

**ET KESİM VE PAKETLEME ATIKSULARININ
BORUSAL REAKTÖRDE
ELEKTROKİMYASAL ARITIMI**

Kağan ERYÜRÜK

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos – 2011

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Kağan ERYÜRÜK'ün "Et Kesim ve Paketleme Atıksularının Borusal Reaktörde Elektrokimyasal Arıtımı" başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 07.07.2011 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı-Soyadı

İmza

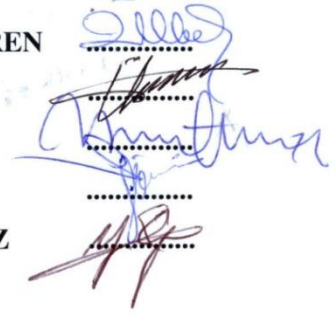
Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

Üye (II. Danışman) : Doç. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

Üye : Doç. Dr. Yusuf YAVUZ

Üye : Yard. Doç. Dr. Serdar GÖNCÜ

Üye : Yard. Doç. Dr. Yeşim GÜÇBİLMEZ



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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ET KESİM VE PAKETLEME ATIKSULARININ BORUSAL REAKTÖRDE ELEKTROKİMYASAL ARITIMI

Kağan ERYÜRÜK

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN

II. Danışman: Doç. Dr. Ümran TEZCAN ÜN

2011, 102 sayfa

Mezbahalarda kesimden ve et işleme sürecinden kaynaklanan atıksular yüksek miktarda organik madde içermektedir. Bu atıksuların nehirlere, kanalizasyon ağına veya toprağa boşaltılması önemli derecede çevre kirliliği yaratmaktadır. Bu çalışmada büyükbaş hayvan ve kanatlı hayvan kesimhaneleri atıksularının elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemiyle arıtımı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda demir elektrotlar kullanılarak ile kesikli geri döngülü ve sürekli işletim sisteminde akım yoğunluğunun, akış hızının, destek elektrolit derişiminin, hidrojen peroksit derişiminin (H_2O_2) ve farklı pH değerlerinin KOİ giderim verimi ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca işletim maliyetleri de hesaplanmıştır.

Büyükbaş hayvan kesimhanesi atıksuyunun kullanıldığı kesikli geri döngülü deneylerde KOİ değeri 840 mg/L' den 84 mg/L' ye düşürülerek %90,00 giderim verimi elde edilmiştir. Kanatlı hayvan kesimhanesi atıksuyunun kullanıldığı sürekli akışlı deneylerde ise KOİ değeri 9400 mg/L' den 425 mg/L' ye düşürülerek %95,48 giderim verimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Elektrokimyasal pıhtılaştırma, mezbaha atıksuyu, kanatlı hayvan kesimhanesi atıksuyu, KOİ.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF WASTEWATERS SLAUGHTERHOUSE AND PACKAGING PLANT BY USING IRON ELECTRODES

KAĞAN ERYÜRÜK

**ANADOLU UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCES
ENVIRONMENTAL ENGINEERING PROGRAM**

**Supervisor: Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN
Asst. Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ümran TEZCAN ÜN
2011, 102 Pages**

Slaughterhouse wastewater originating from slaughterhouse and meat processes contains high concentrations of organic substances. Discharging this kind of wastewater to a river, sewer system or soil causes an important pollution for receiving body. In my master thesis, treatability of slaughterhouse and poultry wastewater by electrocoagulation method that would be feasible and economic in use for small and mid size facilities were examined. Effects of current density, supporting electrolyte concentration, hydrogen peroxide (H_2O_2) concentration, different pH values on the removal efficiency and energy consumption were studied in a semi continuous flow and continuous flow in a tubular iron reactor with iron electrodes. Operating costs for the experiments have also been calculated.

In the experiments, the highest removal efficiency of COD was obtained. In the optimum treatment conditions, the experiments done with the real slaughterhouse wastewater, COD decreased from 840 mg/L to 84 mg/L with a removal efficiency of 90,00 %. In the experiments done with real poultry wastewater, COD was reduced from 9400 mg/L to 425 mg/L and the removal efficiency was 95,48 %.

Keywords : Electrocoagulation, slaughterhouse wastewater, poultry wastewater, COD.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamın her aşamasında, birikimleri ve deneyimleriyle bu çalışmayı gerçekleştirmemde büyük katkısı bulunan, bilimsel desteklerinin yanı sıra hiçbir zaman için benden manevi desteklerini esirgemeyen danışman hocalarım **Sn. Prof. Dr. Ülker BAKIR ÖĞÜTVEREN'e. ve Sn. Doç. Dr. Ümran TEZCAN ÜN'e**

Burada olmamı sağlayan ve eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatım boyunca minnettar kalacağım sevgili ailem; anneme, babama ve ağabeyime, bana hep destek olan nişanlıma en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Kağan ERYÜRÜK

Ağustos 2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. MEZBAHALAR-ET ENTEGRE TESİSLERİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ	3
2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinden Elde Edilen Ana ve Yan Ürünler	4
2.2. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinde Oluşan Atıksuların Özellikleri ve Çevresel Etkileri	8
3. MEZBAHA VE ET ENTEGRE TESİSLERİ ATIKSUYUNUN ARITMA TEKNOLOJİLERİ	10
3.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinde Arıtma Düzeyleri	13
3.2. Biyolojik Arıtım	15
3.2.1. Biyolojik Arıtımla Yapılmış Bazı Çalışmalar.....	15
3.3. Elektrokimyasal Arıtım.....	16
3.3.1. Elektroliz.....	17
3.3.2. Elektroyüzdürme	23
3.3.3. Elektroyükseltgeme.....	24
3.3.4. Elektrobirikim	25
3.3.5. Elektrokimyasal pıhtılaştırma	26
3.3.6. Alanyazın Taraması	30

4. KESİKLİ GERİ DÖNGÜLÜ SİSTEM İLE MEZBAHA-ET ENTEGRE TESİSİ ATIKSUYUNUN ARITIMI	34
4.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler	35
4.2. Kullanılan Yardımcı Araçlar	35
4.3. Tayin Yöntemi	36
4.4. Deney Sonuçlarının Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler	36
4.5. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar	37
4.5.1. Akım yoğunluğunun etkisi.....	38
4.5.2. Destek elektrolit derişiminin etkisi	41
4.5.3. pH değişiminin etkisi	44
4.5.4. Polielektrolit derişiminin etkisi	47
4.5.5. Hidrojen peroksit (H ₂ O ₂) derişimi etkisi.....	49
4.5.6. Akış hızının etkisi	52
4.5.7. Farklı destek elektrolitin (NaCl) etkisi	55
4.5.8. En iyi koşullar belirlenerek yapılan deney sonuçları	57
4.5.9. Sürekli sistemle yapılan deney sonuçları	60
4.5.10. İşletme maliyeti ve akım verimi.....	62
5. SÜREKLİ SİSTEM İLE KANATLI HAYVAN KESİMHANESİ ATIKSUYUNUN ARITIMI	67
5.1. Akım yoğunluğunun etkisi.....	68
5.2. Destek elektrolit derişiminin etkisi	70
5.3. pH değişiminin etkisi	72
5.4. Akış hızının etkisi	75
5.5. Hidrojen peroksit (H ₂ O ₂) etkisi.....	77
5.6. Polielektrolit derişiminin etkisi	80
5.7. En iyi koşullar belirlenerek yapılan deney sonuçları	82
5.8. İşletme Maliyeti ve Akım Verimi	83
6. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER	86

KAYNAKLAR	95
EKLER	98
Ek - 1 Örnek Hesaplamalar	98
Ek - 2 Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Reaktörün Boyutları	100
Ek - 3 KOİ Analizlerinde Kullanılan Reaktör	101
Ek - 4 Deneylerde Kullanılan Santrifüj Cihazı	101
Ek - 5 İletkenlik Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz	102
Ek - 6 pH ve Sıcaklık Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesisleri Süreç Akım Şeması.....	6
3.1. Basit Mezbahalarda En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması.....	12
3.2. Kombinalarda En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması.....	12
3.3. Et İşleme Tesislerinde En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması.....	12
3.4. Elektroliz Sisteminin Ana Bileşenleri ve Özelliği.....	18
3.5. Elektrot Yüzeyi ile Çözelti Arasında Gerçekleşen Tepkimeler.....	19
3.6. Bir Elektroliz Sürecine Etki Eden Faktörler.....	20
3.7. EP'deki etkileşimler.....	27
4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek.....	35
4.2. Akım Yoğunluğu – KOİ İlişkisi.....	40
4.3. Akım Yoğunluğu - % KOİ Giderimi İlişkisi.....	40
4.4. Akım Yoğunluğu – Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	41
4.5. Destek Elektrolit – KOİ İlişkisi.....	43
4.6. Destek Elektrolit – % KOİ Giderimi İlişkisi.....	43
4.7. Destek Elektrolit – Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi.....	44
4.8. pH Değişimi- KOİ İlişkisi	46
4.9. pH Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi	46
4.10. pH Değişimi-Enerji Tüketimi İlişkisi	47
4.11. Polielektrolit-Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	48
4.12. Polielektrolit-KOİ İlişkisi	48
4.13. Polielektrolit-% KOİ Giderimi İlişkisi.....	49
4.14. H ₂ O ₂ -% KOİ Giderimi İlişkisi	51
4.15. H ₂ O ₂ – KOİ İlişkisi	51
4.16. H ₂ O ₂ – Enerji tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	52
4.17. Akış Hızı – % KOİ Giderim İlişkisi.....	54
4.18. Akış Hızı – KOİ İlişkisi	54
4.19. Akış Hızı - Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi.....	55

4.20. Destek Elektrolit (NaCl) – KOİ İlişkisi	56
4.21. Destek Elektrolit (NaCl) – % KOİ Giderimi İlişkisi.....	57
4.22. Destek Elektrolit (NaCl) – Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	57
4.23. En iyi koşullar altında KOİ Giderimi.....	58
4.24. En iyi koşullar altında %KOİ Giderimi	59
4.25. En iyi koşullar altında enerji tüketimi.....	59
4.26. Sürekli akışta KOİ Giderimi	61
4.27. Sürekli akışta % KOİ Giderimi	61
4.28. İşletme maliyetindeki kalemlerin payları.....	64
5.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzene.....	67
5.2. Akım Yoğunluğu – KOİ İlişkisi.	69
5.3. Akım Yoğunluğu - % KOİ Giderimi İlişkisi.....	70
5.4. Akım Yoğunluğu – Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	70
5.5. Destek Elektrolit – KOİ İlişkisi.....	72
5.6. Destek Elektrolit – % KOİ Giderimi İlişkisi.....	72
5.7. pH Değişimi – KOİ İlişkisi	74
5.8. pH Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi	74
5.9. Akış Hızı Değişimi- KOİ İlişkisi	76
5.10. Akış Hızı Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi	77
5.11. Akış Hızı – Enerji Tüketimi (kWh/m ³) İlişkisi	77
5.12. H ₂ O ₂ – KOİ İlişkisi	79
5.13. H ₂ O ₂ –% KOİ Giderimi İlişkisi	80
5.14. Polielektrolit Derişimi – KOİ İlişkisi.....	81
5.15. Polielektrolit Derişimi - % KOİ Giderim İlişkisi.....	82
5.16. En iyi koşullar altında KOİ giderimi.....	83
5.17. En iyi koşullar altında % KOİ giderimi	83
5.18. İşletme maliyetindeki kalemlerin payları.....	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerine Ait Ana ve Yardımcı Süreçler	5
2.2. Türkiye’deki Mevcut Kesimhane ve Kombinaların Sayıları ve Kapasiteleri.....	7
2.2. (Devam) Türkiye’deki Mevcut Kesimhane ve Kombinaların Sayıları ve Kapasiteler.....	7
2.3. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Mezbaha Tesislerine Yönelik Yer Alan Ölçütler.....	9
3.1. Bazı elektrokimyasal yöntemlerde meydana gelen tepkimeler.....	17
4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan araç ve gereçler.....	36
4.2. $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	38
4.3. $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	38
4.4. $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	39
4.5. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	39
4.6. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,05 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	41
4.7. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	42
4.8. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,2 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	42
4.9. pH=3, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	45
4.10. pH=5, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	45
4.11. pH=9, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	45

4.12. pH=7,1, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ve 0,24 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	47
4.13. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3, akış hızı 600 mL/dk , 0,02 M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	50
4.14. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3, akış hızı 600 mL/dk , 0,04 M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	50
4.15. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3, akış hızı 600 mL/dk , 0,08 M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	50
4.16. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 240 mL/dk , 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	53
4.17. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 1000 mL/dk, 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	53
4.18. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 1400 mL/dk , 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	53
4.19. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , 0,1 M NaCl ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	55
4.20. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , 0,05 M NaCl ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	56
4.21. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 1400 mL/dk , polielektrolit 0,24 g/L ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	58
4.22. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 32 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçlar.....	60
4.26. İşletme maliyetleri ve payları.....	64
5.1. $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	68
5.2. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	68
5.3. $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	69
5.4. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk, 0,05 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	71

5.5. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk, 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları.....	71
5.6. pH=3, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	73
5.7. pH=5, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	73
5.8. pH=9, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	73
5.9. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 15 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	75
5.10. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 27 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	75
5.11. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 50 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	76
5.12. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,1M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	78
5.13. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,15 M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	78
5.14. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,2 M H_2O_2 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	79
5.15. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 27 mL/dk , 0,3 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	80
5.16. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 27 mL/dk , 0,4 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	81
5.17. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 27 mL/dk , 0,5 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	81
5.18. $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,5 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları	82
5.19. İşletme maliyetleri ve payları.....	85
5.20. Akım Yoğunluğu ile İşletim Maliyeti Değişimi	86
5.21. Atıksu Akış Hızı ile İşletim Maliyeti Değişimi	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

φ	: Akım Verimi
i	: Akım Yoğunluğu
I	: Amper
%	: Yüzde
e^-	: Elektron
S	: Siemens
$n\bar{e}$	: Tepkimede Aktarılan Elektron Sayısı
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
n	: Tanecik sayısı
t	: Zaman

KISALTMALAR

BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İstemi
C	: Derişim
C ₀	: Başlangıç Derişimi
İK-S	: İki kutuplu Seri
KOİ	: Kimyasal Oksijen İstemi
EP	: Elektrokimyasal Pıhtılaştırma
EPY	: Elektrokimyasal Pıhtılaştırma /Yüzdürme
EY	: Elektro Yüzdürme
F	: Faraday Sabiti
PVC	: Polivinil klorür
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TK-P	: Tek Kutuplu Paralel
TL	: Türk Lirası
V	: Voltaj (Gerilim)
YAHÇY	: Yukarı Akışlı Havasız Çamur Yatak

1. GİRİŞ

Evsel ve endüstriyel su kullanımında nüfus artışına bağlı olarak gözlenen artış, atık suların geri kazanımını ve yeniden kullanılmasını gündeme getirmektedir. Sanayideki atık sular, arıtma sonrası, süreç suyu ya da soğutma suyu olarak kullanılabilir. Soğutma suyu amaçlı kullanım en yaygın olan kullanım olarak bilinmektedir. Su geri dönüşüm sisteminde, kirleticileri yeteri düzeyde uzaklaştırmak temel amaç olarak benimsenmiştir. Et endüstrisinde ortaya çıkan atık sular, padoklardan, kesimhaneden ve rendering tesislerinden kaynaklanmaktadır. Tavuk mezbahalarında, farklı olarak padoklardan gelen atık sular bulunmamaktadır. Söz konusu atık sular, kan, yağ, etten kaynaklanan protein, yağ ve karbonhidrat içeriği ile BOİ ve KOİ değerleri yüksek sulardır [1].

Bu atıksular arıtılmadan alıcı ortamlara verildiklerinde, alıcı ortamların su kalitesini düşürerek sucul yaşamı olumsuz yönde etkiler. Bundan dolayı, günümüzde geleneksel arıtım yöntemlerinin yanı sıra farklı arıtım yöntemleri üzerinde de çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Bu arıtım yöntemlerinden biri de elektrokimyasal arıtım yöntemleridir.

Elektrokimyasal pıhtılaştırma (elektrokoagülasyon) 19. yüzyılın sonlarına doğru 1889 da Londra’da kurulan bir arıtma tesisinde tanımlanarak ortaya konmuştur. 1909’da, Amerika Birleşik Devletlerinde, J. T. Harris, alüminyum ve demir harcanan bir elektrolizle atıksu arıtım sisteminin patentini almıştır. 1940’larda Matteson, elektrokimyasal olarak çözeltide alüminyumun çözünüp alüminyum hidroksit pıhtılaştırıcı oluşturan “Elektronik Pıhtılaştırıcı” isimli bir makine tasarlamıştır. 1956’da İngiltere’de nehir suyunu arıtmak için demir elektrot kullanan benzer bir süreç kullanılmıştır [2].

1930’lu yıllarda EP’den yüksek işletim maliyetleri ve kimyasal pıhtılaştırıcı dozlaması için hali hazırda seçenekler bulunduğu için vazgeçilmiştir. Son yıllarda su arıtım tesislerinde küçük ölçekli EP işlemleri -tam faydalı olması

için daha tekniksel anlaşılırlığa gerek duyduğu gerçeğine rağmen- güvenilir ve etkili bir teknoloji olduğunu kanıtlayarak yer bulmaya başlamıştır [3]. Son yıllarda teknolojinin gelişmesine bağlı olarak enerji tketiciminin azalmasıyla ve çıkış suyundaki verimin artmasıyla EP' nin kullanımı artmıştır [4].

Yapılan bu çalışmada özel bir kesimhaneden alınan tesis çıkış suyunun kirletici derişimlerinin, demir elektrot kullanılarak elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemiyle giderimi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmaların birinci kısmında kullanılan büyükbaş hayvan kesimhanesi atıksuyunun KOİ değeri 840 mg/L, pH' ı 7,1 ve iletkenliği 12,50 mS/cm' dir. Deneysel çalışmaların ikinci kısmında kullanılan kanatlı hayvan kesimhanesi atıksuyunun KOİ değeri 9400 mg/L, pH'ı 7,1 ve iletkenliği 12,25 mS/cm' dir.

Deneysel çalışmalarda akım yoğunluğunun, destek elektrolitin, hidrojen peroksitin, polielektrolit derişiminin ve farklı pH değerlerinin; enerji tketicimine, atıksuda KOİ giderimine etkisi araştırılmıştır.

2. MEZBAHALAR-ET ENTEGRE TESİSLERİ VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Et entegre tesisleri; büyük ve küçükbaş hayvanların kesildiği, parçalandığı, derisinin yüzölüp iç organlarının ayıklandığı ve böylece elde edilen karkastan çeşitli et ve et ürünlerinin üretildiği, kesimden ortaya çıkan ürünlerin değerlendirilerek çeşitli yan ürünlerin elde edildiği tesisleri kapsar. Mezbahalar ise, genellikle hayvanların kesildiği bir kesim yeri olarak hizmet görmekte, yan ürünler hemen hemen hiç değerlendirilmemektedir.

Et kombinalarında ise et üretimi yanında ayrıca et-kemik, kemik, kan unu gibi hayvan beslenmesinde, rendering yağları gibi sabun endüstrisinde, safra, guddeler gibi kimya endüstrilerinde kullanılan ürünler de üretilmektedir. Ayrıca deri ve bağırsak değerleri mezbahalarda üretilenlere göre daha yüksektir.

Et ürünleri endüstrisi en genel halde kullanılan süreçlere göre aşağıdaki şekilde sınıflara ayrılmaktadır:

- A. Basit mezbahalar,
- B. Kompleks mezbahalar,
- C. Et kombinaları;
 - C.1. Az işlemlili et kombinaları,
 - C.2. Çok işlemlili et kombinaları,
- D. Küçük et işleme tesisleri,
- E. Et parçalayıcı işletmeler,
- F. Sucuk-salam ve hazır et üreten işletmeler,
- G. Jambon işletmeleri,
- H. Et konserve işletmeleri,
- I. Rendering tesisleri.

Ancak en genel halde aşağıdaki gibi bir sınıflandırma da yapılabilmektedir.

A. Mezbahalar; sadece kesme, deri yüzme, sakatat ayırma işlemlerini içerir.

B. Kombinalar; hem mezbaha hem de et, deri ve sakatat işleme ve rendering süreçlerini içerir.

C. Et işleme tesisleri ise; sadece et işleme süreçlerini içerir. Canlı hayvan kesimi yapmayan et ürünleri işleme ve paketlenme atölyeleri bu sınıfa girmektedir.

Mezbahalar ve et entegre tesislerine ait süreç akım şeması Şekil 2.1’de, Ana ve Yardımcı süreçler ise Çizelge 2.1’de verilmiştir. Ek olarak Türkiye’deki mevcut kesimhane ve kombinaların sayıları ve kapasiteleri de Çizelge 2.2 ‘de verilmiştir [5].

2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinden Elde Edilen Ana ve Yan Ürünler

Birinci Temel Ürünler

- A. Taze et ürünleri,
- B. Dondurulmuş et ürünleri,
- C. İşlenmiş et ürünleri,
 - a. Parça halinde işlenmiş et ürünleri,
 - a.1. Pastırma ve fume etler
 - a.2. Konserve ürünler
 - b. Kuşbaşı ve kıyma büyüklüğünde işlenen et ürünleri,
 - b.1. Sucuk
 - b.2. Kavurmalar
 - c. Kıyma halinde parçalanarak üretilen diğer et ürünleri,
 - c.1. Köfte
 - c.2. Hamburger
 - d. Emülsiyon teknolojisi uygulanarak işlenen et ürünleri,
 - d.1. Sosis
 - d.2. Salam

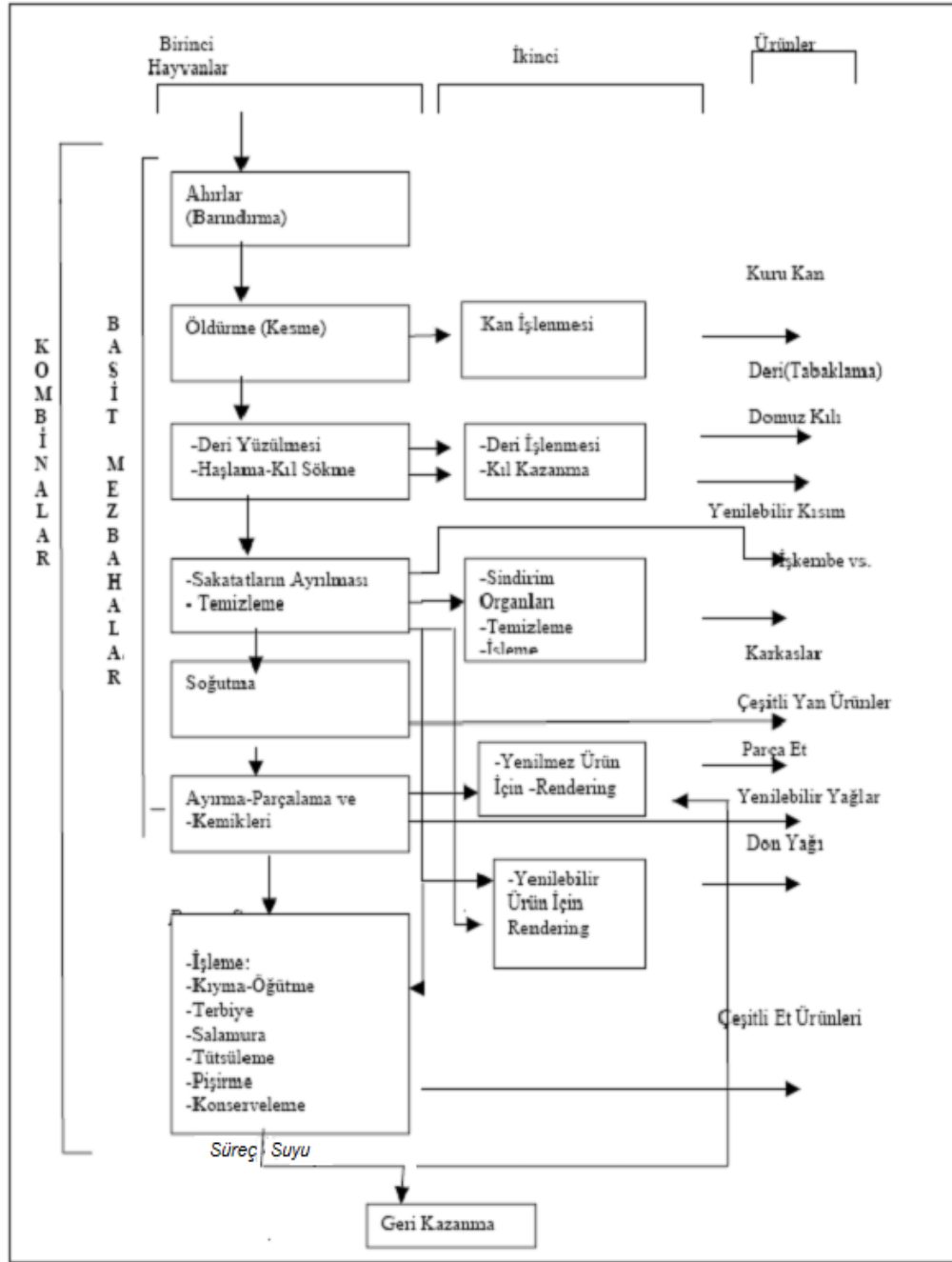
İkinci Temel Ürünler

A. Yağlar: İnsan gıdası olarak kullanılan iç yağlar,

B. Yenebilen iç organlar, baş etleri(kelle), beyin, dil, kalp, karaciğer, böbrekler, dalak, işkembe, testisler, koyun ve keçi düz barsak, ayaklar.

Çizelge 2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerine Ait Ana ve Yardımcı Süreçler [5].

Alt Kategoriler	Ana Süreçler	Yardımcı Süreçler	Ürün
Basit Mezbahalar (A)	- Hayvan barındırma - Kesme (öldürme) - Deri yüzme - Sakatat ayırma	Sakatat işleme Deri yıkama-tuzlama Karkas Parçalama işlemlerinden bir veya en çok ikisi	- Karkas - Kan - Sakatat - Kıl - Deri
Kompleks Mezbahalar (B)	(A)'nın aynısı	Sakatat işleme Deri yıkama-tuzlama Karkas parçalama Kan işleme Rendering İşlemlerinden en az üç tanesi	- Karkas - Yan ürünler - Sakatat - Parça et - Ham veya yarı mamul deri - Ham veya işlenmiş kan - Rendering ürünleri
Az İşlemli Kombinalar (C)	(A)'nın aynısı Sadece kendi kestiği eti kullanır	- Et tuzlama-salamura - Et tütsüleme - Et konserveleme - Diğer et işlemleri - Salam Sucuk üretme	- İşlenmiş çeşitli etler - Az miktarda salam sucuk
Çok İşlemli Kombinalar (D)	(A)'nın aynısı kendi kesimi dışında ayrıca karkas satın alır	(C)'nin aynısı	(C)'nin aynısı
(E, F, G, H, I)	- Donmuş et çözme - Haşlama, pişirme, tütsüleme, kurutma dondurma, dilimleme vb. - Konserveleme işlemleri	- Paketleme	- Et işleme Tesisleri - Tuzlanmış-salamura et - Tütsülü et - Kavrurma et - Konserve et - Diğer hazır etler - Sosis, salam,sucuk,pastırma - Jambon - Dilimlenmiş et ürünleri - Yenilir yağ
Rendering Tesisleri (J)	- Rendering		- Don yağ - Ecza hammaddeleri - Hayvan yemleri



Şekil 2.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesisleri Süreç Akım Şeması [5].

Çizelge 2.2. Türkiye’deki Mevcut Kesimhane ve Kombinaların Sayıları ve Kapasiteleri [5].

Sıra No	İli	Bulunduğu Bölge	Kesimhane-Kombina Sayısı	Günlük Kesim Kapasitesi	
				Büyükbaş (adet)	Küçükbaş (adet)
1	Adana	Akdeniz	17	662	7545
2	Afyon	Ege Bölgesi	14	603	2082
3	Ağrı	Doğu Anadolu	6	256	2260
4	Amasya	Orta Karadeniz	8	530	2250
5	Ankara	İç Anadolu	28	1358	4889
6	Antalya	Akdeniz	13	119	399
7	Artvin	Doğu Karadeniz	8	148	264
8	Aydın	Ege Bölgesi	32	349	1050
9	Balıkesir	Marmara	23	712	5530
10	Bilecik	Marmara	6	287	479
11	Bingöl	Doğu Anadolu	6	295	2280
12	Bitlis	Doğu Anadolu	7	288	2487
13	Bolu	Batı Karadeniz	16	167	412
14	Burdur	Akdeniz	6	331	2885
15	Bursa	Marmara	13	755	3190
16	Çankırı	Orta Karadeniz	7	80	190
17	Çorum	Orta Karadeniz	9	318	1074
18	Denizli	Ege Bölgesi	11	310	2545
19	Diyarbakır	Güney Doğu Anadolu	12	227	2164
20	Edirne	Marmara	8	191	325
21	Elazığ	Doğu Anadolu	10	326	1765
22	Erzincan	Doğu Anadolu	8	400	1665
23	Erzurum	Doğu Anadolu	6	1200	8750
24	Eskişehir	İç Anadolu	9	635	4350
25	Gaziantep	Güney Doğu Anadolu	6	329	4464
26	Giresun	Doğu Karadeniz	10	230	475
27	Gümüşhane	Orta Karadeniz	5	380	600
28	Hatay	Akdeniz	13	279	1490
29	Isparta	Akdeniz	12	297	530
30	İstanbul	Marmara	29	2007	45560
31	İzmir	Ege Bölgesi	30	1368	7333
32	İçel	Akdeniz	9	229	1141

Çizelge 2.3. (Devam) Türkiye’deki Mevcut Kesimhane ve Kombinaların Sayıları ve Kapasiteleri [5].

Sıra No	İli	Bulunduğu Bölge	Kesimhane-Kombina Sayısı	Günlük Kesim Kapasitesi	
				Büyükbaş (adet)	Küçükbaş (adet)
33	Kars	Doğu Anadolu	17	528	2832
34	K. Maraş	Akdeniz	7	256	1156
35	Kastamonu	Batı Karadeniz	14	621	2590
36	Kayseri	İç Anadolu	15	296	1510
37	Kırklareli	Marmara	17	293	942
38	Kırşehir	İç Anadolu	4	110	550
39	Kocaeli	Marmara	11	400	915
40	Konya	İç Anadolu	17	1400	3480
41	Kütahya	Ege Bölgesi	8	275	490
42	Malatya	Doğu Anadolu	9	580	3040
43	Manisa	Ege Bölgesi	30	563	3420
44	Mardin	Güney Doğu Anadolu	13	272	2350
45	Muğla	Ege Bölgesi	12	83	313
46	Muş	Doğu Anadolu	4	45	126
47	Nevşehir	İç Anadolu	9	179	400
48	Niğde	İç Anadolu	6	118	343
49	Ordu	Doğu Karadeniz	14	375	413
50	Rize	Doğu Anadolu	8	130	60
51	Sakarya	Marmara	17	1730	6640
52	Samsun	Orta Karadeniz	22	560	1320
53	Siiirt	Güney Doğu Anadolu	8	50	310
54	Sivas	İç Anadolu	16	514	2455
55	Ş. Urfa	Güney Doğu Anadolu	10	176	2290
56	Tekirdağ	Marmara	12	320	1529
57	Tokat	Orta Karadeniz	8	331	1183
58	Trabzon	Doğu Karadeniz	12	295	205
59	Tunceli	Güney Doğu Anadolu	8	79	210
60	Uşak	Ege Bölgesi	6	118	435
61	Van	Doğu Anadolu	7	625	2694
62	Yozgat	İç Anadolu	9	230	1050
63	Zonguldak	Batı Karadeniz	21	506	810
Toplam Kesimhane-Kombina Üretim Kapasitesi			769	27724	168614

Yan Ürünler

A. Kan,

a.1. Et-kemik unu,

a.2. Kemik unu,

a.3. Rendering yağları,

a.4. Tırnak- boynuz unu

B. Barsak,

C. Deri,

D. Çeşitli tıbbi ve biyoteknolojik preparatlar [5].

2.2. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinde Oluşan Atıksuların Özellikleri ve Çevresel Etkileri

Mezbahalarda, kesimhane ve et işleme süreçleri sırasında oluşan atıksular kan, et, yağ ve sakatat parçacıkları içerir. Bu sular genellikle yüksek KOİ, BOİ₅ toplam askıda katı madde, yağ, gres ve yüzer maddeler içermektedir.

Et endüstrisi atıklarında en önemli kirliliklerden biri kandır. Eskiden kanalizasyon ağına verilen bu atık, bugün yan ürün olarak elde edilmektedir. İşkembe ve bunun gibi atıklar kanalizasyon ağına verildiklerinde, toplam katı madde derişimini artırırılar. Hayvan kesimi ve işleme tesislerinde önemli bir kirlilik kaynağı da temizlik işlemleridir. Yaş işlemlerde kirlilik yükü fazladır. Bu nedenle kirlilik yüklerini azaltmak üzere yaş temizleme yerine kuru temizleme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir.

Et endüstrisi atıksularındaki kirliliğin belirlenmesi ve kontrolünde kalite ölçütlerine baz oluşturacak esas parametrelerin özellikleri ve etkileri şu şekildedir:

Biyokimyasal Oksijen İstemi (BOİ₅): Evsel ve endüstriyel atıksuların oksijen gereksinimini ölçmede yaygın olarak kullanılır. Atıklardaki BOİ su kaynaklarına verildiğinde, ortamda çözünmüş durumda bulunan oksijeni azaltarak suda yaşayan canlıları etkiler. Yüksek BOİ nedeniyle oksijen derişimi azaldıkça balıklar ve suda havalı ortamda yaşamın diğer unsurlarının da yaşama koşulları ortadan kalkar. Oksijen tamamen tükendiğinde havasız

koşullarda ayrışma baş gösterir ve metan, hidrojen sülfür gibi istenmeyen ayrışma ürünleri oluşur.

Askıda Katı Madde: Suda çözünmüş halde bulunmayan maddeleri kapsar. Askıda katı maddeler suda dipte birikmeye ve bulanıklığa yol açar. Ayrıca balıkların solunum yollarını da tahriş ederler.

Yağ ve Gres: Yağ ve gres sınıfına girebilen serbest ve suyla karışmış (emülsiyon) halde bulunabilen çok çeşitli maddeleri içerir. Bu maddeler evsel, hayvansal ve bitki veya petrol türevleri orijinli olabilir.

Genelde yağ ve gresler su yaşamına, kanalizasyon ağına ve alıcı ortama zararlı maddelerdir. Yüzücü yağ ve gres su üstünde bir film oluşturur, ışık ve oksijen aktarımına etki eder, hatta tamamen engelleyebilir. Canlılara ve suda bulunan araçlara bulaşarak onları kirletir. Suyla karışmış (emülsiyon) haldeki yağlar balıklara zehir etkisi yapar. Bu etki daha çok balıkların solunum yollarının yağla kaplanması sonucu oluşur. Yağ ve gres dibe çökerse dipsel yaşamı özellikle balık yumurtalarını tahrip eder [5].

Parametrelerin S.K.K.Y.' ye göre değerleri Çizelge 2.4'te verilmektedir.

Çizelge 2.4. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Mezbaha Tesislerine Yönelik Yer Alan Ölçütler [6].

Parametre	Birim	Kompozit Numune 2 saatlik	Kompozit Numune 4 saatlik
BOİ	mg/L	-	40
KOİ	mg/L	250	160
Yağ ve Gres	mg/L	30	20
pH	mg/L	6-9	6-9

3. MEZBAHA VE ET ENTEGRE TESİSLERİ ATIKSUYUNUN ARITMA TEKNOLOJİLERİ

Mezbahalar ve et entegre tesisleri üç alt sınıftan oluşmaktadır. Bu endüstri atık sularının arıtılması için belirlenen en uygun arıtma teknolojisi alt sınıflar ele alınarak aşağıda açıklanmıştır.

Basit Mezbahalar Al Sınıfı

En uygun arıtma teknolojisi aşağıdaki birim, işlem ve süreçlerden oluşmaktadır.

- Kanın atıksu akımına karıştırılmadan ayrı bir çukurda toplanması,
- Atıksu akımlarının ayrılması,
- Kesme, deri yüzme, sakatat ayırma ve karkas parçalama işlemleri atıksularının bir ızgaradan geçirilerek tutma havuzlarına verilmesi, çökelti olarak yağ ve yüzücü maddelerin sıyırılması,
- Sindirim organları temizleme, ayıklama atıksularının eleklerden geçirilmesi,
- Ağılardan gelen atıksularının bir kapandan geçirilmesi,
- Atıksu akımlarının birleştirilmesi ve dengelenmesi,
- İki aşamalı ikincil arıtma (biyolojik arıtma)

Kombinalar Alt Sınıfı

En uygun arıtma teknolojisi aşağıdaki birim, işlem ve süreçlerden oluşmaktadır.

- Tesis içi kirlenme kontrolü,
- Atıksu akımlarının ayrılması,
- Kesme, deri yüzme, sakatat ayırma, karkas parçalama- doğrama ve tüm et işleme süreçleriyle deri işleme süreci dışındaki tüm yan süreçlerin

atıksularının birlikte toplanarak ızgaradan geçirilmesi ve tutma havuzlarında çökeltilerek yağın sıyrılması ve çözünmüş hava yüzdürmesi uygulaması,

- Sindirim organları temizleme - ayıklama (varsa domuz haşlama ve kıl sökme) süreci atık sularının elekten geçirilmesi ve sonra deri işleme ve evsel nitelikli kullanımlardan gelen atıksularla birleştirilmesi,
- Ağılardan gelen atıksuların bir kapandan geçirilmesi,
- Yukarıdaki tüm atıksuların birleştirilmesi ve dengelenmesi,
- İki aşamalı ikincil arıtma (biyolojik arıtma);
 - ✓ İlk aşama havasız biyolojik arıtma
 - ✓ İkinci aşama havalı biyolojik arıtma

olarak seçilmelidir.

Et İşleme Alt Sınıfı

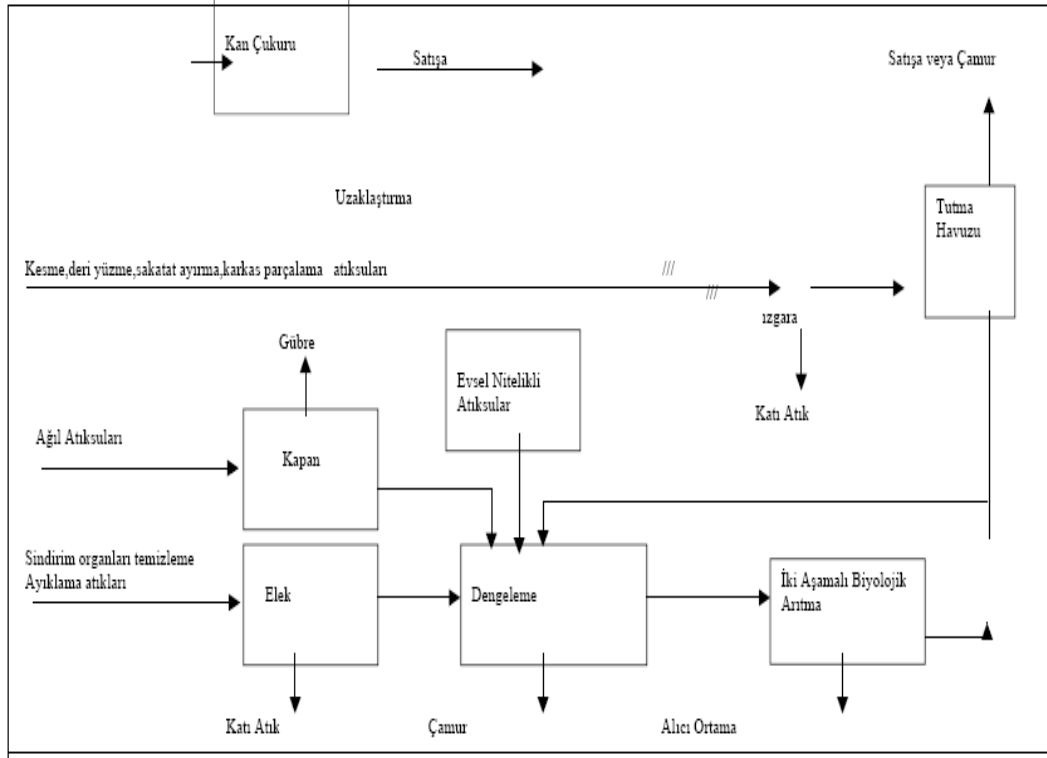
En uygun arıtma teknolojisi aşağıdaki birim, işlem ve süreçlerden oluşmaktadır;

a. Evsel nitelikli sular dışında tüm süreç atıksularının birlikte toplanması, ızgaradan geçirilerek bir tutma havuzunda çökeltilmesi, yağ ve yüzücü maddelerin ayrılması,

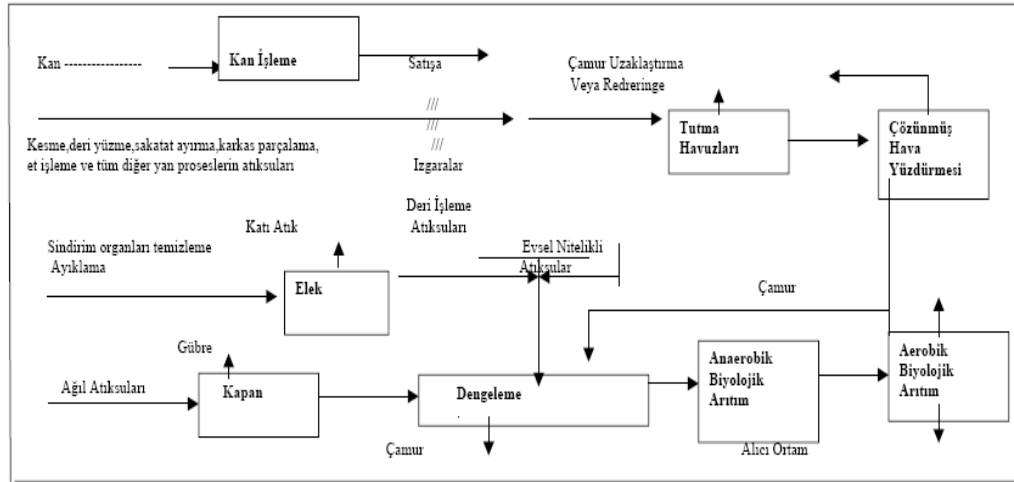
b. Evsel atıksularla birlikte ikincil arıtma (biyolojik arıtma).

Tüm alt sınıflarda kirletilmemiş soğutma suları ve tesis alanı drenaj suları hiçbir arıtmadan geçirilmeden ve diğer atıksularla karıştırılmadan doğrudan alıcı ortama verilmelidir.

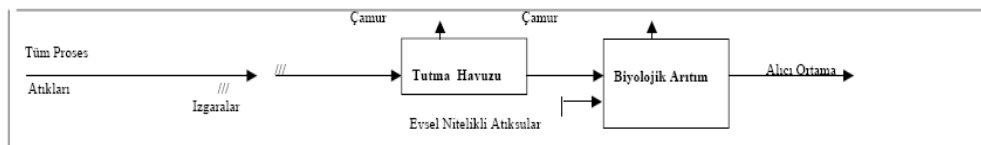
Her bir alt sınıf için en uygun arıtma teknolojileri Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de gösterilmiştir [5].



Şekil 3.1. Basit Mezbahalarda En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması [5].



Şekil 3.2. Kombinalarda En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması [5].



Şekil 3.3. Et İşleme Tesislerinde En Uygun Arıtma Teknolojisi Uygulaması [5].

3.1. Mezbahalar ve Et Entegre Tesislerinde Arıtma Düzeyleri

Et ürünleri endüstrilerinin kirlenme denetimi ve arıtma teknolojisinde gittikçe artan kirliliğin giderimine karşı gelen beş düzey tanımlanması mümkündür;

1. Düzey: Tesis içi kirlenme kontrolü,
2. Düzey: Ayrılmış atıksu akımlarında hazırlık arıtımı (tesis içi arıtma),
3. Düzey: Bileşik atıksu akımının ikincil (biyolojik) arıtımı,
4. Düzey: Biyolojik arıtma sonrası üçüncül arıtım,
5. Düzey: Sıfır atık.

Bunlardan 1., 2. ve bazı durumlarda 3. düzeyler ön arıtmaya karşılık gelmektedir. 4. düzey ise ayrışmaya dayanıklı organik madde ve askıda madde kalıntılarının azaltılarak çok az kirletilmiş ve doğrudan sulamada kullanılabilecek çıkış suyu elde edilmesine olanak sağlayan ileri arıtım düzeylerine karşı gelmektedir. Bunların arasındaki 3. düzey ise en uygulanabilir teknolojilerle ekonomik olarak yapılabilecek arıtmayı göstermektedir.

Yukarıda adı geçen arıtma düzeyleri şu şekilde ayrıntılandırılabilir;

1. Düzey: *Tesis İçi Kirlenme Kontrolü*
2. Düzey: *Ayrılmış Atıksu Akımlarında Hazırlık Arıtımı (Tesis İçi Arıtma):*

- Izgara ve eleklerden geçirme,
- Tutma havuzları (sıyırma ve çökeltme),
- Çözünmüş hava yüzdürmesi,
- Dengeleme.

3.Düzey: *Bileşik Atıksu Akımının İkincil Arıtımı*

1.ve 2. düzey arıtmalarda atıksulardaki organik maddelerin çok azı giderilir. BOİ ve Askıda Katı Madde'nin büyük bir kısmı, özellikle organik maddelerin yükseltgendiği biyolojik süreçlerle giderilebilir. Bu amaçla kullanılan birçok farklı sistem bulunmaktadır. 2. düzeyden sonra bileşik atıksu akımının biyolojik arıtımında en çok kullanılan sistemler: çeşitli tipte havuzlar (havalı/havasız), aktif çamur sisteminin değişik tipleri, yüksek hızlı damlatmalı filtreler şeklinde sıralanabilir. Son yıllarda döner biyolojik diskler ve havasız arıtma süreçleri de hızla yaygınlaşmaktadır.

4. Düzey: *Üçüncül Arıtım*

Üçüncül arıtımda kullanılabilecek diğer sistemler;

- Kum filtreler,
- Mikrostrainer,
- Elektrodializ,
- İyon değişimi,
- Amonyak sıyırma,
- Karbonada soğurma,
- Kimyasal çökeltme,
- Ters geçişim (ozmoz) olarak sıralanabilir.

5. Düzey: *Alıcı Ortama Deşarj Yapmama*

Bu durumda en ileri derecede arıtılmış suyun, sanki bir su kaynağı gibi kullanımı göz önüne alınır. Bu amaçla özellikle tarım alanlarının sulanması en çok uygulanan kullanım olmuştur. Bir diğer yöntem de, sığ havuzlardan toplanan ileri derecede arıtılmış atıksuyun buharlaştırılmasıdır [5].

3.2. Biyolojik Arıtım

Biyolojik arıtım atık suyun içinde bulunan askıda veya çözünmüş organik maddelerin bakterilerce parçalanması ve çökebilen biyolojik yumaklarla sıvının içinde kalan veya gaz olarak havaya kaçan sabit inorganik bileşiklere dönüşmesidir. Biyolojik arıtımın esası organik kirleticilerin doğada yok edilmeleri için yer alan biyolojik yumaklaştırma ve mineralleştirme süreçlerinin kontrolü ile çevrede ve en uygun koşullarda tekrarlanmasıdır. Böylece doğadaki tepkimelerinin hızlandırılarak daha kısa bir sürede, güvenli ortamda gerçekleştirilmeleri sağlanmaktadır. Biyolojik arıtma sistemleri havalı (aerobik) ve havasız (anaerobik) olarak sınıflandırılırlar [7].

3.2.1. Biyolojik Arıtımla Yapılmış Bazı Çalışmalar

Ruiz ve ark.'nın (1997) yaptığı çalışmada, mezbaha atıksularının Yukarı Akışlı Havasız Yatak (YAHÇY) reaktörde ve havasız ortamlı filtrede arıtımının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, hacmi 2 L olan bir adet YAHÇY reaktör ve destek madde olarak kıvrılmış PVC Raschig halkası ile sarılmış bir adet havasız ortamlı filtre kullanılmış ve 35 °C işletme sıcaklığı uygulanmıştır. YAHÇY reaktörü 1-6,5 kg KOİ/m³-gün organik yükleme hızları arasında çalıştırılmıştır. 5 kg KOİ/m³-gün'e kadar olan organik yükleme hızlarında KOİ giderimi %90, 6,5 kg KOİ/m³-gün organik yükleme hızında ise giderim %60 bulunmuştur. Yapılan bu çalışma sonucunda havasız arıtım sistemlerinin mezbaha atıksuları için uygun olduğu belirlenmiştir. YAHÇY reaktörlerinde daha yüksek bir KOİ giderim verimine ulaşıldığı gözlemlenmiştir [8].

Pozo ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada, işletme koşullarına bağlı olarak kümes hayvanı kesimhane atıksularının havasız ortamlı sabit film yöntemiyle arıtım verimi incelenmiştir. Bu çalışmada biri yukarı akışlı diğeri ise aşağı akışlı iki tane laboratuvar ölçekli reaktör kullanılmıştır. Her iki reaktöre destek olarak dikey kıvrımlı PVC tüpleri ve bir geri döngü devresi bağlanmıştır ve her iki reaktörde işletme sıcaklığı 35 °C olarak uygulanmıştır. 8 kg KOİ/m³-gün organik yükleme hızı için %85 ila %95 arasında değişen giderim verimlerine

ulaşılmıştır. Hidrolik alıkoyma süresinin, sıcaklığın, geri döngü oranının ve akış yönünün etkileri de araştırılmıştır [9].

3.3. Elektrokimyasal Arıtım

Kimyasal tepkimeler elektrik enerjisi üretiminde veya elektrik enerjisi kimyasal değişimlerin gerçekleşmesinde kullanılabilir. Genel olarak ifade etmek gerekirse; kimyasal ve elektrik enerjisinin birbirine dönüşümünün ve aralarındaki bağlantıların incelenmesi elektrokimyanın konusudur [10].

Elektrokimyanın uygulama alanları;

- İnorganik be organik kimyasal maddelerin üretimi,
- Metallerin eldesi, rafinasyonu ve geri dönüşümü,
- Atıksuların arıtımı,
- Süreç sularının şartlandırılması,
- Kimyasal maddelerin elde edilmesi ve saflaştırılması,
- Yüzey kaplamacılığı,
- Elektronik parçaların üretimi,
- Birincil ve ikincil pil üretimi,
- Yakıt pilleri,
- Analitik laboratuvar teknikleri,
- Sensörler,
- Korozyon önleme,
- Atık bertarafı'dır [10].

Biyolojik ve kimyasal yöntemlerle yapılan arıtım seçeneklerinde önemli düzeyde çamur oluşumu problem yaratmaktadır. Buna karşılık elektrokimyasal arıtmada böyle bir sorun yoktur, yüksek arıtım verimine sahiptir ve ekonomiktir. Elektrokimyasal süreçler; organik kirleticileri tamamen N_2 , CO_2 gibi gaz şekline dönüştürmektedir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri endüstriyel atıksuların arıtılmasında geniş bir araştırma konusu oluşturmasına rağmen, endüstriyel sistemlerde uygulanması pek yaygınlaşmamıştır [11].

3.3.1. Elektroliz

Elektroliz işlemi sırasında devreden geçirilen elektrik miktarı (Q) ile elektroliz nedeniyle oluşan kimyasal maddeler arasındaki bağıntı, Faraday Yasası olarak bilinmektedir [12].

Faradayın 1. yasası: Bir elektrolitik hücrede elektrotlarda oluşan (uzaklaştırılan) madde miktarları, hücreden geçen elektrik yükü miktarı ile doğru orantılıdır.

Faradayın 2. yasası: Seri halde bağlı farklı elektrolitler içeren elektroliz hücrelerinden geçen belirli miktarda elektrik yükü için her bir maddenin kimyasal eşdeğerlikleri ile doğru orantılı miktarda madde oluşur (uzaklaşır) [12].

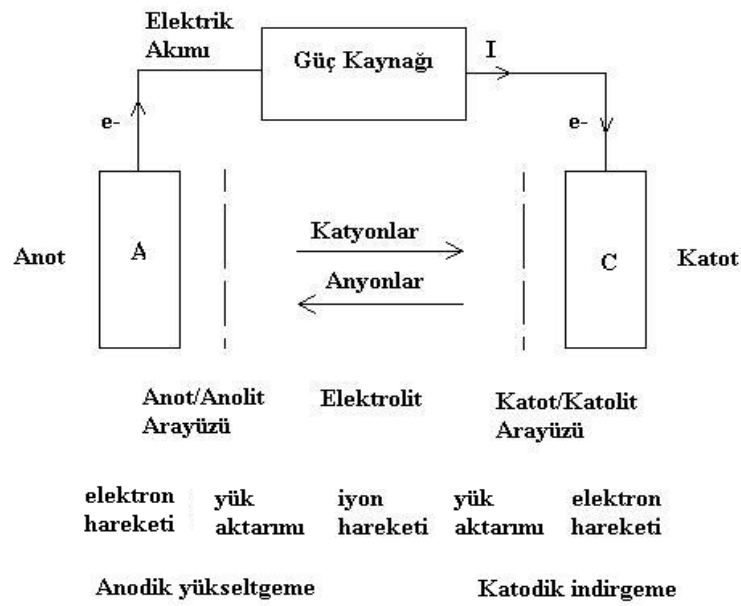
Elektrokimyasal tepkimeler, bir elektrot ile bir elektrolit ara yüzeyinde yük aktarımına neden olan çok evreli tepkimelerdir [12].

Çizelge 3.1. Bazı elektrokimyasal yöntemlerde meydana gelen tepkimeler [10].

Yöntem	Ana elektrot tepkimeleri	Sıvı fazdaki tepkimeler
Elektro-fenton	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})^{2+} + \text{OH}^-$ $\text{RH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{ROH} + \frac{1}{2} \text{H}_2$
Seçici olmayan doğrudan yükseltgenme	$\text{MO}_x + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MO}_x(\text{OH}^-) + \text{H}^+ + \text{e}^-$	$n\text{MO}_x(\text{OH}^-) + \text{R} \rightarrow n/2 \text{CO}_2 + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ + n\text{MO}_x$
Seçici doğrudan yükseltgenme	$n\text{MO}_x(\text{OH}^-) \rightarrow \text{MO}_{x+1} + \text{H}^+ + \text{e}^-$	$\text{R} + \text{MO}_{x+1} \rightarrow \text{RO} + \text{MO}_x$
Dolaylı oksijen yükseltgenmesi	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{H} + \text{e}^-$
Dolaylı klor yükseltgenmesi	$2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HOCl} + \text{H} + \text{Cl}^-$
Dolaylı gümüş yükseltgenmesi	$\text{Ag}(\text{I}) \rightarrow \text{Ag}(\text{II}) + \text{e}^-$	$\text{Ag}(\text{II}) + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{Ag}(\text{NO}_3^-)$ $n\text{Ag}(\text{NO}_3)^+ + \text{R} \rightarrow n \text{Ag}(\text{I}) + m\text{CO}_2 + n\text{HNO}_3$
Elektrobirikim	$\text{M}^{n+} + n\text{e}^- \rightarrow \text{M}$	
Doğrudan indirgenme	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 5\text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + 6 \text{OH}^-$ $\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + 4\text{OH}^-$	

Bir elektrokimyasal sistemde minimum bileşenler; bir anot, bir katot, elektrotlar arasında iyonik bir bağlantı (bir elektrolit) ve elektrotlara olan elektrik bağlantısı (dış elektrik devresi)'dir. Elektrokimyasal hücredeki elektriksel akım;

dış elektrik devredeki akım ve anottan katota doğru olan elektron akımı şeklindedir. Hücredeki akım geçişi, elektrotta elektronlarla, elektrolitte anyonların anoda katyonların ise katoda doğru kütle taşıyımını ile gerçekleşir (Şekil 3.4). Bu nedenle elektrokimyasal sistemlerde girenlerin ürünlere dönüşmesi için yeterli hızda ve oranda maddenin elektrot yüzeyine taşıyımını gereklidir [10].



Şekil 3.4. Elektroliz Sisteminin Ana Bileşenleri ve Özelliği [13].

Çözelti içindeki O türü bir veya birden fazla elektron kazanarak R türü haline dönüşür (Şekil 3.5).



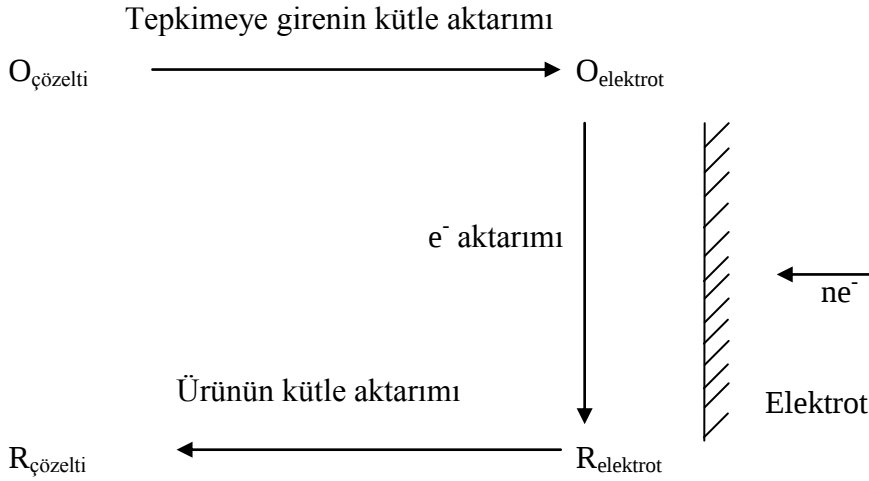
Bu tepkime üç adımda gerçekleşir. İlk adım çözeltiden elektrot yüzeyine doğru kütle aktarımı,



İkinci adım elektrot yüzeyinde yük aktarımı,



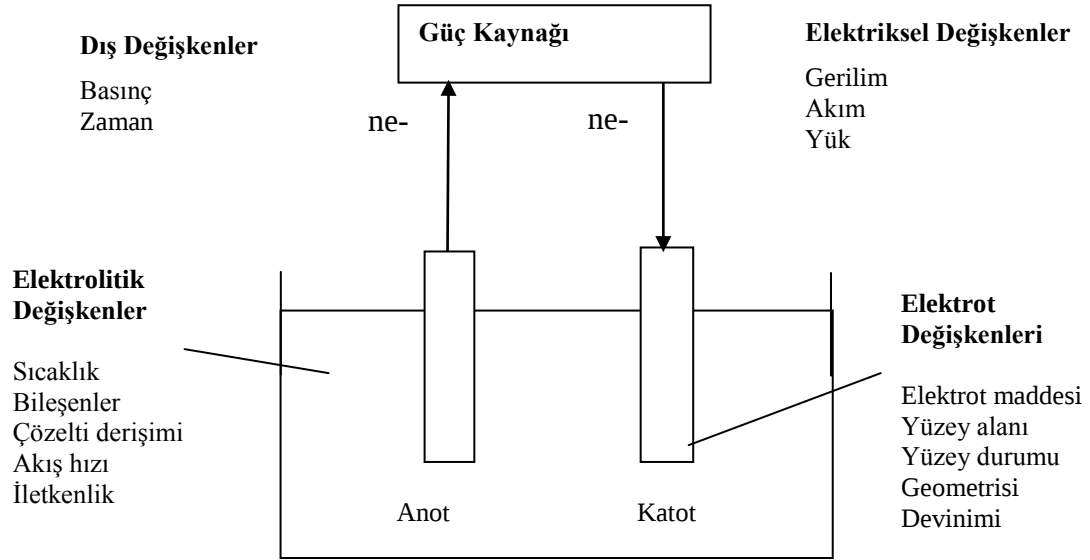
Son adım elektrot yüzeyinden çözeltiye kütle aktarımıdır.



Şekil 3.5. Elektrot Yüzeyi ile Çözelti Arasında Gerçekleşen Tepkimeler [10].

Bu tepkimelerden en yavaş olanı tüm süreç için hız belirleyici basamaktır. Elektrokimyasal süreçlerin hızını belirlemek için tüm elektron ve kütle taşınımlarının ele alınması gereklidir. Elektrokimyasal süreçlerde önemli olan diğer adımlar ise; elektrot yüzeyindeki faz oluşumu, kimyasal tepkimeler ve

elektrot yüzeyindeki adsorbsiyondur. Elektroliz sürecine etki eden faktörler Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Bir Elektroliz Sürecine Etki Eden Faktörler [13].

Elektroliz işleminde kütle taşınımı için difüzyon, taşınım ve elektriksel göç önem taşımaktadır.

Difüzyon, derişim farkıyla türlerin hareketidir. Derişim eşit olana kadar daha seyreltik ortama doğru geçişin nedeni fiziksel süreçtir. Taşınım, dışsal mekanik kuvvetlerin etkisiyle türlerin hareketidir. Elektriksel göç ise, gerilim farkı etkisiyle yüklü türlerin hareketidir [14].

Bir elektrokimyasal reaktörün işletilmesinde aşağıdaki durumlar göz önüne alınmalıdır [10].

- İşletme için uygunluk ve güvenilirlik
- Düşük işletme ve ilk yatırım maliyeti
- Kontrollü ve düzenli elektrot gerilimi
- Kontrollü ve düzenli akım yoğunluğu
- Kontrollü ve yüksek kütle aktarımı
- Kontrollü hidrodinamik
- Az basınç düşüşleri

- Hacim başına yüksek aktif elektrot alanı
- Düşük hücre gerilimi
- Gaz oluşumu kolaylığı
- Reaktör bileşenleri için sağlam malzeme seçimi
- Tıkanma problemlerinin önlenmesi
- Yeterli ısı aktarımı
- Yeterli karışma
- Basit boyutlandırılabilme
- Düşük yer ihtiyacı
- Uzun süre kullanım imkanı ve bakım kolaylığı
- Kontrol ve otomasyonda kolaylık
- Tüm süreçler için uyum

Hücre Bileşenleri

Elektroliz için en önemli bileşenler; elektrot malzemesi, ayırıcılar, elektrolit, elektrolitik dağıtıcılar, türbülans arttırıcılar ve yalıtım malzemeleridir. Bu bileşenler için temel, kimyasal madde ve elektrolitik ortamda mekanik kararlılığın sağlanmasıdır [11].

Elektrot malzemesi

Elektrot seçiminde, önemli ölçüt katot için yüksek hidrojen aşırı gerilimi, anot için yüksek oksijen aşırı gerilimidir. Bütün elektrokimyasal süreçler için katot olarak karbon/PTFE, bakır, çelik ve/veya demir kullanılmakla birlikte Pt ve Ti kaplamalı IrO_2 veya RuO_2 de deneysel çalışmalarda iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [15].

Genel olarak RuO_2 gibi asal metal oksitlerin, benzer asal metallere göre performansları oldukça iyidir. Endüstriyel uygulamalarda bu asal metaller, oksitlerle kaplanır. Metal yüzeylerinin oksitle kaplanması ile elektrotların kullanım süreleri artmaktadır. TiO_2 , düşük maliyeti nedeniyle özellikle dikkat çekicidir [16].

1960’larda boyutsal kararlı anot (DSA) malzemesi olarak RuO₂ ve diğer metal oksitlerle kaplı titanyum kullanımı çok yaygındı. RuO₂’in, korozyona karşı dayanıklılığı ve kararlılığı en büyük özelliğidir. RuO₂’in değerli metal ve/veya geçiş metal oksitleri ile kaplanması katalizör özelliğini arttırmaktadır. RuO₂, elektron mikroskopuyla incelenerek, geniş yarıklı yapısı sayesinde yüzey alanının geniş olduğu gözlenmiştir. Bu geniş alan katalitik etkinliğini büyük oranda arttırmaktadır. Rutenyum oksit kaplı titanyum ise anot olarak uzun bir kullanım ömrüne sahiptir [16].

Bu tür anot malzemeleri, yüksek oksijen aşırı gerilimi oluştururken, klor için düşük aşırı gerilime sahiptir [11].

Elektrot malzemesinin özellikleri;

- Yüksek kimyasal ve mekanik kararlılık,
- Yüksek iletkenlik,
- Birçok şekilde elde edilebilirlik,
- İstenilen tepkimelere karşı seçicilik,
- Düşük maliyet ve/veya uzun ömür,
- Güvenli ve kolay bakım,
- Kirlenmeyen ve kirletmeyen, çevre dostu olması sayılabilir.

Destek elektrolit

Elektrolit içinde yükün daha kolay taşınmasını sağlayabilmek için destek elektrolite gerek duyulabilir. Bir destek elektrolit birçok rolü üstlenmiştir.

- Elektriksel göç yolu ile iyon taşınımını sağlar
- Elektrotlar arasında gerilim düşüşü sağlar
- Aşırı destek elektrolit dozajı durumlarında tepkimeye giren ve ürünlerin etkinlik katsayılarının yaklaşık olarak eşit olmasını sağlar
- Elektriksel çift tabaka yapısını sağlamlaştırır
- Elektroaktif türler için uygun örgü ve kalıcı bir ortam sağlar
- Kararlı sıcaklık ortamı yaratır
- pH ve bileşenlerin kararlılığını sağlar
- Elektrolitik hareket ile elektrot yüzeyine veya elektrot yüzeyinden

çözeltiye kütle taşınımını kolaylaştırır [11].

Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri

Elektrokimyasal atıksu arıtımı, Elektrokimya ve Elektrokimya Mühendisliği'nin temel ilkelerinin kullanıldığı arıtım yöntemidir. Bu nedenle hem elektrokimyasal atıksu arıtım tekniklerinin hem de elektrokimyasal tekniklerin iyi bilinerek bir araya getirilmesi gerekmektedir [17].

Günümüzde elektrokimyasal yöntemler pahalıdır ancak diğer teknolojilere kıyasla daha az yer ihtiyacı gerektiren etkili yöntemlerdir. Zor ayrışan kirletici grupları içeren atıksuların arıtımda elektrokimyasal teknolojiler vazgeçilmez yöntemlerdir [10].

Elektrokimyasal reaktörler modern toplumlarda hayati derecede önemli rol oynamaktadır. Günlük yaşamda elektriğin geniş ölçüde kullanılması ve yeni teknolojilerin uygulanmasındaki artış elektrokimyasal reaktörlerin sayı, tip ve uygulamalarında da son derece büyük artışa neden olmuştur. Öyle ki, 1900'lerden önce sadece Galvanik pillerde kullanım olanağı bulan elektrokimyasal reaktörler, günümüzde metal ve kimyasal madde üretimi, taşınabilir kimyasal güç kaynakları, metal kaplama, korozyon kontrolü, çevresel amaçlı arıtım, saflaştırma, sensörler ve tıbbi cihazlar gibi değişik amaçlarda kullanılmaya başlanmıştır [18].

Elektrokimyasal yöntemlerden birkaçı elektroyüzdürme, elektroyükseltgeme, elektrobirikim, elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemleridir.

3.3.2. Elektroyüzdürme

Bu yöntemde elektrolitten elektrik akımı geçirildiğinde elektrotlarda oluşan hidrojen ve oksijen gazları kolloitlere yapışarak sıvı yüzeyine taşımaktadır. Yüzeydeki köpük, köpük ayırıcılar vasıtasıyla alınabilmektedir. Temelde suyun elektrolizinden üretilen hidrojen ve oksijen gazlarının küçük hava kabarcığı şeklinde su kitlesinin yüzeyine doğru hareketi sırasında kirleticilerin de yüzmesini sağlayan bir süreçtir [10].

Elektroyüzdürme yöntemi, endüstriyel atıksuların arıtımı yanında evsel atıksuların arıtımında da kullanılmaya başlanmıştır. Atıksu arıtımında ön arıtım veya ikincil arıtım, evsel suyun arıtımında ise üçüncül arıtım birimi olarak kullanılabilir [19].

3.3.3. Elektroyükseltgeme

Atıksuyun arıtımı için elektrokimyasal yükseltgeme çalışmaları 19. yüzyıla kadar gitmektedir. Bu teknolojinin yaygın olarak araştırmaları 1970'lerin sonlarında başlamıştır. Son yirmi yıl boyunca araştırma çalışmaları farklı elektrotlarda farklı kirletici türlerinin yükseltgenmesi, elektrot malzemelerin elektrokimyasal kararlılıkları ve elektrokatalitik faaliyetlerinin gelişimi, süreç verimini etkileyen faktörlerin araştırılması ve kirleticilerin parçalanma kinetiği ve mekanizmasının araştırılmasına odaklanmıştır [20].

Dolaylı Elektroyükseltgeme Süreci: Kirleticilerin elektrokimyasal yükseltgenmesi farklı yollarla olabilir. Anodik olarak oluşan klor ve hipoklorit kullanımıyla kirleticilerin yok edilmesi en bilinenidir [20].

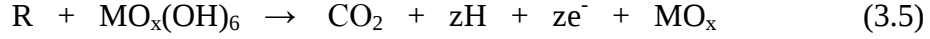
Bu yöntem, tipik olarak 3 g/L'den büyük yüksek klor derişiminde birçok organik ve inorganik kirleticiyi etkili bir şekilde yükseltgeyebilmektedir [20].

Ham atıksuyun klor içeriği düşük ise çok miktarda tuz eklenerek sürecin verimi arttırılabilir. Kirleticiler ayrıca hidrojen peroksit üretimiyle elektrokimyasal olarak parçalanabilir. Bu sistemde, katot malzemesi olarak karbon-PTFE, anot olarak ise Pb/PbO₂, Ti/Pt/PbO₂, veya Pt kullanılabilir [10].

Tehlikeli atıkların arıtımında kullanılan diğer bir yöntem ise, aracı olarak ifade edilen metal iyonlarının anot yüzeyinde kararlı oldukları düşük değerlikten aktif oldukları yüksek değeriğe geçerek organik kirleticilere doğrudan etki etmesidir. Ayrıca geri döngü ile anot yüzeyinden araçlar tekrar oluşturulabilir. Tipik araçlar olarak Ag²⁺, Co³⁺, Fe³⁺, Ce⁴⁺ ve Ni²⁺ sayılabilir. Bu yöntem genellikle asidik ortamda işletilir [11].

Doğrudan Elektroyükseltgeme Süreci: Bu süreç elektrot yüzeyinde elektron alışverişi ile gerçekleşir. Kirleticilerin elektrokimyasal yükseltgenmesi fiziksel olarak soğurulmuş "aktif oksijen" (soğurulmuş hidroksil kökleri, OH⁻) ile

doğrudan anot yüzeyinde gerçekleşir. Bu süreç genellikle anodik yükseltgeme veya doğrudan yükseltgeme olarak ifade edilir. OH radikalleri organik bileşiklerin (R), tamamen yanmasını sağlar ve kimyasal olarak soğurulmuş “aktif oksijen” (MO_{x+1}), seçici yükseltgeme ürünleri oluşumuna katılır.



Anodik yükseltgemedede, katoda oksijen beslemesi veya atıksuya büyük oranda kimyasal madde ekleme gibi sorunlar yoktur. Anot maddesi olarak; Ti/Ru₂, Ti/Pt-Lr, karbon elyaf, MnO₂, Pt-karbon siyahı, gözenekli karbon keçe, paslanmaz çelik kullanılmaktadır [10].

3.3.4. Elektrobirikim

Atıksularda metallerin geri kazanımında kullanılmaktadır. Bu yöntemde katotta gerçekleşen tepkime;



şeklindedir.

Elektrobirikimde en yaygın kullanılan reaktör tipi; plaka ve çerçeve hücreler, dönen hücreler ve üç boyutlu hücrelerdir.

Anot malzemesi olarak çelik, kaplama malzemesi olarak da titanyum üzerine gözenekli metal oksit yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntem daha çok metal yüzeyi kaplama endüstrisinde kullanılmaktadır. Metallerin elektrolitik geri kazanımı iki adımda gerçekleşmektedir; ağır metallerin toplanması ve toplanan metallerin sıyırılmasıdır. Seyreltik atıksularda metal derişikleştirmede iyon değişimi kullanılabilir. Yüksek derişimlere ulaşmak için,

metal yüzeyi kaplama endüstrisi gibi geri kazanım sistemi doğrudan uygulanabilir. Maden endüstrisinde de altın gibi değerli metallerin üretiminde elektrokimyasal metal geri kazanım sistemleri uygulanmaktadır [11].

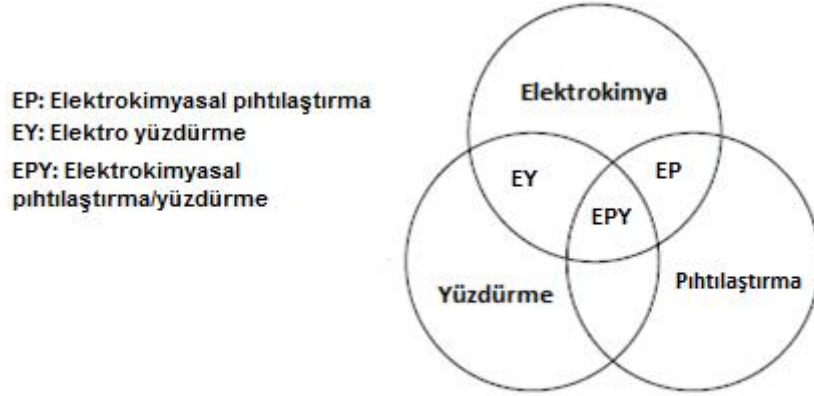
3.3.5. Elektrokimyasal pıhtılaştırma

Pıhtılaştırma, çok küçük katı taneciklerin asıltısındaki yüklü parçacıkların karşı iyonlarla karşılıklı çarpışmasıyla nötralleşmesi olması ve takiben çökelerek toplanması olayıdır. Pıhtılaştırıcı, eklenen uygun kimyasal bileşiklerdir. Alüm ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan böyle bir bileşiktir. Pıhtılaştırmanın mekanizması sürekli tartışma konusu olmuştur. Pıhtılaştırma, öncelikle durgun elektrik kuvvetleri dengeleyerek taneciklerin birbirine yaklaşım bir arada kalmasına izin verecek net yüzey yükünü meydana getirir. Yüzey yükünün azalması zıt yüke sahip olan elektrolitlerin varlığıyla elektriksel çift katmanın itici potansiyelinin azalmasının sonucudur [21].

Elektrokimyasal pıhtılaştırma, elektroliz sonucu anodun çözünmesiyle arıtılacak atıksu içerisinde metal hidroksit yumaklarının oluşturulması sürecidir [2].

Elektrokimyasal pıhtılaştırma (EP) sürecinde, uygun anot malzemesinin elektrolitik yükseltgenmesi ile pıhtılaştırıcı oluşur. Bu süreçte yüklü iyon çeşitleri (metal veya diğerleri) oluşmuş metal hidroksit yumaklarıyla veya zıt yüke sahip iyonlarla, bu yüklü iyon türlerinin tepkimeye girmesiyle arıtılır. EP teknolojisi metal tuzları veya polimerlerin kullanımı ve polielektrolit eklenerek kararlı emülsiyon ve asıltıları kırmak için bir seçenek sunar. Bu teknoloji yüksek derecede yüklenmiş polimerik metal hidroksit türleri girişimi ile su ortamından metalleri, çok küçük dağılmış katıları ve tanecikleri, suda çözünmüş inorganik kirleticileri arıtır. Bu tür polimerik metal hidroksitler toplanmayı veya yumaklaştırmayı kolaylaştırmak için askıda katı ve yağ damlacıklarındaki durgun elektrik yükleri nötralleştirir ve sonuç olarak bunlar su ortamından ayrılır [21].

Elektrokimyasal pıhtılaştırma sudan kirleticileri arındırmak için etkileşimli olarak hareket eden birçok mekanizmanın olduğu karışık bir sistemdir [19]. EP'deki etkileşimler Şekil 3.7'deki gibidir [22].



Şekil 3.7. EP'deki etkileşimler [22].

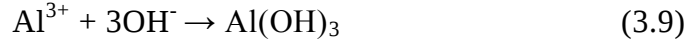
EP, su arıtımında etkili ve başarılı bir yöntemdir. Bu yöntemde, anot olarak kullanılan demir veya alüminyum elektrotlar çözünerek çözeltiye Al^{3+} , Fe^{2+} , ve Fe^{3+} iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksit iyonları ile birleşerek çok az çözünen $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gibi metal hidroksitleri oluşturmaktadır. Anotta metal iyonları oluşurken, katotta hidrojen gazı açığa çıkar [11].

Anotta gerçekleşen tepkimeler;

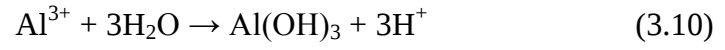
Alüminyum anot için;



Bazik ortamda;



Asidik ortamda;



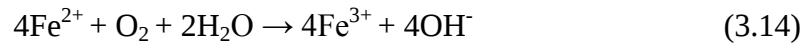
Demir anot için;



Bazik ortamda;



Asidik ortamda;



Ek olarak oksijen oluşum tepkimesi;



Katotta oluşan tepkime;



Al^{3+} veya Fe^{2+} iyonları, parçacıkların yumaklaştırılması için çok verimli pıhtılaştırıcılardır [20].

Alüminyum, genellikle su arıtımı, demir ise atıksu arıtımı için kullanılır [20].

Bu elektrotlar; ucuz, temini kolay ve üstelik etkisi kanıtlanmış elektrotlardır [11].

Elektrokimyasal Pıhtılaştırmanın Olumlu Yönleri

- EP basit bir donanım gerektirir ve çalışma esnasında karşılaşılabilecek çoğu sorunların çözümü, işletim esnekliği sayesinde daha kolaydır.
- EP ile arıtılan atıksu renksiz, kokusuz, temiz ve tatmin edici özelliklere sahiptir.
- EP sonucu oluşan çamur hızlı olarak çökebilen ve kolayca susuzlaştırılabilen bir çamurdur. Çünkü bu çamur temel olarak metal oksitlerinden ve hidroksitlerinden oluşmuştur. Ayrıca EP yöntemi az çamur üreten bir tekniktir.
- EP sonucu oluşan yumaklar daha büyük olmaları ve daha az bağlı su içermeleri dışında kimyasal yumaklarla benzerlik taşımaktadır. Ayrıca EP sonucu oluşan yumakların aside daha dirençli ve daha kararlı olmalarından dolayı süzülerek daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtmalarla karşılaştırıldığında EP daha az toplam çözünmüş katıya sahip bir çıkış suyu sağlar. Eğer bu su tekrar kullanılacaksa, düşük toplam çözünmüş katı miktarı daha düşük bir geri kazanım maliyeti sağlar.
- EP süreci, en küçük koloidal maddelerin sudan uzaklaştırılmasında da çok avantajlıdır. Çünkü uygulanan elektrik ile koloidal parçacıkların daha hızlı hareket etmeleri sağlanır. Böylelikle pıhtılaştırma süreci kolaylaşır.
- EP sürecinde kimyasal maddelerin kullanılmamasından dolayı; artık kimyasalların nötrleştirilmesi ve pıhtılaştırılması esnasında eklenmesi gereken yüksek derişimlerdeki kimyasal maddelerin neden olabileceği ikincil kirlenme sorunlarıyla karşılaşmaz.

- Elektroliz esnasında oluşacak gaz kabarcıkları, kirleticinin çözeltinin üst katmanlarına taşınmasını sağlar. Böylelikle kirleticinin sudan uzaklaştırılması ve toplanması daha kolaylaşır.
- EP hücresindeki elektrolitik süreçler, elektrikle kontrol edildiğinden ve sabit parçalara sahip olduğundan dolayı daha az bakım gerektirirler.
- EP tekniği, elektriğin bulunmadığı kırsal bölgelerde de, kurulacak olan bir güneş paneli ile kullanılabilir [21].

Elektrokimyasal Pıhtılaştırmanın Olumsuz Yönleri

- Atıksuya daldırılan çözünebilir elektrotlar, yükseltgenme sonucu zamanla çözündüklerinden belirli aralıklarla değiştirilmelidir.
- Elektrik kullanımı birçok yerde pahalı olabilmektedir.
- Katotta oluşabilecek geçirimsiz bir oksit film tabakası, EP biriminin veriminin düşmesine neden olur.
- Yüksek iletkenliğe sahip bir atıksu gerekmektedir.
- Bazı durumlarda jelimsi hidroksitler çözünme eğilimi gösterebilirler [21].

3.3.6. Alanyazın Taraması

Uğurlu (2004) tarafından yapılan çalışmada, elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemi kullanılarak kağıt atıksularının arıtımı amaçlanmıştır. Amonyum, nitrit, nitrat ve fosfat giderimi farklı akım yoğunluklarında, elektrot (Al ve Fe) ve elektroliz sürelerinde incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan, giderim etkinliğinin, elektroliz süresi, elektrot tipi ve uygulanan akıma bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre 12V 77,13mA akım yoğunluklarında gerçekleştirilen deneylerde her iki elektrot türü için (nitrat hariç) 2 dakikanın yeterli olduğu görülmüştür. Ayrıca, incelenen parametrelerde KOİ ve BOİ değerlerinde daha iyi sonuçlar elde etmek için bu sürenin biraz daha arttırılması gerektiği belirlenmiştir [23].

Eyvaz ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, bir tekstil atıksuyunun elektrokimyasal pıhtılaştırma ile arıtılmasının sonuçları ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada demir ve alüminyum elektrotlar, tek kutuplu paralel, tek kutuplu seri ve iki kutuplu seri bağlantı şekli ile kullanılmıştır. Arıtma verimliliğinin ölçülmesinde KOİ ve bulanıklık giderimleri dikkate alınmıştır. KOİ gideriminde, her iki elektrot malzemesi için asidik ortam daha uygun olup; demir elektrot için, İki kutuplu-seri (İK-S) bağlantı şekli etkili olurken, alüminyum elektrotlarda ise her üç bağlantı şekli için birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bulanıklık gideriminde; en iyi pH'ın elektrot malzemesine bağlı olduğu, alüminyum elektrotlar için asidik ortamın, demir elektrotlar için ise nötral ortamın daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, yüksek akım yoğunluklarının yüksek KOİ ve bulanıklık giderme verimleri sağladığı görülmüştür. Düşük akım yoğunluğunda (30 A/m^2) demir elektrotlarda sadece Tek kutuplu-paralel (TK-P) sistemden verim alınmıştır. Alüminyum elektrotlarda ise; KOİ giderimi bağlantı şekline göre değişirken, bulanıklık gideriminin bağlantı şeklinden oldukça bağımsız olduğu görülmüştür. Diğer yandan, EP süreci alüminyum elektrotlarla daha hızlı ilerlediğinden; her üç bağlantı için de 5 dakikalık bir süre etkili olurken, demir elektrotlarda ise; seri bağlantı sistemleriyle en az 10 dakikalık bir işlem süresine ihtiyaç duyulduğu, Tek kutuplu-paralel (TK-P) bağlantı şeklinin ise daha fazla işlem süresi gerektirdiği belirlenmiştir [24].

Kobyay ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada kümes hayvanı kesimhanesi atıksularının elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemiyle arıtımı incelenmiştir. Ortalama pH'ın, elektrot malzemesinin, akım yoğunluğunun ve işletme süresinin KOİ ve yağ-gres giderimine, elektrik enerjisi tüketimine ve çözünebilir elektrot tüketimine etkisi araştırılmıştır. En yüksek KOİ giderimi, alüminyum elektrot kullanılarak 25 dakika boyunca 150 A/m^2 akım uygulanması ile %93 olarak bulunmuştur. Demir elektrot ile yağ-gres gideriminde ise %98 verim elde edilmiştir. Her iki elektrot malzemesinin birleştirilerek kullanımı, KOİ ve yağ-gres giderimi açısından sürecin verimini arttırmıştır [25].

Ni'am ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada elektrokoagülasyon yönteminde demir elektrot kullanarak atıksuların arıtılmasını incelemişlerdir. Atıksudan KOİ ve bulanıklığı yüksek oranda gidermek için pH, akım yoğunluğu ve işletme süresi gibi parametreler ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. KOİ değeri 1140 mg/L ve bulanıklığı 491 NTU olan süt tozu atıksuyu kullanılmıştır. İşletme süresinin ve akım yoğunluğunun artmasıyla KOİ ve bulanıklık giderim verimlerinin arttığı gözlenmiştir. Belli bir süreden sonra giderim verimlerinin çok farklılık göstermediği anlaşılmıştır. KOİ giderim veriminin %65' ten büyük olduğu ve bulanıklık giderim veriminin % 95' ten büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca elektrokimyasal pıhtılaştırmanın atıksu pH' ını nötralleştirebileceği anlaşılmıştır [26].

Asselin ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada kümes hayvanı kesimhanesi atıksuyundaki organik bileşiklerin yumuşak çelik ve alüminyum elektrotların iki kutuplu ve tek kutuplu bir şekilde bağlanmasıyla arıtımını incelemişlerdir. Çalışmada KOİ değeri 2700-3100 mg/L olan atıksuyun biyolojik süreçlerin uzun hidrolik bekletme süresi ve geniş alan gereksinimi sebebiyle elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemiyle arıtılması amaçlanmıştır. Deneylerde en iyi verim çift kutuplu yumuşak çelik sistemin kullanıldığı ve akım yoğunluğunun 0,3 A olarak 60 veya 90 dakika boyunca uygulanmasıyla elde edilmiştir. Toplam KOİ' de %82 $\pm$ 2 giderim elde edilmiştir [27].

Ün ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada demir ve alüminyum elektrotlar kullanarak mezbaha atıksuyunun birleşik süreçle arıtımını incelemişlerdir. Çalışmada 340 NTU'ya kadar yüksek bulanıklık, yüksek KOİ (4200 mg/L) ve koyu renge sahip mezbaha atıksuyunu, bulanıklık ve organik kirlilik derişimleri açısından ülkedeki yasal sınırlar altına inecek şekilde arıtılmasını amaçlamışlardır. Deneylerde, akım yoğunluğu, başlangıç pH'sı ve destek elektrolit (Na_2SO_4) dozajı derişimlerinin arıtma verimine etkisi incelenmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça KOİ giderim veriminin arttığı gözlenmiştir. Suyun pH'sının (7,8) her iki elektrot için de uygun pH olduğu anlaşılmıştır. Na_2SO_4 derişiminin artırılması KOİ giderim verimini arttırmış ve enerji tüketimini de belirgin şekilde düşürmüştür.

Aluminyum elektrot kullanılan deneylerde pıhtılaştırıcı yardımcısı olarak poli alüminyum klorür (PAC) kullanılmıştır. 0,75 g/L PAC eklenmesi ile % 94,4 KOİ giderim verimi elde edilmiştir. Belirtilen KOİ giderim verimi 237 mg/L KOİ'ye denk gelmektedir [28].

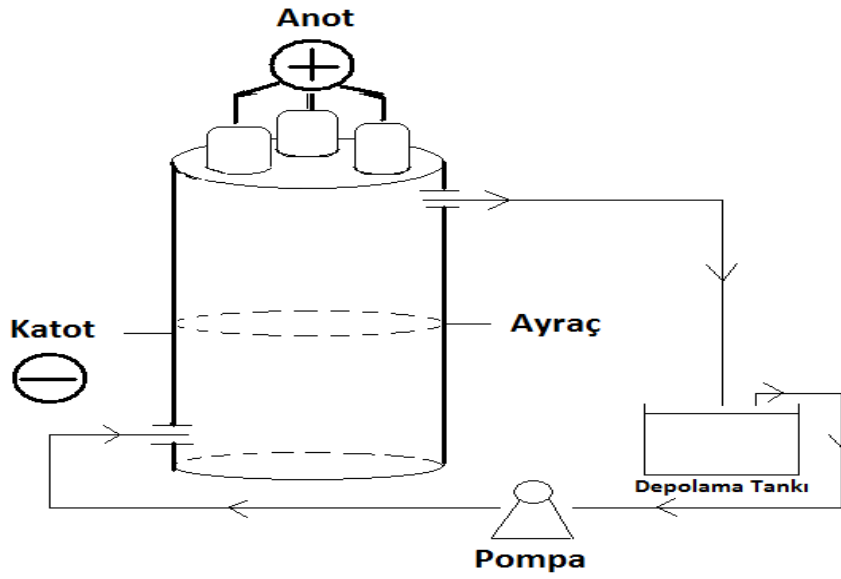
Bu değer Türkiye'de izin verilen mezbaha atıksuyu boşaltım sınırlarına uygun bir değerdir. Demir elektrot kullanılan deneylerde EP işlemi fenton süreciyle birlikte uygulanmıştır. % 81,1 KOİ giderim verimi % 9 H₂O₂ eklenmesiyle elde edilmiştir. Sonuç olarak birleşik süreçlerin EP'de mezbaha atıksularından bulanıklık ve KOİ giderimi için etkili bir yöntem olduğu bulunmuştur [28].

4. KESİKLİ GERİ DÖNGÜLÜ SİSTEM İLE MEZBAHA-ET ENTEGRE TESİSİ ATIKSUYUNUN ARITIMI

Bu çalışmada özel bir mezbahadan alınan 840 mg/L KOİ derişimine sahip 7,10 ph'taki büyükbaş hayvan kesimhanesi atıksuyu kullanılmıştır. Düzenekte kullanılan demir boru 75 cm uzunluğunda ve 3,5 cm çapında olup, 72 cm uzunluğunda ve 1,1 cm çapında 3 adet demir çubuk bir tıpa yardımı ile boru içerisine yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerde demir çubuklar anot, reaktör katot olarak kullanılmıştır.

Çalışmalar kesikli geri döngülü akışta farklı akım yoğunluklarında (10 mA/cm², 20 mA/cm², 30 mA/cm², 40 mA/cm²), farklı destek elektrolit derişimlerinde (0M, 0,05M, 0,1M ve 0,2M Na₂SO₄), farklı pH değerlerinde (orijinal pH, pH=3, pH=5 ve pH=9), farklı hidrojen peroksit derişimlerinde (0M, 0,02M, 0,04M ve 0,08M), farklı akış hızlarında (240 mL/dk, 600 mL/dk, 1000 mL/dk ve 1400 mL/dk) ve pıhtılaştırma yardımcısı anyonik polielektrolit kullanılarak (0,24 g/L) gerçekleştirilmiştir. En iyi koşullarda ve sürekli akışta da deneyler yapılmıştır. Demir boru içine tabandan 30 cm mesafede 1 adet karıştırıcı engel konulmuş, böylece atıksuyun düzenek içinde tam karışımı sağlanmak istenmiştir. Borunun alt ve üst kısmında yer alan 1'er cm çaplı 2 adet delikten akış bir peristaltik pompa yardımı ile aşağıdan yukarıya doğru sağlanmıştır. Güç kaynağının (+) ucu demir çubuklara, (-) ucu ise demir boruya bağlanarak demir çubuklar anot, dış demir boru katot olarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek

4.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Mezbaha atıksuyuyla yapılan çalışmada destek elektrolit olarak kolay sağlanabilmesi ve ucuz olmasından dolayı sodyum sülfat (Na_2SO_4) kullanılmıştır. Ayrıca pH ayarlaması için de sülfürik asit (H_2SO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

Numunelerin hazırlanması ve KOİ tayini için gümüş sülfat (Ag_2SO_4), potasyum bikromat (K_2CrO_7), demir(II)amonyum sülfat ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$) çözeltileri ve ferroin belirteci kullanılmıştır.

Arıtım derecesini yükseltmek için de pıhtılaştırma yardımcısı olarak anyonik polielektrolit kullanılmıştır.

4.2. Kullanılan Yardımcı Araçlar

Çalışmalarda; akım; 50V - 45A girişli Statron marka güç kaynağından sağlanmıştır.

Analizler için kullanılan diğer araçlar ise Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan araç ve gereçler

Araç ve Gereçler	Marka ve Modeli
Santrifüj	Hettich EBA 20
KOİ reaktörü	Lovibond ET 125 SC
Sıcaklık Ölçer ve pH Metre	Hanna instruments pH 301
İletkenlik Ölçer	Radiometer Pioneer 30
Hassas Tartı	Scaltech SBC 31

4.3. Tayin Yöntemi

Belirli zaman aralıklarında alınan numunelerde; pH, iletkenlik, sıcaklık ve KOİ derişimleri belirlenmiştir. Alınan numuneler öncelikle 3 dk. süreyle 5000 devir/dk hızla santrifüjlenmiş daha sonra analizleri yapılmıştır. KOİ derişimleri, standart metotla 5220 no’lu yöntem kullanılarak ölçülmüştür [29]. pH ve sıcaklık Orion marka pH metreyle, iletkenlik ise İnolab marka iletkenlik ölçer yardımıyla ölçülmüştür.

4.4. Deney Sonuçlarının Hesaplanmasında Kullanılan Eşitlikler

Deneysel çalışmaların sonuçlarının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

KOİ hesaplanması

$$KOİ \text{ (mg/L)} = \frac{8000 \times C \times (V_1 - V_2)}{V_0} \quad (4.1)$$

C: Standardizasyon değeri

V₁: Kör için harcanan DAS hacmi

V₂: Örneğin titrasyon hacmi

V₀: İlk örnek hacmi

Yüzde giderim

$$\%Giderim = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (4.2)$$

C₀:Başlangıç KOİ derişimi

C:t anındaki KOİ derişimi

Enerji tüketimi

$$\text{Enerji tüketimi [kWh/m}^3] = \frac{V \times I \times t}{V_{\text{çözelti}}} \quad (4.3)$$

I: Akım (A)

V_{çözelti}: Çözelti hacmi (L)

t: zaman (s)

4.5. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

Çalışmalar; gerçek mezbaha atıksuyunun elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemi ile kesikli geri döngülü akışta farklı akım yoğunluklarında (i: 10, 20, 30 ve 40 mA/cm²), değişen destek elektrolit derişimlerinde (0,05, 0,1 ve 0,2 M Na₂SO₄), farklı pH değerlerinde (orijinal pH, pH=3, pH=5 ve pH=9), farklı hidrojen peroksit derişimlerinde (0,02, 0,04 ve 0,08 M H₂O₂), farklı akış hızlarında (240 mL/dk., 600 mL/dk., 1000 mL/dk. ve 1400 mL/dk.) ve 0,24 g/L anyonik polielektrolit derişiminde gerçekleştirilmiştir. İşlem gören atıksu hacmi tüm deneysel çalışmalarda 800 mL'dir.

4.5.1. Akım yoğunluğunun etkisi

90 dakika boyunca her 15 dakikada bir alınan örneklerde ham atıksudaki KOİ giderimi incelenmiştir. Farklı akım yoğunluklarında harcanan enerji miktarları da hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.2, 4.3, 4.4, ve 4.5'te verilmiştir. Farklı akım yoğunluklarının KOİ derişimine, yüzde giderime ve enerji tüketimine etkilerinin zamanla değişimi de Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4' te gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	9,30	7,10	6,00	12,25	840	0	0,00
15	22,10	9,37	8,90	9,22	672	20	18,91
30	22,40	9,60	9,40	8,26	470	44	38,89
45	22,60	9,75	9,80	7,76	437	48	59,71
60	22,40	9,78	10,20	7,70	403	52	81,39
75	22,70	9,96	10,60	7,20	336	60	103,91
90	22,50	10,00	11,00	7,15	269	68	127,29

Çizelge 4.3. $i = 20 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

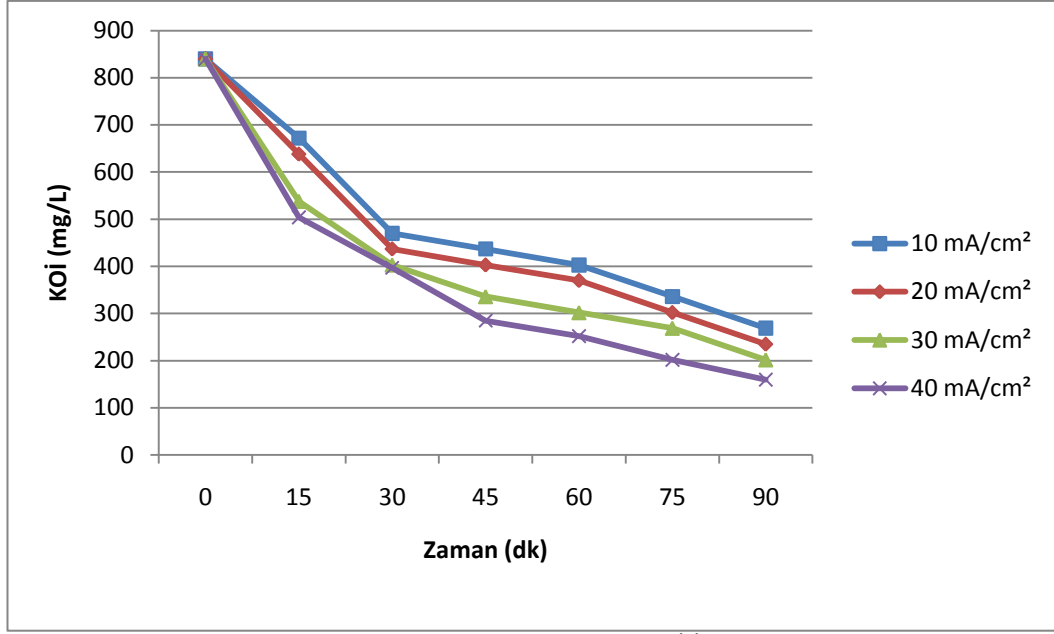
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	22,50	7,10	9,70	12,00	840	0	0,00
15	22,90	9,08	14,40	9,40	638	24	61,20
30	23,40	9,51	16,50	7,96	437	48	131,33
45	23,60	9,78	18,00	7,14	403	52	207,83
60	25,10	9,98	19,00	6,38	370	56	288,58
75	26,50	10,16	20,50	6,30	302	64	375,70
90	28,40	10,45	20,60	6,15	235	72	463,25

Çizelge 4.4. $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

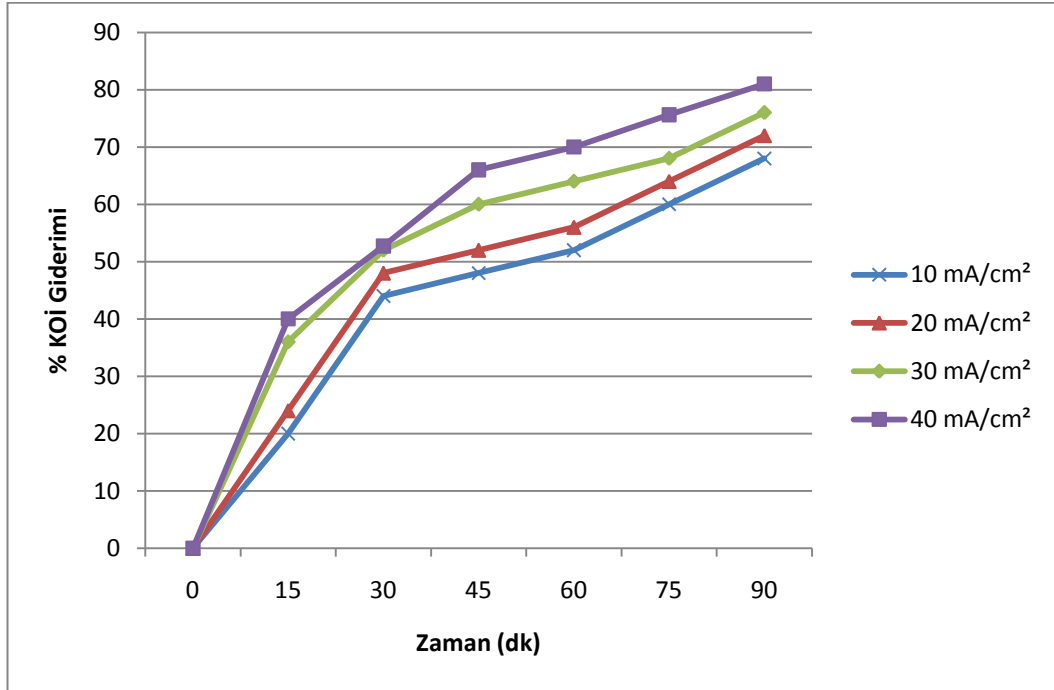
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	11,30	7,10	15,10	12,47	840	0	0,00
15	27,10	8,90	19,00	9,70	538	36	121,13
30	27,20	9,53	21,70	8,25	403	52	259,46
45	28,60	9,67	23,80	2,65	336	60	411,19
60	28,60	9,75	25,70	1,53	302	64	575,03
75	27,80	9,95	27,20	0,90	269	68	748,43
90	26,40	10,32	29,00	0,74	202	76	933,30

Çizelge 4.5. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 600 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

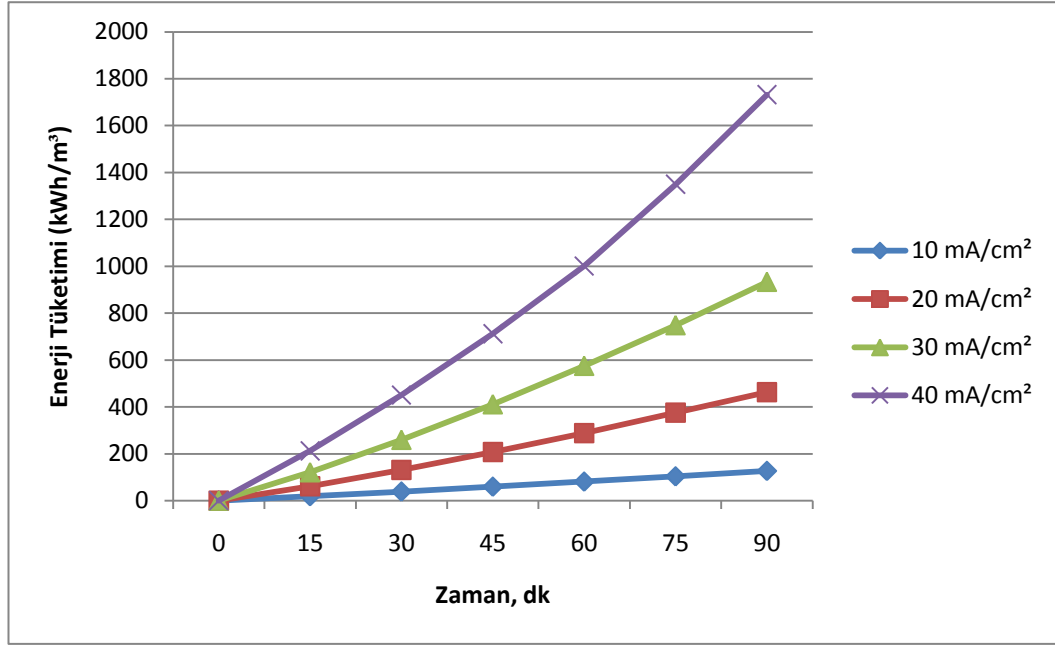
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	19,80	7,10	20,60	12,50	840	0	0,00
15	32,00	9,35	25,00	9,70	504	40	212,50
30	34,80	9,96	28,00	7,60	397	52,7	450,50
45	35,10	10,35	30,80	1,15	285	66	712,30
60	32,60	11,00	34,00	1,00	252	70	1001,30
75	24,10	11,05	41,00	0,80	202	75,6	1349,80
90	24,30	11,20	45,00	0,70	159,6	81	1732,30



Şekil 4. 2. Akım Yoğunluğu – KOİ İlişkisi



Şekil 4.3. Akım Yoğunluğu - % KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 4.4. Akım Yoğunluğu – Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

4.5.2. Destek elektrolit derişiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğunda, akış hızı 600 mL/dk, ve pH 7,1 olduğunda 0,05, 0,1 ve 0,2 M Na₂SO₄ derişiminin enerji tüketimi, KOİ derişimi ve yüzde giderim üstündeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8’ de, zamanla derişimleri ise Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,05 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

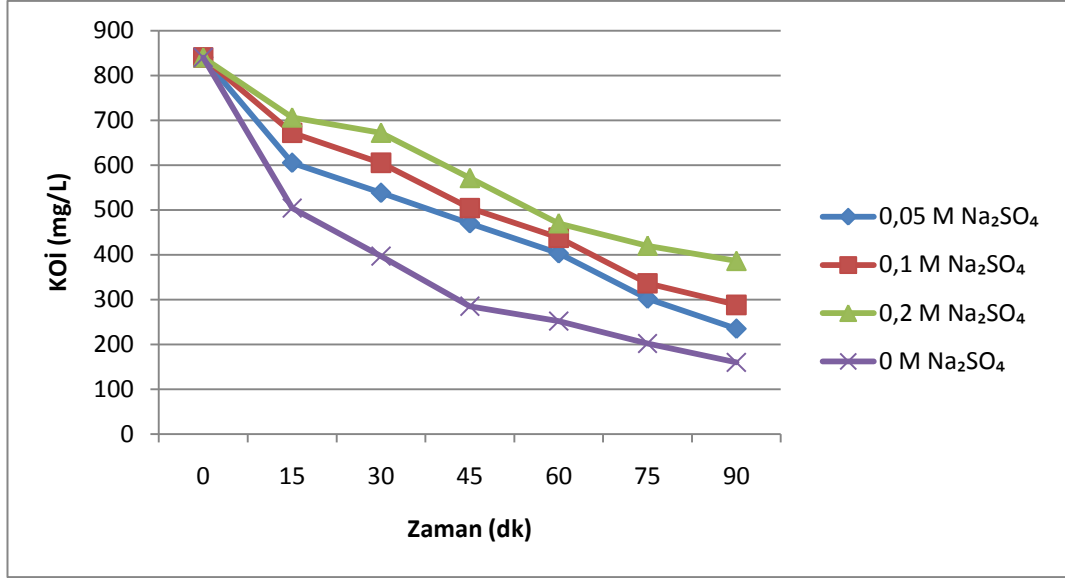
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	9,30	7,10	6,00	17,12	840	0	0,00
15	22,30	12,560	6,20	16,97	672	20	52,70
30	22,90	13,420	7,20	16,80	605	28	113,90
45	22,90	13,470	7,40	16,64	504	44	176,80
60	23,00	13,510	7,70	13,90	438	48	242,25
75	23,10	13,530	7,90	9,80	336	60	309,40
90	22,40	13,600	8,20	2,23	288	66	379,10

Çizelge 4.7. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi $0,1 \text{ M}$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

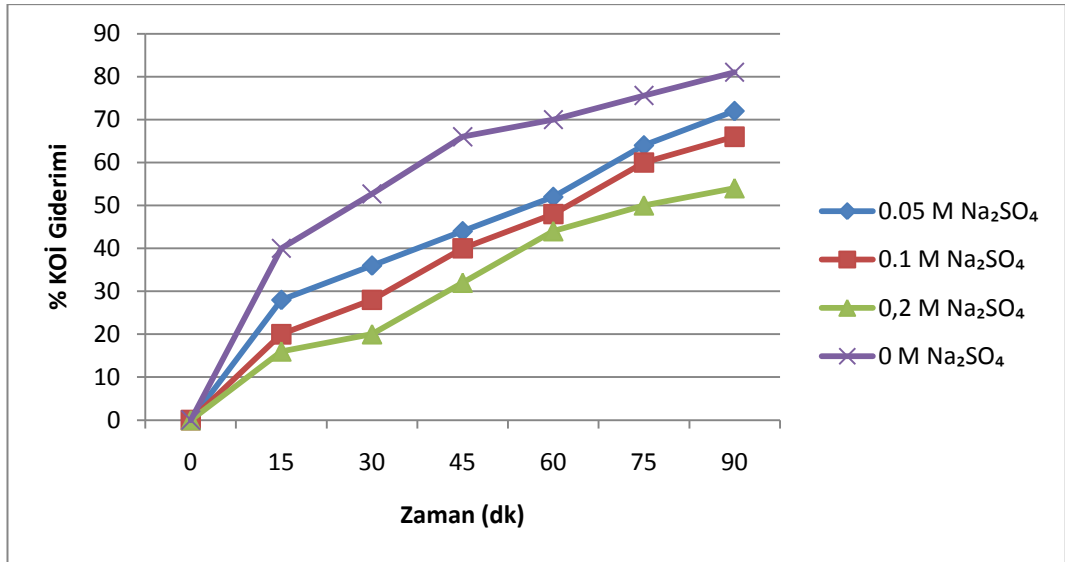
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	10,10	7,10	7,20	15,60	840	0	0,00
15	24,00	12,44	11,40	13,00	605	28	96,90
30	25,10	13,15	12,90	12,60	538	36	206,55
45	26,70	13,18	14,90	12,40	470	44	333,20
60	26,80	13,27	16,40	11,60	403	52	472,60
75	27,00	13,28	17,70	10,80	302	64	623,05
90	28,20	13,30	18,60	10,30	235	72	781,15

Çizelge 4.8. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi $0,2 \text{ M}$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

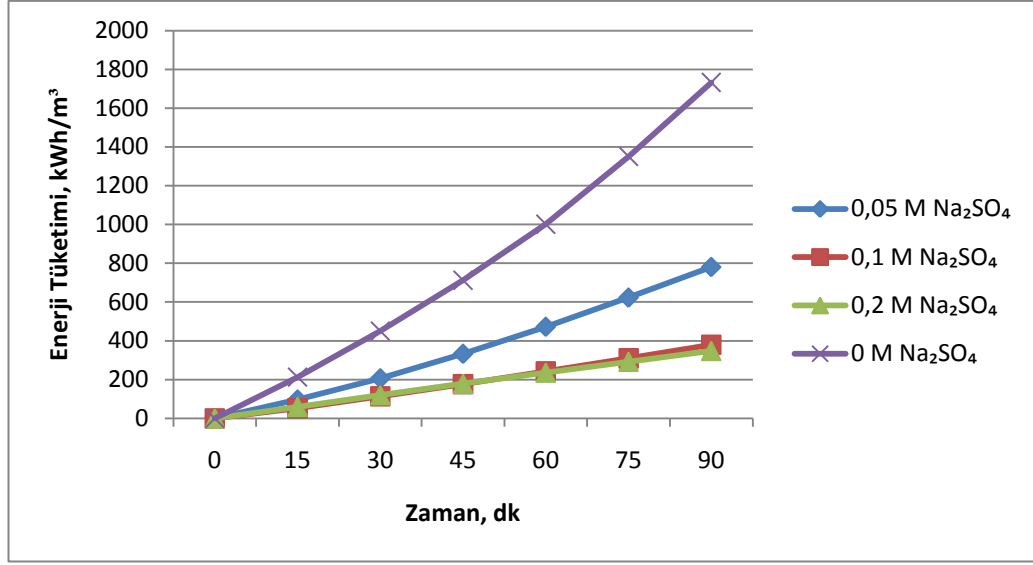
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	15,60	7,10	4,70	38,70	840	0	0,00
15	24,80	13,23	7,00	36,00	706	16	59,50
30	24,90	13,71	7,10	30,00	672	20	119,85
45	24,90	13,76	7,00	29,80	571	32	179,35
60	24,90	13,80	6,70	29,60	470	44	236,30
75	24,50	13,90	6,60	29,40	420	50	292,40
90	24,60	13,95	6,60	29,00	386	54	348,50



Şekil 4.5. Destek Elektrolit – KOİ İlişkisi



Şekil 4.6. Destek Elektrolit – % KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 4.7. Destek Elektrolit – Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

4.5.3. pH değişiminin etkisi

Atıksuyun başlangıç pH'ları 3, 5, orijinal (7,1) ve 9 şeklinde ayarlanarak yapılan deneyler sonucu her bir pH için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 4.7, 4.9, 4.10 ve 4.11' de verilmiştir. En yüksek KOİ giderimi Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'dan da görüleceği gibi pH 7,1 civarında bulunmuştur. Arıtılan atıksu hacmi başına enerji tüketimi için en iyi değerler şekil 4.10' da görüldüğü üzere pH 7,1 olan orijinal pH'da elde edilmiştir. pH 7,1'de KOİ derişimi 288 mg/L, KOİ giderim verimi % 66 ve enerji tüketimi 379,10 kWh/m³ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. pH=3, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

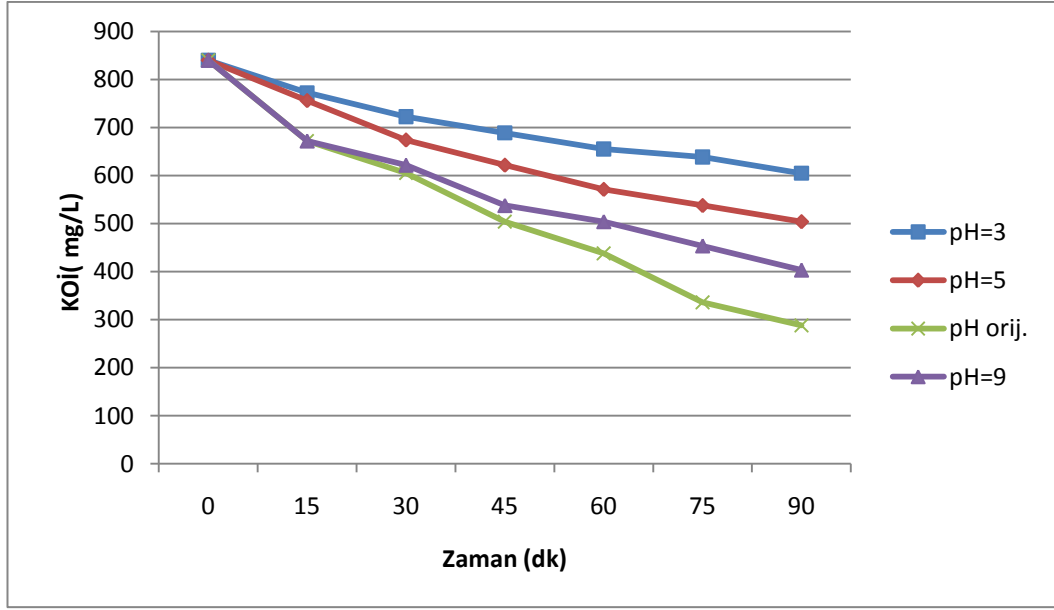
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	17,50	3,00	5,50	22,76	840	0	0,00
15	22,30	12,83	9,70	22,60	772,1	8	82,45
30	23,00	13,33	12,30	19,40	722,4	14	187,00
45	23,10	13,45	12,80	19,00	688,8	18	295,80
60	23,10	13,49	13,70	18,80	655,2	22	412,25
75	23,20	13,52	14,10	18,40	638,4	24	532,10
90	23,20	13,54	14,50	18,00	604,8	28	655,35

Çizelge 4.10. pH=5, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

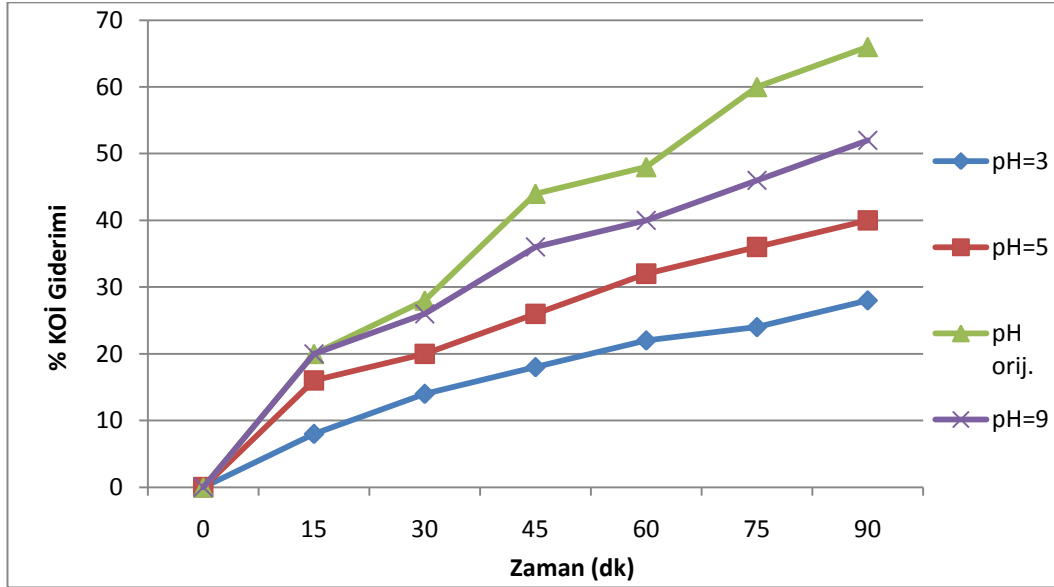
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	22,00	5,00	6,00	22,60	840	0	0,00
15	24,90	13,43	10,50	21,60	756	10	89,25
30	26,30	13,46	13,10	20,90	674	20	200,60
45	27,50	13,49	14,10	20,60	621,6	26	320,45
60	27,80	13,5	14,40	20,30	571,2	32	442,85
75	29,00	13,52	14,70	20,00	537,6	36	567,80
90	29,00	13,55	15,10	19,80	504	40	696,15

Çizelge 4.11. pH=9, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

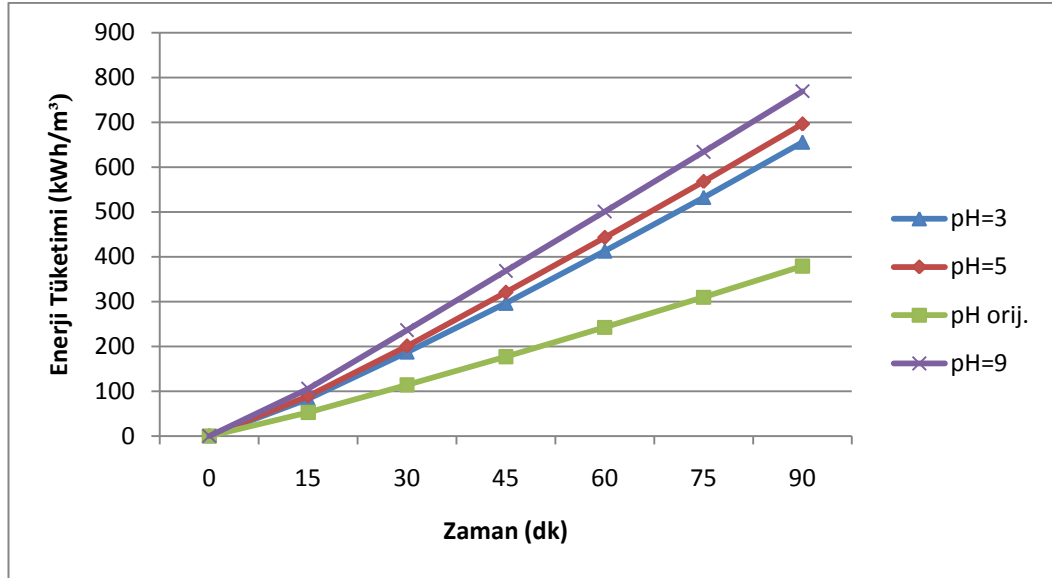
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	18,20	9,00	5,80	22,90	840	0	0,00
15	24,00	12,87	12,40	22,00	672	20	105,40
30	26,00	13,17	15,40	20,80	621,6	26	236,30
45	28,00	13,19	15,50	19,90	537,6	36	368,05
60	28,30	13,30	15,60	19,75	504	40	500,65
75	28,50	13,38	15,70	19,50	453,6	46	634,10
90	28,80	13,40	15,90	19,20	403,2	52	769,25



Şekil 4.8. pH Değişimi- KOİ İlişkisi



Şekil 4.9. pH Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi



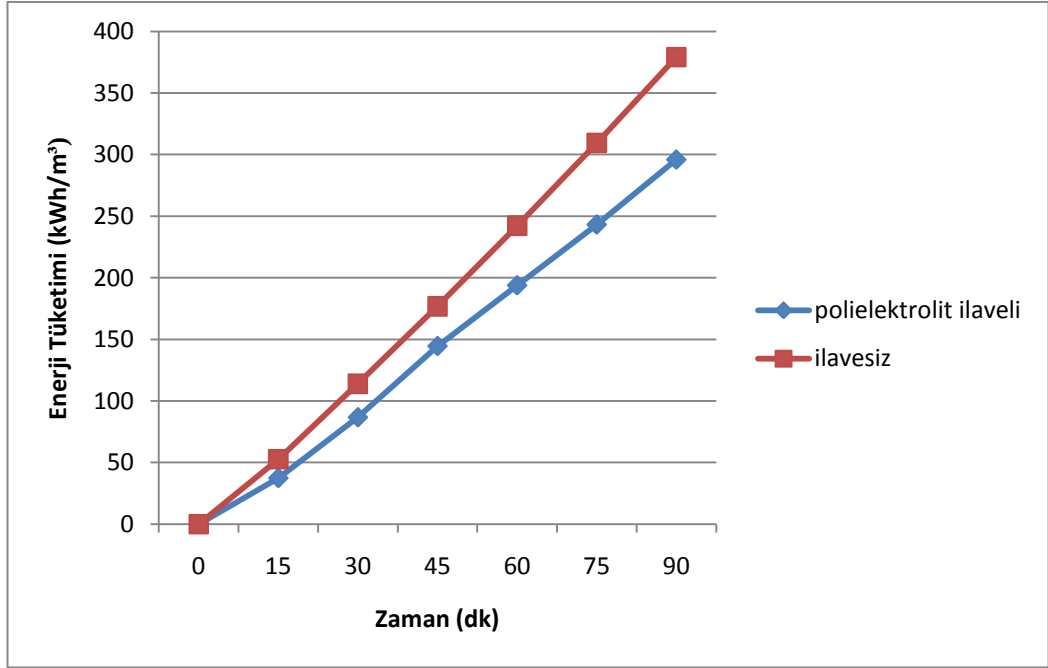
Şekil 4.10. pH Değişimi-Enerji Tüketimi İlişkisi

4.5.4. Polielektrolit derişiminin etkisi

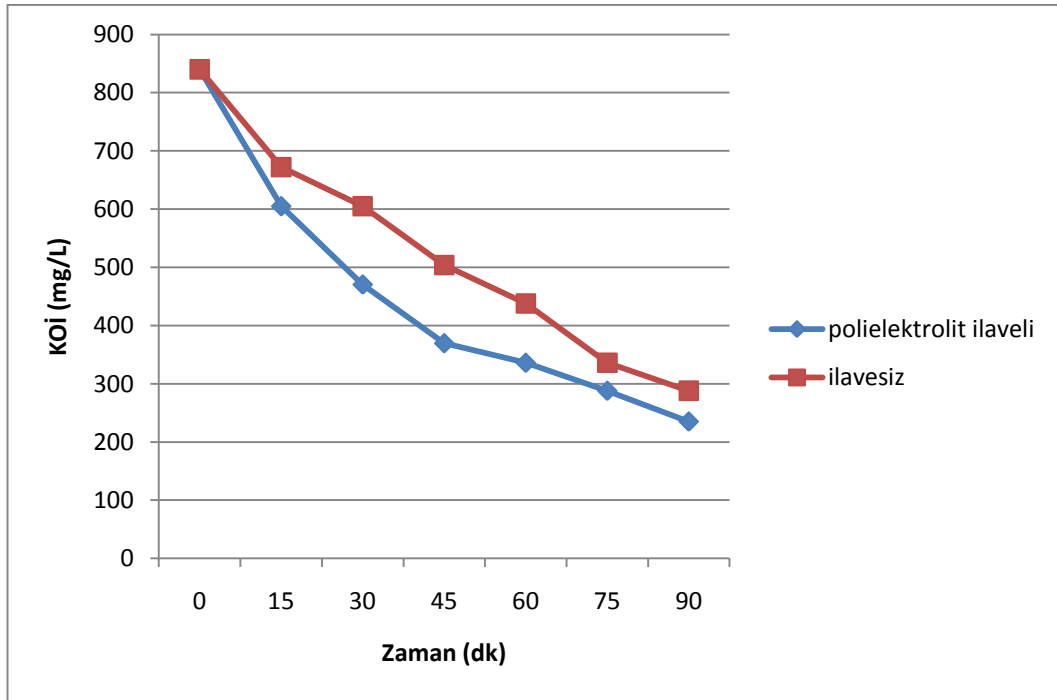
40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,1 M Na₂SO₄ derişiminde üretici firmanın önerdiği derişim olan 0,24 g/L anyonik polielektrolit eklenmesi ile yapılan deneyde; KOİ derişimi, yüzde giderim ve enerji tüketimi incelenmiştir. Polielektrolit ilavesinin KOİ giderim verimini artırdığı, enerji tüketimini ise azalttığı gözlenmiştir. Deney sonuçları sırasıyla Çizelge 4.12 ve Şekil 4.11-4.13' te verilmiştir.

Çizelge 4.12. pH=7,1, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, akış hızı 600 mL/dk , destek elektrolit derişimi 0,1 M ve 0,24 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

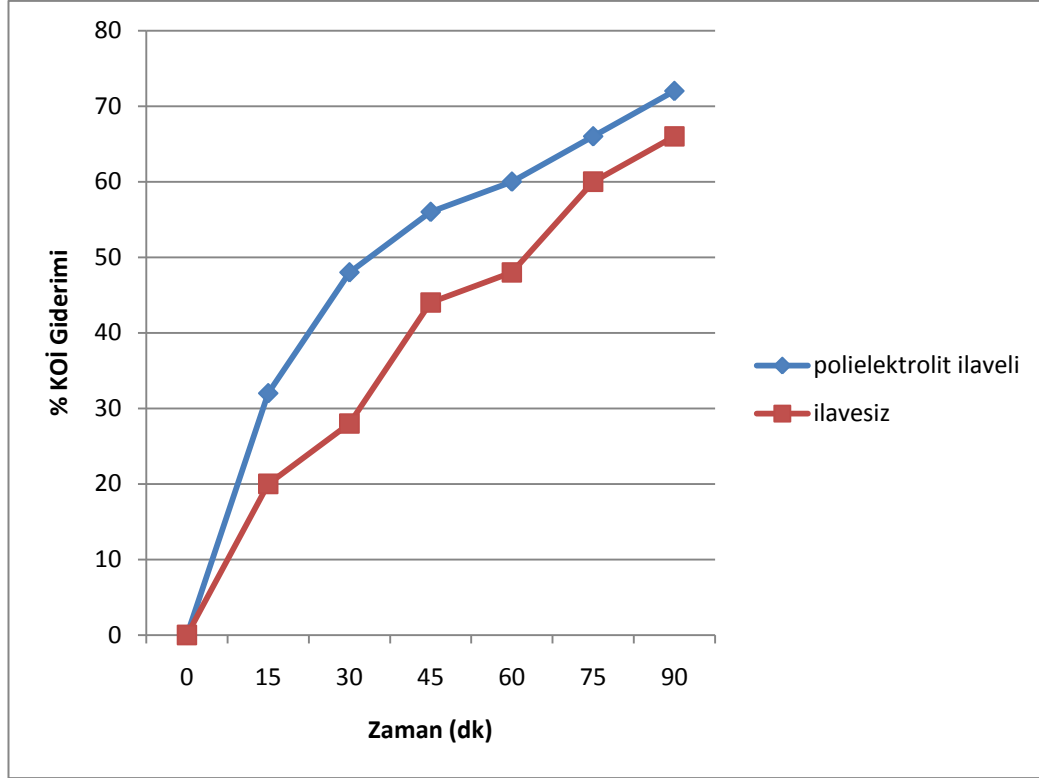
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8,50	7,10	7,40	24,36	840	0	0,00
15	21,20	13,40	4,40	23,00	571,2	32	37,40
30	22,70	13,51	5,80	22,60	436,8	48	86,70
45	24,50	13,58	6,80	22,30	369,6	56	144,50
60	23,60	13,62	5,80	21,70	336	60	193,80
75	23,70	13,63	5,80	21,50	288	66	243,10
90	23,70	13,65	6,20	21,40	235,2	72	295,80



Şekil 4.11. Polielektrolit-Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi



Şekil 4.12. Polielektrolit-KOİ İlişkisi



Şekil 4.13. Polielektrolit-% KOİ Giderimi İlişkisi

4.5.5. Hidrojen peroksit (H_2O_2) derişimi etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu, 600 mL/dk. akış hızında, 0,1 M Na₂SO₄ ilavesi ile ve pH 3,0'da 0,02 M, 0,04M ve 0,08 M H₂O₂ ile deneyler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Artan H₂O₂ derişiminin KOİ giderim veriminin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Deney sonuçları sırasıyla Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15 ve Şekil 4.14-4.16' da verilmiştir.

Çizelge 4.13. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=3$, akış hızı 600 mL/dk , $0,02 \text{ M H}_2\text{O}_2$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

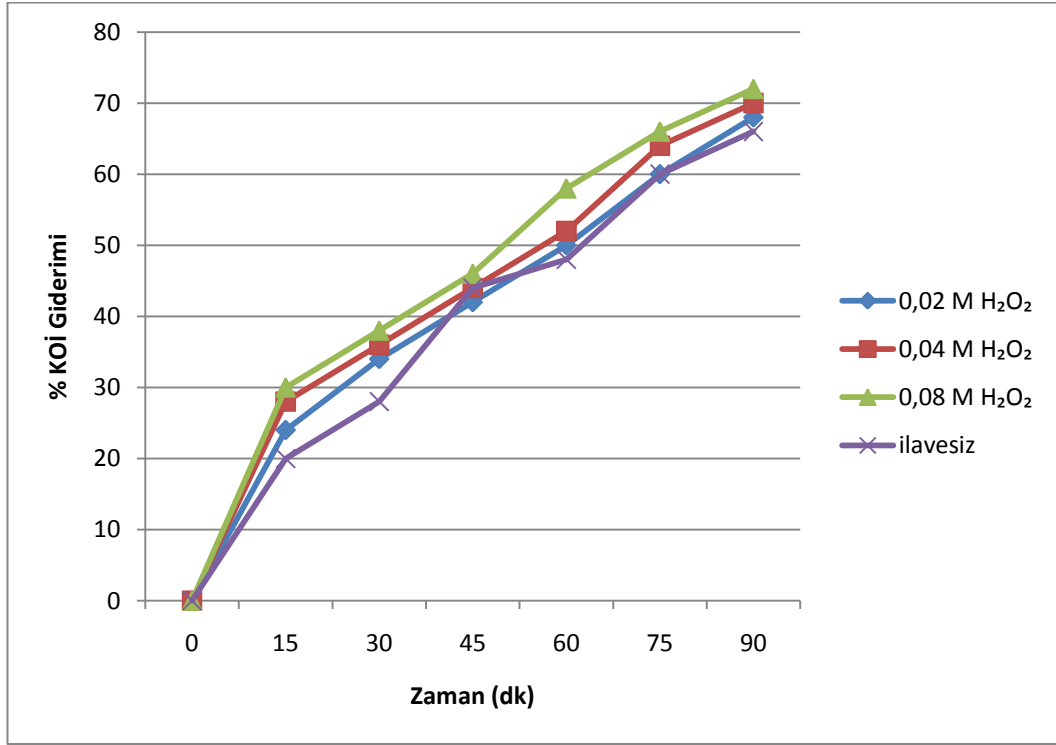
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	11,90	3,00	5,10	14,10	840	0	0,00
15	21,80	8,15	4,20	13,84	638,4	24	35,70
30	22,00	12,73	4,20	13,59	554,4	34	71,40
45	22,10	12,95	4,20	13,40	487,2	42	107,10
60	22,30	13,46	4,30	13,00	420	50	143,65
75	22,50	13,57	4,20	12,50	336	60	179,35
90	22,50	13,60	4,30	11,80	268,8	68	215,90

Çizelge 4.14. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=3$, akış hızı 600 mL/dk , $0,04 \text{ M H}_2\text{O}_2$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

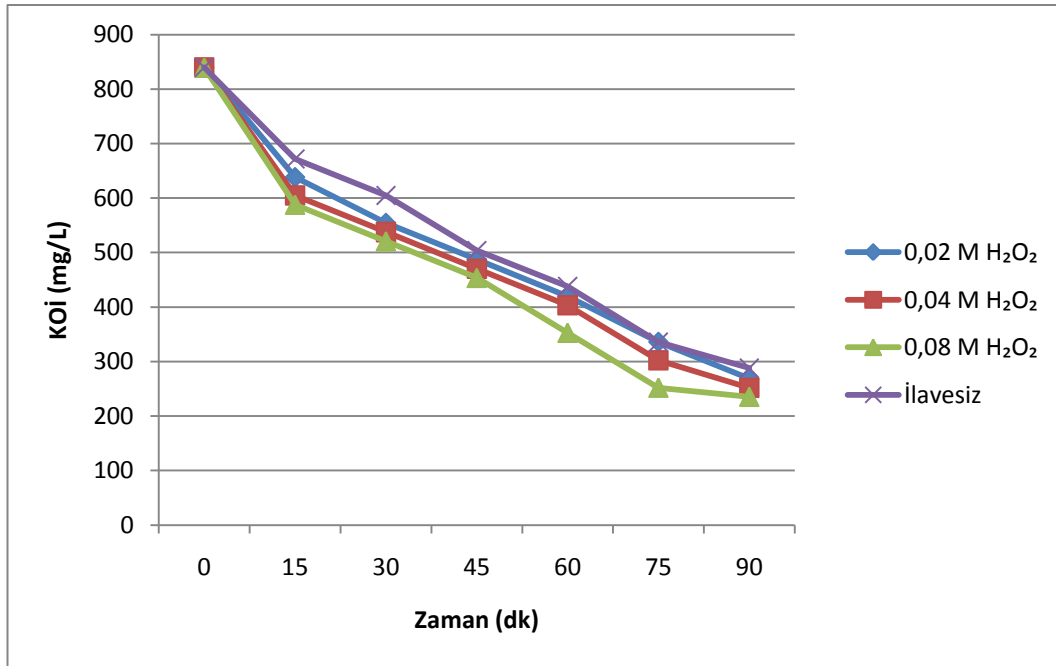
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	9,50	3,00	6,70	19,75	840	0	0,00
15	21,50	12,59	5,10	18,80	604,8	28	43,35
30	21,90	13,44	5,30	15,40	537,6	36	88,40
45	22,00	13,58	5,30	13,90	470,4	44	133,45
60	22,20	13,61	4,50	13,20	403,2	52	171,70
75	22,20	13,63	4,40	11,80	302,4	64	209,10
90	22,30	13,65	4,30	10,50	252	70	245,65

Çizelge 4.15. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=3$, akış hızı 600 mL/dk , $0,08 \text{ M H}_2\text{O}_2$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	9,70	3,00	5,40	19,81	840	0	0,00
15	21,70	9,32	4,40	16,60	588	30	37,40
30	21,90	9,50	4,30	16,45	520,8	38	73,95
45	22,00	10,90	4,10	15,45	453,6	46	108,80
60	22,20	12,30	4,20	15,00	352,8	58	144,50
75	22,30	13,51	4,10	14,30	252	66	179,35
90	22,40	13,60	4,00	13,80	235,2	72	213,35



Şekil 4.14. H₂O₂-% KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 4.15. H₂O₂ – KOİ İlişkisi



Şekil 4.16. H₂O₂ – Enerji tüketimi (kWh/m³) ilişkisi

4.5.6. Akış hızının etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu, 0,1 M Na₂SO₄ ilavesi ile ve pH 7,1’de 240, 600, 1000 ve 1400 mL/dk akış hızlarında deneyler yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Belirtilen akış hızları için deneysel sonuçlar Çizelge 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20’de ve Şekil 4.17-4.19’ da verilmiştir. En iyi KOİ giderim verimi Şekil 4.17’ de de görüldüğü gibi 1400 mL/dk olan akış hızında tespit edilmiştir.. Akış hızına bağlı olarak enerji tüketimi de şekil 4.19’ da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 240 mL/dk , 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

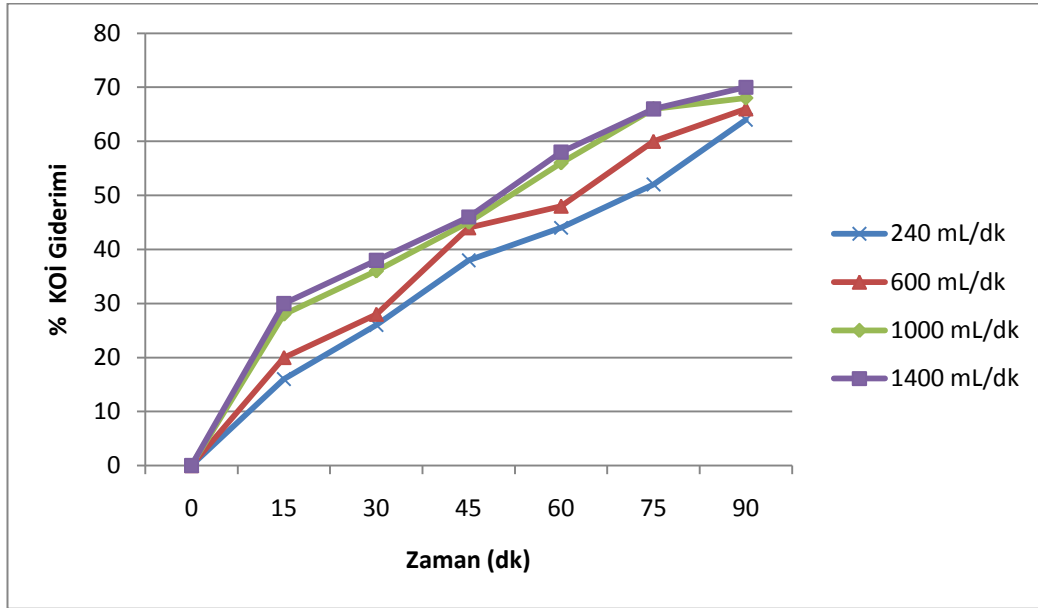
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	7,10	7,10	7,20	19,05	840	0	0,00
15	22,70	13,42	6,00	16,50	705,6	16	51,00
30	23,00	13,46	6,20	16,38	604,8	28	103,70
45	24,30	13,47	7,30	16,28	520,8	38	165,75
60	24,30	13,48	6,60	16,10	470,4	44	221,85
75	23,40	13,50	9,20	15,90	403,2	52	300,05
90	23,60	13,51	9,10	15,80	324,4	64	377,40

Çizelge 4.17. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 1000 mL/dk, 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

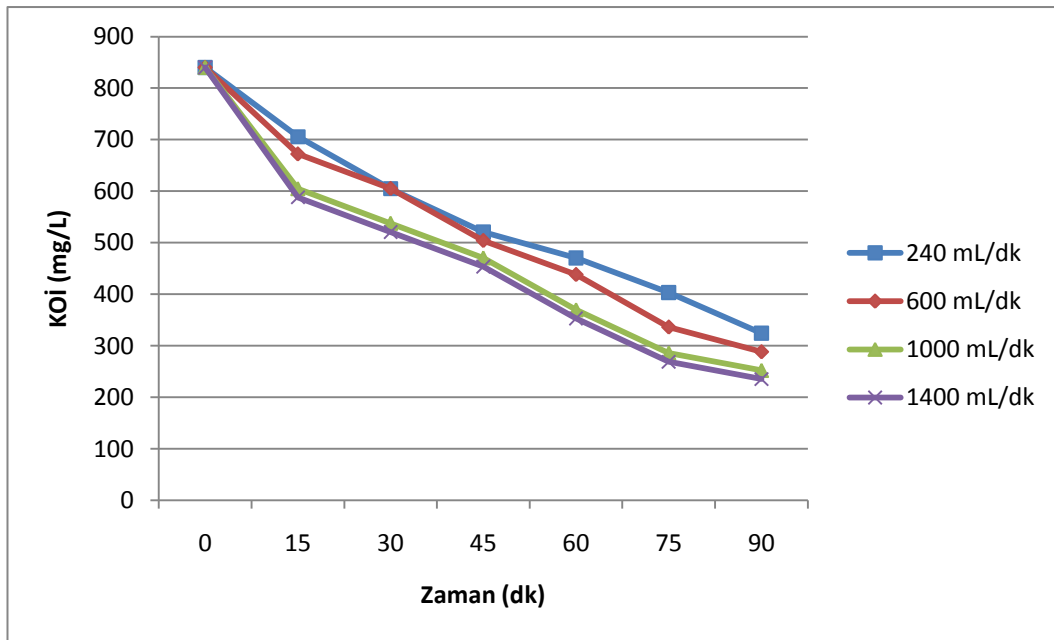
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	9,00	7,10	8,60	21,40	840	0	0,00
15	25,50	13,45	12,50	20,30	604,8	28	106,25
30	27,50	13,51	15,80	20,00	537,6	36	240,55
45	28,00	13,52	17,80	19,80	470,4	44	391,85
60	28,50	13,54	17,10	19,50	369,6	56	537,20
75	28,70	13,56	16,50	19,20	285,6	66	677,45
90	25,20	13,60	14,00	18,17	252	68	796,45

Çizelge 4.18. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 1400 mL/dk , 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

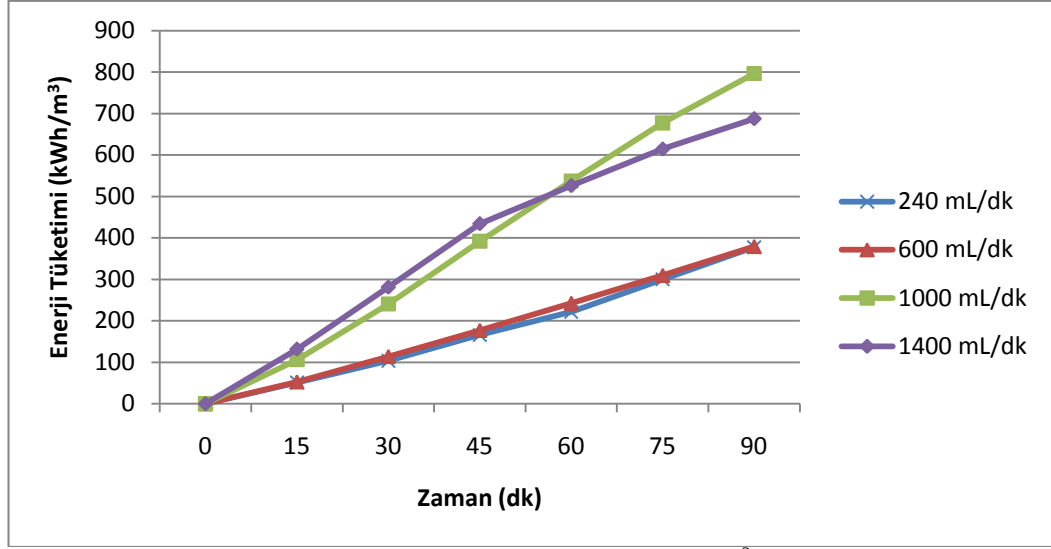
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	12,30	7,10	7,90	21,80	840	0	0,00
15	26,50	13,30	15,50	19,60	588	30	131,75
30	28,50	13,36	17,60	19,30	520,8	38	281,35
45	28,50	13,40	18,00	18,90	453,6	46	434,35
60	28,00	13,45	10,80	18,30	352,8	58	526,15
75	25,30	13,49	10,40	18,20	268,8	68	614,55
90	25,50	13,52	8,60	17,85	235,2	70	687,65



Şekil 4.17. Akış Hızı – % KOİ Giderim İlişkisi



Şekil 4.18. Akış Hızı – KOİ İlişkisi



Şekil 4.19. Akış Hızı - Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

4.5.7. Farklı destek elektrolitin (NaCl) etkisi

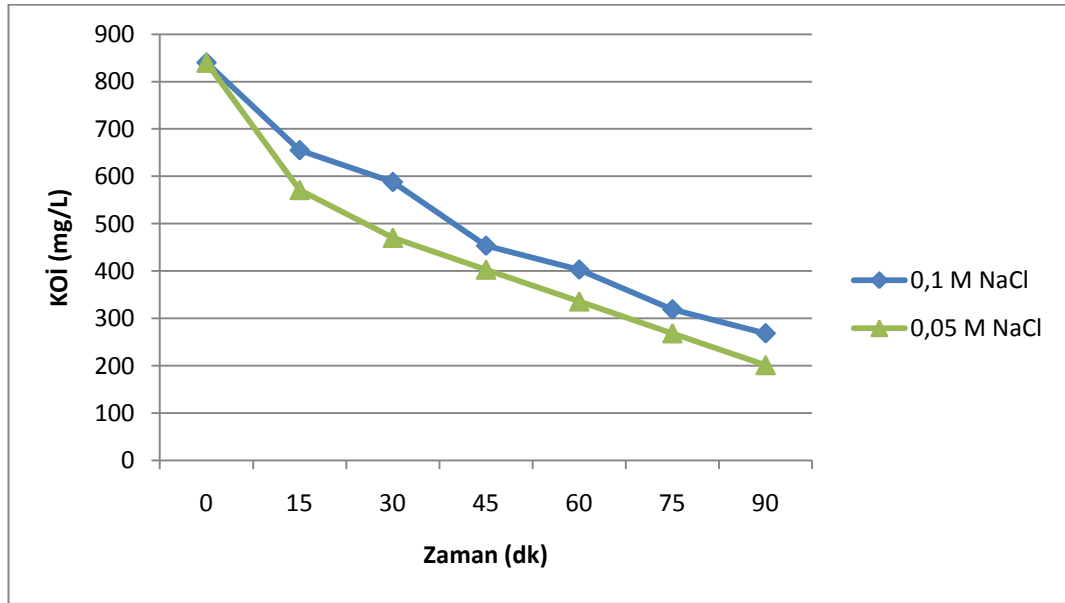
40 mA/cm² akım yoğunluğu, 600 mL/dk akış hızında ve pH 7,1 olduğunda 0,05 ve 0,1 M NaCl ilavesi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Düşük derişimde NaCl eklenmesiyle KOİ giderim verimi artmıştır. NaCl derişiminin artmasıyla % giderimde bir düşüş olmaktadır (Şekil 4.21). Bunun nedeni KOİ derişiminin belirlenmesi sırasında Cl⁻ iyonlarının girişim yapması sonucu değerlerin yüksek çıkması olabilir.

Çizelge 4.19. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH=7,1, akış hızı 600 mL/dk , 0,1 M NaCl ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

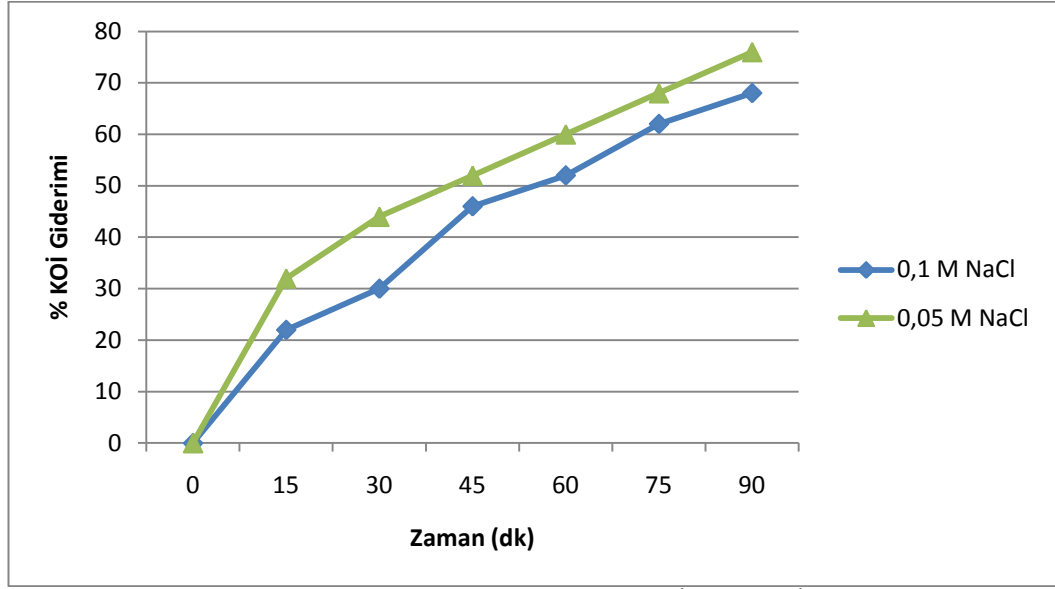
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m³)
0	12,70	7,10	5,80	10,80	840	0	0,00
15	22,40	10,55	5,90	9,74	655,2	22	50,15
30	22,20	12,50	5,00	9,30	588	30	92,65
45	21,90	12,51	5,50	9,15	453,6	46	139,40
60	21,90	12,55	4,40	9,00	403,2	52	176,80
75	21,90	12,62	5,00	8,90	319,2	62	219,30
90	22,20	13,00	5,10	8,65	268,8	68	262,65

Çizelge 4.20. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 600 mL/dk , $0,05 \text{ M NaCl}$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

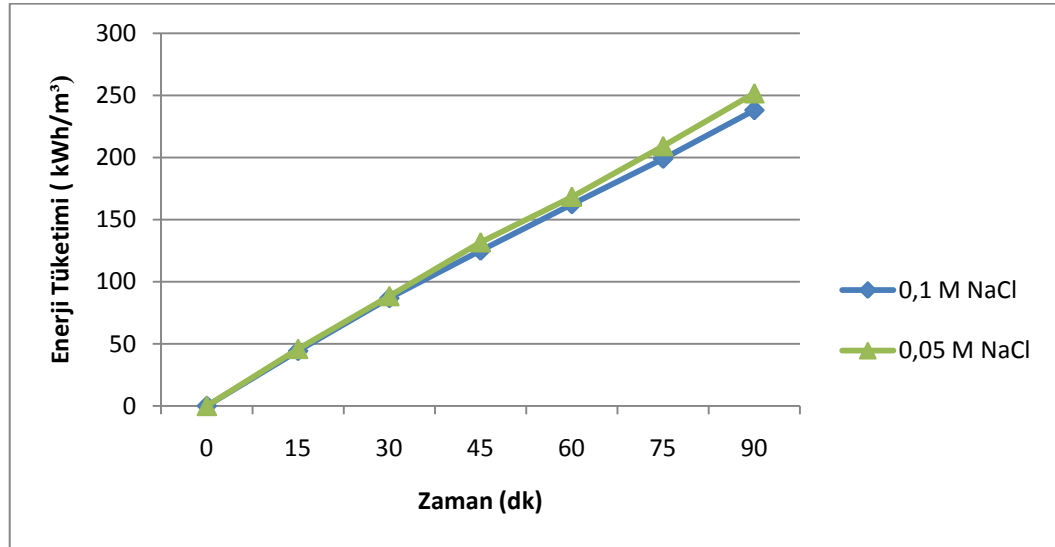
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m^3)
0	13,10	7,10	6,70	11,05	840	0	0,00
15	22,50	1,60	5,40	9,80	571,2	32	45,90
30	22,70	12,45	5,00	9,57	470,4	44	88,40
45	22,50	12,53	5,10	9,50	403,2	52	131,75
60	22,40	12,56	4,30	9,40	336	60	168,30
75	22,50	12,60	4,80	9,32	268,8	68	209,10
90	22,60	12,65	5,00	9,25	201,6	76	251,60



Şekil 4.20. Destek Elektrolit (NaCl) – KOİ İlişkisi



Şekil 4.21. Destek Elektrolit (NaCl) – % KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 4.22. Destek Elektrolit (NaCl) – Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

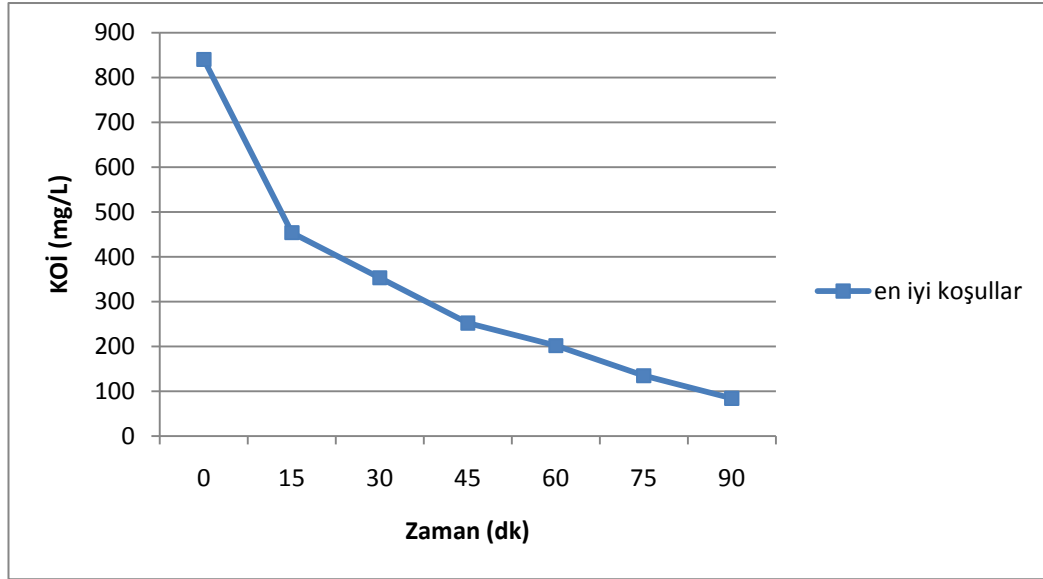
4.5.8. En iyi koşullar belirlenerek yapılan deney sonuçları

Deneylerle KOİ giderim veriminin en yüksek seviyeye ulaştığı koşullar (akım yoğunluğu 40 mA/cm^2 , akış hızı 1400 mL/dk , pH orijinal (7,1) ve $0,24 \text{ g/L}$ anyonik polielektrolit ilaveli) kullanılarak tasarlanan bu elektrokimyasal reaktör

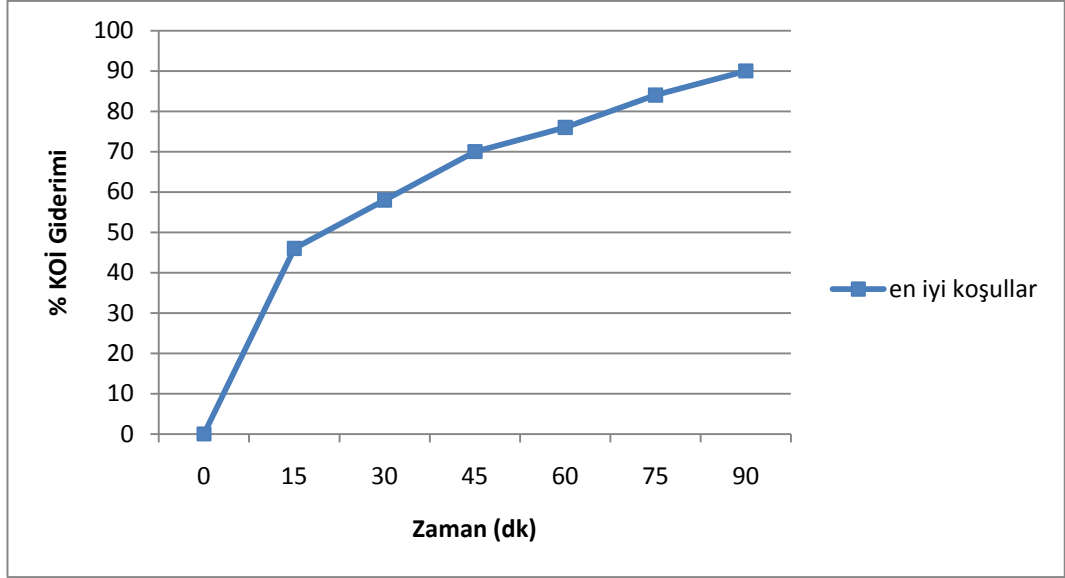
ile ulaşılabilecek en büyük giderim değeri belirlenmek istenmiştir. Elde edilen sonuç  izelge 4.21’de ve şekil 4.23, 4.24 ve 4.25’te görülmektedir.

Çizelge 4.21. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 1400 mL/dk , polielektrolit $0,24 \text{ g/L}$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

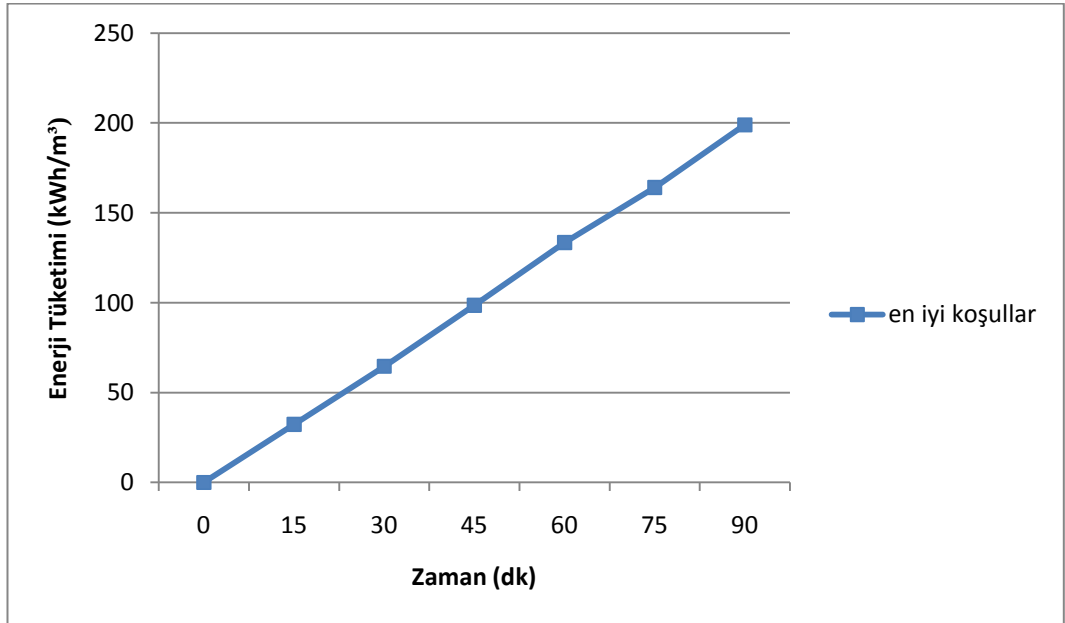
Zaman (dk)	Sıcaklık (�C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8,50	7,10	4,6	12,45	840	0	0,00
15	21,40	12,30	3,8	11,30	453,6	46	32,30
30	21,70	12,34	3,8	11,00	352,8	58	64,60
45	21,70	12,40	4,0	10,75	252	70	98,60
60	21,40	12,52	4,1	10,45	201,6	76	133,45
75	21,40	12,60	3,6	10,08	134,4	84	164,05
90	21,40	12,80	4,1	9,70	84	90	198,90



şekil 4.23. En iyi koşullar altında KOİ Giderimi



Şekil 4.24. En iyi koşullar altında %KOİ Giderimi



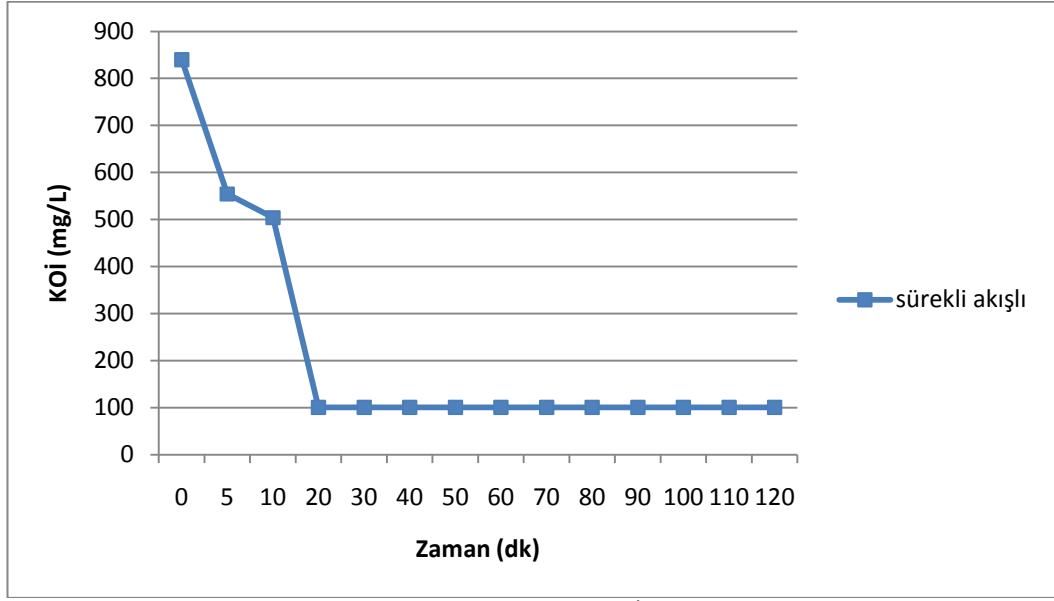
Şekil 4.25. En iyi koşullar altında enerji tüketimi

4.5.9. Sürekli sistemle yapılan deney sonuçları

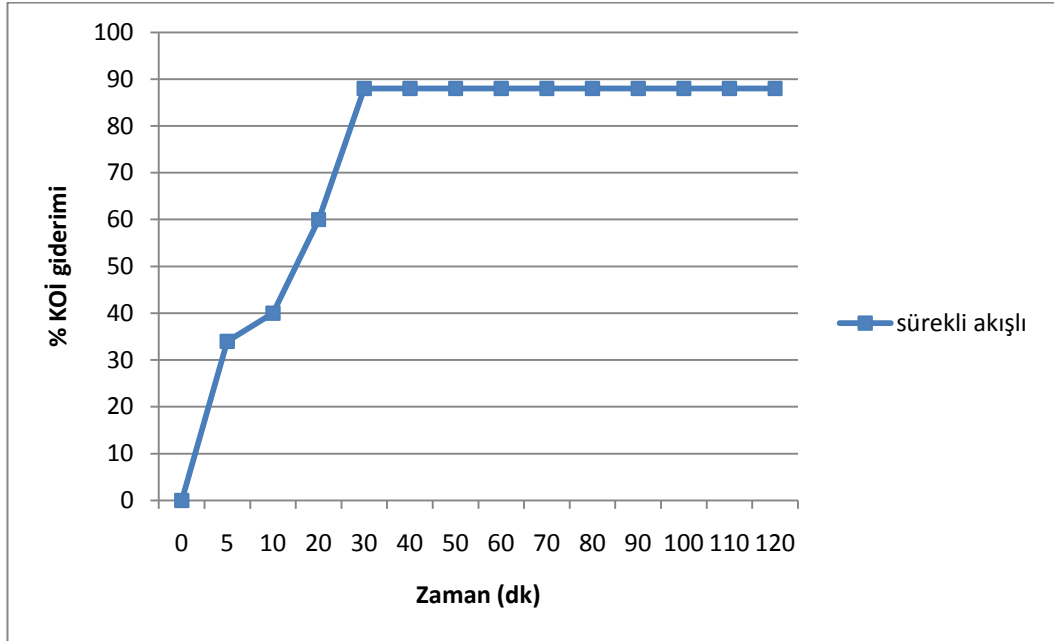
Kesikli geri döngülü akış koşullarında yapılan deneylerin ardından sistemin sürekli akış koşulunda verimi incelenmiştir. Akış hızı 32 mL/dk (21 dk alıkonma süresi), akım yoğunluğu 40 mA/cm² ve orijinal pH' da atıksu reaktörden sürekli (tek geçiş) geçirilmiştir. Deneye ait sonuçlar Çizelge 4.22'de verilmiştir. 120 dakika boyunca KOİ'deki değişim ve yüzde giderimdeki değişim Şekil 4.26-4.27'de görülmektedir. Şekil 4.26'dan da görüleceği gibi sistem yaklaşık 30 dakika içinde yatışkın hale erişmiş ve 30. dakikadan itibaren atıksuyun çıkış KOİ'si sabit duruma gelmiştir. 120 dakikalık işlem sonunda başlangıç KOİ derişimi 840 mg/L'den 100,8 mg/L değerine inerek % 88'lik bir giderime ulaşılmıştır. 32 mL/dk akış hızı ile 21 dk reaktörde alıkonma süresi boyunca reaktörün elektrik enerjisi tüketimi 50,78 kWh/m³ olmuştur. Bu sonuca göre 21 dk alıkonma süresi ile %88 giderim verimi elde edilmiştir.

Çizelge 4.22. i = 40 mA/cm², pH=7,1, akış hızı 32 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	7,8	7,10	7,1	14,80	840	0
5	20,4	8,40	4,5	14,50	554,4	34
10	21,5	8,52	4,1	14,62	504	40
20	21,5	8,75	4,1	14,80	336	60
30	22,2	8,90	4,2	15,02	100,8	88
40	22,1	8,95	3,6	15,25	100,8	88
50	22,4	8,93	3,6	15,13	100,8	88
60	22,5	8,97	3,6	15,32	100,8	88
70	23,0	9,01	3,7	15,45	100,8	88
80	23,2	8,95	3,8	15,38	100,8	88
90	23,4	8,93	3,6	15,52	100,8	88
100	23,4	8,86	3,6	15,60	100,8	88
110	23,7	8,93	3,7	15,63	100,8	88
120	23,8	8,95	3,7	15,70	100,8	88



Şekil 4.26. Sürekli akışta KOİ Giderimi



Şekil 4.27. Sürekli akışta % KOİ Giderimi

4.5.10. İşletme maliyeti ve akım verimi

Sistemin işletilmesi sırasında ortaya çıkan masrafların toplamına işletme maliyeti adı verilir. Yapılan deneyler sırasında kullanılan kimyasal maddeler, tüketilen elektrik ve harcanan demir miktarı işletme maliyetlerinin bir parçasıdır.

$$\text{İşletme Maliyeti} = \text{Kullanılan kimyasal maddelerin maliyeti} + \text{tüketilen elektriğin maliyeti (EP için)} + \text{harcanan demirin maliyeti} \quad (4.4)$$

Elektrik tüketimleri kWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Harcanan teorik demir miktarı ise Faraday'ın ikinci yasası yardımıyla hesaplanabilir.

En İyi Koşullarda İşletme Maliyeti ve Akım Verimi

En iyi koşullar olan $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH} = 7$, $1, 1400 \text{ mL/dk}$ akış hızında ve $0,24 \text{ g/L}$ anyonik polielektrolit ilavesiyle yapılan çalışmanın maliyeti aşağıda hesaplanmıştır.

i) *Kimyasal Madde Maliyeti:* S.K.Y.Y'nin mezbaha tesislerine yönelik KOİ boşaltım sınır değeri olan 250 mg/L değerinin elde edildiği 45 dakikalık elektrokimyasal pıhtılaştırma işlemi için;

Harcanan anyonik polielektrolit miktarı $0,24 \text{ g/L}$ 'dir.

Anyonik polielektrolit fiyatı $7,92 \text{ TL / kg}$ 'dır.

$$\text{Kullanılan kimyasal maddenin maliyeti (TL)} = \text{Kimyasal madde miktarı} \times \text{kimyasal madde birim fiyatı} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7 kullanılarak

$$\begin{aligned} \text{Kimyasal madde maliyeti (TL)} &= 0,24 \frac{\text{g}}{\text{L}} \times 7,92 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 1,9008 \text{ TL/m}^3 \text{ arıtılan atıksu} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

ii) *Elektrik Maliyeti*: S.K.Y.Y'nin mezbaha tesislerine yönelik KOİ boşaltım sınır değeri olan 250 mg/L değerine yaklaşık 45 dakikada ulaşılmıştır. Bu nedenle boşaltım sınırına inildiği zaman göz önüne alınarak elektrik enerjisi tüketimi hesaplanmıştır.

Deneyler sırasında atıksu arıtımı için harcanan elektriğin maliyeti

Belirtilen deney için elektrik tüketimi 98,60 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır.

Arıtım için harcanan elektrik maliyeti (TL) = Elektrik tüketimi x atıksu hacmi x elektrik birim fiyatı (4.8)

Denklem 4.8'den;

$$\begin{aligned} \text{Arıtım için tüketilen elektriğin maliyeti (TL)} &= 98,60 \frac{kWh}{m^3} \times 0,17216 \frac{TL}{kWh} \\ &= 16,975 \text{ TL/m}^3 \quad \text{arıtılan atıksu} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

iii) *Demir Maliyeti*: En iyi koşullarda yapılan 90 dakikalık bu çalışmanın sonucunda pratik olarak harcanan demirin maliyeti hesaplanmıştır.

Deney sonunda demir elektrotun kütle kaybı (m_{deneysel}) 34,50 g. olarak bulunmuştur.

Harcanan Demirin Maliyeti (TL) = Oluşturulan demir miktarı x Demir fiyatı (4.9)

Denklem 4.9'dan;

$$\begin{aligned} \text{Harcanan Demirin Maliyeti (TL)} &= \frac{34,50 \text{ g}}{0,800 \text{ L}} \times 1,059 \frac{TL}{kg} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{m^3} \\ &= 45,6693 \text{ TL/m}^3 \quad \text{arıtılan atıksu} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

iv) Toplam İşletme Maliyeti

En iyi koşullarda gerçekleştirilen deney için gerekli işletme maliyeti Denklem 4.4 kullanılarak;

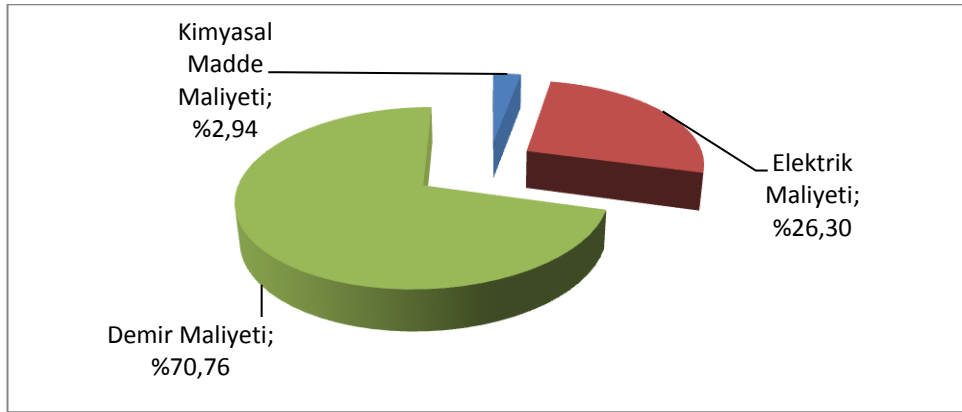
$$\begin{aligned}\text{Toplam İşletme Maliyeti} &= 1,9008 + 16,975 + 45,6693 \\ &= 64,5451 \text{ TL/ m}^3 \text{ arıtılan atıksu}\end{aligned}$$

olarak bulunmuştur.

İşletme maliyetine katılan kalemlerin toplam maliyetteki payları Çizelge 4.24'te ve Şekil 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.23. İşletme maliyetleri ve payları

	Maliyet (TL/m ³)	Pay (%)
Kimyasal	1,9008	2,94
Elektrik	16,975	26,30
Demir	45,6693	70,76
Toplam	64,5451	100,00



Şekil 4.28. İşletme maliyetindeki kalemlerin payları

v) Akım Verimi

Laboratuvar ölçekli EP reaktöründe anodik elektrokimyasal çözünmeden oluşan teorik metal üretimi Faraday'ın ikinci yasasından hesaplanabilir [30].

$$m_{\text{teorik}} (\text{mg/s}) = \frac{I M}{F n \bar{e} \frac{g}{1000 \text{ mg}}} \quad (4.5)$$

$$m_{\text{üretilen}} (\text{mg}) = m_{\text{üretim hızı}} t \quad (4.6)$$

Burada;

I : Uygulanan akım (A)

M : Çözünen metalin molekül ağırlığı (g/mol)

F : Faraday sabiti (96485 C/mol) ($N_A q$). Bir mol elektronun sahip olduğu elektrik yükü olarak tanımlanır.

N_A : Avogadro sayısı ($6,02 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}$)

q : bir elektronun yükünün büyüklüğü ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$)

$n\bar{e}$ = Tepkimeye aktarılan elektron sayısıdır. Örneğin Fe (II), elektrokimyasal demir çözünmesinde birincil olarak üretilen ürün ise, $n\bar{e}$ 2 olarak varsayılır.

t = Elektroliz süresi (s)

Oluşan çözünmüş metal üretimi için akım verimi (ϕ), Faraday kanunu ile hesaplanan teorik kayıp ve deney sırasında elektrotlardaki kütle kaybından hesaplanır [31].

$$\phi = (m_{\text{teorik}}/m_{\text{üretilen}}) \times 100 \quad (4.10)$$

Deneyler sırasında çözünmeyle suya geçip pıhtılaştırıcı oluşturan demirin miktarı Faraday'ın ikinci yasası ile hesaplanabilir;

Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak;

$$\begin{aligned} \text{Teorik olarak üretilcek demir miktarı (g)} &= \frac{27,2 \text{ A} \times 55,845 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \times 2} \times 90 \text{ dk} \times \frac{60 \text{ sn}}{1 \text{ dk}} \\ &= 42,51 \text{ g} \end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

Deney sonunda demir elektrotun kütle kaybı (m_{deneysel}) 34,50 g. olarak bulunmuştur.

Akım verimi (%) = $[34,50 \text{ g} / 42,51 \text{ g}] \times 100 = 81,16$ olarak bulunmuştur.

Sürekli Akış Koşulunda İşletim Maliyeti

40 mA/cm² akım yoğunluğunda, atıksuyun orijinal pH' ında ve 32 mL/dk akış hızında (reaktörde alıkonma süresi 21 dk) gerçekleştirilen sürekli akışın sağlandığı sistemde işletim maliyeti, herhangi bir kimyasal madde ilavesi olmadığı için sadece elektrik enerjisi ve elektrot maddesi tüketimi temel alınarak hesaplanmıştır.

i) *Elektrik Maliyeti:* Reaktörde 21 dk. alıkonma süresi sonucunda %88 KOİ giderimi ile başlangıç KOİ derişimi 840 mg/L'den 100,8 mg/L'ye düşürülürken 50,78 kWh/m³ lük elektrik enerjisi tüketilmiştir.

$$\begin{aligned}\text{Elektrik Maliyeti (TL)} &= 50,78 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 0,17216 \frac{\text{TL}}{\text{kWh}} \\ &= 8,742 \text{ TL/m}^3 \text{ arıtılan atıksu}\end{aligned}$$

ii) *Tüketilen Teorik Demir Maliyeti :* 21 dk. boyunca 0,675 L hacimdeki atıksuyun elektrokimyasal pıhtılaştırma işlemi sonucu açığa çıkan demir miktarı Faraday yasası kullanılarak hesaplanabilir.

Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak;

$$\begin{aligned}\text{Teorik olarak üretilecek demir miktarı (g)} &= \frac{27,2 \text{ A} \times 55,845 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \times 2} \times 21 \text{ dk} \times \frac{60 \text{ sn}}{1 \text{ dk}} \\ &= 9,918 \text{ g.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Demir Maliyeti (TL)} &= \frac{9,918 \text{ g}}{0,675 \text{ L}} \times 1,059 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 15,56 \text{ TL/ m}^3 \text{ arıtılan atıksu}\end{aligned}$$

iii) *Toplam İşletme Maliyeti*

Denklem 4.4 kullanılarak;

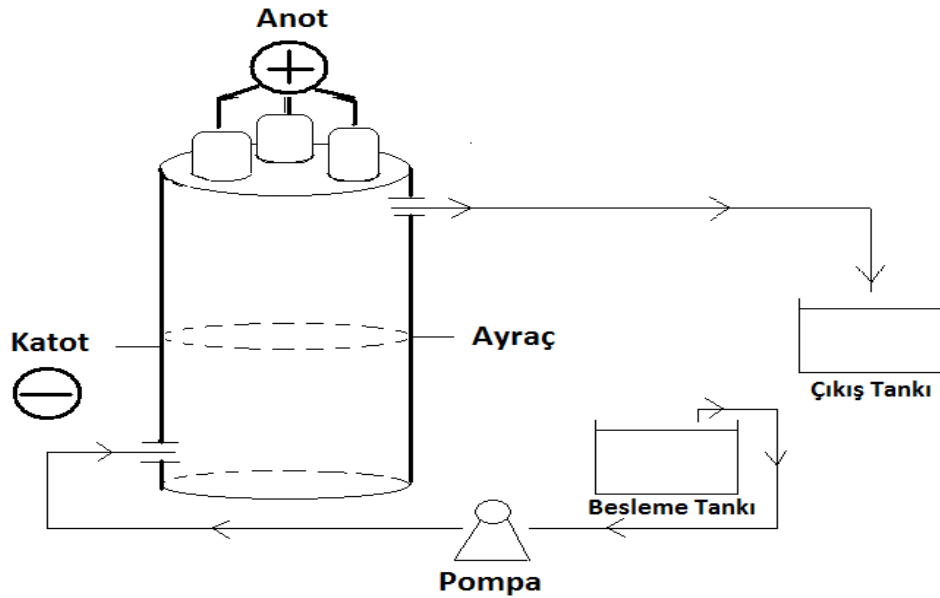
Toplam İşletme Maliyeti = $0 + 8,742 + 15,56 = 24,302 \text{ TL/ m}^3$ arıtılan atıksu olarak hesaplanmıştır.

5. SÜREKLİ SİSTEM İLE KANATLI HAYVAN KESİMhanesi ATIKSUYUNUN ARITIMI

Çalışmada özel bir mezbahadan alınan 9400 mg/L KOİ derişimine sahip kanatlı hayvan kesimhanesi atıksu kullanılmıştır. Düzenekte kullanılan demir boru 75 cm uzunluğunda ve 3,5 cm çapında olup, 72 cm uzunluğunda ve 1,1 cm çapında 3 adet demir çubuk bir tıpa yardımı ile boru içerisine yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerde demir çubuklar anot, reaktör katot olarak kullanılmıştır.

Çalışmalar sürekli akışta farklı akım yoğunluklarında (30 mA/cm^2 , 40 mA/cm^2 ve 50 mA/cm^2), farklı destek elektrolit derişimlerinde (0M, 0,05M ve 0,1M), farklı pH değerlerinde (orijinal pH, pH=3, pH=5 ve pH=9), farklı hidrojen peroksit derişimlerinde (0M, 0,1M, 0,15M ve 0,2M), farklı akış hızlarında (15 mL/dk, 18 mL/dk ve 27 mL/dk) ve farklı derişimlerde pıhtılaştırma yardımcısı katyonik polielektrolit kullanılarak (0,3 g/L, 0,4 g/L ve 0,5 g/L) gerçekleştirilmiştir. En iyi koşullarda ve sürekli akışta da deneyler yapılmıştır.

Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı düzenek

5.1. Akım yoğunluğunun etkisi

90 dakika boyunca ilk iki örnek 15 dakikada bir, diğer örnekler 10 dakikada bir alınarak örneklerde ham atıksudaki KOİ giderimi 18 mL/dk akış hızında incelenmiştir. Bulunan sonuçlar Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilmiştir. Farklı akım yoğunluklarının KOİ derişimine ve yüzde giderime etkilerinin zamanla değişimi Şekil 5.2 ve 5.3'te gösterilmektedir. Akım yoğunlukları ile 675 mL atıksu hacmi için elektrik enerjisi tüketimi 18 mL/dk akış hızında (reaktörde alıkonma süresi 38 dk.) sırasıyla 40,2 kWh/m³, 57,7 kWh/m³ ve 98,9 kWh/m³ olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere akım yoğunluğu arttıkça enerji tüketimi de artmıştır.

Çizelge 5.1. $i = 30 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

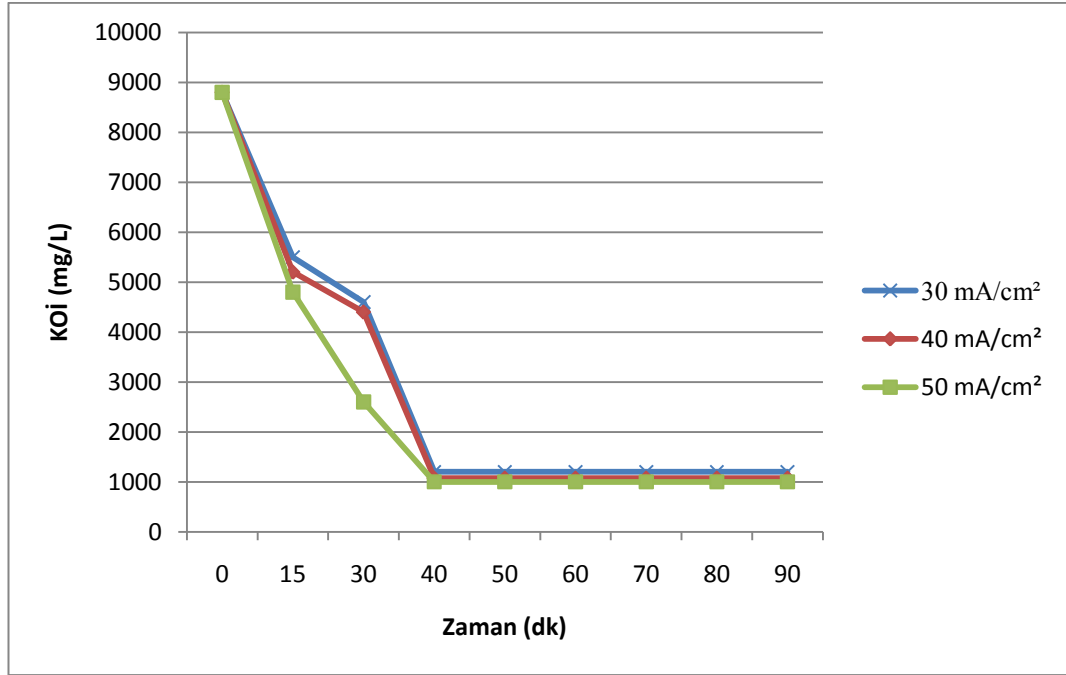
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	5,3	7,10	2,9	14,08	8800	0
15	22,8	9,80	2,4	17,10	5500	37,50
30	23	10,65	2,2	19,00	4600	47,73
40	24,2	11,70	2,1	19,80	1200	86,36
50	24,5	11,65	2,2	17,50	1200	86,36
60	25	11,90	2,0	17,00	1200	86,36
70	25,1	11,75	2,2	20,00	1200	86,36
80	25	11,70	2,0	20,50	1200	86,36
90	24,8	11,60	2,1	21,40	1200	86,36

Çizelge 5.2. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

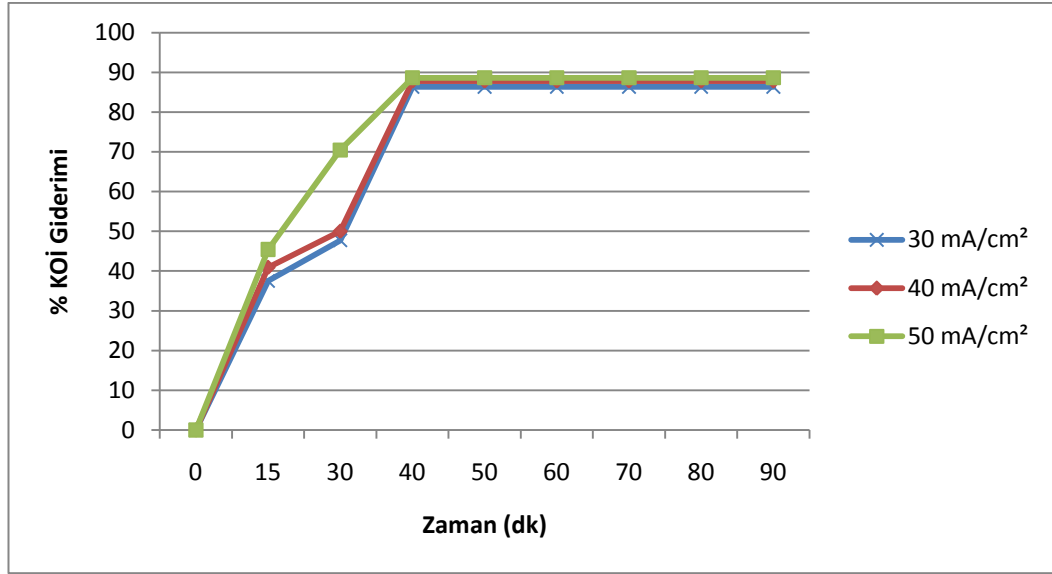
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	6	7,10	2,9	14,07	8800	0
15	21,7	9,95	2,5	16,65	5200	40,91
30	24,2	10,02	2,6	18,00	4400	50,00
40	25,6	9,90	2,4	18,90	1075	87,78
50	25,8	9,84	2,4	19,50	1075	87,78
60	26,5	9,65	2,2	20,00	1075	87,78
70	25,3	9,50	2,2	16,80	1075	87,78
80	26,5	9,40	2,4	18,90	1075	87,78
90	26,8	9,40	2,1	21,00	1075	87,78

Çizelge 5.3. $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

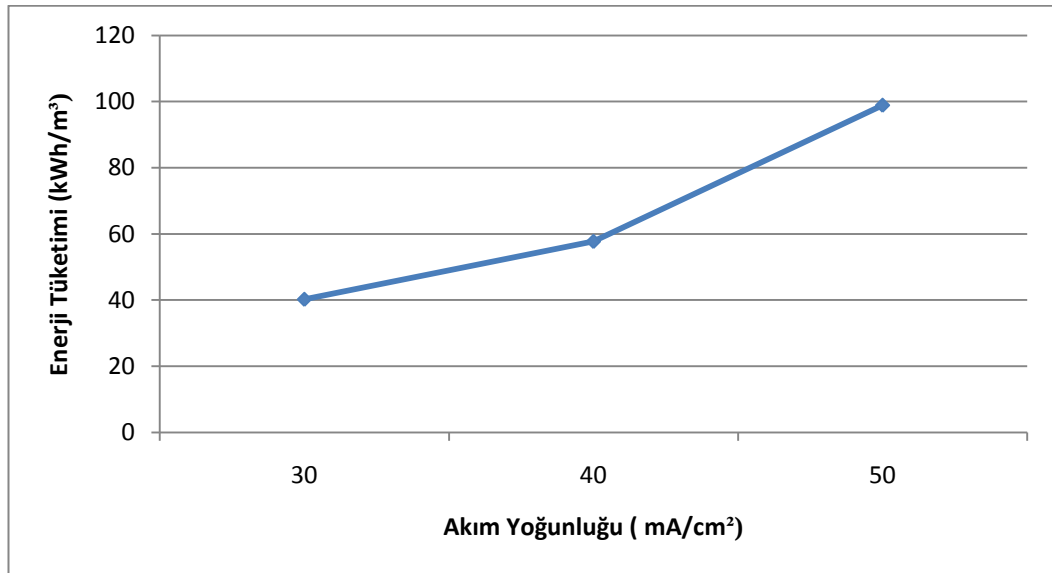
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	Gerilim (V)	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	5,6	7,10	3,2	14,17	8800	0
15	22,6	9,60	3,4	17,38	4800	45,45
30	27,5	10,68	3,9	19,50	2600	70,45
40	28,2	12,18	4,0	18,90	1000	88,64
50	29,1	12,16	3,1	18,60	1000	88,64
60	34,5	11,88	3,1	18,10	1000	88,64
70	37,6	11,90	3,1	21,00	1000	88,64
80	36,9	11,86	3,2	22,60	1000	88,64
90	36,1	11,50	3,0	23,80	1000	88,64



Şekil 5.2. Akım Yoğunluğu – KOİ ilişkisi



Şekil 5.3. Akım Yoğunluğu - % KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 5.4. Akım Yoğunluğu – Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

5.2. Destek elektrolit derişiminin etkisi

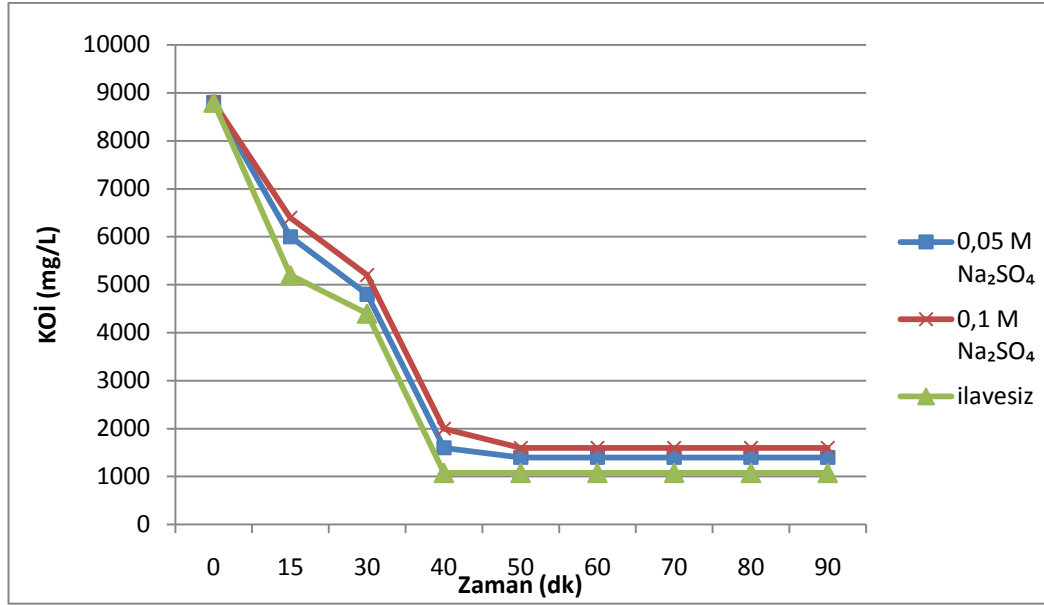
40 mA/cm² akım yoğunluğu, akış hızı 18 mL/dk, ve pH 7,1 olarak 0,05 M ve 0,1 M Na₂SO₄ derişiminin KOİ derişimi ve yüzde giderim üstündeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4 ve 5.5’ de, zamanla değişimleri ise Şekil 5.5 ve 5.6’ da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk, 0,05 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

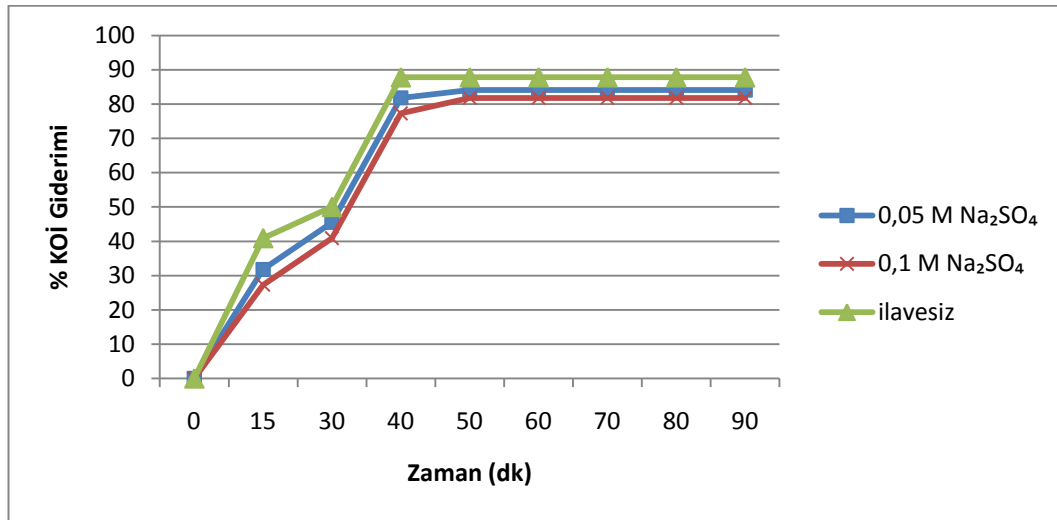
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	8,1	7,10	14,10	8800	0
15	22,6	9,80	16,50	6000	31,80
30	26,5	10,65	16,00	4800	45,50
40	27,3	1203	16,30	1600	81,80
50	28,1	11,95	16,10	1400	84,10
60	28,3	11,70	16,50	1400	84,10
70	29	11,55	18,10	1400	84,10
80	29,3	11,40	18,60	1400	84,10
90	28,9	11,60	19,00	1400	84,10

Çizelge 5.5. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1, akış hızı 18 mL/dk, 0,1 M Na_2SO_4 ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	12,3	7,10	13,83	8800	0
15	24,1	10,01	17,05	6400	27,27
30	28,2	10,25	18,20	5200	40,91
40	28,5	11,10	18,10	2000	77,27
50	29,0	11,15	17,90	1600	81,80
60	29,1	11,63	18,15	1600	81,80
70	28,7	11,45	17,20	1600	81,80
80	28,7	11,82	17,50	1600	81,80
90	29,0	11,65	17,65	1600	81,80



Şekil 5.5. Destek Elektrolit – KOİ İlişkisi



Şekil 5.6. Destek Elektrolit – % KOİ Giderimi İlişkisi

5.3. pH değişiminin etkisi

Atıksuyun başlangıç pH'ları 3, 5, orijinal (7,1) ve 9 olarak ayarlanarak yapılan deneyler sonucu her bir pH için elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 5.2, 5.6, 5. ve 5.8' de verilmiştir. KOİ giderimi en iyi Şekil 5.7'den de görüleceği gibi pH 7,1 civarı olarak bulunmuştur. Aynı şekilde KOİ giderim yüzdesinin de orijinal pH'da en iyi sonucu verdiği görülmektedir. (Şekil 5.8) pH etkisinin

incelendiği deneylerde en iyi giderimler suyun kendi pH'sında elde edilmiş ve KOİ derişimi 1075 mg/L ve KOİ giderim verimi % 87,78 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. pH=3, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

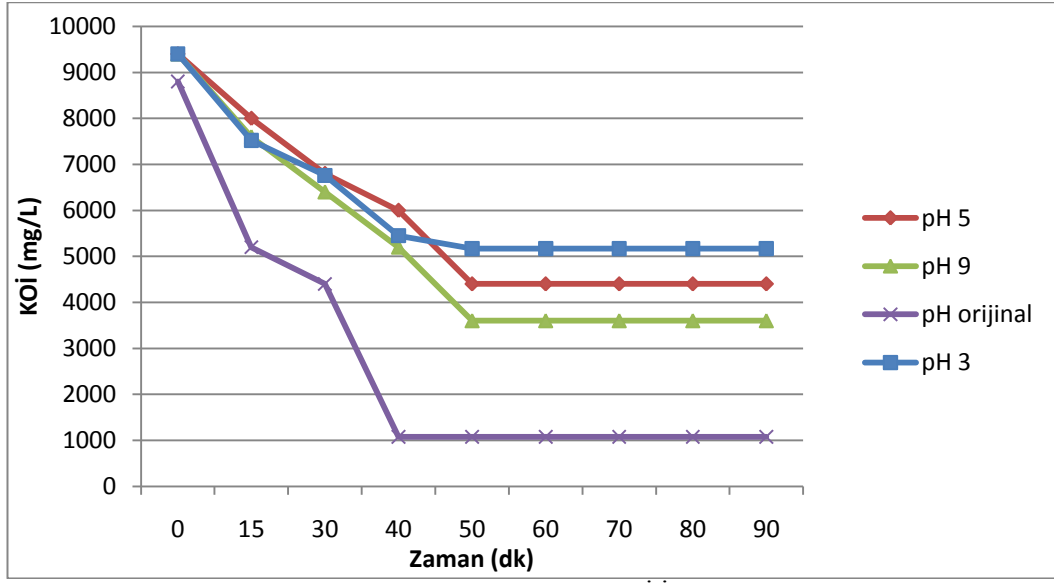
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	7,3	3,00	14,30	9400	0
15	22,0	7,50	16,10	8093	13,90
30	22,5	8,10	15,70	7520	20,00
40	23,4	8,35	16,30	6759	28,10
50	24,1	9,00	16,50	5170	45,00
60	24,5	9,10	16,80	5170	45,00
70	25,2	9,25	17,10	5170	45,00
80	27,3	9,50	17,30	5170	45,00
90	27,6	9,75	17,35	5170	45,00

Çizelge 5.7. pH=5, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

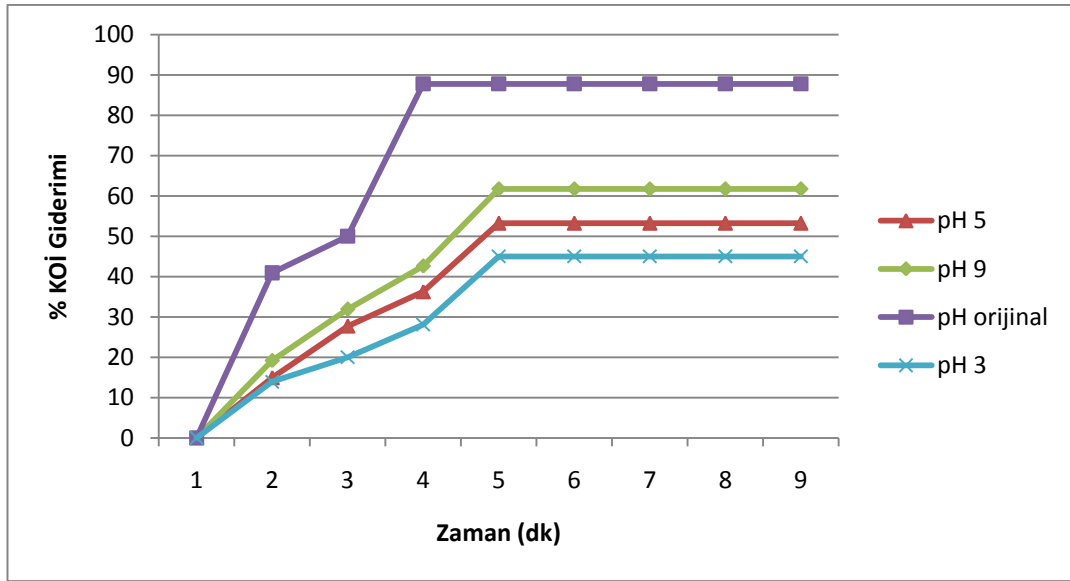
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	14,3	5,00	14,30	9400	0
15	27,0	11,40	14,80	8000	14,90
30	28,2	11,55	15,70	6796	27,70
40	29,0	12,40	15,50	5997	36,20
50	29,2	12,57	16,20	4400	53,20
60	29,5	12,80	15,80	4400	53,20
70	29,7	13,15	16,40	4400	53,20
80	29,5	13,30	17,10	4400	53,20
90	29,6	13,5	18,00	4400	53,20

Çizelge 5.8. pH=9, $i = 40 \text{ mA/cm}^2$ ve akış hızı 18 mL/dk yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	7,4	9,00	13,50	9400	0
15	22,2	9,80	14,20	7600	19,15
30	24,4	10,65	14,80	6400	31,90
40	25,0	12,03	15,10	5396	42,60
50	25,5	12,95	15,25	3600	61,70
60	27,3	12,70	16,10	3600	61,70
70	28,4	12,55	17,40	3600	61,70
80	28,9	13,40	18,10	3600	61,70
90	29,0	13,60	17,10	3600	61,70



Şekil 5.7. pH Değişimi – KOİ İlişkisi



Şekil 5.8. pH Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi

5.4. Akış hızının etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu ve pH 7,1’de 15 mL/dk (45 dk. alıkonma süresi), 18 mL/dk (38 dk. alıkonma süresi), 27 mL/dk (25 dk. alıkonma süresi) ve 50 mL/dk (13,5 dk. alıkonma süresi) akış hızlarında deneyler yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Çizelge 5.2, 5.9, 5.10,5.11’de ve Şekil 5.9-5.10’ da verilmiştir.

Akış hızı arttıkça reaktörde alıkonma süresi azalmasına rağmen KOİ giderim yüzdeleri artmıştır. Bu durumda yüksek akış hızı ile kütle aktarımının daha hızlı gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca akış hızının artması ile reaktörde alıkonma süresinin azalması nedeniyle enerji tüketiminin de azaldığı Şekil 5.11’de de görülebilir. 15, 18, 27 ve 50 mL/dk akış hızlarında sırasıyla 68,3, 57,7, 37,9 ve 20,49 kWh/m³ enerji tüketimi gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.9. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 15 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

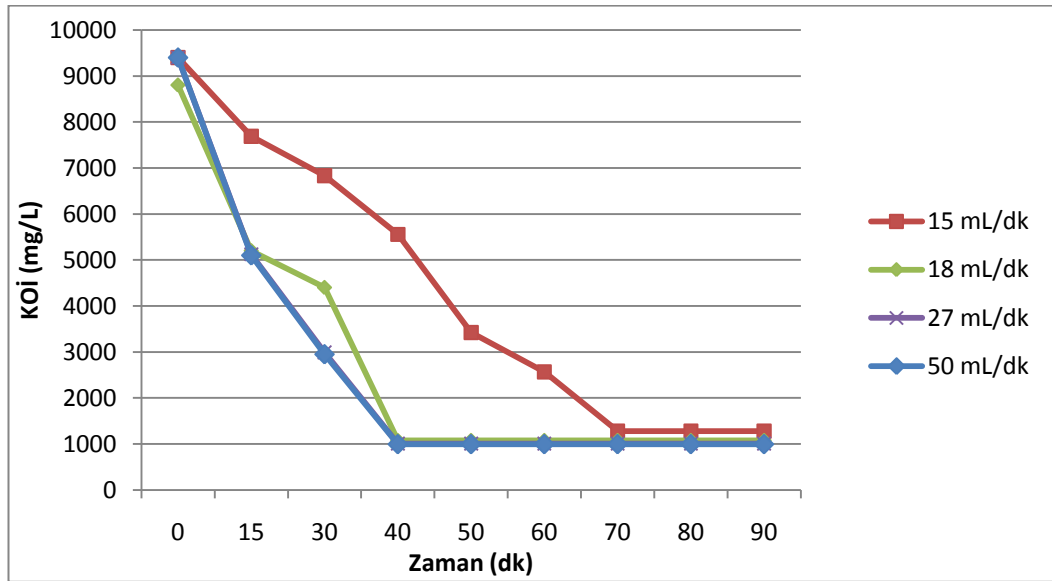
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	14,2	7,10	12,80	9400	0
15	24,1	10,02	13,90	7689,2	18,20
30	25,2	10,20	14,20	6833,8	27,30
40	25,6	10,50	15,00	5555,4	40,90
50	26,2	10,55	15,35	3421,6	63,60
60	26,5	10,85	15,52	2566,2	72,70
70	27,2	10,93	15,80	1278,4	86,40
80	27,6	11,03	16,15	1278,4	86,40
90	28	11,20	15,70	1278,4	86,40

Çizelge 5.10. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 27 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

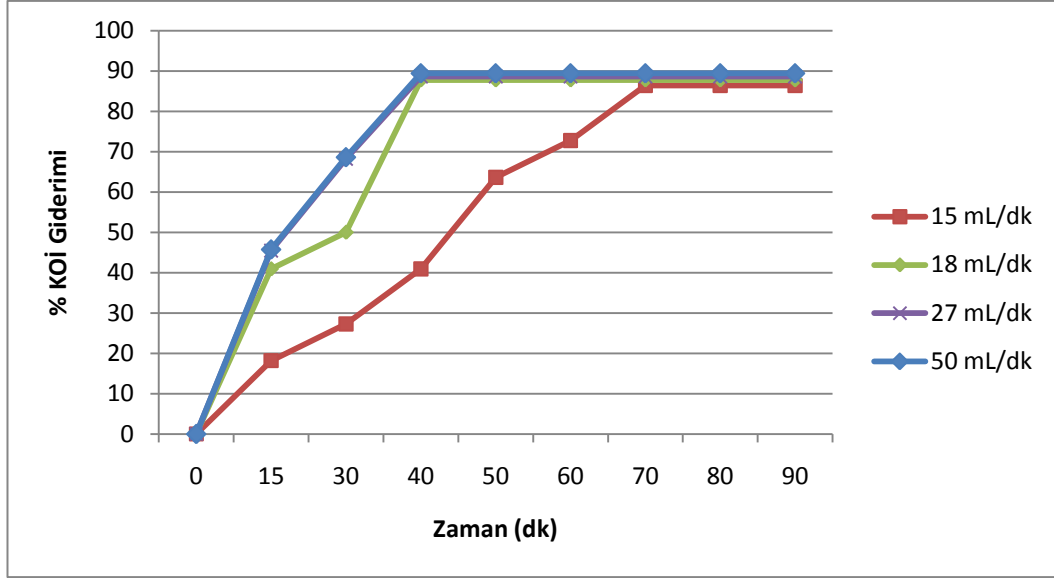
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	18,4	7,10	14,10	9400	0
15	24,4	10,40	16,80	5123	45,50
30	25,0	10,48	18,20	2989,2	68,20
40	25,4	10,60	18,10	1005,8	88,60
50	26,0	10,85	18,75	1005,8	88,60
60	26,4	11,10	19,00	1005,8	88,60
70	27,1	11,20	19,20	1005,8	88,60
80	27,5	11,25	18,90	1005,8	88,60
90	27,9	11,38	19,50	1005,8	88,60

Çizelge 5.11. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, pH 7,1 ve akış hızı 50 mL/dk ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

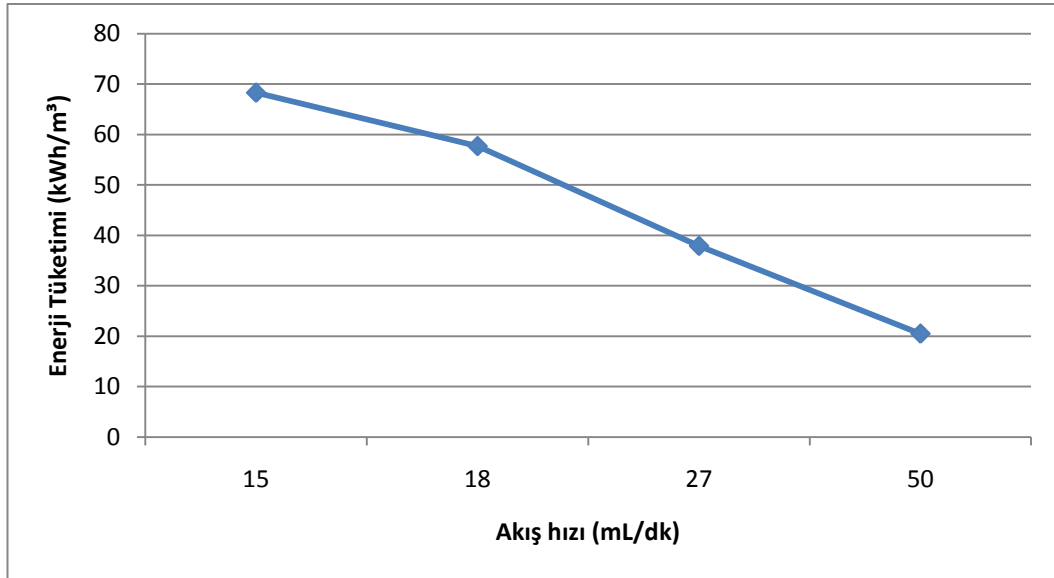
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	6,5	7,05	14,10	9400	0
15	21,5	10,30	16,90	5100	45,74
30	23,8	10,40	18,23	2950	68,62
40	25,2	10,70	18,20	995	89,41
50	25,3	10,85	18,52	995	89,41
60	25,7	10,90	18,87	995	89,41
70	26,1	11,05	19,10	995	89,41
80	26,4	11,10	19,12	995	89,41
90	26,6	11,23	19,50	995	89,41



Şekil 5.9. Akış Hızı Değişimi- KOİ İlişkisi



Şekil 5.10. Akış Hızı Değişimi-% KOİ Giderimi İlişkisi



Şekil 5.11. Akış Hızı – Enerji Tüketimi (kWh/m³) İlişkisi

5.5. Hidrojen peroksit (H₂O₂) etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu, akış hızı 27 mL/dk. ve pH 3,0'da 0,1 M, 0,15 M ve 0,2 M H₂O₂ ilavesi ile deneyler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Artan H₂O₂ derişiminin KOİ giderim veriminin artmasına sebep olduğu görülmüştür. Deney sonuçları sırasıyla Çizelge 5.12, 5.13 ve 5.14 ve Şekil 5.12 ve 5.13' de verilmiştir.

Çizelge 5.12. i = 40 mA/cm², pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,1M H₂O₂ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

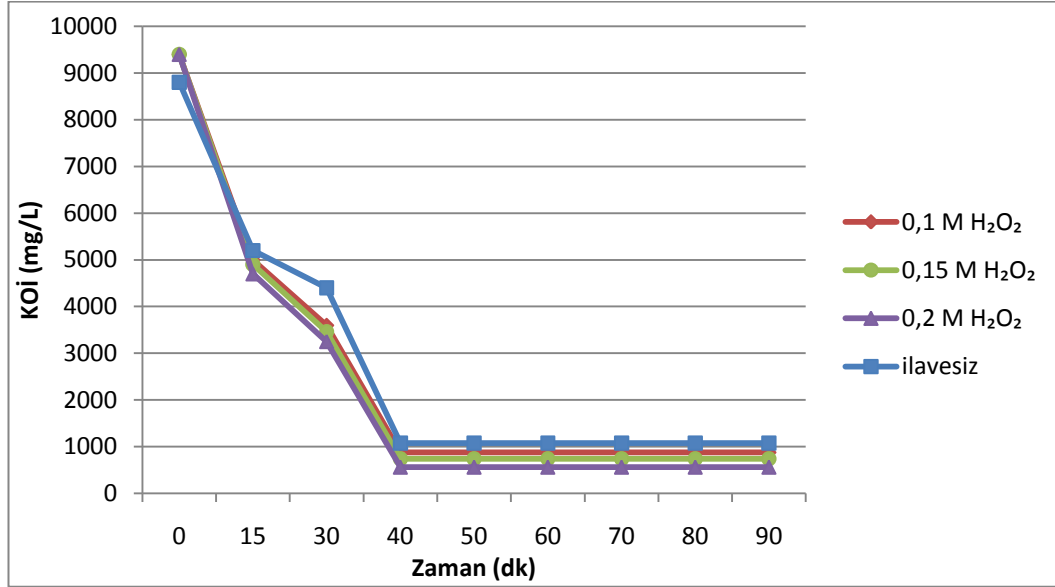
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	14,1	3,00	13,40	9400	0
15	23,1	7,60	14,05	5000	46,80
30	24,4	7,75	13,82	3600	61,70
40	24,9	8,05	15,10	880	90,60
50	25,5	8,13	15,25	880	90,60
60	25,9	8,20	15,70	880	90,60
70	26,7	8,55	16,10	880	90,60
80	27,5	8,70	16,25	880	90,60
90	27,9	8,88	16,40	880	90,60

Çizelge 5.13. i = 40 mA/cm², pH=3,0, akış hızı 27 mL/dk , 0,15 M H₂O₂ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

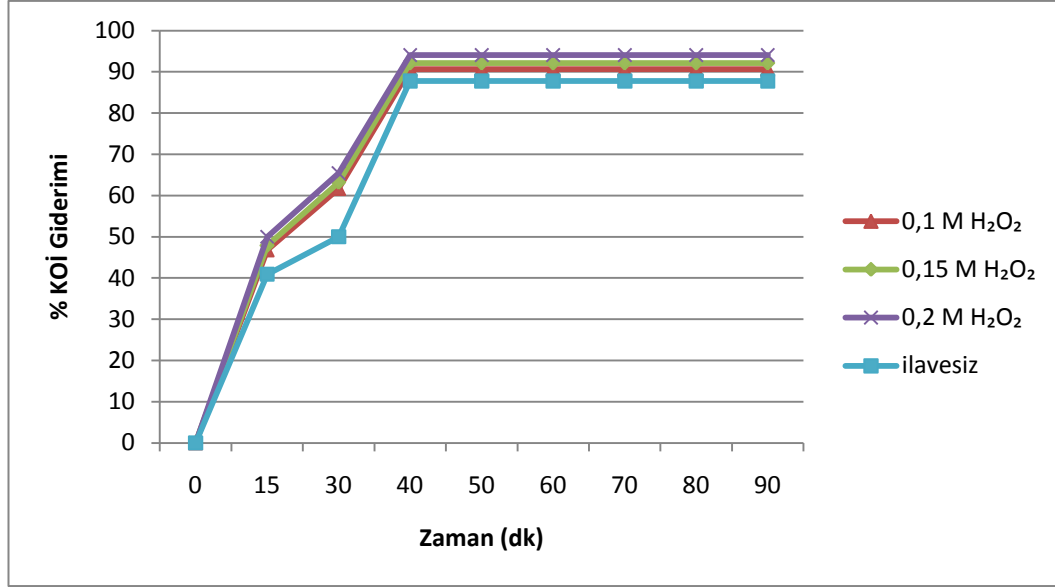
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	18,1	3,00	14,32	9400	0
15	24,1	7,45	13,95	4900	47,90
30	25,2	7,80	14,05	3460	63,20
40	25,5	7,90	14,45	740	92,10
50	25,9	8,15	14,63	740	92,10
60	25,9	8,35	14,70	740	92,10
70	26,7	8,40	15,12	740	92,10
80	27,4	8,50	15,32	740	92,10
90	27,9	8,60	15,50	740	92,10

Çizelge 5.14. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=3,0$, akış hızı 27 mL/dk , $0,2 \text{ M H}_2\text{O}_2$ ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	7,4	3,00	14,10	9400	0
15	21,8	7,30	14,25	4700	50,00
30	22,4	7,65	14,45	3250	65,40
40	23,5	7,80	14,59	560	94,00
50	24,2	8,00	14,63	560	94,00
60	25,0	8,15	14,73	560	94,00
70	25,3	8,25	15,32	560	94,00
80	26,1	8,40	15,73	560	94,00
90	26,8	8,10	16,05	560	94,00



Şekil 5.12. H_2O_2 – KOİ ilişkisi



Şekil 5.13. H₂O₂ –% KOİ Giderimi İlişkisi

5.6. Polielektrolit derişiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu, akış hızı 27 mL/dk. ve pH 7,1’de 0,3 g/L, 0,4 g/L ve 0,5 g/L kationik polielektrolit derişim değeriinde yapılan deneyde; KOİ derişimi ve yüzde giderimi üzerine etkileri incelenmiştir. Polielektrolit ilavesinin KOİ giderim verimini artırdığı gözlenmiştir. Deney sonuçları sırasıyla Çizelge 5.15-5.17 ve Şekil 5.14-5.15’ te verilmiştir.

Çizelge 5.15. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 27 mL/dk , 0,3 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

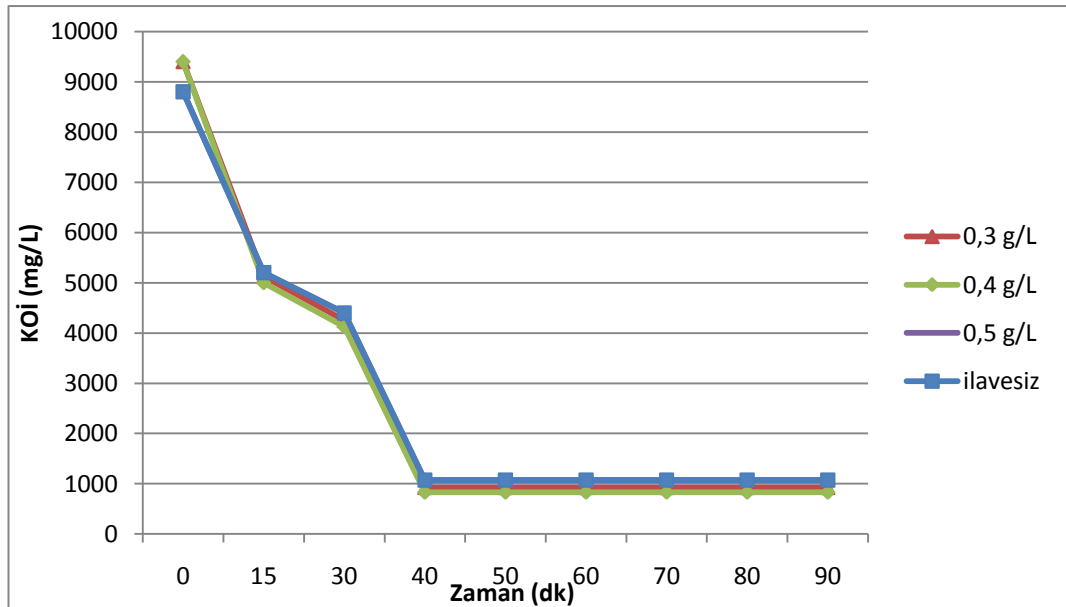
Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	6,9	7,10	15,10	9400	0
15	19,2	8,30	15,32	5125	45,48
30	22,1	8,45	15,42	4250	54,79
40	23,0	8,65	1510	925	90,16
50	23,8	8,81	15,60	925	90,16
60	24,4	8,95	15,72	925	90,16
70	26,0	9,05	17,40	925	90,16
80	26,5	9,12	17,73	925	90,16
90	27,2	9,15	17,70	925	90,16

Çizelge 5.16. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 27 mL/dk , $0,4 \text{ g/L}$ polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

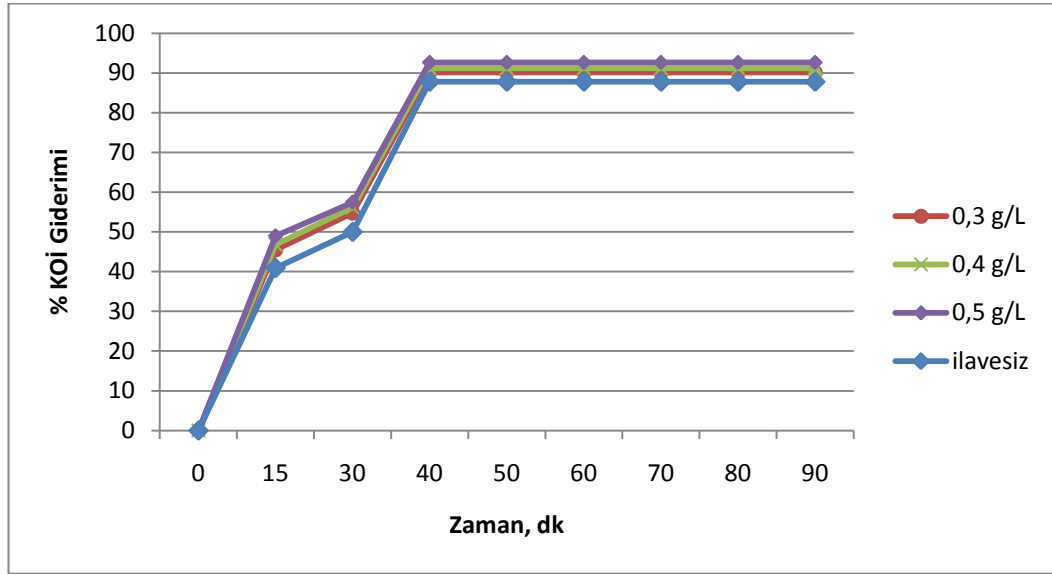
Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	15,2	7,10	14,30	9400	0
15	23,1	8,40	14,80	5000	46,81
30	24,0	8,51	14,70	4125	56,12
40	24,4	8,70	15,50	830	91,17
50	25,1	8,74	16,10	830	91,17
60	26,0	8,90	16,20	830	91,17
70	26,6	8,85	16,40	830	91,17
80	26,9	9,03	17,10	830	91,17
90	27,3	9,12	17,30	830	91,17

Çizelge 5.17. $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=7,1$, akış hızı 27 mL/dk , $0,5 \text{ g/L}$ polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	18,2	7,10	14,30	9400	0
15	26,1	8,38	16,10	4800	48,94
30	26,7	8,45	15,70	4000	57,45
40	27,3	8,52	16,30	695	92,82
50	27,8	8,62	16,50	695	92,82
60	28,1	8,58	16,80	695	92,82
70	28,3	8,70	17,10	695	92,82
80	28,5	8,83	17,30	695	92,82
90	28,8	9,05	17,35	695	92,82



Şekil 5.14. Polielektrolit Derişimi – KOİ İlişkisi



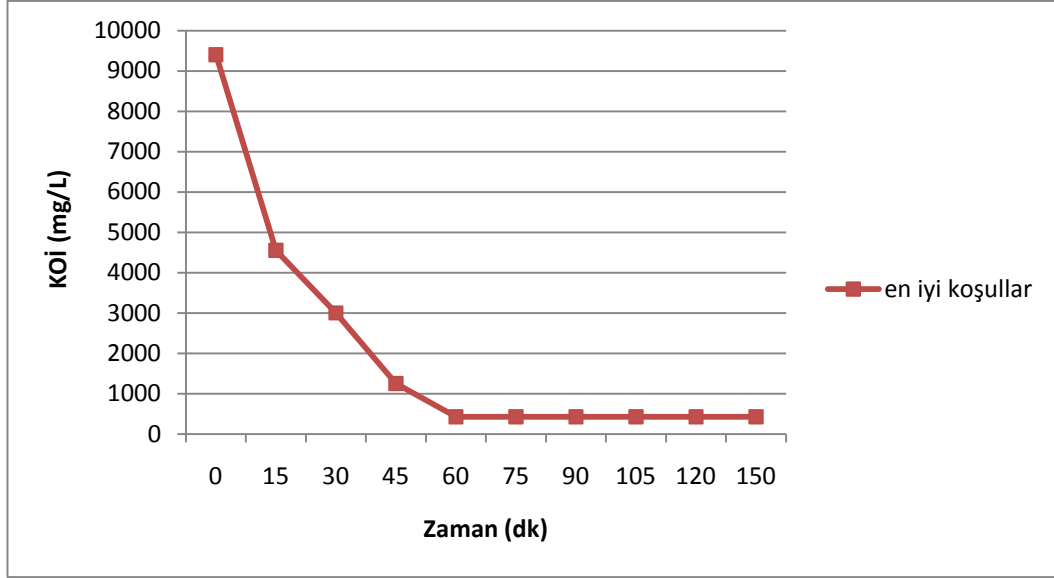
Şekil 5.15. Polielektrolit Derişimi – % KOİ Giderim İlişkisi

5.7. En iyi koşullar belirlenerek yapılan deney sonuçları

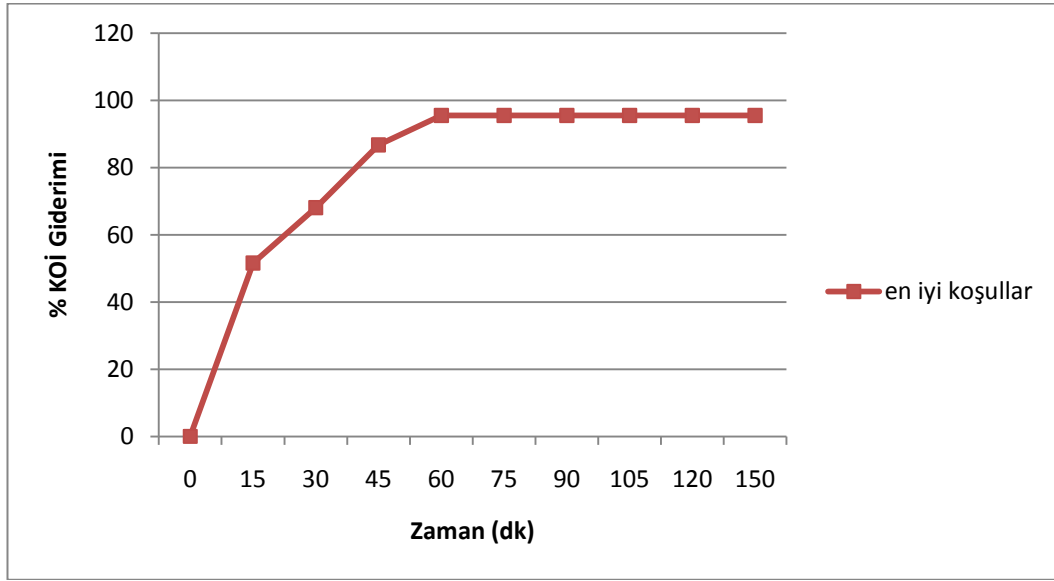
Deneylerle belirlenen en iyi koşullarda KOİ giderim veriminin en yüksek seviyeye ulaştığı gözlenmiştir. (Çizelge 5.17) En iyi koşulların parametreleri akım yoğunluğu 5 mA/cm^2 , akış hızı 27 mL/dk , pH 3,0, hidrojen peroksit (H_2O_2) derişimi 0,2 M ve katyonik polielektrolit derişimi 0,5 g/L olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.18. $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}=3,0$, akış hızı 27 mL/dk , 0,5 g/L polielektrolit derişimi ile yapılan deneysel çalışmanın sonuçları

Zaman (dk)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	pH	İletkenlik (mS/cm)	KOİ (mg/L)	KOİ Giderimi (%)
0	7,9	3,00	13,40	9400	0
15	23,1	7,60	14,05	4550	51,60
30	24,4	7,75	13,82	3000	68,10
45	24,9	8,05	15,10	1250	86,70
60	25,5	8,13	15,25	425	95,48
75	25,9	8,20	15,70	425	95,48
90	26,7	8,55	16,10	425	95,48
105	27,5	8,70	16,25	425	95,48
120	27,9	8,88	16,40	425	95,48
150	28,2	9,01	16,65	425	95,48



Şekil 5.16. En iyi koşullar altında KOİ giderimi



Şekil 5.17. En iyi koşullar altında % KOİ giderimi

5.8 İşletme maliyeti ve akım verimi

En İyi Koşullarda İşletme Maliyeti ve Akım Verimi

En iyi koşullar olan $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH} = 7,1$, 27 mL/dk akış hızında, $0,2 \text{ M H}_2\text{O}_2$ ilavesiyle ve $0,5 \text{ g/L}$ katyonik polielektrolit ilavesiyle yapılan çalışmanın maliyeti aşağıda hesaplanmıştır.

i) Kimyasal Madde Maliyeti;

Harcanan katyonik polielektrolit miktarı bir deney için 1,553 g/0,003105 m³'tür.
Harcanan H₂O₂ miktarı 54,31 mL/0,003105 m³'tür.

Katyonik polielektrolitin fiyatı 8,48 TL / kg, hidrojen peroksitin fiyatı ise 2,50TL/5L'dir. Denklem 4.7 kullanılarak

Kimyasal madde maliyeti (TL) =

$$= \left(\frac{1,553 \text{ g}}{0,003105 \text{ m}^3} \times 8,48 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) + \left(\frac{54,31 \text{ mL}}{0,003105 \text{ m}^3} \times \frac{2,50 \text{ TL}}{5 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \right)$$

= 12,99 TL/m³ arıtılan atıksu
olarak hesaplanır.

ii) Elektrik Maliyeti:

Deneyler sırasında atıksu arıtımı için harcanan elektriğin maliyeti

Belirtilen deney için elektrik tüketimi 103,89 kWh/m³ olarak hesaplanmıştı.

Denklem 4.8'den;

Arıtım için tüketilen elektriğin maliyeti (TL) =

$$103,89 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 0,17216 \frac{\text{TL}}{\text{kWh}} = 17,8857 \text{ TL/ m}^3 \text{ arıtılan atıksu}$$

olarak hesaplanır.

iii) Demir Maliyeti: En iyi koşullarda yapılan 90 dakikalık bu çalışmanın sonucunda pratik olarak harcanan demirin maliyeti hesaplanmıştır.

Deney sonunda demir elektrotun kütle kaybı (m_{deneysel}) 11,40 g. olarak bulunmuştur.

Denklem 4.9'dan;

$$\begin{aligned}\text{Harcanan Demirin Maliyeti (TL)} &= (11,40 \text{ g}/0,003105 \text{ m}^3) \times 1,059 \text{ TL}/1000 \text{ g} \\ &= 3,8881 \text{ TL}/\text{m}^3 \text{ arıtılan atıksu}\end{aligned}$$

olarak hesaplanır.

iv) Toplam İşletme Maliyeti

En iyi koşullarda gerçekleştirilen deney için gerekli işletme maliyeti Denklem 4.4 kullanılarak;

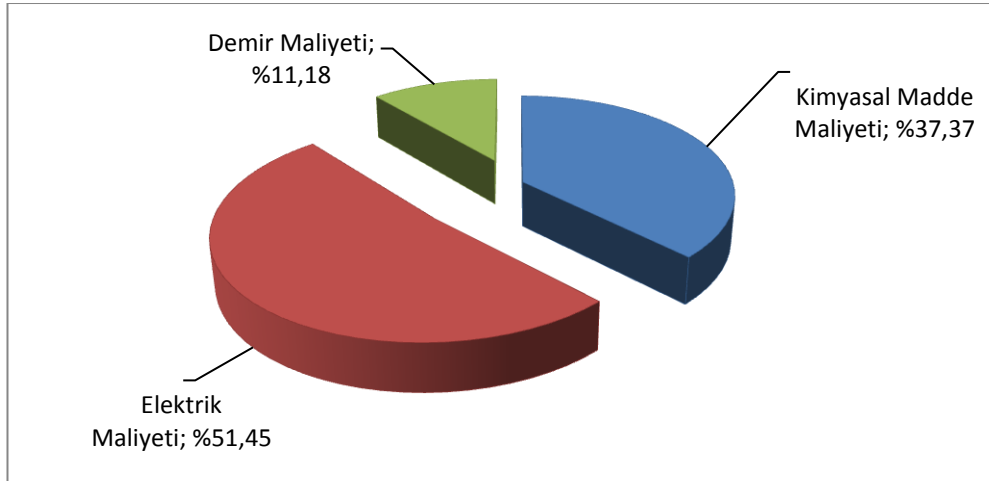
$$\begin{aligned}\text{Toplam İşletme Maliyeti} &= 12,9900 + 17,8857 + 3,8881 \\ &= 34,7638 \text{ TL}/\text{m}^3 \text{ arıtılan atıksu}\end{aligned}$$

olarak bulunmuştur.

İşletme maliyetine katılan kalemlerin toplam maliyetteki payları Çizelge 5.19'da ve Şekil 5.18'de verilmiştir.

Çizelge 5.19. İşletme maliyetleri ve payları

	Maliyet (TL/m ³)	Pay (%)
Kimyasal Madde	12,9900	37,37
Elektrik	17,8857	51,45
Demir	3,8881	11,18
Toplam	34,7638	100,00



Şekil 5.18. İşletme maliyetindeki kalemlerin payları

v) Akım Verimi

Deneyler sırasında çözünmeyle suya geçip pıhtılaştırıcı oluşturan demirin miktarı Faraday'ın ikinci yasası ile hesaplanabilir;

Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak;

$$\text{Teorik olarak üretilcek demir miktarı (g)} = \frac{34 \text{ A} \times 55,845 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} \times 2} \times 25 \text{ dk} \times \frac{60 \text{ sn}}{1 \text{ dk}} \\ = 14,76 \text{ g.}$$

olarak hesaplanır.

Deney sonunda demir elektrotun kütle kaybı (m_{deneysel}) 11,40 g. olarak bulunmuştur.

Akım verimi (%) = $[11,40 \text{ g} / 14,76 \text{ g}] \times 100 = 77,24$ olarak bulunmuştur.

Akım Yoğunluğu ile İşletim Maliyeti Değişimi

Akım yoğunluğu arttıkça işletim maliyetinin arttığı belirlenmiştir. (Çizelge 5.20)

Çizelge 5.20. Akım Yoğunluğu ile İşletim Maliyeti Değişimi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	KOİ Derişimi (mg/L)	Elektrokimyasal pıhtılaştırma süresi (dk)	Kimyasal Madde Maliyeti (TL/m ³)	Elektrik Enerjisi Maliyeti (TL/m ³)	Teorik Elektrot Maliyeti (TL/m ³)	Toplam Maliyet (TL/m ³)
30	1200	38	-	6,92	21,12	28,04
40	1075	38	-	9,93	28,16	38,09
50	100	38	-	17,03	35,19	52,22

Atıksu Akış Hızı ile İşletim Maliyeti Değişimi

Çizelge 5.21’ de görüldüğü üzere akış hızı arttıkça toplam işletim maliyeti azalmıştır.

Çizelge 5.21. Atıksu Akış Hızı ile İşletim Maliyeti Değişimi

Atıksu Akış Hızı (mL/dk)	KOİ Derişimi (mg/L)	Elektrokimyasal pıhtılaştırma süresi (dk)	Kimyasal Madde Maliyeti (TL/m³)	Elektrik Enerjisi Maliyeti (TL/m³)	Teorik Elektrot Maliyeti (TL/m³)	Toplam Maliyet (TL/m³)
15	1278	45	-	11,76	52,31	64,07
18	1075	38	-	9,93	28,16	38,09
27	1005	25	-	6,52	18,53	25,05
50	995	13,5	-	3,53	10,01	13,54

6. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemi kullanılarak boru tipi demir reaktörde, demir elektrotlarla, mezbaha ve kanatlı hayvan kesimhanesi atıksularındaki organik madde giderimi amaçlanmış, bu amaç doğrultusunda pH, akış hızı, akım yoğunluğu ve kimyasal madde ilavesi (destek elektrolit derişimi vb) gibi parametreler değiştirilerek yöntemin verimi incelenmiştir.

Akım yoğunluğu ile kirletici giderim verimleri doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar, akım yoğunluğunun giderim veriminde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir ancak akım yoğunluğunun artmasının olumsuz yönlerinden birisi elektrik tüketiminin artması ve maliyetlerin yükselmesidir. Diğer bir olumsuz yön ise artan elektrik yüküyle sistemde ısınma sorununun ortaya çıkmasıdır.

Akış hızı, kirleticilerin anot ve katotla yüzey temasında önemli bir ölçüttür. Yeterli temas süresinin sağlanması kütle aktarımının büyük olması için de gereklidir. Bunun yanı sıra suda karışma yaratarak anotta ve katotta biriken jelatinimsi maddenin yüzeyden ayrılmasını sağlayarak arıtım veriminin artmasını sağlamaktadır ancak çok hızlı akışlarda temas, ters bir etki olarak düşmekte ve arıtımı olumsuz etkilemektedir. Akış hızının bir diğer olumsuz etkisi ise çok hızlı akışlarda, oluşan yumakların parçalanmasıdır.

Destek elektrolit derişimi, suya iyon kazandırmak ve elektrik iletkenliğinin artmasını sağlamak açısından gereklidir. Eklenen destek elektrolit derişimi arttıkça iletkenlik artar, gerilim düşer ancak bununla birlikte harcanan kimyasal madde miktarı sebebiyle maliyetler yükselebilir. Bu yüzden en uygun miktar önem kazanmaktadır. Ayrıca oluşan yumakları parçalamaması bakımından atıksuyun sıcaklığının belirli değerler arasında tutulması gerekir. Bunu sağlamak için deneylerde atıksu geri soğutucu ile soğutulmuştur.

Deneyler, ilk sette kesikli geri döngülü, ikinci sette sürekli akış olmak üzere iki akış üzerinde gerçekleştirilmiştir ve deneysel çalışmalarda kullanılan değişkenlerin etkilerinin sonuçları aşağıda verilmiştir.

Kesikli Geri Döngülü Sistemle Yapılan Çalışmaların Sonuçları

Akım yoğunluğunun etkisi

10, 20, 30, 40 mA/cm² akım yoğunlukları denenmiş ve KOİ derişimleri sırasıyla 269 mg/L (%68 giderim), 235 mg/L (%72 giderim), 202 mg/L (%76 giderim), 159,6 mg/L (%81 giderim) olmuştur (Şekil 4.3).

Elektrokimyasal süreçler elektron aktarımıyla gerçekleştiğinden akım yoğunluğu ile birlikte giderimin artması beklenen bir durumdur. Akım yoğunluğundaki artışla birlikte enerji tüketimleri de artış göstermiştir.

Destek elektrolit derişiminin etkisi

Elektrokimyasal süreçlerde, genellikle seyreltik ve elektriksel iletkenliği düşük atıksuların arıtımı için destek elektrolit kullanımı son derece yaygındır. Yüksek iletkenlikle çözeltilerde bulunan katyonların ve anyonların daha kolay hareketi sağlanarak düşük gerilim uygulanması olanaklı kılınmaktadır. Kolay temin edilebilen, ucuz ve etkin olmasından dolayı yapılan deneysel çalışmaların tamamında Na₂SO₄ kullanılmıştır.

40 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,05 M, 0,1 M ve 0,2 M Na₂SO₄ derişimleri kullanılarak destek elektrolit derişiminin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. 40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,05 M, 0,1 M ve 0,2 M Na₂SO₄ derişimleri için KOİ derişimleri sırasıyla 235 mg/L (%72 giderim), 288 mg/L (%66 giderim), 386 mg/L (%54 giderim) olarak bulunmuştur (Şekil 4.6).

Destek elektrolit ilavesi ile giderimde olumlu etki gözlenmemiştir. Destek elektrolit eklendiğinde giderimin azalması alanyazında gözlenen bir etkidir. Destek elektrolit ilavesi enerji tüketimini düşürmek için önemlidir. Destek elektrolit derişimi düşük olan durumlarda yüksek hücre gerilimi çekildiğinden maliyet artmaktadır ve ısınma yoluyla enerji kaybı olduğundan birim giderim başına enerji verimi düşmektedir.

Akış hızı etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu, 0,1 M Na₂SO₄ ilavesi ve pH 7,1’de 240, 600, 1000 ve 1400 mL/dk. akış hızlarında deneyler yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda KOİ derişimleri sırasıyla 324,4 mg/L (%64 giderim), 288 mg/L (%66 verim), 252 mg/L (%68), 235,2 mg/L (%70) olarak bulunmuştur. En iyi KOİ giderim verimi Şekil 4.17’ de de görüldüğü gibi 1400 mL/dk. olan akış hızında belirlenmiştir.. Akış hızına bağlı olarak enerji tüketimi de Şekil 4.19’ da gösterilmiştir.

pH değişiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 0,1 M Na₂SO₄ derişimde pH 3, pH 5, orijinal pH (7,1), pH 9 değerlerinde çalışılarak farklı pH değerlerinin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen KOİ derişimleri sırasıyla 604,8 mg/L (%24 giderim), 504 mg/L (%40 giderim), 288 mg/L (%66 giderim), 403,2 mg/L (%52 giderim) olmuştur (Şekil 4.9). Yapılan deneylerde en iyi giderimin orijinal pH değerinde elde edildiği ve en az enerji tüketiminin bu pH değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Enerji tüketimlerinin zamanla değişimi Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Hidrojen peroksit (H₂O₂) derişiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,02 M, 0,04 M ve 0,08 M H₂O₂ derişimleri kullanılarak hidrojen peroksit derişiminin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. 40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,02 M, 0,04 M ve 0,08 M H₂O₂ derişimleri için KOİ derişimleri sırasıyla 268,8 mg/L (%68 giderim), 252 mg/L (% 70 giderim), 235,2 mg/L (%72 giderim) olarak bulunmuştur (Şekil 4.14).

Hidrojen peroksit ilavesi ile giderimde çok büyük bir değişim gözlenmemiştir. Hidrojen peroksit ilavesi ile giderimin artması alanyazında gözlenen bir etkidir ancak deneylerde çok düşük derişimde hidrojen peroksit kullanıldığı için bu etki net bir şekilde görülememiştir.

Polielektrolit derişiminin etkisi

Farklı akım yoğunlukları, farklı destek elektrolit derişimleri ve farklı pH değerlerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen giderimlerin arttırılması için anyonik polielektrolit eklenmesi denenmiştir.

Polielektrolit, atıksuların arıtımında pıhtılaştırma yardımcısı olarak kullanılan bir kimyasal maddedir. Yapılan deneylerde oluşan, çözünürlüğü düşük metal oksit tuzları ile sağlanan yumaklaşmayı arttırmada kullanılmıştır.

40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,1 M Na₂SO₄ derişiminde 0,24 g/L polielektrolit derişimi denenmiştir. Deney sonucunda elde edilen KOİ derişimi 235,2 mg/L (%72 giderim) olmuştur (Şekil 4.13). Polielektrolit eklenmesiyle ve giderimin artmasıyla enerji tüketiminin azaldığı görülmüştür.

En iyi koşulların belirlenmesiyle gerçekleştirilen deney

Akım yoğunluğu 40 mA/cm², akış hızı 1400 mL/dk., pH orijinal (7,1) ve anyonik polielektrolit miktarı 0,24 g/L olarak belirlenen en iyi koşullar altında yapılan deney sonucunda 84 mg/L KOİ derişimine (%90 giderim) ulaşılmış ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde KOİ için belirtilen boşaltım değerlerinin altına inilmiştir.

İşletim Maliyeti

En iyi koşullar olan $i = 40 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH} = 7$, 1 ve 27,2 A akımda yapılan çalışmanın maliyeti hesaplanmıştır. İşletim maliyeti 64,5451 TL/ m³ arıtılan atıksu olarak bulunmuştur. Bu değer, elektrokimyasal pıhtılaştırma yönteminin ekonomik açıdan da uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Sürekli Sistemle Yapılan Çalışmanın Sonuçları

Akım yoğunluğunun etkisi

30, 40 ve 50 mA/cm² akım yoğunlukları denenmiş ve KOİ derişimleri sırasıyla 1200mg/L (%86,36 giderim), 1075 mg/L (%87,78 giderim), 1000 mg/L (%88,64 giderim) olmuştur (Şekil 5.2).

Elektrokimyasal süreçler elektron aktarımıyla gerçekleştiğinden akım yoğunluğu ile birlikte giderimin artması beklenen bir durumdur. Akım yoğunluğundaki artışla birlikte enerji tüketimleri de artış göstermiştir (Şekil 5.4).

Destek elektrolit derişiminin etkisi

Elektrokimyasal süreçlerde, genellikle elektriksel iletkenliğin düşük olduğu atıksu arıtımı uygulamaları için destek elektrolit kullanımı son derece yaygındır. Yüksek iletkenlikle çözeltide bulunan katyonların ve anyonların daha kolay hareketi sağlanarak düşük gerilim uygulanması olanaklı kılınmaktadır. Kolay temin edilebilir, ucuz ve etkin olmasından dolayı yapılan deneysel çalışmalarda Na₂SO₄ kullanımı denenmiştir.

40 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,05 M ve 0,1 M Na₂SO₄ derişimleri kullanılarak destek elektrolit derişiminin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. 40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,05 M ve 0,1 M Na₂SO₄ derişimleri için KOİ derişimleri sırasıyla 1400 mg/L (% 84,14 giderim), 1600 mg/L (% 81,80 giderim) olarak bulunmuştur (Şekil 5.5).

Destek elektrolit ilavesi ile giderimde olumlu etki gözlenmemiştir. Destek elektrolit eklendiğinde giderimin azalması alanyazında gözlenen bir etkidir. Destek elektrolit ilavesi enerji tüketimini düşürmek için önemlidir.

pH değışiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğunda pH 3, pH 5, orijinal pH (7,1), pH 9 değıerlerinde çalışılarak farklı pH değıerlerinin etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen KOİ derişimleri sırasıyla 5170 mg/L (%45,00 giderim), 4400 mg/L (%53,20 giderim), 1075 mg/L (%87,78 giderim), 3600 mg/L (%61,70 giderim) olmuştur (Şekil 5.7). Yapılan deneylerde en iyi KOİ giderim veriminin orijinal pH değerinde elde edildiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.8).

Akış hızının etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğu ve pH 7,1’de 15, 18, 27 ve 50 mL/dk. akış hızlarında deneyler yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda KOİ derişimleri sırasıyla 1278,4 mg/L (%86,40 giderim), 1075 mg/L (%87,78 verim), 1005,8 mg/L (%88,60), 995 mg/L (%89,41) olarak bulunmuştur. En iyi KOİ giderim verimi Şekil 5.11’ de de görüldüğü gibi 50 mL/dk. olan akış hızında belirlenmiştir.

Polielektrolit derişiminin etkisi

Polielektrolit, atıksuların arıtımında pıhtılaştırma yardımcısı olarak kullanılan bir kimyasal maddedir. Yapılan deneylerde, oluşan çözünürlüğü düşük metal oksit tuzları ile sağlanan yumaklaşmayı arttırmada kullanılmıştır.

40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,3 g/L, 0,4 g/L, 0,5 g/L katyonik polielektrolit derişimleri denenmiştir. Deney sonucunda elde edilen KOİ derişimleri 925 mg/L (%90,16 giderim), 830 mg/L (%91,17 giderim), 695 mg/L (%92,82 giderim) olmuştur (Şekil 5.14). Polielektrolitin eklenmesiyle giderimin arttığı görülmüştür.

Hidrojen peroksit (H₂O₂) derişiminin etkisi

40 mA/cm² akım yoğunluğunda 0,1 M, 0,15 M ve 0,2 M H₂O₂ derişimleri kullanılarak hidrojen peroksit derişiminin etkisi incelenmeye çalışılmıştır. 40 mA/cm² akım yoğunluğunda, 0,1 M, 0,15 M ve 0,2 M H₂O₂ derişimleri için KOİ

derişimleri sırasıyla 880 mg/L (%90,60 giderim), 740 mg/L (% 70 giderim), 560 mg/L (%94,00 giderim) olarak bulunmuştur (Şekil 5.12).

Hidrojen peroksit ilavesi ile giderimin arttığı gözlenmemiştir (Şekil 5.12). Hidrojen peroksit ilavesi ile giderimin artması alanyazında gözlenen bir etkidir.

En iyi koşulların belirlenmesiyle gerçekleştirilen deney

Akım yoğunluğu 50 mA/cm², akış hızı 27 mL/dk., pH orijinal (7,1), 0,2 M H₂O₂ derişimi ve 0,5 g/L katyonik polielektrolit derişimi olarak belirlenen en iyi koşullar altında yapılan deney sonucunda 425 mg/L KOİ derişimine (%95,48 giderim) ulaşılmıştır.

İşletim Maliyeti

En iyi koşullar olan $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $pH = 7$, 1 ve 34,0 A akımda yapılan çalışmanın maliyeti hesaplanmıştır. İşletim maliyeti 34,7638 TL/ m³ arıtılan atıksu olarak bulunmuştur. Bu değer elektrokimyasal pıhtılaştırma yönteminin ekonomik açıdan da uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Çalışma sonucunda, mezbaha ve kanatlı hayvan kesimhanesi atıksularının organik madde içeriğinin demir elektrotlar kullanılarak kesikli geri döngülü ve sürekli akışta, elektrokimyasal pıhtılaştırma yöntemi ile arıtılabilir olduğu anlaşılmıştır. Organik madde içeriğini gösteren KOİ derişimleri yeterli elektroliz süreleri uygulandığında SKKY’de belirtilen derişim değerlerinin altına indirilebilmektedir. Son olarak mezbaha ve kanatlı hayvan kesimhanesi atıksularının organik madde içeriğinin giderilmesinde elektrokimyasal pıhtılaştırmanın başarılı bir yöntem olduğu sonucu çıkarılabilir.

İşletme maliyeti, arıtılan m³ atıksu temel alınarak hesaplanmıştır ve elektrokimyasal pıhtılaştırma yönteminin ekonomik açıdan uygulanabilir bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Kaftan A., *Entegre Et Tesislerinde Atık Suyun Yeniden Kullanımı*, 81-88. <http://dergiler.ankara.edu.tr/dergiler/47/1445/16235.pdf>
- [2] Holt, P., Barton, G., Mitchell, C., “Electrocoagulation As A Wastewater Treatment”, *The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event*, Victoria, 1-6, 1999.
- [3] Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M., Mitchell, C. A., “A Quantitative Comparison Between Chemical Dosing and Electrocoagulation”, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **211**, 233 – 248, 2002.
- [4] Moreno-Casillas, A. H., Cocke, L. D., Gomes, A. G. J., Morkovsky, P., Parga, R. J., Peterson, E., “Electrocoagulation Mechanism For COD Removal”, **208**, 2007
- [5] T.C. ÇEVRE VE ORMAN BAKANLIĞI, *Türkiye Çevre Atlası*, 304–318, 2003.
- [6] T.C. ÇEVRE ORMAN BAKANLIĞI, *Tablo 5.6: Gıda Sanayii (Mezbahalar ve Entegre Et Tesisleri) Atık Sularının Alıcı Ortamlara Boşaltım Sınırları*, Türkiye, 31 Aralık 2004.
- [7] Öztürk, İ., Timur, H., Koşkan, U., *Atıksu Arıtımının Esasları: Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*, Türkiye.
- [8] Ruiz, I., Veiga, M. C., De Santiago, P., Blazquez, R., *Treatment of slaughterhouse wastewater in a UASB reactor and an anaerobic filter*, “*Biosource Technology*”, **251**, 1997.
- [9] Del Pozo, R., Diez, V., Beltrans, S., *Anaerobic pre-treatment of slaughterhouse wastewater using fixed-film reactor*, “*Biosource Technology*”, **143**, 1999.
- [10] Türkoğlu, B., *Bitkisel yağ üretimi teknolojileri ve rafinasyon atıksularının elektrokimyasal arıtımı*, Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir, 2006.
- [11] Altay, Ü., *Zeytinyağı atıksularının arıtımında elektrokimyasal yükseltgemenin kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.

- [12] Soydan, A. B. ve Saraç A. S., *Genel üniversite kimyası ve modern uygulamaları*, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul, 1998.
- [13] Walsh, F. C., *A first course in electrochemical engineering*, Electrosynthesis Company Inc., The Environmental Consultancy, 13-63, 76-83, 1993.
- [14] Pletcher, D., *A first course in electrochemistry*, Electrosynthesis Company Inc., The Environmental Consultancy, 189-197, 1991.
- [15] Francesco, M. D. ve Costamagra, P., *On the design of electrochemical reactors for the treatment of polluted water*, *Journal of Cleaner Production*, Articles in Press, 1-2, (2002).
- [16] Prentice, G.A., *Electrochemical engineering principles*, Prentice- Hall International Editions, 1991.
- [17] Gürel, C., *Tekstil atıksularından boyar maddelerin elektrokimyasal yükseltgeme ile giderimi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [18] Yavuz, Y., *Tekstil atıksularından boyar maddelerin elektroadsorpsiyonla giderimi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1998.
- [19] İnan, H., Şimşek, H., Karpuzcu, M. ve Dimoglo, A., *Elektrokimyasal yöntemler ile zeytinyağı endüstrisi karasuyunun arıtılabilirliği*, 1. Zeytinyağı Üretiminde Çevre Sorunları ve Çözümleri Uluslararası Çalıştayı Bildiriler Kitabı, Balıkesir, 167-178, 2002.
- [20] Chen, G., *Electrochemical Technologies in wastewater treatment*, "Separation Purification Technology", **11**, 27-28, 2004.
- [21] Mollah, A. M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., Cocke, D. L., *Electrocoagulation (EC)-science and applications*, "Journal of Hazardous Material", 29-40, 2001.
- [22] Emamjomeh, M. M., Sivakumar, M., "Review of Pollutants Removed by Electrocoagulation and Electrocoagulation/Flotation Processes", *Journal of Environmental Management*, 90, 1663–1679, 2009.
- [23] Uğurlu, M., *Elektrokoagülasyon yöntemiyle kağıt atıksularında bazı inorganik bileşenlerin giderilmesi*, "G.U.Journal of Science", **85**, 2004.

- [24] Eyvaz, M., Bayramoğlu, M., Koby, M., *Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: Teknik ve ekonomik değerlendirme*, "İTÜ dergisi, su kirlenmesi kontrolü, Cilt:16, Sayı 1-3 ", 55, 2006.
- [25] Koby, M., Şentürk, E., Bayramoğlu, M., "Treatment of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, 172, 2006.
- [26] Ni'am M. F., Othman F., Sohaili J., Fauzia Z., Removal of COD and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique, *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, Vol 11, No 1 2007:198-205
- [27] Asselin M., Drogui P., Benmoussa H., Blais J. F., *Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells*, *Chemosphere*, 72, 1727–1733, 2008.
- [28] Ün, Ü.T., Koparal A.S., Ögütveren Ü.B., Hybrid Processes for the Treatment of Cattle-Slaughterhouse Wastewater Using Aluminum and Iron Electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 164, 580 – 586, 2009.
- [29] Franson, M.A.H., *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition*, American Public Healt Association Washington, A.B.D., 1998
- [30] Timmes, T. C., Kim, H. C., Dempsey, B. A., "Electrocoagulation Pretreatment Of Seawater Prior To Ultrafiltration: Bench-scale Applications For Military Water Purification Systems", *Desalination*, 249, 895–901, 2009.
- [31] Alinsafi, A., Khemis, M., Pons, M. N., Leclerc, J.P., Yaacoubi, A., Benhammou, A., Nejmeddine, A., "Electro-Coagulation of Reactive Textile Dyes and Textile Wastewater", *Chemical Engineering and Processing*, 44, 461–470, 2005.

EKLER

Ek - 1 Örnek Hesaplamalar

Akım Yoğunluğu Hesaplaması

Yapılan çalışmalarda 1,1 cm çapında ve 72 cm uzunluğunda 3 adet demir çubuk elektrottan oluşan anot kullanılmıştır. Uygulanacak olan 6,8 amperlik (I) akıma karşılık gelecek olan akım yoğunluğu mA/cm² cinsinden;

$$\text{Bir çubuğun etkin ıslak alanı (A) (cm}^2\text{)} = 2 \times \pi \times r \times h = 2 \times \pi \times 0,55\text{cm} \times 65,5\text{ cm} \\ = 226,4\text{ cm}^2$$

$$\text{Toplam anot alanı (A}_T\text{) (cm}^2\text{)} = n \times A = 3 \times 226,4\text{ cm}^2 = 679,2\text{ cm}^2$$

$$\text{Akım yoğunluğu (i) (mA/cm}^2\text{)} = \frac{I}{A_T} = \frac{6,8\text{ A} \times \frac{1000\text{ mA}}{1\text{ A}}}{679,2\text{ cm}^2} = 10\text{ mA/cm}^2$$

olarak hesaplanmıştır.

KOİ Derişimi Hesaplaması

Mezbaha atıksuyu ile yapılan çalışmada orijinal pH' da, 0,1 M Na₂SO₄ derişiminde, 40 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 600 mL/dk akış hızında, 30. dakika sonunda kalan KOİ derişimi mg/L cinsinden;

$$\text{KOİ (mg/L)} = \frac{8000 \times N (A - B)}{V_0} = \frac{8000 \times 0,24\text{ N} \times (0,6 - 0,285)}{1\text{ mL}} = 605\text{ mg/L}$$

olarak hesaplanmıştır.

Burada;

N : DAS'ın normalitesi (N)

A : Şahidin titrasyonu için harcanan DAS hacmi (mL)

B : Örneğin titrasyonu için harcanan DAS hacmi (mL)

V₀ : Örnek hacmi (mL)

Yüzde Giderim Hesaplaması

Yapılan çalışmada KOİ derişimi 90 dakika içinde 840 mg/L'den 235,2 mg/L'ye düşürülmüştür. KOİ' nin 90 dakika sonundaki yüzde giderimi;

$$\% \text{ Giderim} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 = \frac{840 - 235,2}{840} \times 100 = \% 72$$

şeklinde hesaplanır.

Enerji Tüketimi Hesaplaması

Mezbaha atıksuyunun arıtımında 40 mA/cm² akım yoğunluğunda, orijinal pH'da, 600 mL/dk akış hızında ve 0,1 M destek elektrolit derişiminde 90 dakika sonunda harcanan enerji kWh/m³ cinsinden;
Gerilim ve KOİ derişimi 90 dakika boyunca aşağıdaki tablodaki gibi kaydedilmiştir.

Zaman (dk)	Gerilim (V)	C (mg/L)
0	6,00	840
15	6,20	672
30	7,20	605
45	7,40	504
60	7,70	438
75	7,90	336
90	8,20	288

15. dakika sonunda enerji tüketimi;

$$\begin{aligned} \text{Enerji tüketimi [kWh/m}^3] &= \frac{V \times I \times t}{V_{\text{çözeltili}}} = \\ &= \frac{6,20V \times 27,2A \times (15dk / 60dk) \times h}{0,0008 \text{ m}^3} \times \frac{1kW}{1000W} \\ &= 52,7 \text{ kWh/m}^3 \end{aligned}$$

I: Akım (A)

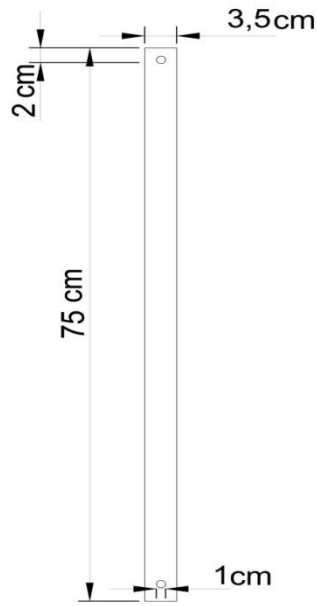
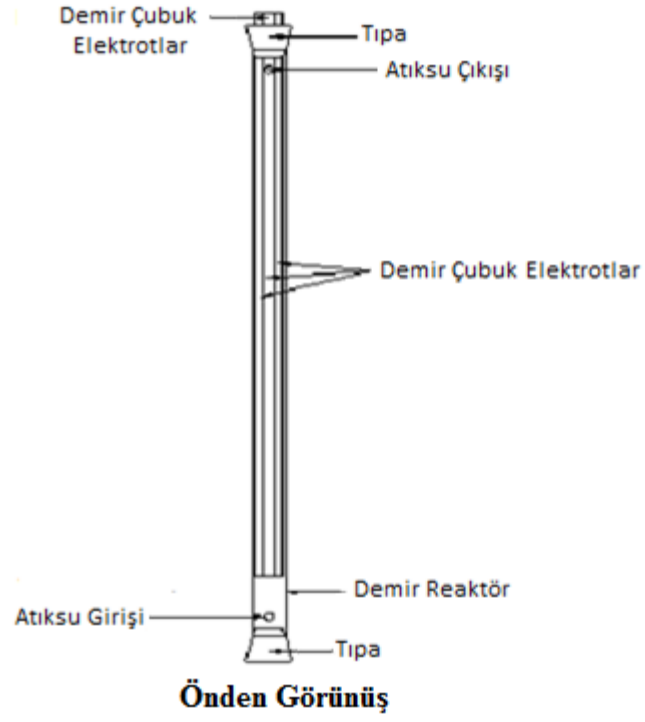
V_{çözeltili}: Çözeltili hacmi (L)

t: zaman (s)

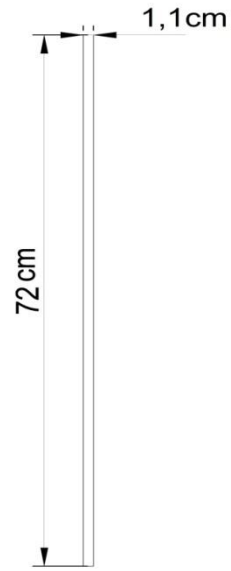
C₀: Başlangıç KOİ derişimi

C: t anındaki KOİ derişimi

Ek - 2 Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Reaktörün Boyutları



Demir Reaktör



Demir Çubuk Elektrot

Ek - 3 KOİ Analizlerinde Kullanılan Reaktör



Ek - 4 Deneylerde Kullanılan Santrifüj Cihazı



Ek - 5 İletkenlik Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz



Ek - 6 pH ve Sıcaklık Ölçümlerinde Kullanılan Cihaz

