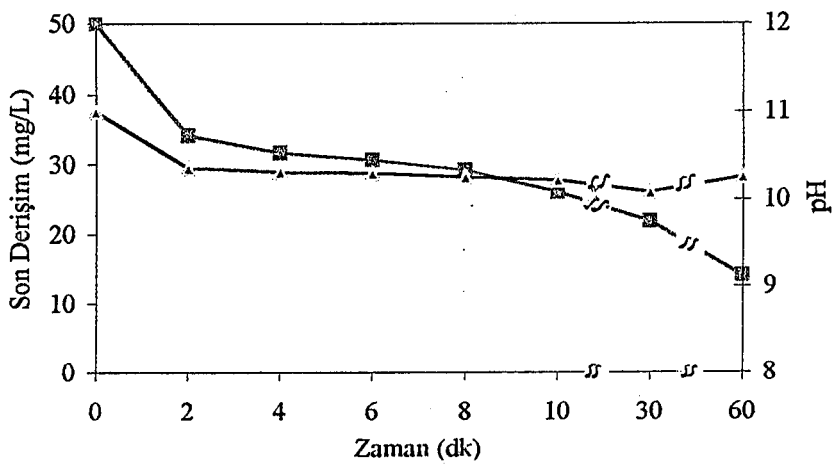
Şekil 8.46. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin $0,20 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



(a)

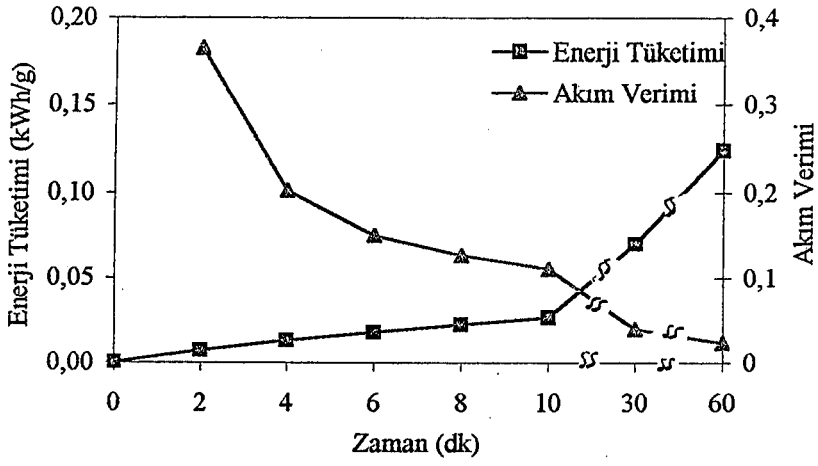


(b)

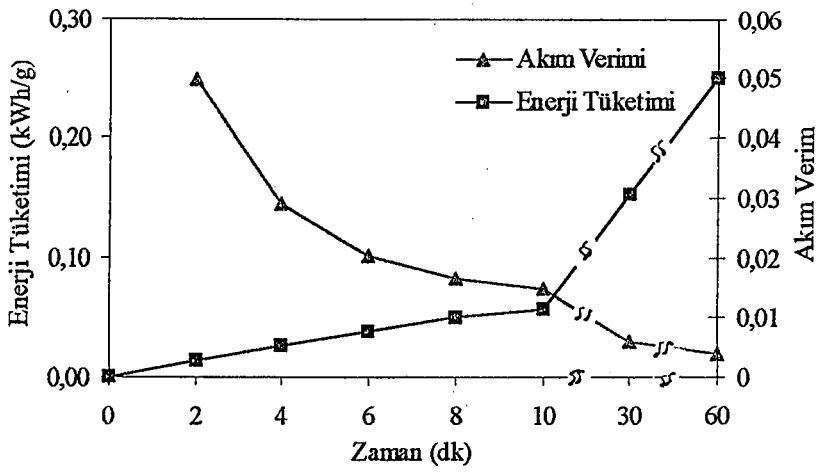


(c)

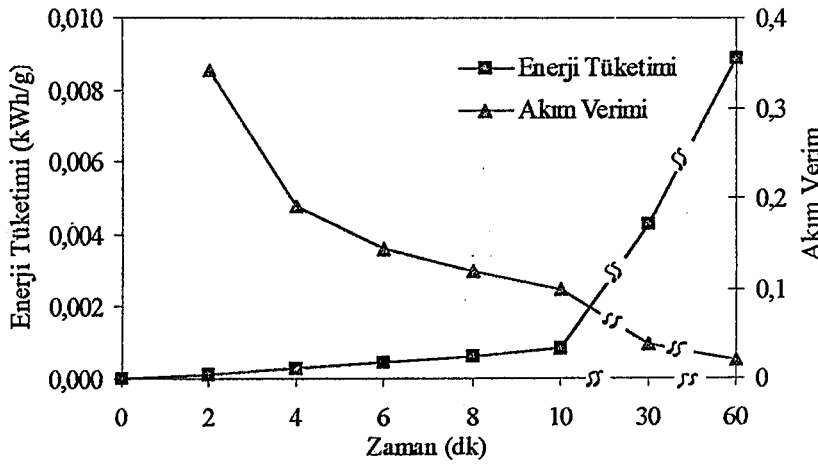
Şekil 8.47. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin pH 3, 9 ve 11'de 0,20 A'de zamanla değişimi



(a)



(b)



(c)

Şekil 8.48. Demir reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde pH 3, 9 ve 11'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

8.2.1.6. Kütle aktarım katsayısının (k) değişimi

Başlangıç derişiminin, akış hızının, Na_2SO_4 derişiminin ve pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi araştırılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.28-8.31'de verilmiştir.

Başlangıç Derişiminin kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.18. 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} başlangıç derişimlerinin $0,20 \text{ A}$ 'de kütle aktarım katsayısına etkisi

Başlangıç Derişimi (mgL^{-1})	k, (10^{-3} ms^{-1})
10	0,391269
50	0,236332

Uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.19. 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına etkisi

Uygulanan akım (A)	k, (10^{-3} ms^{-1})
0,15	0,186
0,20	0,236
0,25	0,280

pH'nın kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.20. 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,20 \text{ A}$ 'de pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi

PH	k, (10^{-3} ms^{-1})
3,0	0,276
5,5	0,236
9,0	0,308
11,0	0,179

Destek elektrolit derişiminin (Na_2SO_4) kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.21. 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de sodyum sülfat (Na_2SO_4) derişiminin kütle aktarım katsayısına etkisi

Na_2SO_4 Derişimi (M)	k, (10^{-3} ms^{-1})
0,00	0,000280
0,01	0,000316

8.2.2. Alüminyum reaktörde kesikli sistemde yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları

8.2.2.1. Uygulanan akımın etkisinin incelendiği deney sonuçları

Alüminyum reaktörün anot, karıştırıcının katot olduğu durumda 10, 50 ve 300 mgL⁻¹ LAS içeren çözeltiler ile farklı akım değerlerinde işlem süresine bağlı olarak çalışılmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 8.32-50 ve Şekil 8.49-76'da verilmiştir.

8.2.2.2. Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Farklı başlangıç derişimlerinin LAS giderimine etkisinin incelendiği deney sonuçları Çizelge 8.32-38'de verilmiştir. 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ LAS derişimlerinin giderime etkisi Şekil 8.61'de, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 62-63'de gösterilmiştir.

8.2.2.3. Reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumun etkisinin incelendiği deney sonuçları

Reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda işlem süresinin ve başlangıç derişiminin giderime etkisi ile ilgili sonuçlar Çizelge 8.39-40'da verilmiştir.

LAS gideriminin zamanla değişimi Şekil 8.64-66'da, akım veriminin ve enerji tüketiminin zamanla değişimi ise Şekil, 8.65-67'de, gösterilmiştir.

8.2.2.4. Destek elektrolit (Na_2SO_4) derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Farklı akım değerlerinde çalışma çözeltisine ilave edilen destek elektrolit derişiminin giderime etkisinin incelendiği sonuçlar izelge 8.41-44'de verilmiştir.

Na_2SO_4 derişiminin giderime etkisi Şekil 8.68, 70 ve 72'de, akım verimi ve enerji tüketimine etkisi ise Şekil 8.69,71 ve 73'de gösterilmiştir.

8.2.2.5. pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçları

10 ve 50 mgL^{-1} LAS içeren özeltide 0,20 A akım değerinde pH'nın giderime etkisi ile ilgili sonuçlar izelge 8.45-50'de verilmiştir. Şekil 8.86-91'de pH'nın LAS giderimine, akım verimine ve enerji tüketimine etkisi gösterilmiştir.

En iyi çalışma koşullarında sodyum loril eter sülfatlı (SLES) özelti ve porsuk nehrinden alınan LAS içeren su örneği ile çalışılmış, elde edilen sonuçlar izelge 8.51-58'de verilmiştir. İşlem süresinin, enerji tüketiminin ve akım veriminin yüzey aktif madde derişimine etkisi Şekil 8.92-99'da gösterilmiştir.

Çizelge 8.22. Alüminyum reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS (pH 5,5) çözeltisinde farklı akım değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,15	2	50	5,8	42	7,27	0,0875	0,0595
	4	57	5,1	49	7,43	0,0511	0,1163
	6	62	3,8	62	7,47	0,0431	0,1500
	8	68	3,2	68	7,53	0,0354	0,2000
	10	76	2,9	71	7,61	0,0296	0,2676
	30	92	2,2	78	7,68	0,0108	0,8846
	60	123	1,3	87	7,85	0,0060	2,1207
0,20	1	57	5,2	48	7,43	0,1501	0,0396
	2	61	4,7	53	7,5	0,0828	0,0767
	3	64	3,2	68	7,57	0,0709	0,0941
	4	68	2,9	71	7,62	0,0555	0,1277
	5	71	2,5	75	7,68	0,0469	0,1578
	30	95	1,8	82	7,75	0,0085	1,1585
	60	132	1,0	90	7,98	0,0047	2,9333
0,25	1	77	4,7	53	7,66	0,1326	0,0605
	2	81	4,1	59	7,74	0,0738	0,1144
	3	84	2,7	73	7,82	0,0609	0,1438
	4	87	2,3	77	7,79	0,0481	0,1883
	5	81	1,9	81	7,78	0,0405	0,2083
	30	115	1,3	87	7,77	0,0073	1,6523
	45	147	0,6	94	7,62	0,0052	2,9322

Çizelge 8.23. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS (pH 4,5) çözeltisinde farklı akım değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL^{-1})	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg^{-1}
0,15	2	21	35,0	30	5,31	0,0070	0,3126
	4	27	32,0	36	5,6	0,0150	0,1876
	6	33	30,0	40	5,63	0,0248	0,1389
	8	38	27,5	45	5,69	0,0338	0,1172
	10	48	25,5	49	6,02	0,0490	0,1021
	30	61	15,0	70	7,24	0,1307	0,0486
	60	107	11,5	77	7,48	0,4169	0,0267
0,20	1	29	33,0	34	5,55	0,0057	0,5315
	2	37	30,5	39	5,56	0,0126	0,3048
	3	43	26,0	48	5,60	0,0179	0,2501
	4	51	25,0	50	5,65	0,0272	0,1954
	5	63	23,0	54	5,80	0,0389	0,1688
	30	74	12,5	75	7,01	0,1973	0,0391
	60	120	9,0	82	7,41	0,5854	0,0214
	0,25	1	40	29,0	42	5,27	0,5252
2	48	26,5	47	5,30	0,2939	0,0170	
3	53	24,5	51	5,43	0,2126	0,0260	
4	61	22,5	55	5,99	0,1719	0,0370	
5	71	17,5	65	6,26	0,1626	0,0455	
30	98	9,5	81	7,43	0,0338	0,3025	
60	133	5,5	89	7,74	0,0185	0,7472	

Çizelge 8.24. Alüminyum reaktörde 300 mgL^{-1} LAS (pH 4,24) çözeltisinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL^{-1})	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg^{-1}
0,25	1	10	36,0	28	4,11	2,1008	0,0002
	2	22	33,5	33	4,05	1,2380	0,0007
	3	34	26,0	48	4,04	1,2005	0,0016
	4	45	23,0	54	4,03	1,0129	0,0027
	5	48	20,5	59	4,02	0,8853	0,0036
	30	62	17,0	66	4,34	0,1651	0,0274
	60	94	12,5	75	4,74	0,0938	0,0817

Çizelge 8.25. Alüminyum reaktörün katot olduğu durumda başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçları

Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
10	1	86	5,6	39	7,05	0,0975	0,0814
	2	92	5,4	46	7,14	0,0575	0,1667
	3	98	4,8	52	7,18	0,0433	0,2356
	4	107	4,2	58	7,25	0,0363	0,3075
	5	125	3,5	65	7,37	0,0325	0,4006
	30	168	2,6	74	7,54	0,0062	2,8378
	35	200	2,6	74	7,73	0,0053	3,9414
50	1	48	29,0	42	5,40	0,5252	0,0095
	2	54	25,5	49	5,63	0,3064	0,0184
	3	72	23,0	54	5,80	0,2251	0,0333
	4	95	20,5	59	5,86	0,1844	0,0537
	5	132	15,0	70	5,88	0,1751	0,0786
	20	180	3,0	94	6,04	0,0588	0,3191

Çizelge 8.26. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinin (pH 6,53) 0,15 A'de zamanla değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,15	1	2,2	5,4	46	6,57	0,1917	0,0012
	2	2,7	4,8	52	6,61	0,1084	0,0026
	3	3	3,5	65	6,67	0,0903	0,0035
	4	3,4	2,9	71	6,72	0,0740	0,0048
	5	3,9	2,6	74	6,76	0,0617	0,0066
	30	4,1	1,9	81	6,84	0,0113	0,0380
	60	4,2	1,2	88	7,04	0,0061	0,0716

Çizelge 8.27. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinin (pH 4,92) 0,25 A'de zamanla değişimi

Akım (A)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,25	1	3,6	26	48	6,98	0,1200	0,0006
	2	2,7	23,5	53	7,14	0,0663	0,0008
	3	2,65	20,5	59	7,18	0,0492	0,0011
	4	2,6	18	64	7,25	0,0400	0,0014
	5	2,5	12,5	73	7,37	0,0365	0,0014
	30	2,4	8	84	7,54	0,0070	0,0071
	60	2,3	3,5	93	7,73	0,0039	0,0124

Çizelge 8.28. Alüminyum reaktörde 0,01 M ve 0,05 M Na₂SO₄ 300 mgL⁻¹ LAS (pH 4,27) çözeltilerinin 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları

Destek Elektrolit Derişimi (M)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
0,01	1	4,8	33,0	34	4,2	0,0850	0,0001
	2	5,3	25,5	49	4,17	0,0613	0,0002
	3	6,2	23,5	53	4,18	0,0442	0,0003
	4	7,1	19,5	61	4,19	0,0381	0,0004
	5	7,6	16,5	67	4,21	0,0335	0,0006
	30	8,1	14,0	72	5,25	0,0060	0,0035
	60	7,5	9,5	81	5,63	0,0034	0,0065
0,05	1	4,4	26,0	48	4,28	0,1200	0,0001
	2	4,7	23,5	53	4,29	0,0663	0,0001
	3	4,8	17,5	65	4,3	0,0542	0,0002
	4	5,0	14,5	71	4,32	0,0444	0,0003
	5	5,3	12,0	76	4,35	0,0380	0,0004
	30	5,5	9,0	82	4,44	0,0068	0,0024
	60	5,8	5,0	90	4,48	0,0038	0,0049

Çizelge 8.29. Alüminyum reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS çözeltilerinde 0,20 A'de farklı başlangıç çözeltileri ph değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Başlangıç Çözelti pH'sı	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	PH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
3	1	6,50	7,9	21	3,06	0,0657	0,0103
	2	6,60	7,3	27	3,08	0,0422	0,0163
	3	6,72	7,0	30	3,09	0,0313	0,0224
	4	6,81	5,7	43	3,11	0,0336	0,0211
	5	6,93	4,3	57	3,14	0,0356	0,0203
	30	7,10	3,9	61	3,21	0,0064	0,1164
	60	7,30	3,3	67	3,29	0,0035	0,2179
9	1	50	8	20	7,73	0,0833	0,0625
	2	53	7	30	7,39	0,1178	0,0469
	3	55	6,7	33	7,34	0,1667	0,0344
	4	57	5,4	46	7,30	0,1652	0,0360
	5	61	3,8	62	7,26	0,1640	0,0388
	30	64	2,6	74	7,21	0,8649	0,0077
	60	68	1,9	81	7,09	1,6790	0,0042
11	1	19,0	6,7	33	8,70	0,0192	0,1032
	2	21,0	6,1	39	8,61	0,0359	0,0610
	3	21,7	5,1	49	8,48	0,0443	0,0511
	4	22,0	4,5	55	8,38	0,0533	0,0430
	5	23,8	3,8	62	8,10	0,0640	0,0388
	30	25,3	3,2	68	7,80	0,3721	0,0071
	60	27,8	2,6	74	7,50	0,7514	0,0039

Çizelge 8.30. Alüminyum reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde 0,20 A'de farklı başlangıç çözeltisi pH değerlerinde elde edilen deney sonuçları

Başlangıç Çözeltisi pH'sı	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
3	1	7,5	33,0	36	3,10	0,5627	0,0015
	2	7,7	30,5	39	3,11	0,3048	0,0026
	3	7,8	29,0	42	3,14	0,2188	0,0037
	4	8,1	27,5	45	3,16	0,1758	0,0048
	5	8,3	26,0	48	3,18	0,1501	0,0058
	30	9,1	18,0	64	3,21	0,0333	0,0284
	60	9,6	15,0	70	3,41	0,0182	0,0549
9	1	32,0	40,0	20	7,20	0,3126	0,0107
	2	35,0	37,0	26	7,46	0,2032	0,0179
	3	39,0	34,5	31	7,50	0,1615	0,0252
	4	43,0	30,5	39	7,53	0,1524	0,0294
	5	48,0	29,0	42	7,63	0,1313	0,0381
	30	52,0	8,0	84	7,81	0,0438	0,1238
	60	56,0	4,5	91	7,97	0,0237	0,2462
11	1	19,0	34,5	31	8,41	0,4846	0,0041
	2	23,0	31,5	37	8,45	0,2892	0,0083
	3	29,0	26,0	48	8,50	0,2501	0,0121
	4	33,0	23,5	53	8,52	0,2071	0,0166
	5	37,0	20,5	59	8,59	0,1844	0,0209
	30	41,0	15,0	70	8,74	0,0365	0,1171
	60	44,0	11,0	78	8,80	0,0203	0,2256

Çizelge 8.31. Demir reaktörde 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ SLES (pH 7,2) çözeltilerinde 0,25 A'de elde edilen deney sonuçları

Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
10	2	26,8	4,3	57	7,3	0,0785	0,0315
	4	27,1	3,7	63	7,46	0,0434	0,0576
	6	27,3	3,5	65	7,55	0,0298	0,0844
	8	28,3	2,9	71	7,62	0,0244	0,1068
	10	28,2	2,3	77	7,68	0,0212	0,1227
	30	29,9	1,7	83	8,03	0,0076	0,3620
	60	30,3	1,2	88	7,49	0,0040	0,6920
50	1	40,7	11,695	76,61	7,17	1,0553	0,0036
	2	43,1	8,49	83,02	7,24	0,5718	0,0070
	3	46	8,255	83,49	7,68	0,3833	0,0111
	4	50	5,775	88,45	7,72	0,3046	0,0151
	5	55	4,13	91,74	8,46	0,2527	0,0201
	30	85,3	2,285	95,43	8,12	0,0438	0,1796

Çizelge 8.32. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} SLES (pH 7,2) çözeltilerinde $0,25 \text{ A}'de$ elde edilen deney sonuçları

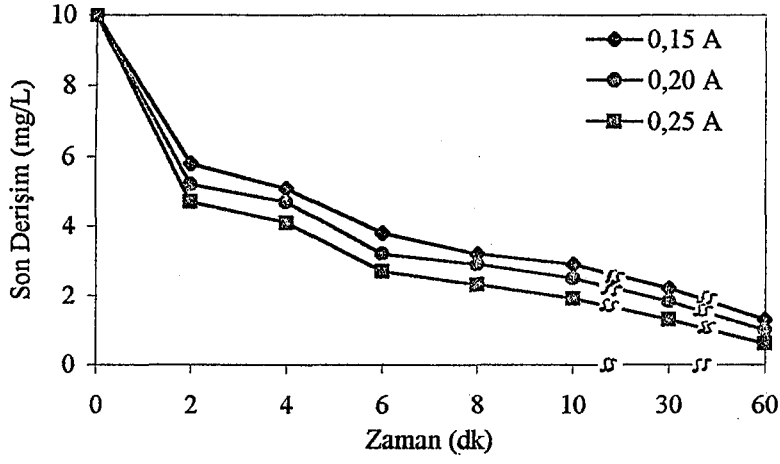
Başlangıç Derişimi (mgL^{-1})	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL^{-1})	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg^{-1}
10	2	135	3,20	68,00	8,02	0,0943	0,1340
	4	146	2,40	76,00	8,11	0,0527	0,2593
	6	175	2,10	79,00	8,13	0,0365	0,4484
	8	198	1,80	82,00	8,14	0,0284	0,6517
	10	198	1,60	86,00	8,25	0,0239	0,7953
	30	198	1,00	90,00	7,68	0,0083	2,2267
	60	198	1,00	90,00	7,78	0,0042	4,4534
50	1	94	10,84	78,32	7,70	1,0867	0,0081
	2	107	7,57	84,86	7,81	0,5887	0,0170
	3	112	6,50	88,99	7,85	0,4116	0,0261
	4	124	4,15	91,77	7,78	0,3183	0,0365
	5	137	2,76	94,49	7,81	0,2622	0,0489
	30	90	2,75	94,49	7,72	0,0435	0,1928

Çizelge 8.33. 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS içeren porsuk suyunda $0,25 \text{ A}'de$ demir reaktörde elde edilen deney sonuçları

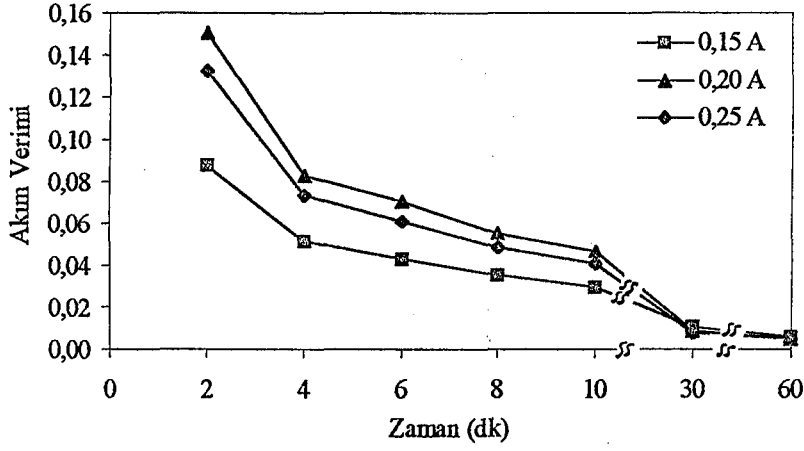
Başlangıç Derişimi (mgL^{-1})	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL^{-1})	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg^{-1}
10	2	1,5	7,08	44	8,61	0,2731	0,0018
	4	1,6	6,20	51	8,58	0,1583	0,0033
	6	1,6	5,80	64	8,56	0,1324	0,0047
	8	1,7	5,06	60	8,53	0,0931	0,0060
	10	1,7	4,70	63	8,5	0,0782	0,0072
	30	1,8	4,40	65	8,68	0,0269	0,0219
	60	1,9	2,30	82	8,03	0,0170	0,0365
50	2	1,3	27,38	48	8,61	0,3306	0,0003
	4	1,4	26,33	50	8,65	0,1722	0,0007
	6	1,5	25,28	52	8,68	0,1194	0,0011
	8	1,6	23,17	56	8,70	0,0964	0,0015
	10	1,7	22,11	58	8,63	0,0799	0,0019
	30	1,7	17,90	66	8,60	0,0303	0,0049
	60	1,8	14,74	73	8,59	0,0168	0,0095

Çizelge 8.34. 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ LAS içeren porsuk suyunda 0,25 A'de alüminyum rektörde elde edilen deney sonuçları

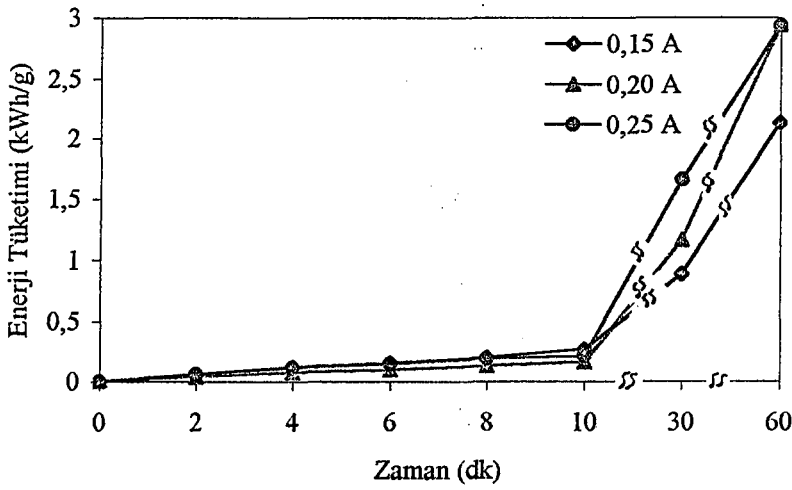
Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	Zaman (dk)	Gerilim (V)	Son Derişim (mgL ⁻¹)	Giderim (%)	pH	Akım Verimi	Enerji Tüketimi, kWhg ⁻¹
10	2	3,9	7,15	44	8,53	0,2731	0,0048
	4	4,1	6,60	48	8,52	0,1490	0,0091
	6	4,3	6,10	52	8,58	0,1076	0,0133
	8	4,7	5,10	59	8,42	0,0916	0,0168
	10	4,8	4,80	62	8,42	0,0770	0,0206
	30	3,9	4,16	67	8,47	0,0277	0,0464
	60	3,7	3,20	74	8,37	0,0153	0,0792
50	2	2,9	7,15	40	8,44	0,2775	0,0004
	4	3,0	6,60	43	8,46	0,1492	0,0009
	6	3,3	6,10	48	8,5	0,1110	0,0014
	8	3,5	5,10	53	8,49	0,0919	0,0020
	10	3,7	4,80	56	8,51	0,0777	0,0026
	30	3,7	4,16	63	8,42	0,0291	0,0077
	60	3,7	3,20	71	8,43	0,0164	0,0151



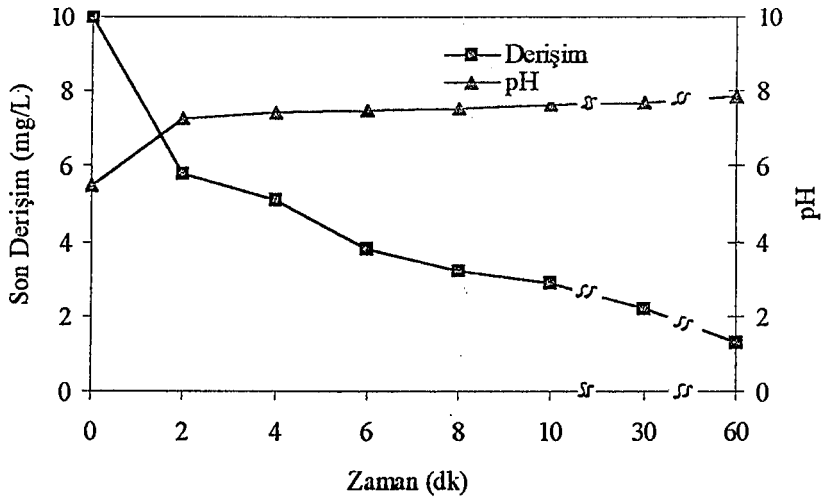
Şekil 8.49. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nın farklı akım değerlerinde zamanla değişimi



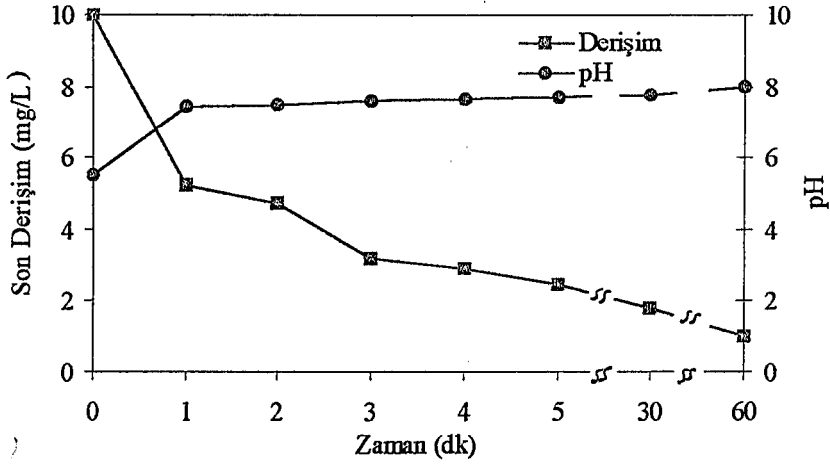
Şekil 8.50. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



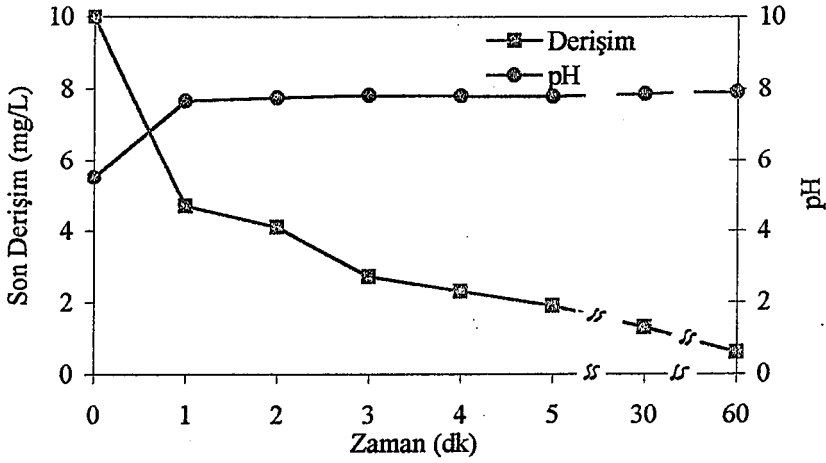
Şekil 8.51. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



(b)



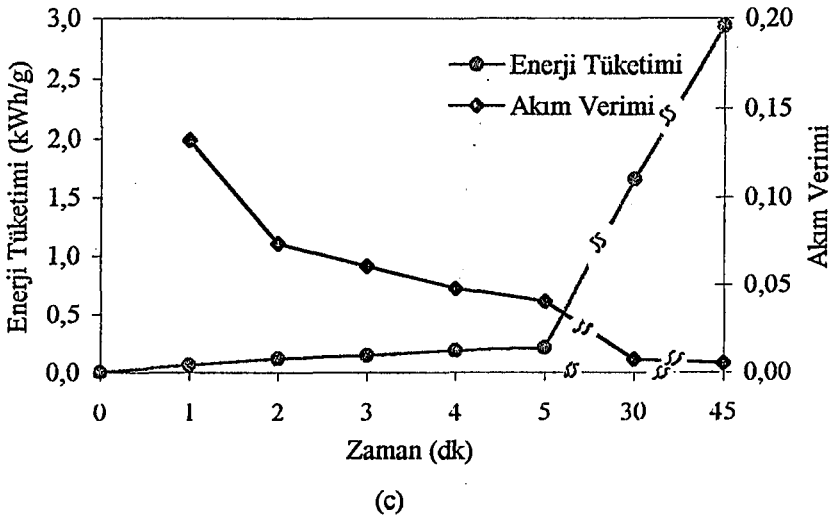
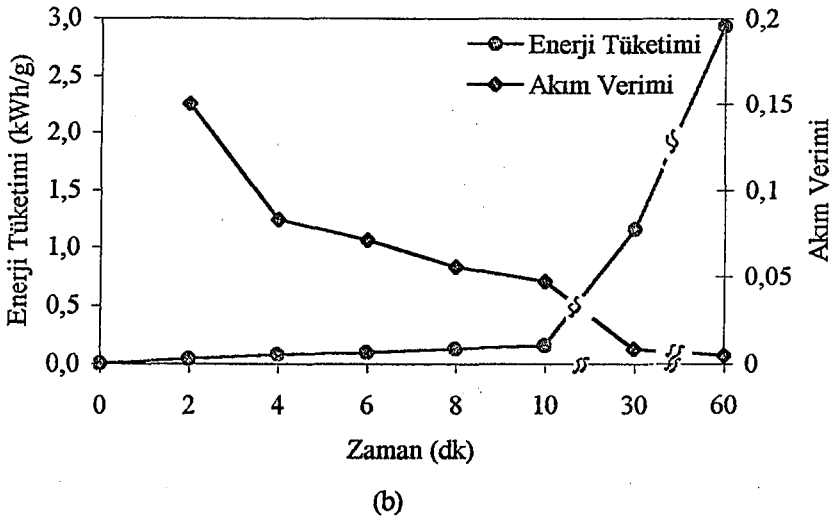
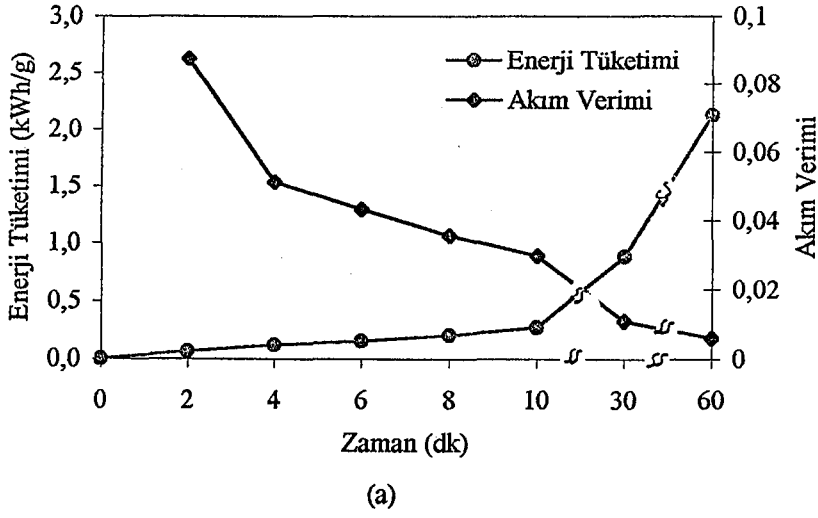
(c)

Şekil 8.52. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi

a) 0,15 A

b) 0,20 A

c) 0,25 A akım değerlerinde

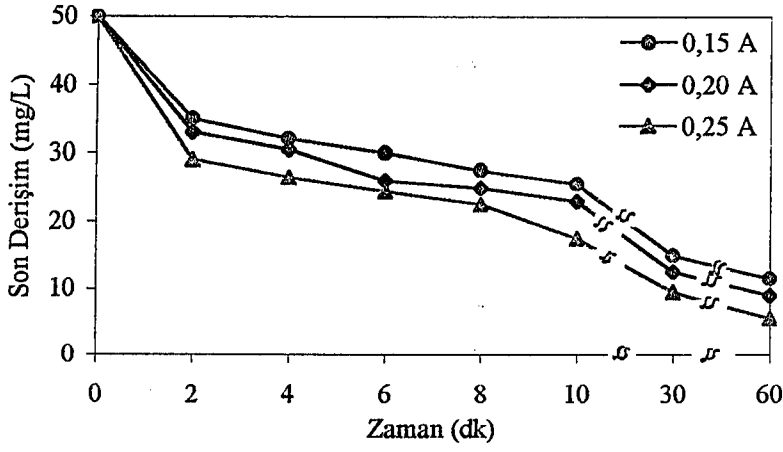


Şekil 8.53. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

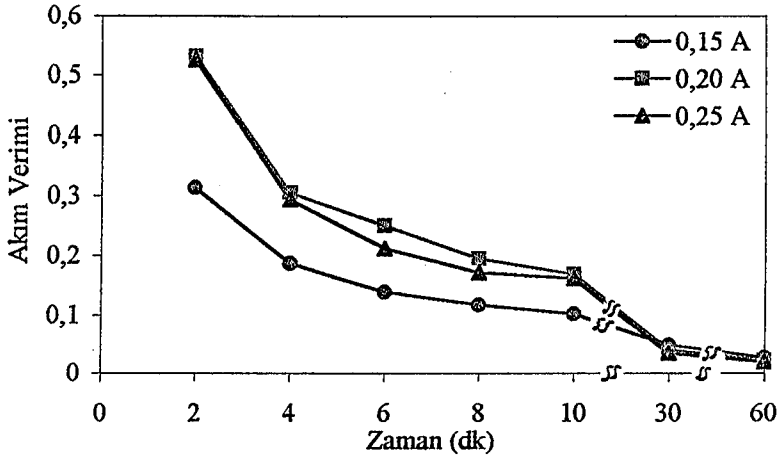
a) 0,15 A

b) 0,20 A

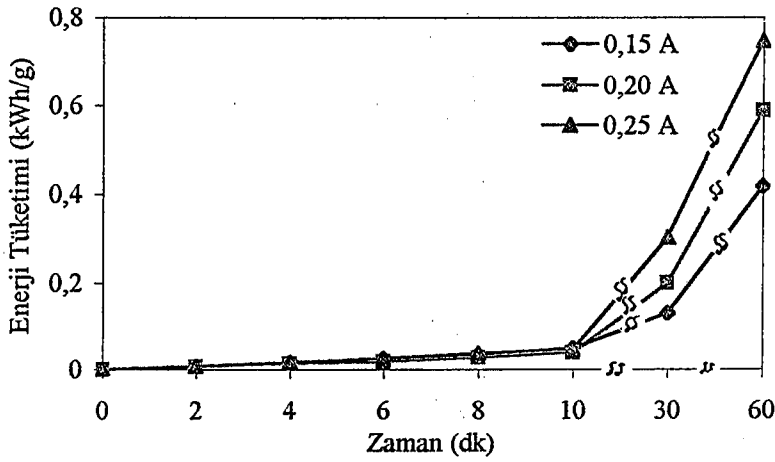
c) 0,25 A akım değerlerinde



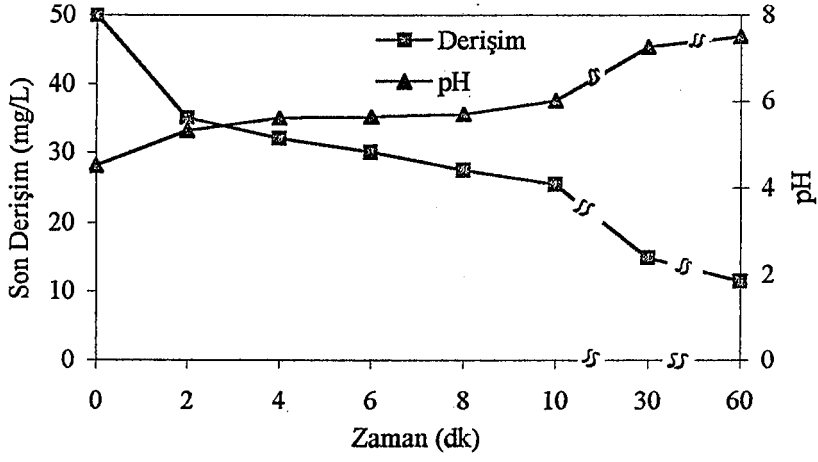
Şekil 8.54. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın farklı akım değerlerinde zamanla değişimi



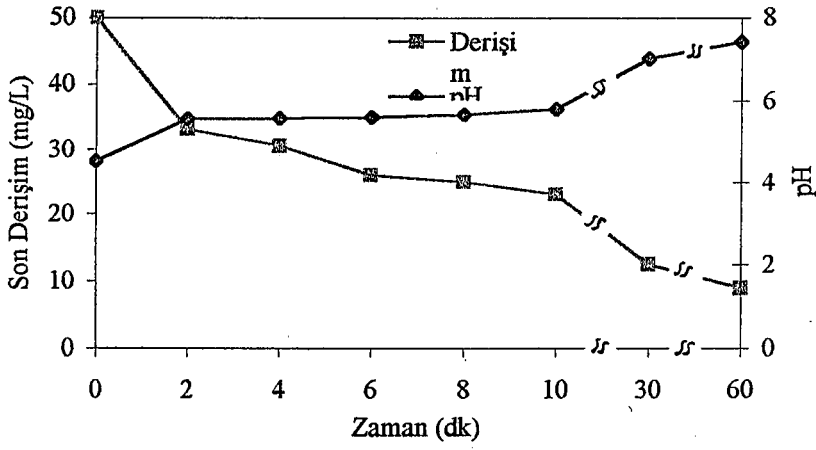
Şekil 8.55. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



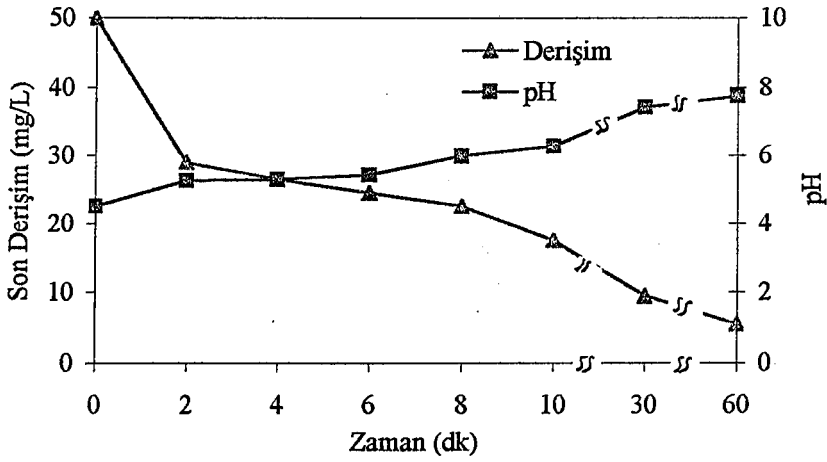
Şekil 8.56. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı akım değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



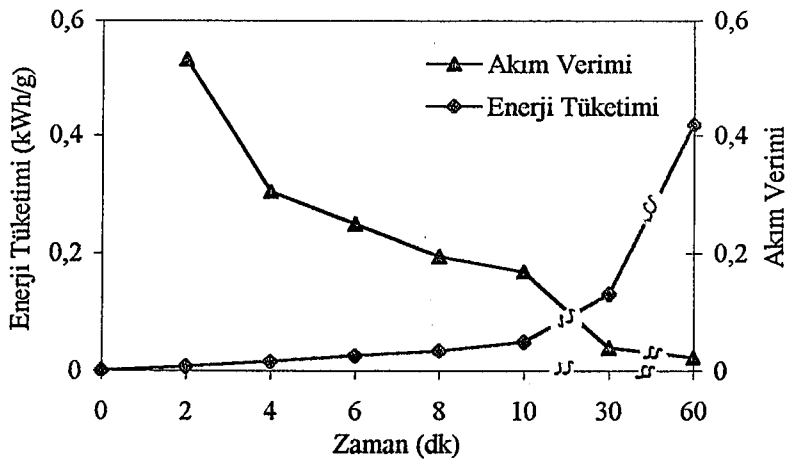
(b)



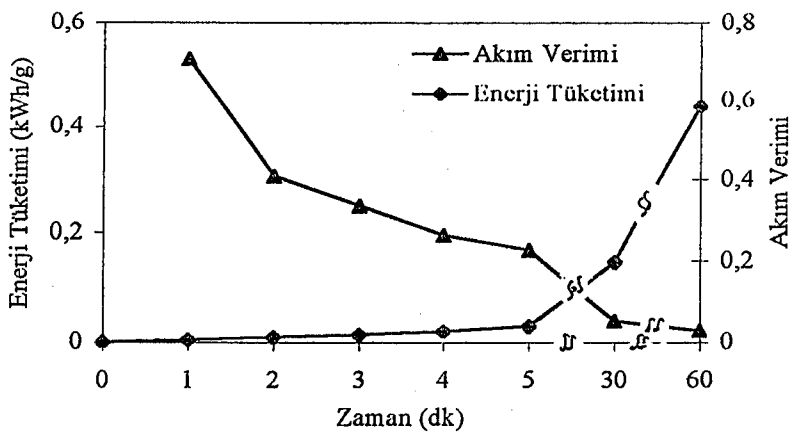
(c)

Şekil 8.57. Alüminyum reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS derişiminin ve pH'ın zamanla değişimi

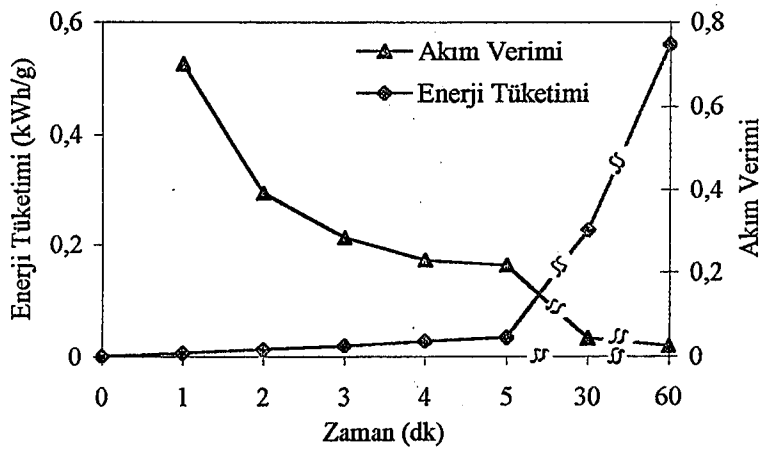
- 0,15 A
- 0,20 A
- 0,25 A akım değerlerinde



(a)



(b)



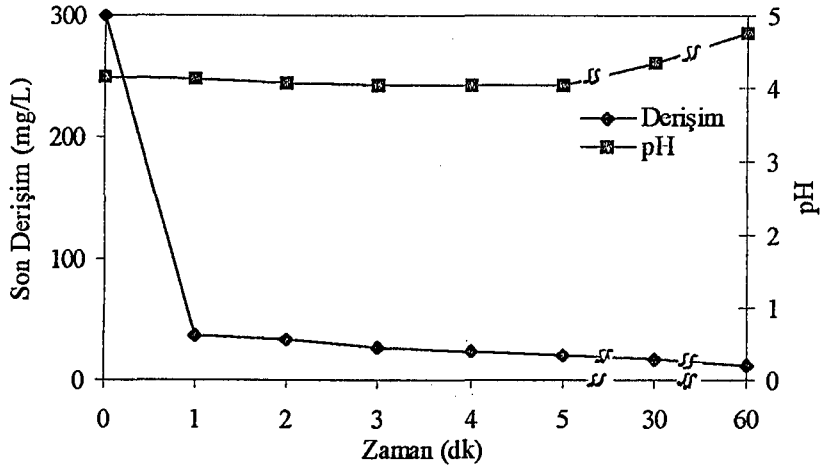
(c)

Şekil 8.58. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

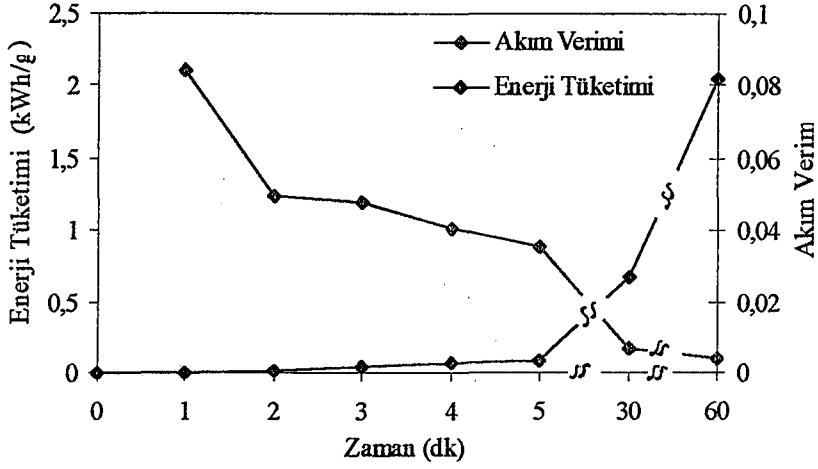
a) 0,15 A

b) 0,20 A

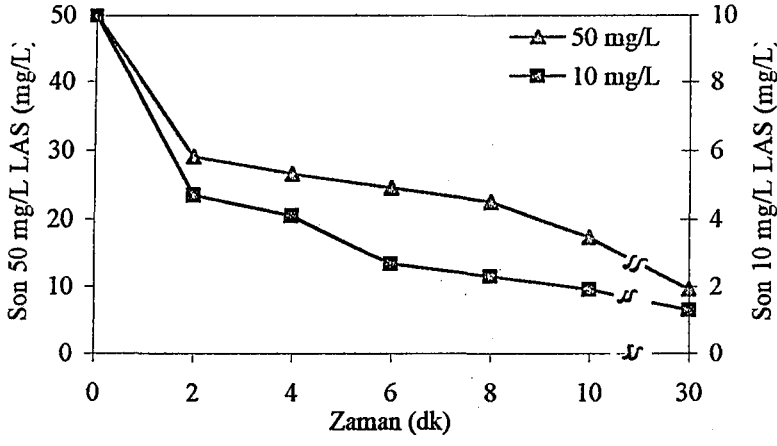
c) 0,25 A akım değerlerinde



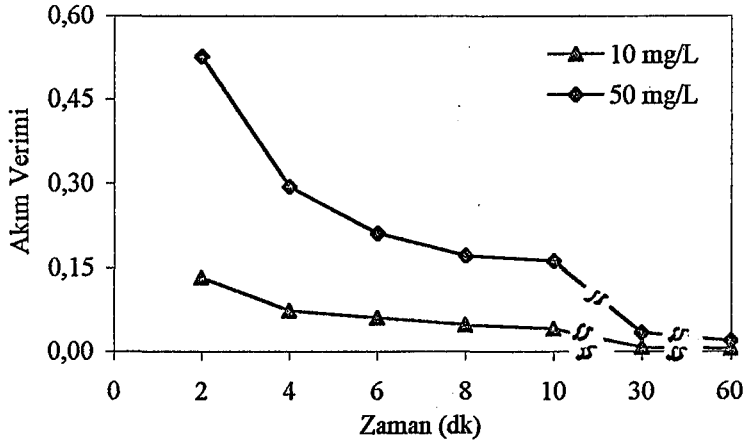
Şekil 8.59. Alüminyum reaktörde 300 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nın $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



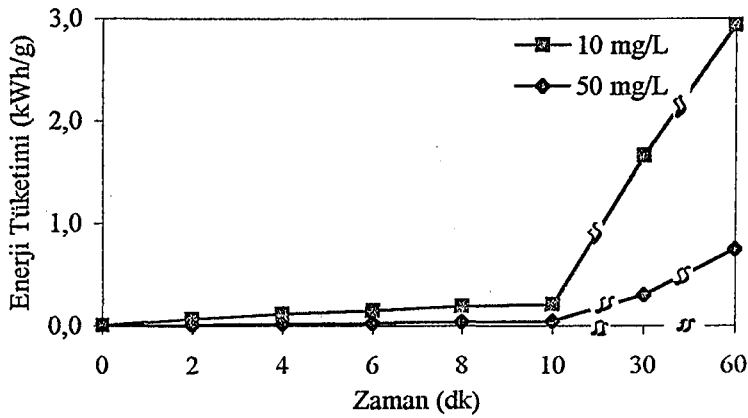
Şekil 8.60. Alüminyum reaktörde 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



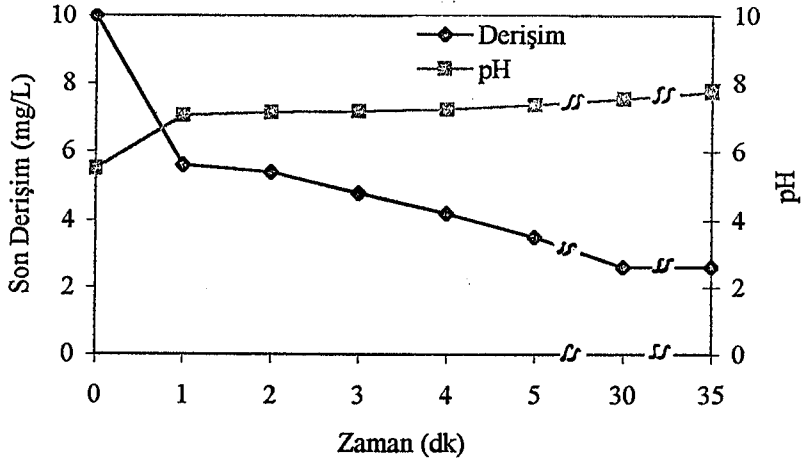
Şekil 8.61. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



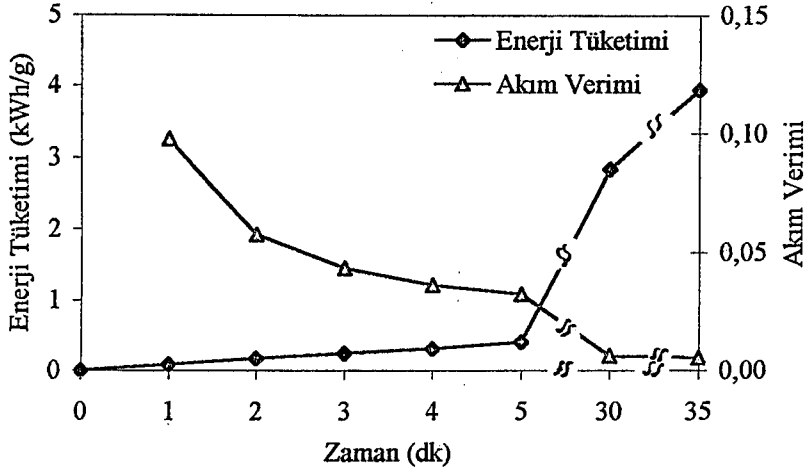
Şekil 8.62. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS çözeltilerinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım veriminin zamanla değişimi



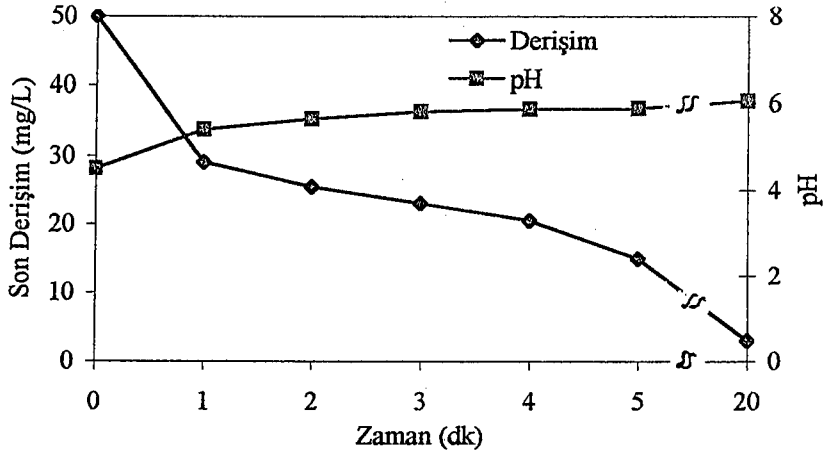
Şekil 8.63. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} ve 50 mgL^{-1} LAS çözeltilerinde $0,25 \text{ A}$ 'de enerji tüketiminin zamanla değişimi



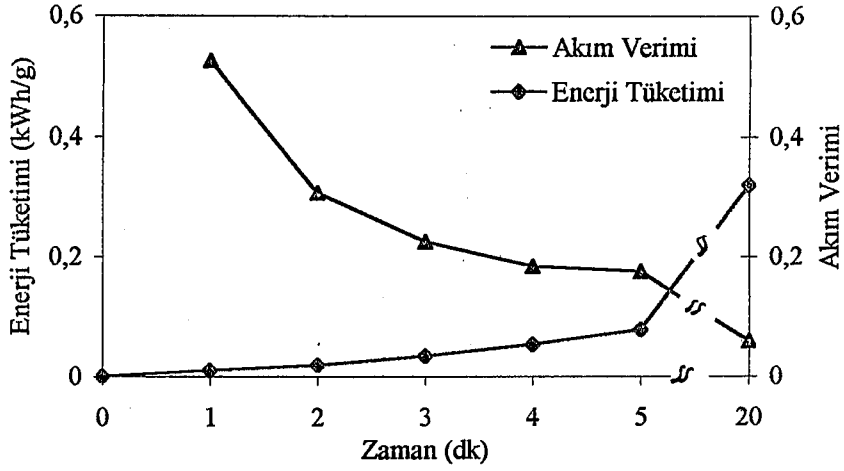
Şekil 8.64. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL⁻¹ LAS derişiminin ve pH'nın 0,25 A'de zamanla değişimi



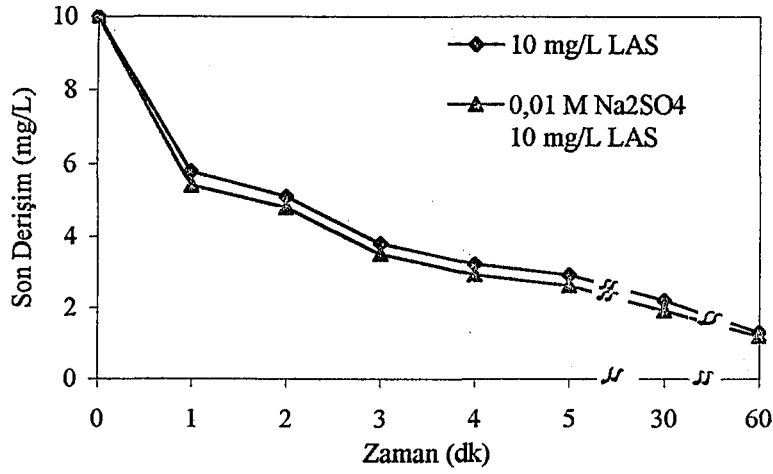
Şekil 8.65. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 10 mgL⁻¹ LAS çözeltilisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



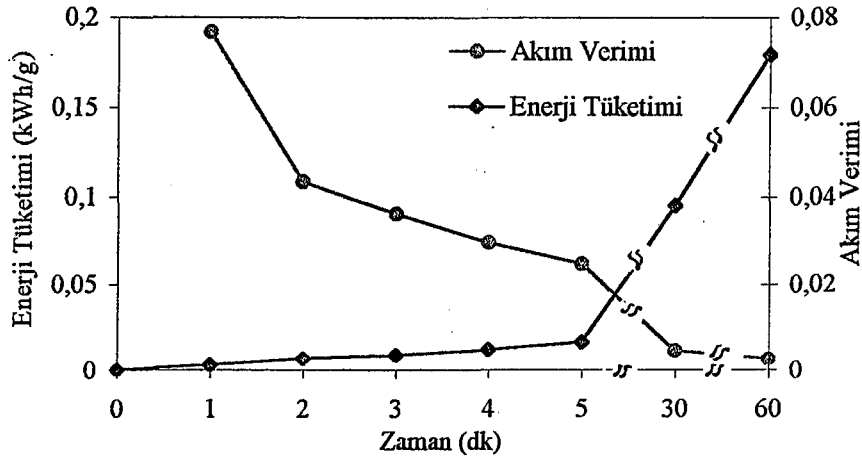
Şekil 8.66. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nın $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



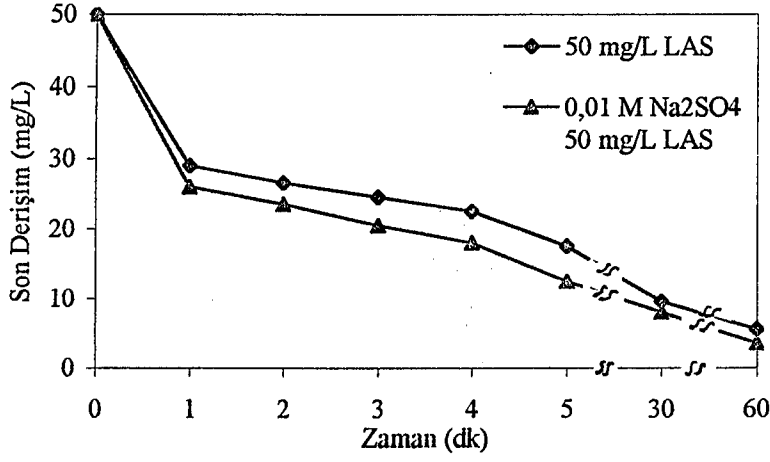
Şekil 8.67. Alüminyum reaktörün katot, karıştırıcının anot olduğu durumda 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



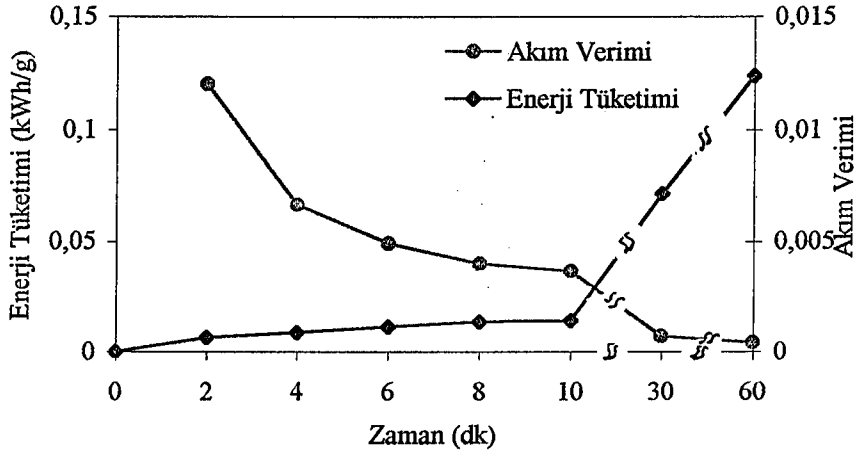
Şekil 8.68. Alüminyum reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS ve 0,01M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS derişimlerinin 0,15 A'de zamanla değişimi



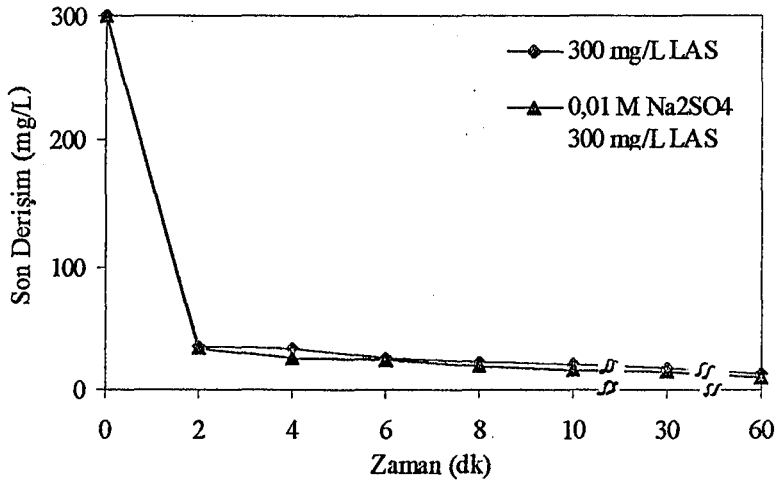
Şekil 8.69. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 10 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde 0,15 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



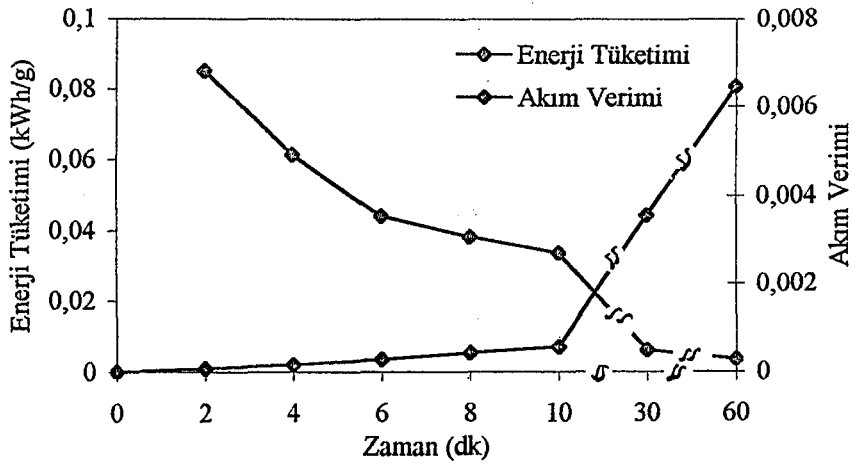
Şekil 8.70. Alüminyum reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS ve 0,01 M Na₂SO₄ 50 mgL⁻¹ LAS derişiminin 0,25 A'de zamanla değişimi



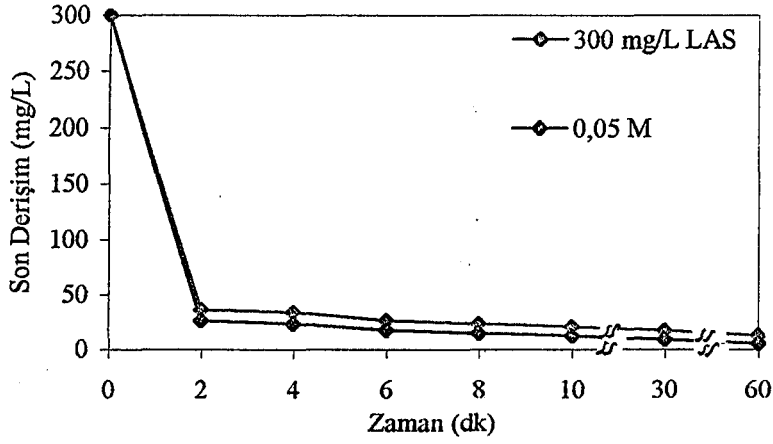
Şekil 8.71. Alüminyum reaktörde 0,01 M Na₂SO₄ 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde 0,25 A'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



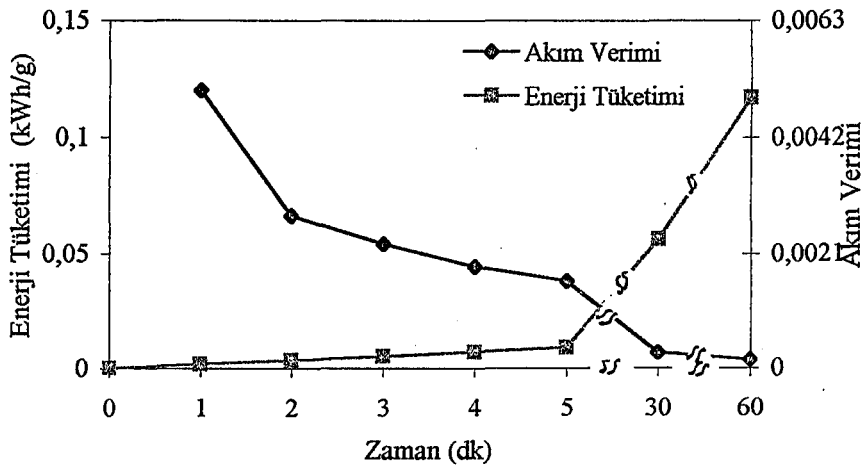
Şekil 8.72. Alüminyum reaktörde 300 mgL^{-1} LAS ve $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 300 mgL^{-1} LAS derişiminin $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



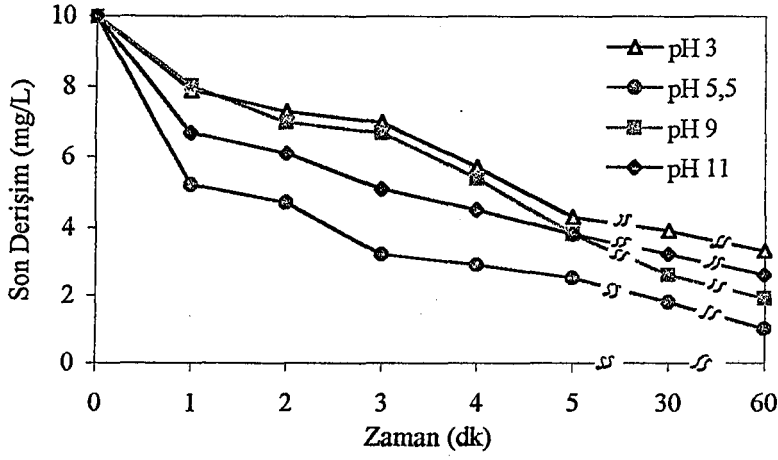
Şekil 8.73. Alüminyum reaktörde $0,01 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



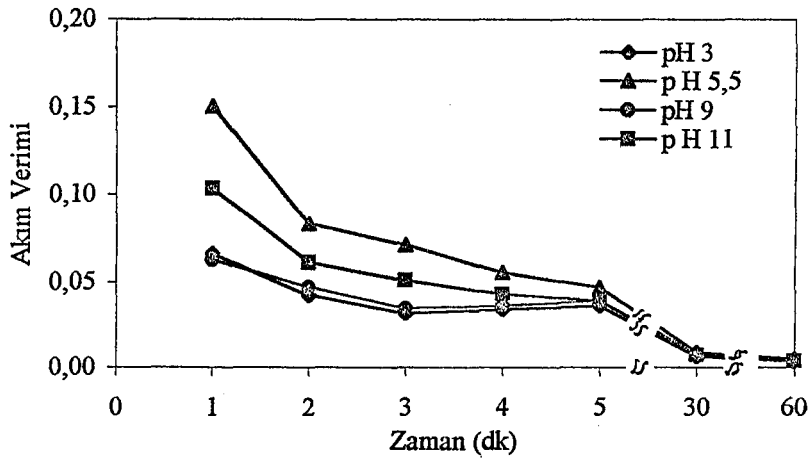
Şekil 8.74. Alüminyum reaktörde 300 mgL^{-1} LAS ve $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 300 mgL^{-1} LAS derişimlerinin $0,25 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



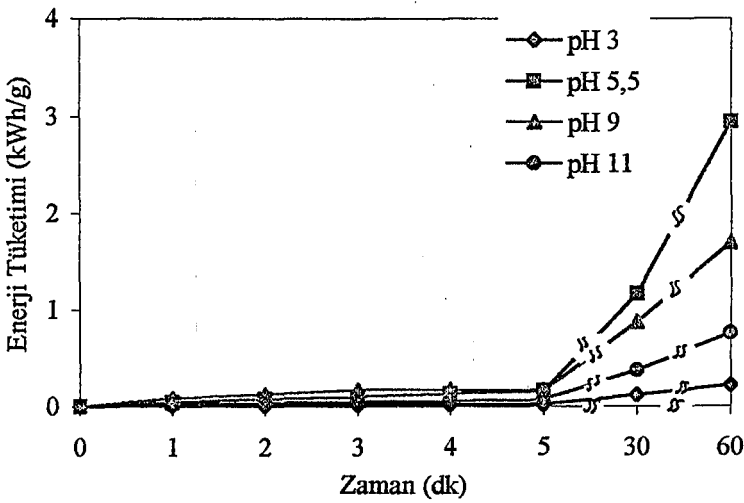
Şekil 8.75. Alüminyum reaktörde $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ 300 mgL^{-1} LAS çözeltisinde $0,25 \text{ A}$ 'de akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



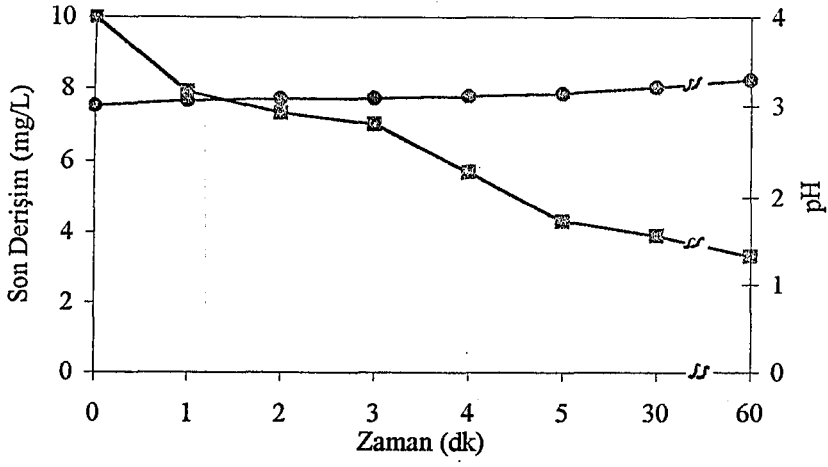
Şekil 8.76. Alüminyum reaktörde farklı pH değerlerinde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin $0,20 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



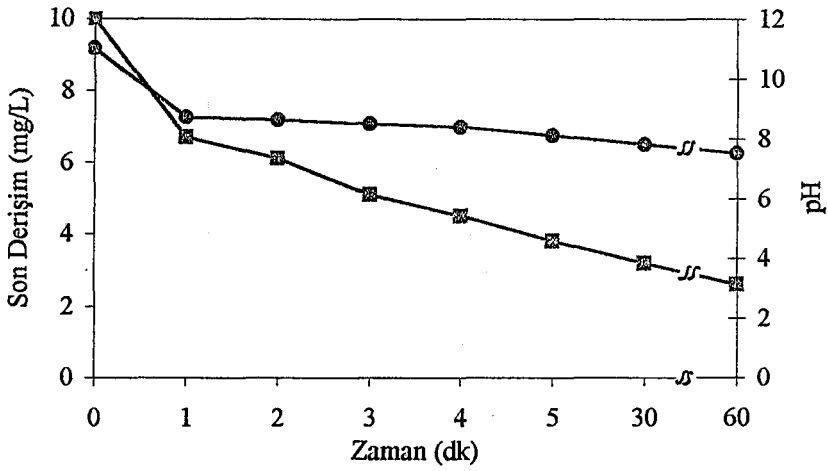
Şekil 8.77. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



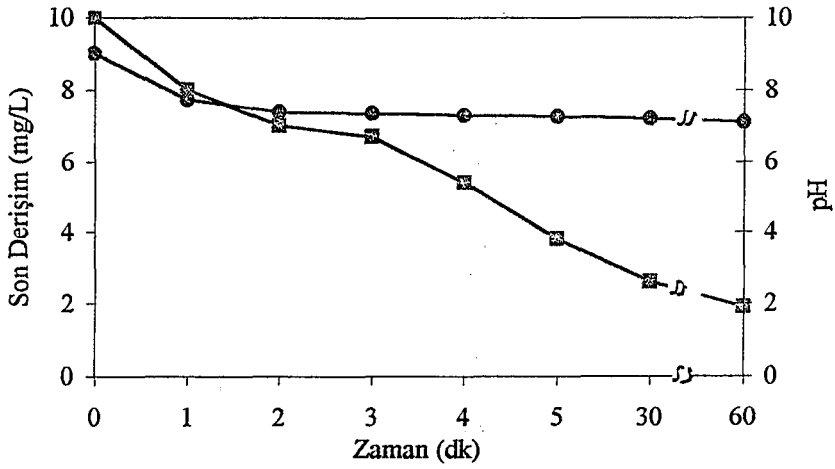
Şekil 8.78. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



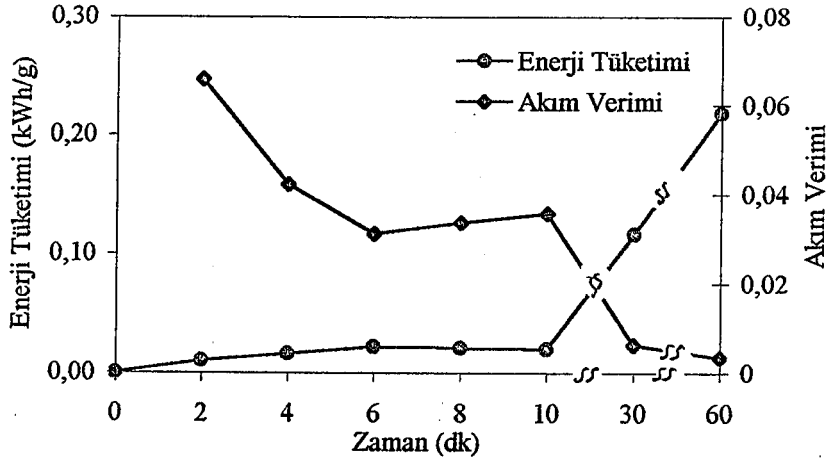
(b)



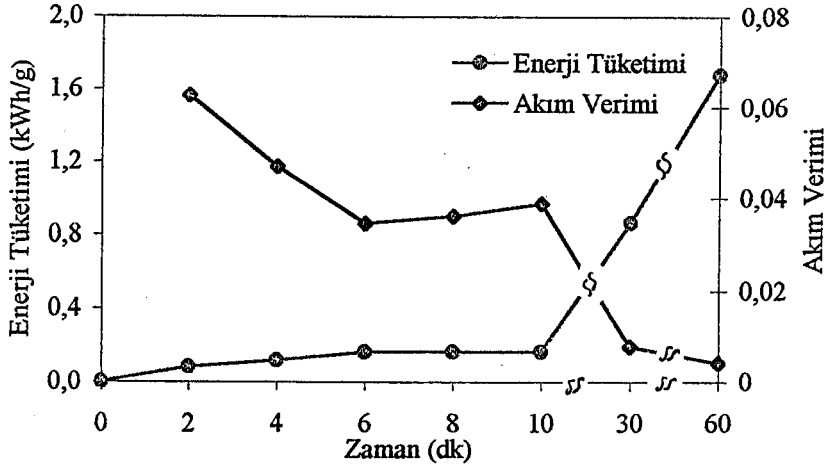
(c)

Şekil 8.79. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'ın 0,20 A'de zamanla değişimi

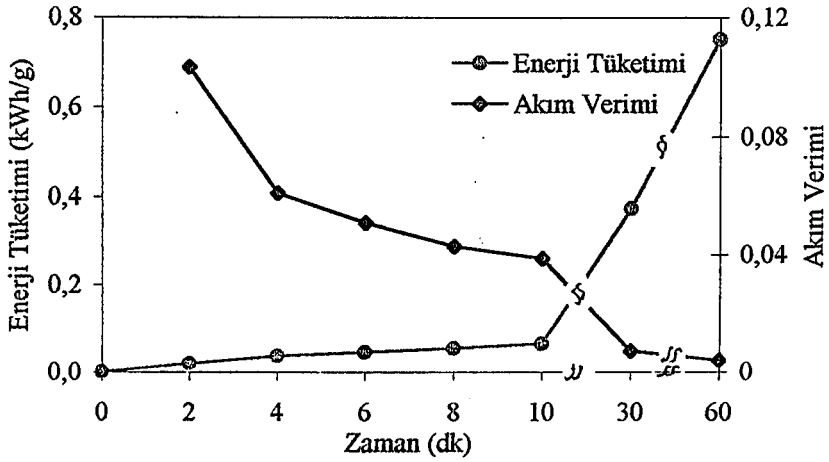
- a) pH 3
- b) pH 9
- c) pH 11'de



(a)



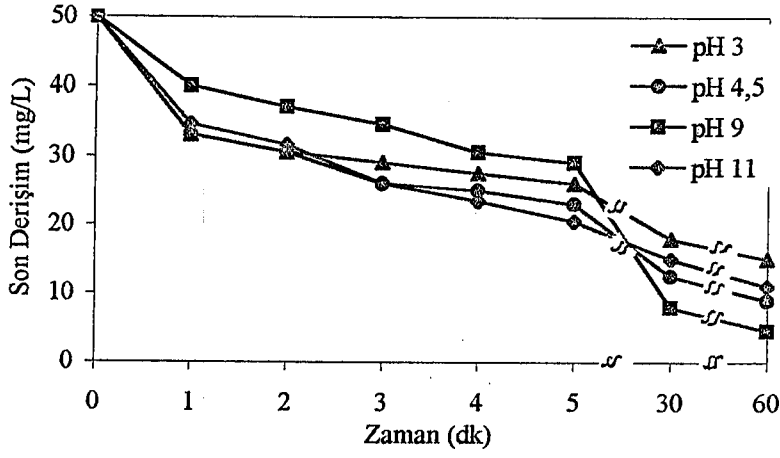
(b)



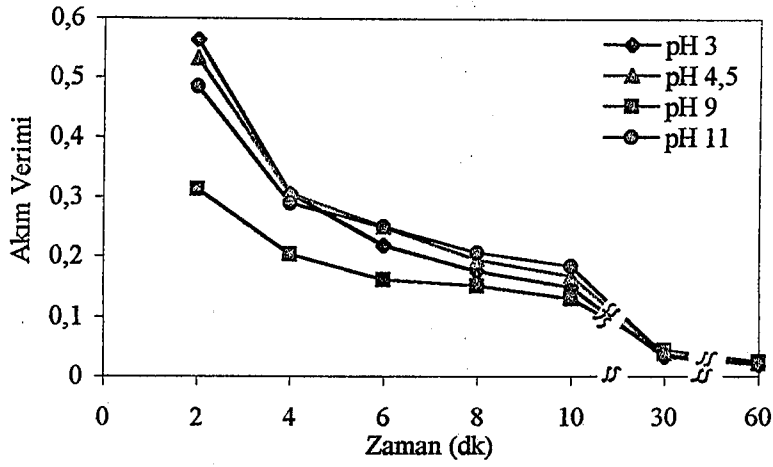
(c)

Şekil 8.80. Alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

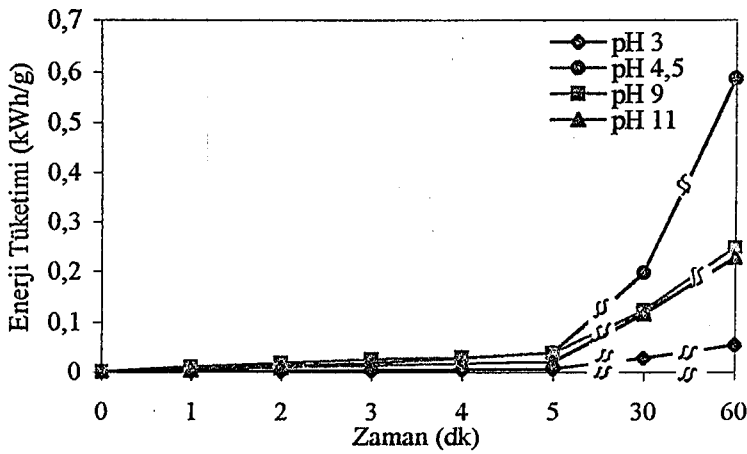
- pH 3
- pH 9
- pH 11'de



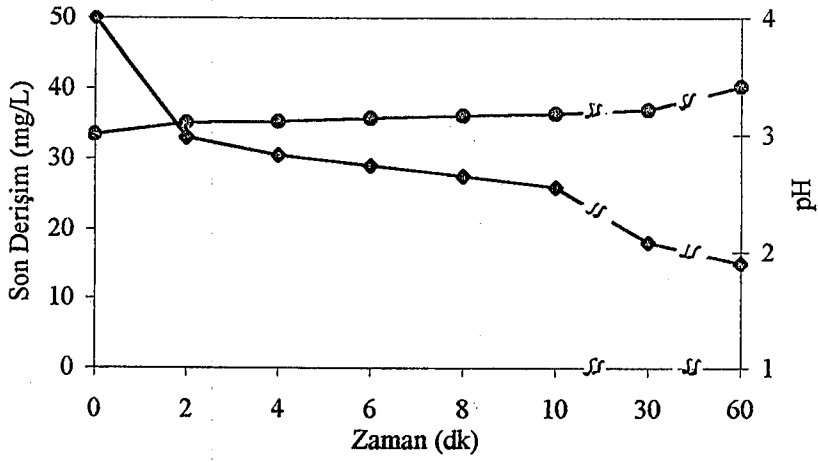
Şekil 8.81. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin farklı pH değerlerinde 0,20 A'de zamanla değişimi



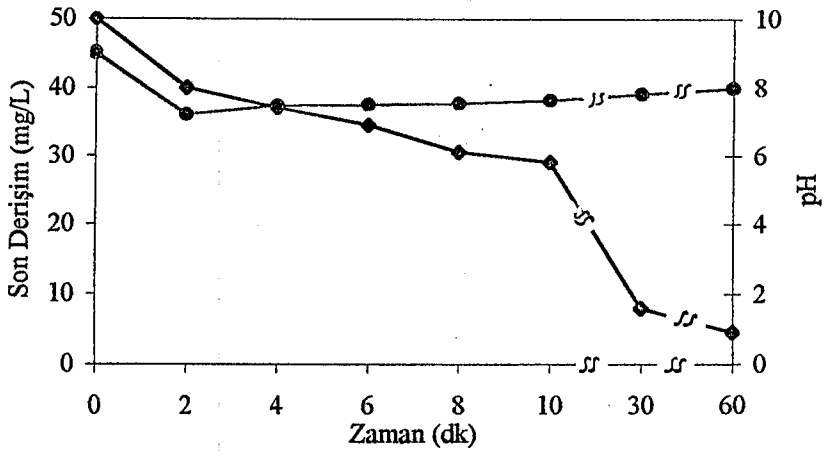
Şekil 8.82 Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde akım veriminin zamanla değişimi



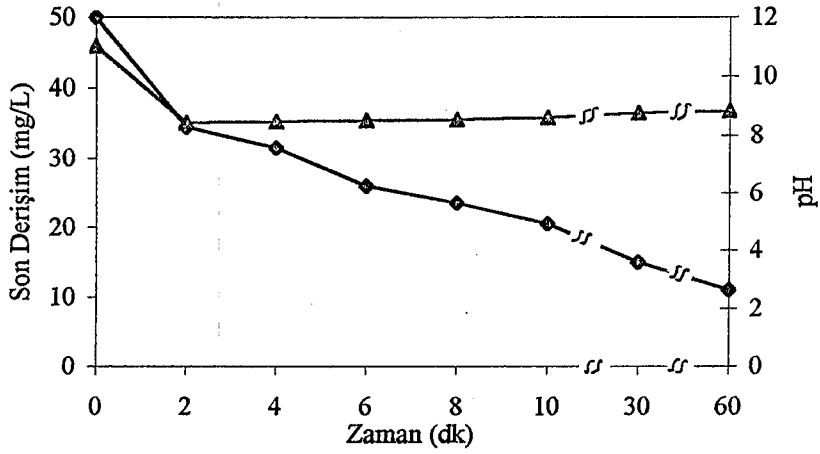
Şekil 8.83. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde farklı pH değerlerinde enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)



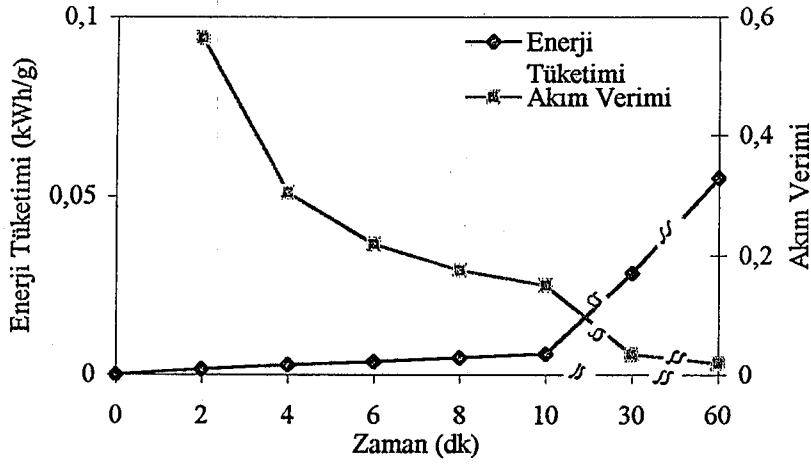
(b)



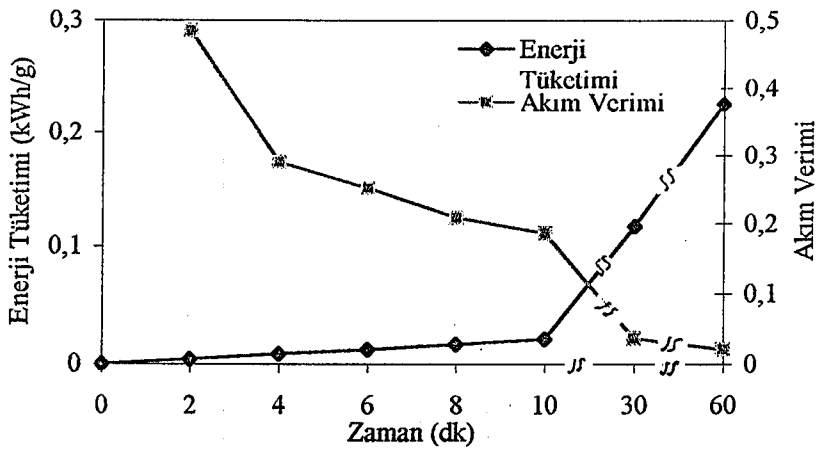
(c)

Şekil 8.84. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin ve pH'nın 0,20 A'de zamanla değişimi

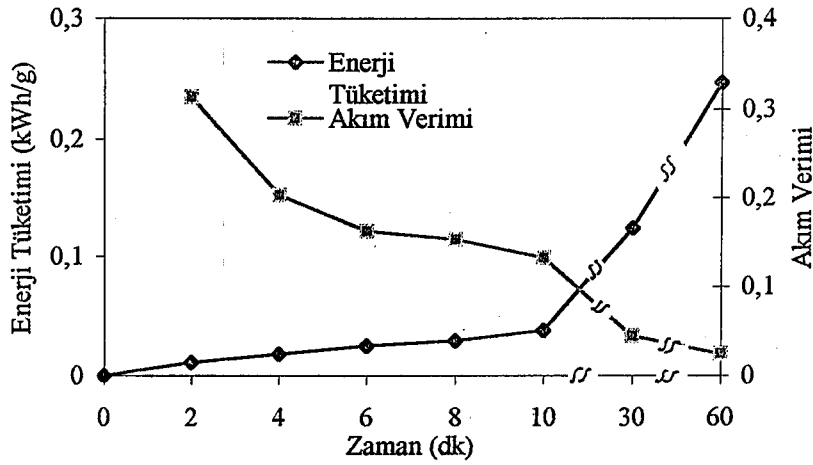
- a) pH 3
- b) pH 9
- c) pH 11'de



(a)



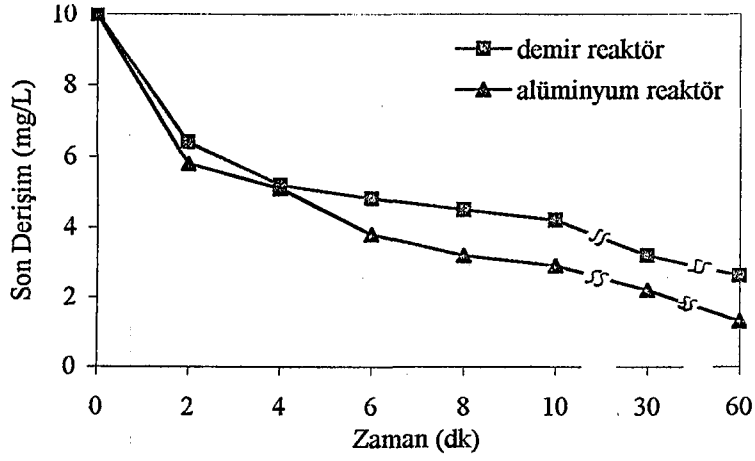
(b)



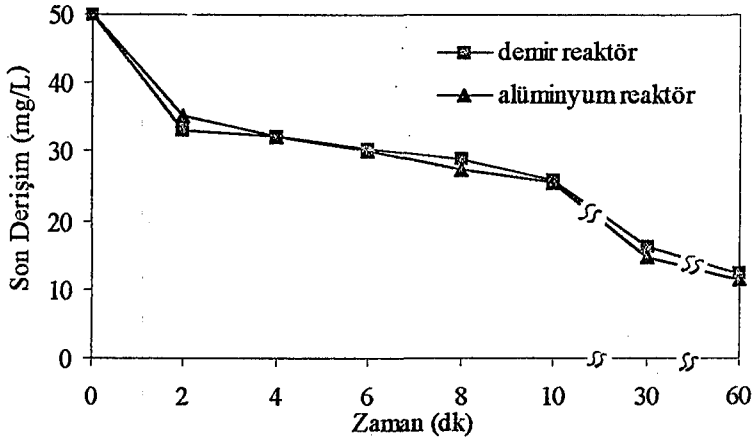
(c)

Şekil 8.85. Alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS çözeltisinde akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

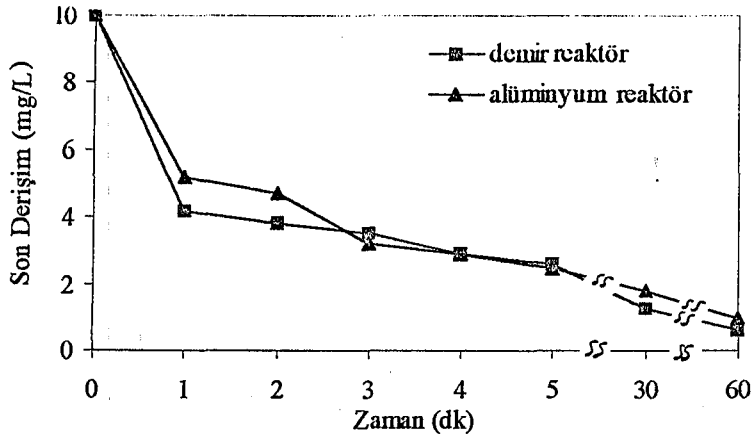
- a) pH 3
- b) pH 9
- c) pH 11'de



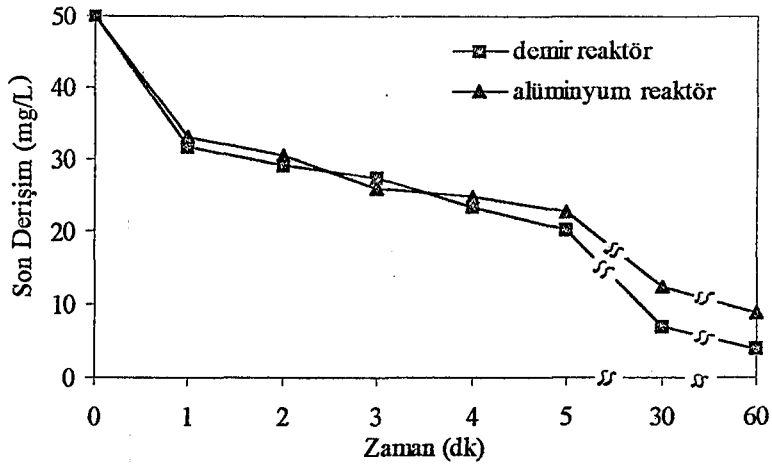
Şekil 8.86. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL^{-1} LAS derişiminin $0,15 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



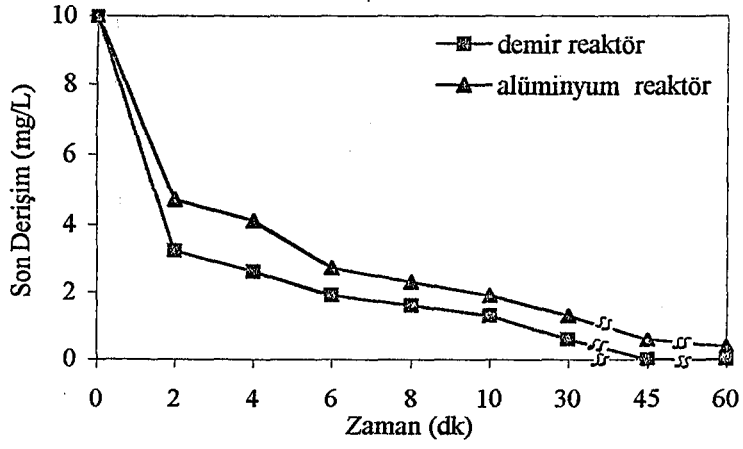
Şekil 8.87. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL^{-1} LAS derişiminin $0,15 \text{ A}$ 'de zamanla değişimi



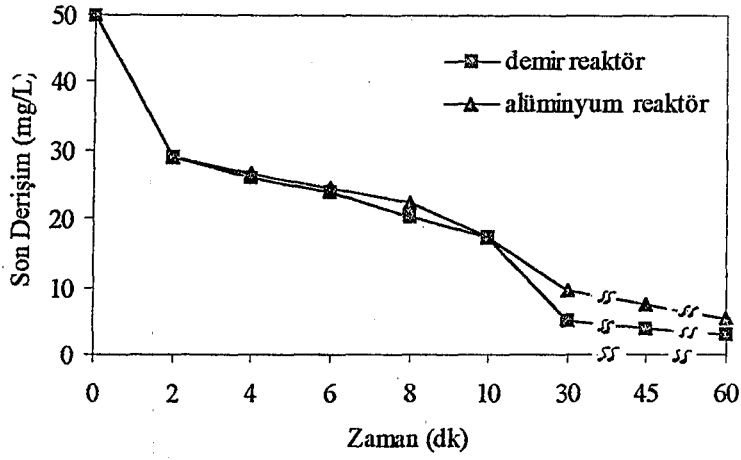
Şekil 8.88. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS derişiminin 0,20 A'de zamanla değişimi



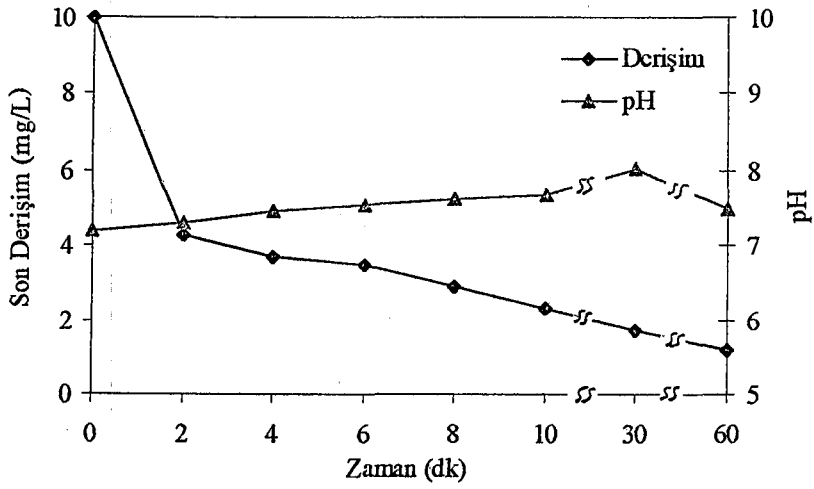
Şekil 8.89. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS derişiminin 0,20 A'de zamanla değişimi



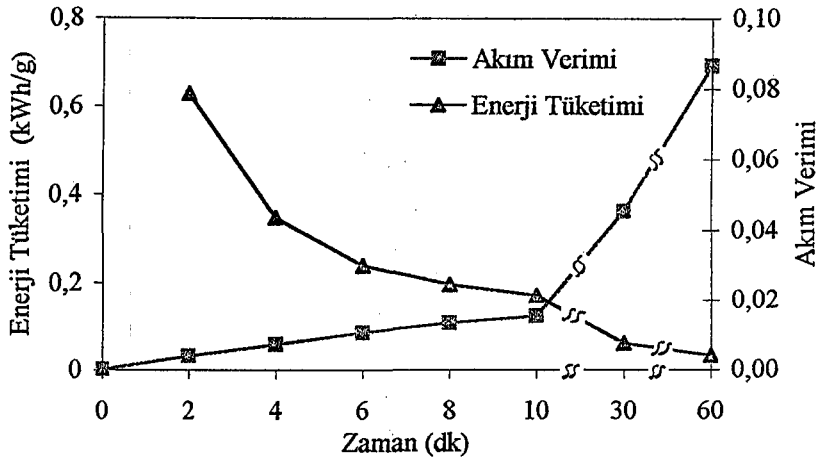
Şekil 8.90. Demir ve alüminyum reaktörde 10 mgL⁻¹ LAS derişiminin 0,25 A' de zamanla değişimi



Şekil 8.91. Demir ve alüminyum reaktörde 50 mgL⁻¹ LAS derişiminin 0,25 A' de zamanla değişimi



(a)

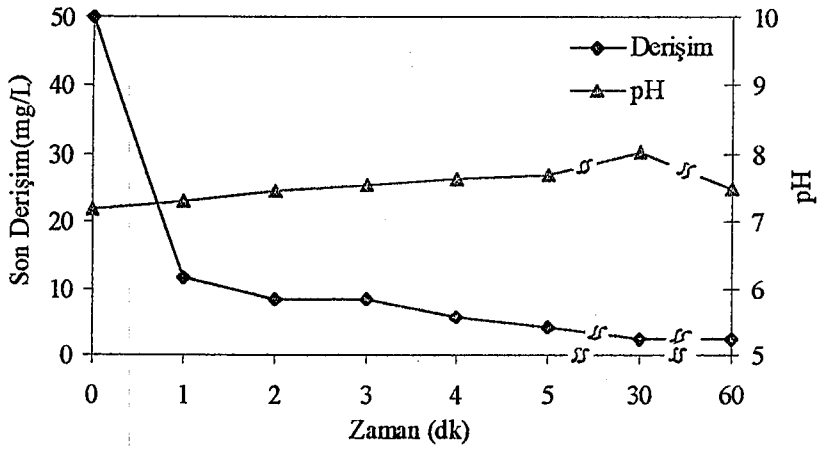


(b)

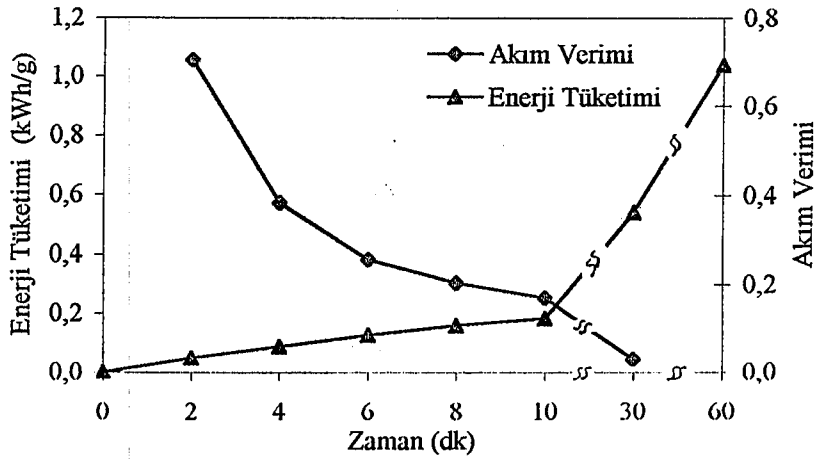
Şekil 8.92. 10 mgL^{-1} (pH 7,2) Sodyum loril eter sülfat (SLES) çözeltisinde demir reaktörde $0,25 \text{ A'de}$

a) SLES derişiminin ve pH'ın

b) akım veriminin ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



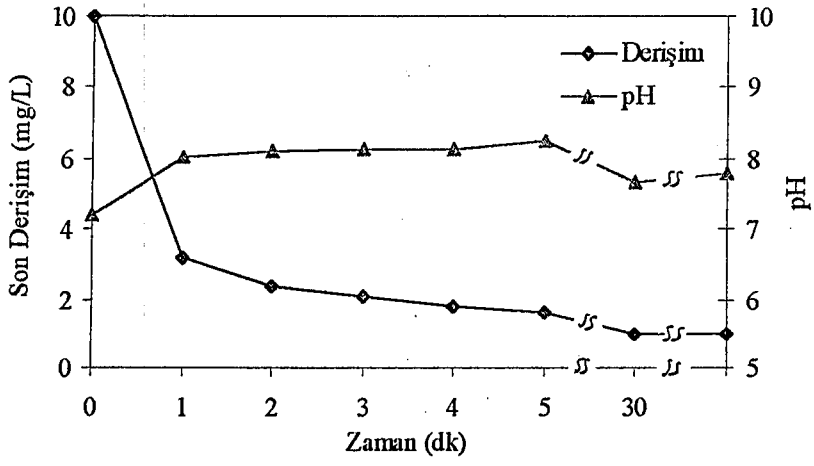
(a)



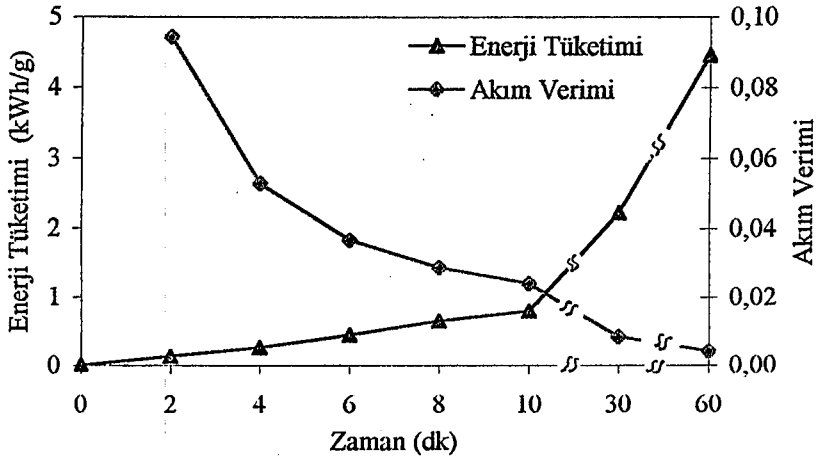
(b)

Şekil 8.93. 50 mgL^{-1} (pH 7,2) Sodyum loril eter sülfat (SLES) çözeltisinde demir reaktörde 0,25 A'de

- SLES derişiminin
- akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



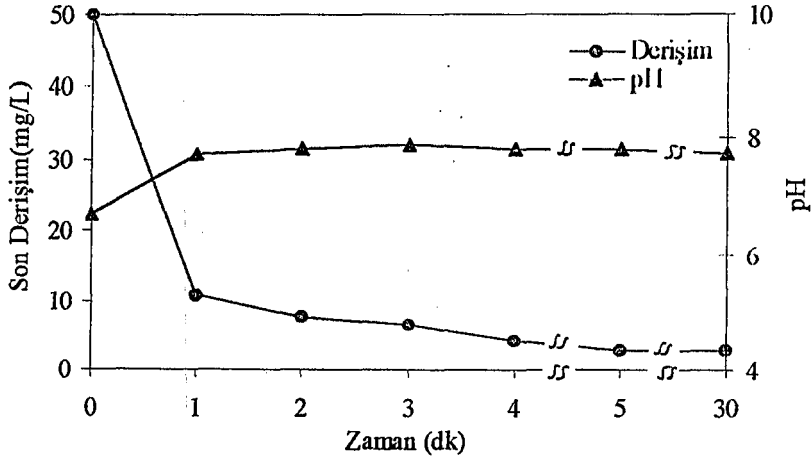
(a)



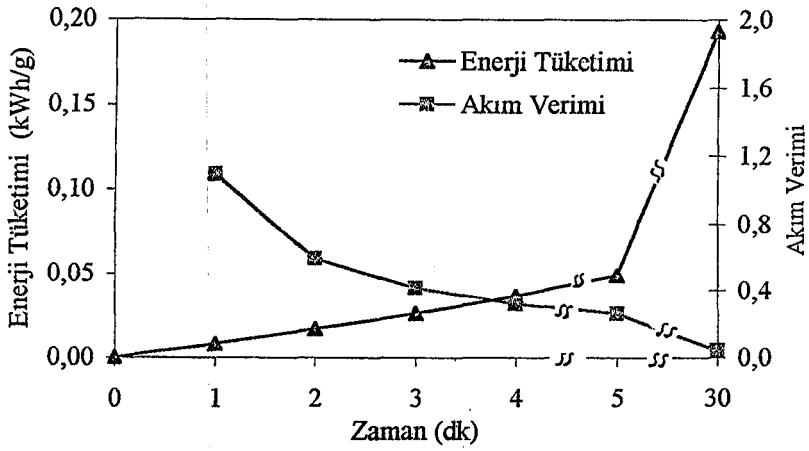
(b)

Şekil 8.94. 10 mgL^{-1} (pH 7,2) Sodyum loril eter sülfat (SLES) çözeltisinde alüminyum reaktörde $0,25 \text{ A}'de$

- SLES derişiminin
- akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi



(a)

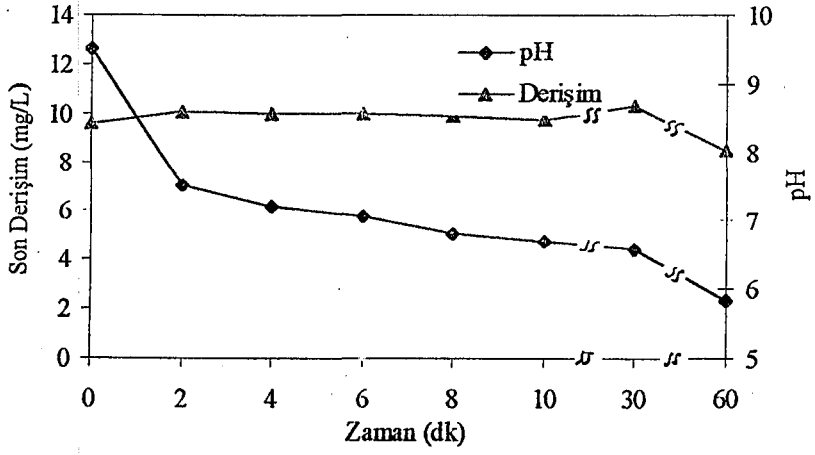


(b)

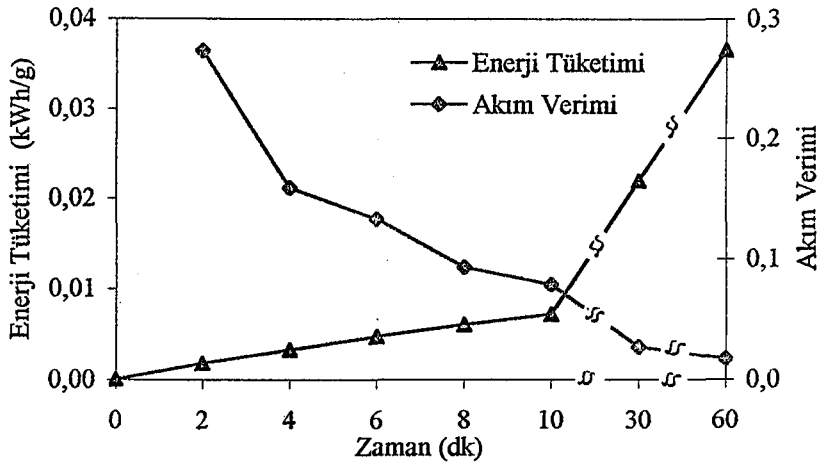
Şekil 8.95. 50 mgL^{-1} (pH 7,2) Sodyum loril eter sülfat (SLES) çözeltisinde alüminyum reaktörde $0,25 \text{ A}'de$

a) SLES derişiminin ve pH'ın

b) akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

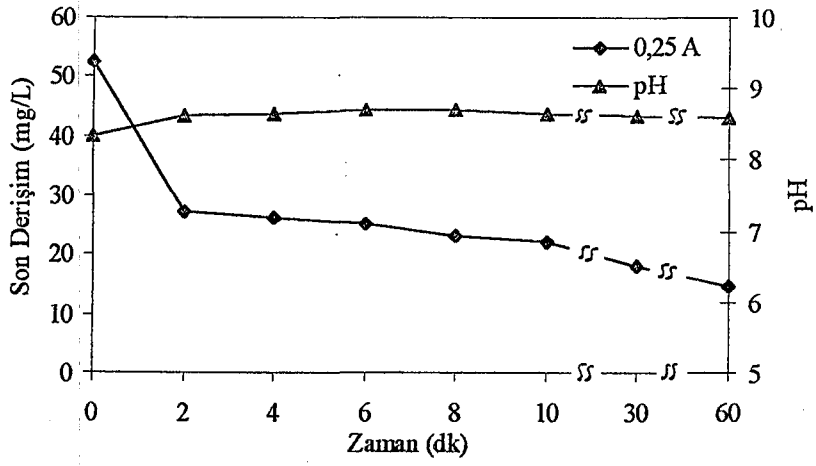


(a)

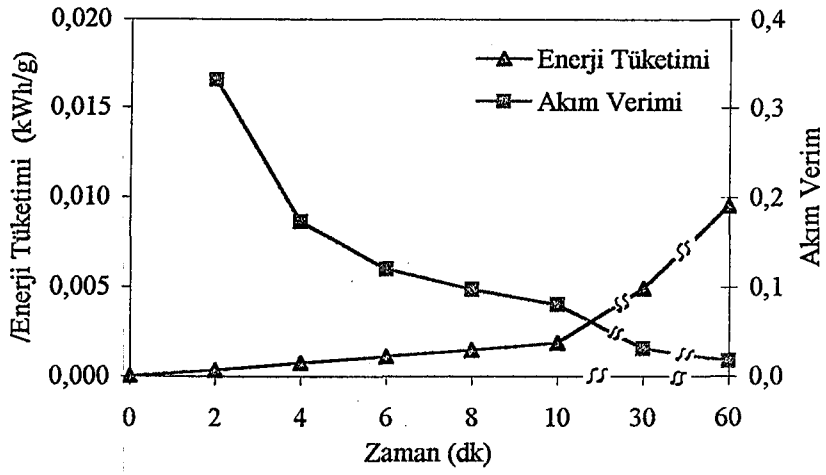


(b)

Şekil 8.96. $12,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,4) LAS içeren porsuk suyu için demir reaktörde $0,25 \text{ A}'de$
a) yüzey aktif madde derişiminin ve pH'ın
b) akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

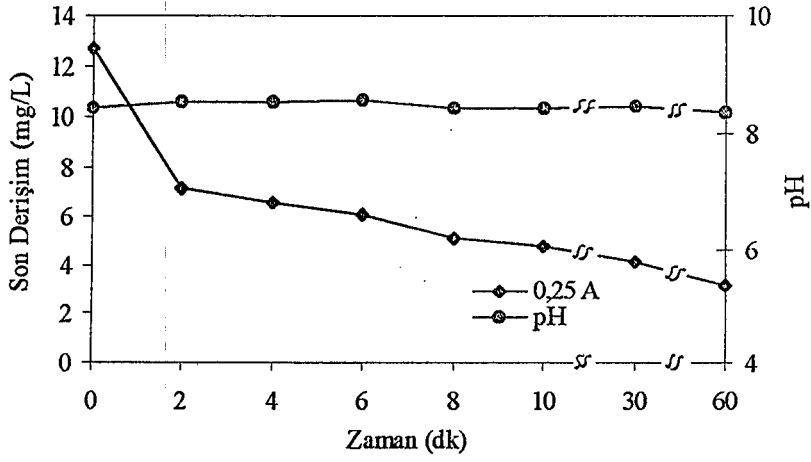


(a)

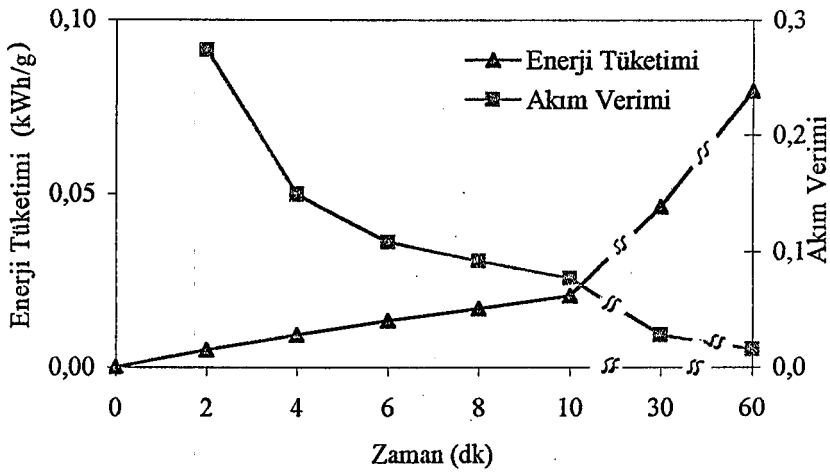


(b)

Şekil 8.97. $52,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,32) LAS içeren porsuk suyu için demir reaktörde 0,25 A'de
a) yüzey aktif madde derişiminin ve pH'ın
b) akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

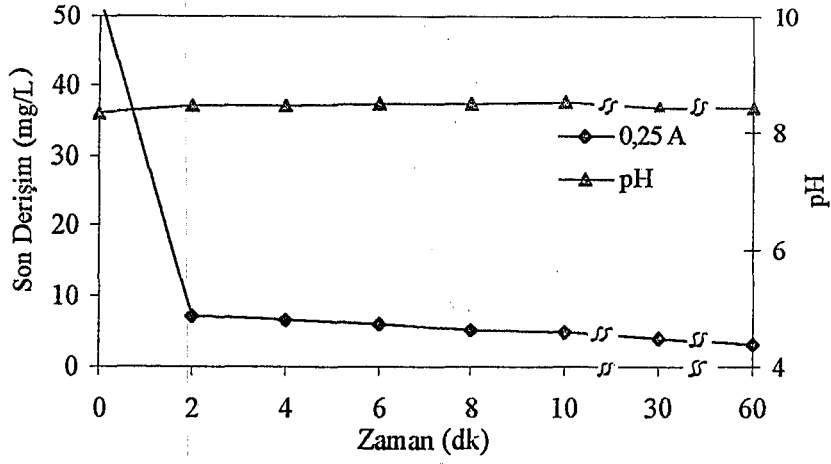


(a)

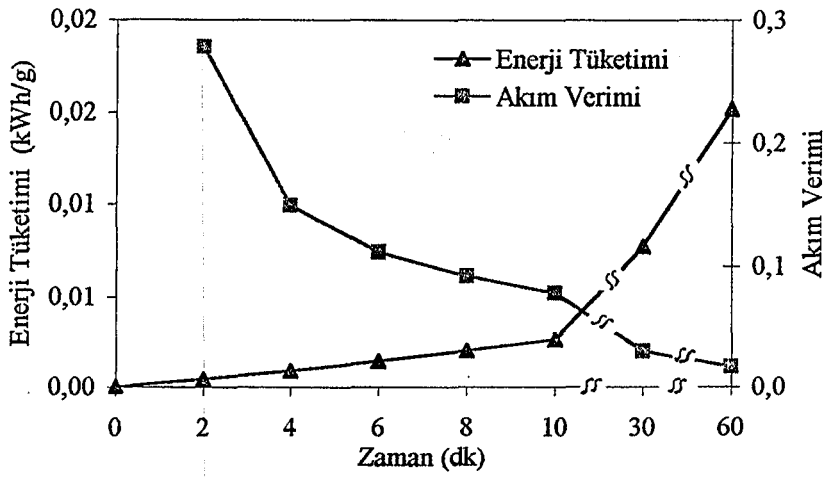


(b)

Şekil 8.98. $12,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,42) LAS içeren porsuk suyu için alüminyum reaktörde 0,25 A'de
a) yüzey aktif madde derişiminin ve pH'ın
b) akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değışimi



(a)



(b)

Şekil 8.99. $52,66 \text{ mgL}^{-1}$ (pH 8,42) LAS içeren porsuk suyu için alüminyum reaktörde $0,25 \text{ A}$ 'de
a) yüzey aktif madde derişiminin ve pH'ın
b) akım verimi ve enerji tüketiminin zamanla değişimi

8.2.2.6. Kütle aktarım katsayısının (k) değişimi

Başlangıç derişiminin, akış hızının, Na₂SO₄ derişiminin ve pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisinin incelendiği sonuçlar Çizelge 8.59-62'de verilmiştir.

Başlangıç Derişiminin kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.35. 10 mgL⁻¹ ve 50 mgL⁻¹ başlangıç derişimlerinin 0,20 A'de kütle aktarım katsayısına etkisi

Başlangıç Derişimi (mgL ⁻¹)	k, (10 ⁻³ ms ⁻¹)
10	0,338781
50	0,210292

Uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.36. 50mgL⁻¹ LAS çözeltisinde uygulanan akımın kütle aktarım katsayısına etkisi

Uygulanan Akım (A)	k, (10 ⁻³ ms ⁻¹)
0,15	0,180062
0,20	0,210292
0,25	0,262141

pH'nın kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.37. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde 0,20 A'de pH'nın kütle aktarım katsayısına etkisi

pH	k, (10 ⁻³ ms ⁻¹)
3,0	0,190779
5,5	0,210292
9,0	0,144291
11,0	0,203956

Destek elektrolit derişiminin (Na₂SO₄) kütle aktarım katsayısına (k) etkisi

Çizelge 8.38. 50 mgL⁻¹ LAS çözeltisinde 0,25 A'de sodyum sülfat (Na₂SO₄) derişiminin kütle aktarım katsayısına etkisi

Na ₂ SO ₄ derişimi (M)	k, (10 ⁻³ ms ⁻¹)
0,00	0,262141
0,01	0,320686

9. BULGULARIN TARTIŞILMASI

9.1. Elektrokimyasal Yükseltgeme ile Yüzey Aktif Madde Giderimi İçin

Deneysel Bulguların Tartışılması

Yapılan çalışmadan elde edilen tüm deneysel sonuçlar Çizelge 8.1-5’de ve Şekil 8.1-18’de verilmiştir. Bu çalışma sonucunda elektrokimyasal reaktörde anodik yükseltgeme ve elektrokimyasal çöktürme ile yüzey aktif maddelerin sudan ekonomik bir şekilde uzaklaştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

Akım Yoğunluğunun Etkisi

Yüzey aktif maddelerin elektrokimyasal yükseltgenmesi sırasında akım yoğunluğu arttıkça % giderim de artmaktadır (Şekil 8.1-2). Genel olarak elektrokimyasal süreçlerde uygulanan akımla birlikte giderimin artması beklenen bir durumdur. Bununla birlikte, akım yoğunluğunun artması enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır (Şekil 8.5-6). Ayrıca akım yoğunluğundaki artış akım veriminde düşmeye neden olmaktadır (Şekil 8.9-12).

Başlangıç Derişiminin Etkisi

Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçlarına göre başlangıç derişiminin artmasıyla birlikte % giderim değerleri düşmektedir (Şekil 8.4-5). Giderim hızında ise artış olmaktadır. Giderim hızı arttıkça akım verimi de artmaktadır (Şekil 8.1-4). Akım verimi ve giderim hızının yüksek olduğu başlangıç derişiminde enerji tüketiminin düşük olması beklenir. Bu durum Şekil 8.5’de görülmektedir. Elektrokimyasal giderim çalışmalarında bu tip sistemler kütle aktarım kontrollü sistemler olarak bilinmektedir. Başlangıç derişimi arttıkça kütle aktarım katsayısında da artış gözlenmiştir (Çizelge 8.6).

Akış Hızının Etkisi

Akış hızının etkisinin incelendiği çalışmalarda akış hızı arttıkça % giderim düşmektedir. Sürekli akışlı reaktörde akış hızı başlangıç derişiminden bağımsız ve çözeltinin reaktörde kalış süresine bağıdır. Reaktörde kalış süresi arttıkça çözeltinin elektrot ile temas süresi arttığı için giderim artmakta, enerji tüketiminde de artış görülmektedir (Şekil 8.11).

pH'nın Etkisi

Çalışma sırasında kullanılan 10 mg/L LAS içeren çözeltinin pH'ı 5,5'dir. pH'ı 3 ve 9 olan LAS model çözeltisi ile yapılan çalışmalardan orjinal pH'ya sahip çözelti ile daha yüksek giderim elde edildiği görülebilir. Bununla birlikte akım veriminde artış, enerji tüketiminde ise düşme gözlenmiştir (Şekil 8.13-15). Buradan hareketle pH ayarlaması yapılmaksızın orjinal pH'ya sahip çözeltinin artırılması mümkün olmaktadır.

Destek Elektrolit Derişiminin Etkisi

Destek elektrolit derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçlarına göre kullanılan destek elektrolit derişiminin artmasıyla çözeltinin iletkenliği artmakta ve yüksek % giderimler elde edilmektedir. Destek elektrolit derişimi 0,1 M'dan 0,15 M'a yükseltildiğinde ise % giderimdeki artış çok düşük olmaktadır. Bu yüzden 0,1 M Na_2SO_4 destek elektrolit derişimi, LAS'ın elektrokimyasal giderim süreci için uygun değer olarak belirlenmiştir.

Kütle Aktarım Katsayılarının Etkisi

Kütle aktarım katsayıları incelendiğinde akış hızının artmasıyla % giderim değerlerinin düşmesine karşın kütle aktarım katsayısında belirgin artışlar olduğu görülebilir. Bu durum yüksek akış hızında hızlı bir giderimin sağlandığının bir göstergesidir.

Kütle aktarım kontrollü sistemlerden beklenildiği üzere başlangıç derişimi arttıkça kütle aktarım katsayısı artmaktadır. Çizelge 8.6'dan da görüldüğü gibi bu artış yaklaşık 10 kat olmaktadır. İncelenen diğer parametreler gibi kütle aktarım katsayısı, orijinal çözelti pH'ında daha yüksektir. Çözeltiye ilave edilen destek elektrolit derişimi ile kütle aktarım katsayısı da artmıştır. Bu artış 0,1 M'ın üzerindeki destek elektrolit derişimleri için çok düşük olmuştur. Bu yüzden 0,1 M destek elektrolit derişimi kütle aktarım kontrollü sistemler için kabul edilebilir bir değerdir.

9.2. Elektrokimyasal Çöktürme İle Yüzey Aktif Madde Giderimi için

DeneySEL Bulguların Tartışılması

Uygulanan Akımın Etkisi

Yüzey aktif maddelerin elektrokimyasal çöktürülmesi sırasında akım yoğunluğunun artmasıyla % giderim değerlerinde de artış olmaktadır (Şekil 8.19). Bu artış uygulanan yüksek akım değerlerinde çöktürmede rol alan alüminyum ve demir iyonlarının daha fazla üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Elektrot malzemesinin demir olması durumunda üretilen Fe^{+2} iyonları H_2O_2 ile fenton yükseltmesine katkıda bulunacağı için giderim değerlerindeki artış alüminyum

elektrottaki artışa göre daha yüksek olmaktadır. Uygulanan akım yoğunluğundaki artış akım veriminin düşmesine neden olur.

Akım yoğunluğunun artması, yüzey aktif maddenin elektrokimyasal çöktürülmesi için gerekli koagülan miktarı, yükseltgenmesi için gerekli elektrot yüzeyi ve fenton ajanı miktarını artırdığı için kütle aktarım katsayısı, artan akım yoğunluğuyla büyümüştür (Çizelge 8.19).

Başlangıç Derişiminin Etkisi

Başlangıç derişiminin etkisinin incelendiği deney sonuçlarına bakıldığında başlangıç derişimi arttıkça % giderim değerlerinde düşme görülmektedir (Şekil 8.31). Enerji tüketimi azalırken akım veriminde artış görülmektedir (Şekil 8.32-33).

Destek Elektrolit Derişiminin Etkisi

Elektrokimyasal süreçlerde kütle akışına direnç oluşturan düşük iletkenliği önlemek amacıyla uygun destek elektrolit kullanımı yaygındır. Bu çalışmada atıksuyun iletkenliğini arttırmak için 0,01 M FeSO₄ ve 0,05 M H₂O₂ destek elektrolit ilavesi ile hem sistemden geçen akımda artış sağlanmış hem de fenton yükseltgemesinde etkin olan OH⁻ radikallerinin derişimi arttırılmıştır. Bunun sonucunda daha yüksek giderim değerlerine ulaşılmıştır. Örneğin 0,01 M FeSO₄ ve 0,05 M H₂O₂ ilavesiyle 300 mgL⁻¹ LAS içeren model çözelti kullanılarak yapılan çalışmada ilk 8 dk içinde %100'lük bir giderime ulaşılmıştır.

Çözeltiye ilave edilen destek elektrolit derişimi ile kütle aktarım katsayısı artmıştır. Bu yüzden 0,01 M destek elektrolit derişimi kütle aktarım kontrollü sistemler için kabul edilebilir uygun değerdir.

pH'in Etkisi

pH'nın etkisinin incelendiği deney sonuçlarına göre pH 3, 9 ve 11'de çalışılmış, bazik pH'da elde edilen sonuçların orjinal çözelti pH'sında elde edilen sonuçlara yakın çıktığı görülmüştür. Bu durum çözeltinin pH'sını değiştirmeksizin çalışmaların yapılmasına olanak kılmaktadır. Ayrıca çözeltide bulunan hidroksit (OH⁻) ve demir (Fe⁺²) iyonlarının çökmesiyle birlikte yüzey aktif maddenin çökmesi de gerçekleşeceğinden uygun pH'larda (~8) giderimin yüksek olması beklenen bir durumdur. Bu sonuç enerji tüketimini de olumlu yönde etkilemekte ve akım verimini artırmaktadır (Şekil 8.44-45).

Polaritenin Etkisi

Reaktörün anot ve katot olduğu durumlar karşılaştırıldığında reaktörün anot olduğu durumda katot olduğu durumdan daha fazla giderim elde edilmiştir. Reaktör anot iken elektrot yüzeyi arttığı için üretilebilecek koagölan miktarı da artmış ve yüksek giderim değerlerine ulaşılmıştır. Bu durumda enerji tüketimi daha düşük, akım verimi ise daha yüksek olmaktadır (Şekil 8.64-67). Elektrot malzemesinin alüminyum ve demir olması herhangi bir fark yaratmamaktadır.

Yine de demir reaktörde alüminyum reaktöre göre biraz daha fazla giderim sağlanmıştır. Bunun nedeni demirin, iyi bir koagulan olarak giderimi arttırmasının yanısıra fenton yükseltgemesi için ortam oluşturmasının da etkisi vardır.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalarda yüzey aktif maddenin, kullanılan iki elektrokimyasal yöntemle de uzaklaştırılabileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle elektrokimyasal çökelmede elektrokimyasal olarak üretilen koagülana ek bir koagülana gerek duyulmaksızın yüksek oranlarda giderim elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda karşılaşılan en iyi koşullarda LAS'ın dışında diğer bir non iyonik yüzey aktif madde olan SLES ile de çalışılmış, kısa sürede %90 oranında giderim elde edilmiştir. Bu sonuç ise yüzey aktif maddenin cinsine bağlı olmaksızın giderim yapılabileceğini göstermiştir.

Gerçek kirlilik koşullarında diğer kirleticilerle beraber yüzey aktif maddenin çöktürme ile giderimi incelenmiş, % 80 oranında giderime ulaşılmıştır.

Yapılan bu çalışmada maliyet konusunda kesin bir sonuca ulaşma zorluğu açıktır. Pilot ölçekte yapılacak çalışmalar ışığında yapılacak maliyet analizleri ile giderim açısından etkin olduğu sonucuna varılan elektrokimyasal yöntemlerin ekonomik açıdan da diğer yöntemlerle karşılaştırılması mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. USLU, O. ve TÜRKMEN, A., *Su Kirliliği ve Kontrolü*, T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim Dizisi 1, Ankara, 1987.
2. DÖKMECİ, İ., *Toksikolojik Akut Zehirlenmelerde Tanı ve Tedavi*, Nobel Tıp Kitapevleri, Ankara, 1994.
3. BOYAR, A. B., *Deterjanlar*, Çevre Koruma Dergisi, 31-32, 6-8, 1986.
4. ÖZTÜRK, M.A. ve TÜRKAN, İ., *Canlılar ve Çevre*, Ege Üniversitesi Ofset Basımevi, İzmir, 1989.
5. KIMERLE, R.A., *Tenside Surfactants Detergents*, 169, 1989.
6. LEWIS, M. A., *Chronic Toxicities of Surfactants and Detergent Builders to Algae: A Review and Risk Assesment*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 20, 123-140, 1990.
7. DOĞAN, F., TOKGÖZ, A.A., *İzmir Şehri içme ve Kullanma Sularında deterjan Araştırması*, *Anadolu Tıp Dergisi*, 8, 93-102, 1986.
8. ARCHER, A.C., MENDES, A.M., BOAVENTURA, R.A.R., *Separation of An Anionic Surfactant by Nanofiltration*, 33, 2758-2764, 1999.
9. ADAMS, C., SPITZER, S. ve COWAN, R.M., *Biodegradation of Nonionic Surfactants and Effects of Oxidative Pretreatment*, *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 122, 477-483, 1996.
10. FIGUEROA, L.A., MILLER J., DAWSON H.E., *Biodegradation of Two Polyethoxylated Nonionic Surfactants in Sequencing Batch Reactors*, *Water Environmental Research*, 69, 1282-1289, 1997.
11. FIELD, J.A., FIELD T.M., POIGER, T., SIEGRIST H., GIGER ., *Fate of Secondary Alkane sulfonate surfactants During municipal Wastewater Treatment*, *Water Research*, 29, 1995.
12. LIN S. H., LIN C. M. ve LEU H. G., *Operating Characteristics and Kinetic Studies of Surfactants Wastewater Treatment By Fenton Oxidation*, *Water Research*, 33, 1735-1741, 1999.
13. HELISTON, M., *Industrial Applications of Nonionic Surfactants, In Industrial Applications of Surfactants*, ed. D.R. Karsa, The Royal Society of Chemistry, London, 1986.
14. AINSWOTH, S.J., *Chem & Eng. News*, 72, 34-42, 1994.

15. BREITER, M.W., *Anodic oxidation of Formic Acid on Pt (II) interpretation of Potentiostatic Current Potential Curves Reactions Mechanizm In Perchloric Acid Solution*, *Electrochemical Acta*, **8**, 457-470, 1963.
16. WEINENGER, J. L., *AIChE Symposium Series*, **79**, 179-186, 1983.
17. PLETCHER, D. ve WALSH, F.C., *Industrial Electrochemistry*, 2nd. Ed., Chapman&Hall, London, 1990.
18. LEU, H.G., LIN, S.H. ve LIN, T.M., *Enhanced Electrochemical Oxidation of Anionic Surfactants*, *Journal of Environmental Science and Health, part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, **4**, 681-689, 1998.
19. LIN S. H. ve PENG, C. F., *Journal of Environmental Science and Health*, **A30**, 89-103, 1995.
20. ZOR, S., YAZICI, B., ERBİL, M. VE GALİP, H., *The Electrochemical Degradation Of Linearalkylbenzenesulfonate (LAS) On Platinum Electrode*, *Water Research*, **32**, 579-586, 1998.
21. Van Muylder, N. ve De Zoubov, *Comportement Electrochimique Du Platine Diagramme D'equilibres Tension-pH Du Systeme Pt-H₂O 25°C Rapport Technique RT Of Cebelcor*, 1958.
22. WARD, T.E. ve LARSON, R.J., *Biodegradation Kinetics of Linear Alkylbenzene Sulfonate In Sludge Amended Agricultural Solids*, *Environmental Safety*, **17**, 119-130, 1989.
23. YILDIZ, E., PEKDEMİR, T., KESKİNLER, B., ÇAKICI, A., AKAY, G., *Surfactant-Mediated Separation Processes: Surfactant-Enhanced Crossflow Filtration In Nitrate Removal From Water*, *Chemical Engineering Research And Design*, **74**, 546-553, 1996.
24. SNELL, K. ve KEENAN, A.G. *Chloride Inhibition of Ethanol Elektrooxidation At A Platinum Electrode In Aqueous Acid Solution (1)*, *Electrochemical Acta* **26**, 1339-1344, 1981.
25. MANAHAN, S. H., *Environmental Chemistry*, 197-200, 6th Edition, 1994.
26. HOLUM, J. R., *Fundamentals of General, Organic and Biological Chemistry*, Second Edition, 1982.
27. <http://www.epa.gov/swertio1/products/aatdf/chap4.html>
28. KOPARAL, A.S., *Sudaki Boyar Maddelerin Bir Elektrokimyasal Reaktörde Renklerinin Giderilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Müh. Anabilim Dalı, 1991.

29. CANBEK, V., *Atıksulardan Yağın Elektrokoagülasyonla Uzaklaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 1994.
30. FIGEROA L.A., MILLER, J., DAWSON H.E., *Biodegradation of two polyetixylated Nonionic Surfactants in Sequencing Batch Reactors*, Water Environmental Research, **69**, 1282-1289, 1997.
31. SWISHER, R. D., *Surfactant Biodegradation*, Surfactant Science Series, **13**, Marcel Dekker Inc., New York, 1970.
32. LARSON, R.J., ROTHGEB, T.M., SHIMP, T.M., WARD, T.E. ve VENTULLO, R.M., *Kinetics and Practical Significance of Biodegradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate In The Environment*, J. American Oil Chem. Soc., **70**, 645-657, 1993.
33. DEALMEIDA, J.L.G., DUFAUX, M., BEN TAARİT Y. ve NACCACHE, C., *Linear Alkylbenzene*, American Oil Chemist's Society, **71**, 675-694, 1994.
34. MANAHAN, STANLEY E., *Environmental Chemistry*, Sixth Edition, 197-200, 1994.
35. HOLUM, John R., *Fundamentals Of General, Organic and Biological Chemistry*, Second Edition, 133, 1982.
36. HIGGINS, J.J. ve BURNS, R.G., *The Chemistry and Microbiology of Pollution*, University of Kent At Centerbury, England, 141-170, 1975.

12. EK AÇIKLAMALAR

EK-A Reaktör Hacmi ve Anot Yüzey Alanı Hesabı

EK-A.1 Reaktör Hacmi Hesabı

Her biri 4 elektrot içeren 28 tabakadan oluşan reaktörün hacmi, elektrotların toplam hacmine eşittir. Reaktör hacmini hesaplamak için dış çapı $D_d = 0,82$ cm, iç çapı $D_e = 0,65$ cm ve yüksekliği $D_L = 0,7$ cm olan bir elektrotun kapladığı alanı buluruz.

Reaktör hacmi (V_R) = Elektrot hacmi x elektrot sayısı

Elektrot hacmi (A_z) = Elektrot alanı x elektrot sayısı

Elektrot alanı (A) = Eşkenar üçgen alanı x 2

$$\text{Üçgenin alanı} = \frac{(0,8 * \sin 60 * 0,82) * 2}{2} = 0,580 \text{ cm}^2$$

$$\text{Elektrot hacmi} = 0,557 * 0,7 = 0,406 \text{ cm}^2$$

$$\text{Reaktör hacmi} = 0,406 * 28 * 4 = 45,47 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

EK-A.2 Anot Yüzey Alanı Hesabı

$$\text{Elektrotun dış yüzey alanı} = \frac{D_L * D_d * \pi}{2}$$

$$\text{Elektrotun iç yüzey alanı} = \frac{D_L * D_e * \pi}{2}$$

$$\text{Elektrotun yüzey alanı} = \frac{D_L * D_d * \pi}{2} + \frac{D_L * D_e * \pi}{2}$$

$$A = 0,7 * \frac{0,82 * 3,14}{2} + 0,7 * \frac{0,65 * 3,14}{2}$$

$$A = 1,65 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

EK-B Örnek Hesaplamalar

EK-B.1 Yüzde Giderim Hesabı

Çizelge 8.1'den alınan 10 mg/L LAS derişimi için $3,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ akış hızı ve 1 A'deki % giderim hesabı eşitlik 7.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

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

$$\% \text{ Giderim} = \frac{(10 - 0,6)}{10} * 100$$

$$\% \text{ Giderim} = \% 94$$

Ek-B.2 Akım Verimi Hesabı

Çizelge 8.4'den alınan 0,07 M Na_2SO_4 , 50 mg/L LAS çözeltisi için $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$ akış hızında ve 1,0 A akımda akım verimi hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\text{Akım Verimi} = \% \text{ Giderim} * [(C_o * Q * F) / (I / \text{tabaka sayısı}) * 4]$$

$$\text{Akım Verimi} = 0,70 * [(0,15625 * 6 * 10^{-3} * 96500) / (1/28) * 4]$$

$$\text{Akım Verimi} = 0,1231$$

EK-B.3 Enerji Tüketimi Hesabı

Çizelge 8.5'den alınan 0,15 M Na_2SO_4 , 10 mg/L LAS çözeltisi için $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$ akış hızında ve 0,50 A akımda enerji tüketimi hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi kWh/g} = V * I / [(C_o - C) * Q]$$

$$\text{Enerji Tüketimi kWh/g} = (70 * 0,50) / [(10 - 2,8) * 6 * 10^{-3}]$$

$$\text{Enerji Tüketimi kWh/g} = 0,8102 \text{ kWh/g}$$