

**HİBRİT ELEKTROKİMYASAL PROSESLER İLE DONDURMA
ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ ARITIMI**

ABDULKERİM AKYÜZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HİBRİT ELEKTROKİMYASAL PROSESLER İLE DONDURMA
ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ ARITIMI

Abdulkerim AKYÜZ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Şeref KESKİN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 12/01/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

12 Ocak 2024

Abdulkerim AKYÜZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat SOLAK'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

12 Ocak 2024

Abdulkerim AKYÜZ



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI.....	4
2.1. DONDURMA ÜRETİM TESİSİ.....	4
2.1.1. Süt.....	4
2.1.2. Dondurma Üretimi.....	4
2.1.3. Dondurma Üretimi Mix Hazırlama.....	5
2.1.4. Dondurma Üretiminde Kullanılan Maddeler.....	6
2.1.4.1. Yağ.....	7
2.1.4.2. Sütün Yağsız Katı Formu.....	7
2.1.4.3. Tatlandırıcılar.....	7
2.1.4.3. Stabilizatör.....	8
2.2. DONDURMA ÜRETİM TESİSLERİNDE ATIKSU OLUŞUMU VE ATIKSULARIN ARITILMASI.....	8
2.3. ELEKTROKİMYASAL PROSESLER.....	10
2.3.1. Elektro-Fenton Prosesleri (Elektrofenton, Foto-Elektrofenton, Sono- Elektrofenton).....	11
2.3.2. Elektroflotasyon Yöntemi.....	12
2.3.3. Elektrodializ Yöntemi.....	13
2.3.4. Elektrokoagülasyon (EK) Prosesi.....	14
2.3.4.1. Alüminyum Elektrotlu EK Reaktörlerinde Gerçekleşen Tepkimeler	15
2.3.4.2. Demir Elektrotlu EK Reaktörlerinde Gerçekleşen Tepkimeler	17
2.3.4.3. Elektrokoagülasyonun avantajları ve dezavantajları	19
2.3.4.3. EK yönteminde dikkat edilmesi gereken parametreler	20
2.3.5. Elektrokoksidasyon	22
2.3.6. Elektrodeiyonizasyon.....	23
2.3.7. Hibrit Elektrokimyasal Prosesler	24
3. MATERYAL METOT.....	29
3.1. ATIKSUYUN TEMİNİ VE ÖZELLİKLERİ	29
3.2. DENEY DÜZENEGİ	29
3.2.1. Kesikli Akış İçin Reaktör Tasarımı.....	29
3.2.2. Deneysel İşlemin Yapılışı.....	29
3.3. DONDURMA ATIKSUYUNDA pH, İLETKENLİK, TDS, AKM, KOİ ÖLÇÜMÜ.....	30

3.3.1. pH ölçümü.....	30
3.3.2. İletkenlik Ölçümü.....	30
3.3.3. TDS Ölçümü	30
3.3.4. AKM Ölçümü	30
3.3.5. TOK Ölçümü	30
3.3.6. KOİ Ölçümü	30
3.3.7. SEM/EDS Ölçümü	30
3.4. DENEYSEL VERİLERİ HESAPLAMAK İÇİN KULLANILAN EŞİTLİKLER.....	31
3.4.1. Akım Yoğunluğu Hesaplamak İçin Kullanılacak Eşitlik	31
3.4.2. Akım Verimi	31
3.4.3. Toplam Çözünen Demir ve Alüminyum Miktarı.....	31
Toplam çözünen Fe ve Al miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır... 31	
3.5. TÜKETİLEN ENERJİ	32
3.6. ORTALAMA OKSİDASYON DEĞERİ	32
3.7. KARBON OKSİDASYON DEĞERİ	32
4. BULGULAR VE ÖNERİLER.....	33
4.1. FE/PC/TiRuO ₂ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	33
4.1.1. Fe/PC/TiRuO ₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	35
4.1.2. Fe/PC/TiRuO ₂ hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	37
4.2. AL/PC/TiRuO ₂ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	37
4.2.1. Al/PC/TiRuO ₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	39
4.2.2. Al/PC/TiRuO ₂ hibrit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal reaktörün enerji tüketimi, enerji ve akım verimliliği parametrelerinin değerlendirilmesi.....	41
4.3. FE/PC/GRAFİT HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	41
4.3.1. Fe/PC/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	43
4.3.2. Fe/PC/Grafit hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	45
4.4. AL/PC/GRAFİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	46
4.4.1. Al/PC/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	47

4.4.2. Al/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	49
4.5. Al/PÇ/Al ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	50
4.5.1. Al/PÇ/Al elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	51
4.5.2. Al/PÇ/Al Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi	53
4.6. Fe/PÇ/Fe ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ.....	54
4.6.1. Fe/PÇ/Fe elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	56
4.6.2. Fe/PÇ/Fe Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi	57
4.7. TiRuO ₂ /PÇ/GRAFİT HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	58
4.7.1. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	59
4.7.2. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	61
4.8. BDD/PÇ/PÇ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ	62
4.8.1. BDD/PÇ/PÇ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi	63
4.8.2. BDD/PÇ/PÇ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	65
4.9. ELEKTROT BAĞLANTI TÜRLERİNİN KOİ/TOK GİDERİM VERİMİNE ETKİSİ ...	66
4.10. ÇÖZÜNÜR ELEKTROTLARIN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL PROSESLER SONRASI OLUŞAN ATIK ÇAMURUN ANALİZİ	70
5. SONUÇLAR.....	77
6. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Sütün içerisindeki bileşenler.....	4
Şekil 2.2. Günümüz endüstriyel dondurmaya ait üretim şeması.	6
Şekil 2.3. Dondurmanın üretim aşamasının şematik diyagramı. (1) karıştırma, (2) pastörizasyon, (3) dondurma, (4) sertleştirme ve (5) dondurma üretim sonu.	9
Şekil 2.4. Atıksu arıtma tesisi akım şeması.	10
Şekil 2.5. Atıksuların Arıtımında kullanılan Elektrokimyasal Prosesler.....	11
Şekil 2.6. Elektroflotasyon şematik gösterimi	13
Şekil 2.7. Elektrodializ klasik yöntem şematik gösterimi.	13
Şekil 2.8. EK prosesinin şematik gösterimi.	14
Şekil 2.9. EK Reaktöründe Al Elektrotu kullanırsa gerçekleşebilecek reaksiyonlar.....	16
Şekil 2.10. EK'de oluşabilecek monomerik yapıda Al türevleri.....	17
Şekil 2.11. Dimerik ve polimerik Al ⁺³ yapıları.....	17
Şekil 2.12. EK Reaktöründe Fe Elektrotu kullanırsa gerçekleşebilecek reaksiyonlar....	17
Şekil 2.13. EO prosesinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.14. Elektrodeiyonizasyonun çalışma prensibi (AM: Anyon değiştirici membran, CM: katyon değiştirici membran, D: seyreltik bölme, K: derişik bölme).....	24
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.	30
Şekil 4.1. Fe/PÇ/TiRuO ₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.	34
Şekil 4.2. Fe/PÇ/TiRuO ₂ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.	35
Şekil 4.3. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.4. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.	36
Şekil 4.5. Fe/PÇ/TiRuO ₂ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	37
Şekil 4.6. Al/PÇ/TiRuO ₂ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.	38
Şekil 4.7. Al/PÇ/TiRuO ₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.	39
Şekil 4.8. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.	40
Şekil 4.9. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.	40
Şekil 4.10. Al/PÇ/TiRuO ₂ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	41
Şekil 4.11. Fe /PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.	43
Şekil 4.12. Fe/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.	43

Şekil 4.13. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	44
Şekil 4.14. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	45
Şekil 4.15. Fe/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	45
Şekil 4.16. Al/PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.....	47
Şekil 4.17. Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ- TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.....	47
Şekil 4.18. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	48
Şekil 4.19. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	49
Şekil 4.20. Al/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	49
Şekil 4.21. Al/PÇ/Al elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma....	51
Şekil 4.22. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.....	51
Şekil 4.23. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	52
Şekil 4.24. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	53
Şekil 4.25. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	53
Şekil 4.26. Fe/PÇ/Fe elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma....	55
Şekil 4.27. Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.....	55
Şekil 4.28. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	56
Şekil 4.29. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	57
Şekil 4.30. Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	57
Şekil 4.31. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.....	59
Şekil 4.32. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ- TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.....	59
Şekil 4.33. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	60
Şekil 4.34. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.35. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	61
Şekil 4.36. BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.....	63
Şekil 4.37. BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ- TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.....	63
Şekil 4.38. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.....	64
Şekil 4.39. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.....	65
Şekil 4.40. BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).....	66
Şekil 4.41. Farklı Elektrot bağlantı türlerinin KOİ Giderim verimine etkisi.....	67
Şekil 4.42. Farklı Elektrot bağlantı türlerinin TOK Giderim verimine etkisi.....	67
Şekil 4.43. Fe/PÇ/TiRuO ₂ elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proste	

KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	71
Şekil 4.44. Fe/PÇ/Grafit elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	72
Şekil 4.45. Al/PÇ/TiRuO ₂ elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	73
Şekil 4.46. Al/PÇ/Grafit elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	74
Şekil 4.47. Al/PÇ/Al elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	75
Şekil 4.48. Fe/PÇ/Fe elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.....	76

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Literatürde hibrit elektrokimyasal prosesler ile yapılan çalışmalar.....	27
Çizelge 3.1. Dondurma üretim atıksu karakterizasyonu.....	29
Çizelge 4.1. Fe/ /PÇ/ TiRuO ₂ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.....	33
Çizelge 4.2. Al /PÇ/ TiRuO ₂ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.....	38
Çizelge 4.3. Fe/PÇ/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.....	42
Çizelge 4.4. Al /PÇ/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.....	46
Çizelge 4.5. Al /PÇ/Al Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları	50
Çizelge 4.6. Fe /PÇ/Fe Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları	54
Çizelge 4.7. TiRuO ₂ /PÇ/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları. ..	58
Çizelge 4.8. BDD/PÇ/PÇ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.	62

KISALTMALAR

AKM	Askıda katı madde
Al	Alüminyum
AO	Anodik oksidasyon
AOPs	İleri oksidasyon yöntemleri
BDD	Bor katkılı elmas elektrotlar
CF	Karbon Keçe
cm	Santimetre
DC	Doğru Akım
Dk	Dakika
E	Akım verimi
EF	Elektro fenton
EK	Elektrokoagülasyon
EO	Elektro oksidasyon
Fe	Demir
G	Gram
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
L	Litre
mA	Miliamper
Mg	Magnezyum
PÇ	Paslanmaz Çelik
T	Sıcaklık
t	Zaman
TÇK	Toplam çözünmüş katı
TOK	Toplam organik karbon

ÖZET

HİBRİT ELEKTROKİMYASAL PROSELER İLE DONDURMA ÜRETİM TESİSİ ATIKSULARININ ARITIMI

Abdulkerim AKYÜZ

Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Murat SOLAK

Ocak 2024, 87 sayfa

Dünya nüfusundaki artış, her geçen gün değişen ve gelişen insan ihtiyaçlarının karşılanması adına endüstriyel tesislerdeki üretimin artmasına neden olmaktadır. Üretim esnasında kullanılan hammaddelerin ve üretim sonucu oluşan atıkların miktarı oldukça fazladır. Bu üretimlerin yapılabilmesi için en tabii ihtiyaçların başında su gelmektedir. Yüksek miktarlarda su tüketen endüstriyel tesislerde oluşan atıksuların arıtılması ve tekrar kullanılması son derece önemlidir. Üretim süreçlerinde oluşan atıksuların arıtılması için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri de elektrokimyasal tekniklerdir. Elektrokimyasal teknikler kullanılan elektrot türlerine göre elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon ve elektroflotasyon prosesleri olarak çalışabilmektedir. Genellikle, elektrokimyasal sistemlerde EK veya EO prosesi olarak atıksu arıtımında uygulamalar bulunmaktadır. Ancak eş zamanlı olarak aynı reaktörde hibrit elektrot türlerinin kullanımı konusunda dondurma üretim proses atıksularının arıtımı üzerine yapılan çalışmalar kısıtlı kalmıştır. Bu tez çalışmasında, Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit hibrit elektrot türleri ile Al/PÇ/Al, Fe/PÇ/Fe, TiRuO₂/PÇ/Grafit, BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı türlerinin KOİ ve TOK giderim verimlerine etkileri incelenmiştir. En yüksek KOİ/TOK giderim verimi %95 ile BDD/PÇ/PÇ elektrot türü olduğu belirlenirken, en düşük giderim verimi %59 ile Al/PÇ/Grafit elektrot türünde elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, dondurma atıksularının biyolojik bozunurluğunun belirlenmesi amacıyla Ortalama Oksidasyon değeri (OOD), karbon oksidasyon değeri (KOD) gibi parametreler incelenmiştir. Elektrokimyasal proseslerin işletilmesinde en önemli parametrelerden enerji tüketimi, akım verimi, elektrik enerjisi verimi gibi parametreler belirlenmiştir. Çalışmada yüksek KOİ içeriğine sahip atıksulardan biri olan dondurma üretimi atıksularının arıtımında özellikle BDD/PÇ/PÇ elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal prosesin etkin olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar sözcükler: Dondurma üretim tesisi atıksuları, hibrit elektrot bağlantısı, KOİ, TOK

ABSTRACT

TREATMENT OF ICE CREAM PRODUCTION PLANT WASTEWATER BY HYBRID ELECTROCHEMICAL PROCESSES

Abdulkerim AKYÜZ

Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences,
Department of Environmental Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat SOLAK

January 2024, 87 pages

The increase in the world population causes the production in industrial facilities to increase in order to meet human needs that change and develop day by day. The amount of raw materials used during production and the waste generated as a result of production is quite high. Water is one of the most natural needs for these productions. It is extremely important to treat and reuse wastewater generated in industrial facilities that consume high amounts of water. Various techniques are used to purify wastewater generated during production processes. One of these techniques is electrochemical techniques. Electrochemical techniques can operate as reactor electrocoagulation, electrooxidation and electroflotation processes, depending on the types of electrodes used. Generally, there are applications in wastewater treatment as EC (electrocoagulation) or EO (electrooxidation) process in electrochemical systems. However, studies on the treatment of ice cream production process wastewater regarding the use of hybrid electrode types simultaneously in the same reactor have been limited. In this thesis study, Fe/SS/TiRuO₂, Al/SS/TiRuO₂, Fe/SS/Graphite, Al/SS/Graphite hybrid electrode types and Al/SS/Al, Fe/SS/Fe, TiRuO₂/SS/Graphite, BDD/SS/SS The effects of electrode connection types on KOD and TOC removal efficiencies were examined. While the highest KOD/TOC removal efficiency was determined to be the BDD/SS/SS electrode type with 95%, the lowest removal efficiency was obtained from the Al/SS/Graphite electrode type with 59%. In addition, in the study, parameters such as Average Oxidation State (AOS) and Carbon Oxidation State (COS) were examined in order to determine the biodegradability of ice cream production wastewater. Parameters such as energy consumption, current efficiency and electrical energy efficiency, which are among the most important parameters in the operation of electrochemical processes, have been determined. In the study, it was concluded that the electrochemical process using BDD/SS/SS electrode type is effective in the treatment of ice cream production wastewater, which is one of the wastewaters with high KOD content.

Keywords: Ice cream production plant wastewaters, hybrid electrode connection, KOD, TOC

1. GİRİŞ

Yaşadığımız gezegenin %71'den fazlası sudan oluşsa da denizler, yani tuzlu sular, tüm su dağıtımının %97'sini oluşturmakta, bu da küresel olarak kullanılabilir su kaynaklarının mevcudiyeti için ciddi bir sorun ortaya çıkarmaktadır. Dünya tatlı su kaynaklarının %68'inden fazlası buzullarda ve %30'u yeraltında bulunduğundan, kullanılabilir su kaynakları oldukça kısıtlıdır[1].

Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü, insan faaliyetleri ve gezegenin mevcut su kaynaklarını tüketen doğal faktörlerin bir sonucu olarak 2050 yılında tatlı su kaynaklarında önemli azalmalar öngörmektedir. Dünyanın en büyük 37 akiferinden 21'inin önemli miktarda su kullandığı ve su tüketiminin her yıl %1 oranında arttığı tahmin edilmektedir [2].

Ülkemiz kişi başına düşen 1.519 m³ su ile, Dünya Yaban Hayatı Fonu'nun 2014 yılı araştırmasına göre "su sıkıntısı çeken" bir ülke olarak ifade edilmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun tahminlerine göre 2030 yılına kadar Türkiye'de 100 milyon insan yaşayacak. Bu durumda kişi başına düşecek su miktarının da azalacağı öngörülmektedir [3].

Birleşmiş Milletler (BM), tatlı su kaynaklarının kapsamlı değerlendirmesinde, 2025 yılına kadar dünya nüfusunun üçte ikisinin su kıtlığı yaşayacağını öngörmektedir. Çünkü artan sera gazı konsantrasyonlarının iklim değişikliğine neden olacağı belirtilmektedir [4]. Sulak alanların doğal sistemlerinin ve su kaynaklarının iklim değişikliğinden etkilenmesi iki şekilde ifade edilmektedir. Birincisi, sıcaklık ve su seviyesi değişimleri gibi biyofiziksel oluşumların doğrudan bir sonucudur. İklim değişikliğinin gezegenimiz üzerindeki ikinci etkisi, istenmeyen sonuçlarıdır. İklim değişikliğinin neden olduğu aşırı hava olaylarının olası etkileri sulak alan taban akışlarındaki değişiklikler, değişen derinlik, artan sel, heyelanlar ve çığlar, toprak erozyonu, akifer yeniden dolusunda bir düşüşün yol açtığı sel potansiyeli, taşkın yatakları ve su kaynağındaki azalması olarak sıralanabilir [5].

İklim değişikliğinin önlenmesi ve tersine çevrilmesi, günümüzde ÷lke yönetimlerinin ve bu konudaki araştırmacıların ana hedeflerinden biri haline gelmiştir. Karşılaştığımız çevresel risklerin üstesinden gelmek için toplumun yeni sürdürülebilir alışkanlıklar konusunda bilinçlendirilmesi oldukça önemlidir. Çevrenin korunması, sosyal uyum ve ekonomik kalkınma, sürdürülebilirliğin üç temel unsurunu oluşturmaktadır [6]. Buna göre sürdürülebilir kalkınma terimi, “Gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılamak” olarak tanımlanmaktadır [7]. Dünya nüfusunun gün geçtikçe artması ve buna bağlı olarak artan ihtiyaçların sağlanması adına gelişen endüstriyel faaliyetlerin yürütülmesi sırasında sürdürülebilirlik konusunun ele alınması gerekmektedir. Endüstriyel sürdürülebilirlik konusunda incelenmesi gereken öncü parametreler ham madde kullanımı, enerji tüketimi, atık oluşumu ve su kullanımınıdır. Çok fazla su tüketen firmalar için incelenmesi gereken en önemli parametre ise suyun optimum şekilde kullanılması ve oluşan atıksuyun arıtılarak ve/veya geri kazanımıdır. Çeşitli faaliyetler neticesinde oluşan atıksular en yakın alıcı ortamlara verilmektedir. Genellikle bu ortamlar atıksu kaynağına en yakın konumda bulunan deniz, göl, ırmaklar gibi ortamlardır ve bu ortamlarda bulunan organizmalar ve diğer canlılar için olumsuz etkileri bulunmaktadır [8]. Bu nedenle üretim süreçlerinde çıkan atıksuların geri kazanımı konusu oldukça önemlidir. Endüstriyel atıksular alıcı ortama deşarj edilmeden önce belirli işlemlere tabi tutularak arıtılmaktadır. Suyun arıtılması konusunda yenilikçi ve ucuz çevre teknolojilerinin geliştirilmesi konusu araştırmacıların hedefi olmuştur [9].

Arıtma tekniklerinden birisi olan elektrokimyasal yöntem, gaz, sıvı ve katıların yer aldığı ortamlarda kolay uygulanabilmesi ve kirleticilerin giderilmesi için yeni yöntemlerde öncü olmaktadır. Elektrokimyasal yöntemin avantajlarına bakıldığında; elektronlar kullanılarak arıtım gerçekteştirilmektedir ve arıtım sonucunda yeni 2 ürünün ortaya çıkması ya da atıkları daha az zararlı hale getirip çevreye olan etkisini azaltmaktadır [8]. Elektrooksidasyon (EO), Elektrokoagülasyon (EK), Elektrodializ[10], Elektrodeiyonizasyon [11] gibi elektrokimyasal arıtma teknikleri, su tiplerini pratik kullanım için kapsamlı bir şekilde hazırlamadaki etkinlikleri nedeniyle son 10 yılda büyük ilgi görmüştür [12].

Elektrokimyasal atıksu arıtma proseslerinden biri olan EK prosesi, elektrolitte metal hidroksit türlerinin üretilmesi ile çözünür metal elektrotları kullanan bir arıtma yöntemidir [13]. Bu proses, küçük yapıdaki koloidal parçacıkları rahatlıkla

uzaklaştırırken bununla beraber daha az çamur üretimi, biyolojik açıdan biyobozunur olmayan organik maddeleri ortamdaki giderirken biyolojik arıtım için de bir ön hazırlık aşaması olarak görülebilir. Bunun yanı sıra metal hidroksit dozajını kolayca düzenler, ağır metal iyonlarını çökeltir veya hidroksitler şeklinde adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılmasını gerçekleştirir. Yaklaşık %90'lık yüksek giderim verimliliği, yaklaşık 10 dakikalık kısa bir temas süresi ve nispeten ucuz bir yatırım maliyeti, iyi tasarlanmış sistemlerde gerçekleştirilebilir [8][14].

Elektrokimyasal olarak atıksu arıtımında kullanılan bir diğer proseste elektrooksidasyon prosesidir. Bu proses, Ti/RuO₂, Ti/IrO₂, grafit, bor kaplı elmas (BDD) gibi çözünmez elektrotların kullanıldığı ve yüksek organik içerikleri etkin bir şekilde giderebilen yeni nesil prosestir [15][16]. Elektrokimyasal prosesler kendi başlarına kullanılabilirler gibi, hibrit sistemler olarak da tasarlanabilmektedir. Hibrit elektrokimyasal sistemlerin su/atıksulara uygulanması 2 farklı şekilde olabilmektedir. Bunlardan biri elektrokimyasal proseslerin ardı sıra kullanımı; örneğin, EK ve EO proseslerinin ardı sıra uygulanması. Diğeri ise, aynı reaktör içerisinde çözünür ve çözünmez elektrot türlerinin kullanıldığı hibrit sistemlerin kullanımı, örneğin, Anot/Katot/Anot olarak Al/PÇ/Ti/RuO₂ kullanımı. Burada reaktör hem EK hem de EO prosesi olarak çalışmaktadır. Bunların haricinde elektrokimyasal sistemlerin hibrit olarak kullanımı farklı arıtma prosesleri ile birlikte kullanımını ifade etmektedir. Örneğin elektrokoagülasyon sonrası membran gibi [17].

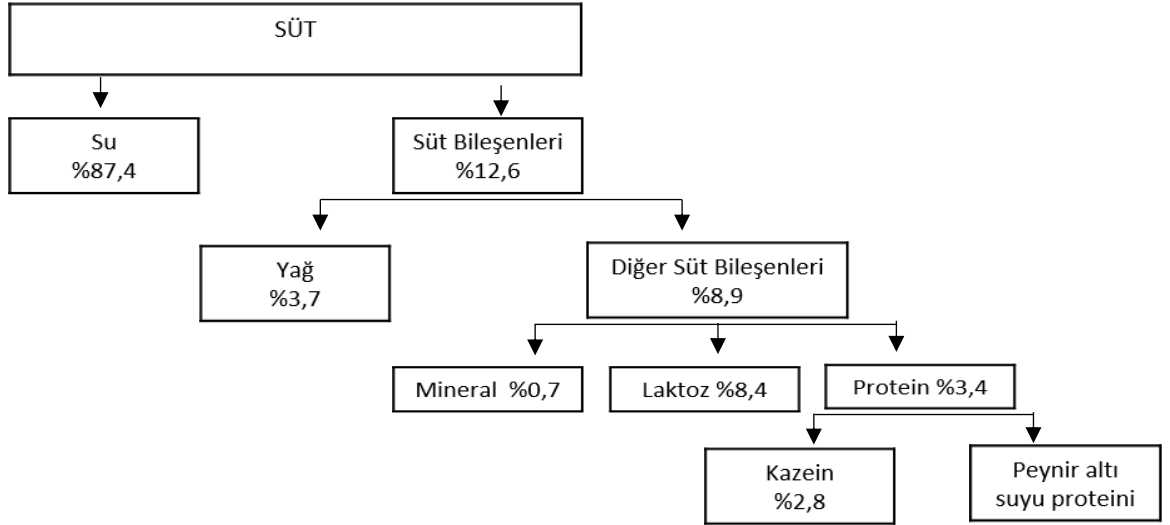
Süt ve süt ürünleri üretim süreçleri önemli miktarlarda su tüketen gıda sektörlerinden biridir. Bu sektörlerde ciddi miktarlarda su kullanılmakta ve dolayısıyla yüksek miktarlarda atıksu oluşmaktadır. Bu atıksular üretim proseslerine bağlı olarak değişmekle birlikte yüksek KOİ, BOİ, yağ-gres, TOK gibi kirleticileri içermektedir. Literatürde, EK ve EO prosesleri bu tür atıksuların arıtımında kullanılmıştır. Ancak, aynı reaktör içerisinde hibrit elektrot bağlantı sistemiyle söz konusu atıksuyun arıtım veriminin değerlendirilmesine yönelik araştırmalar kısıtlı kalmıştır. Bu tez çalışmasında süt ve süt ürünleri üretim endüstrisinden biri olan dondurma üretimi sırasında oluşan atıksuların hibrit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesler ile arıtım etkinliği araştırılmıştır. Proses etkinliği geliştirmek amacıyla anot/katot/anot olarak Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Al, Fe/PÇ/Fe, TiRuO₂/PÇ/Grafit, BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrot bağlantı türleri kullanılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. DONDURMA ÜRETİM TESİSİ

2.1.1. Süt

Süt, çeşitli kimyasal bileşenler içerir ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Süt tipik olarak su, yağ, laktoz, kazein, peynir altı suyu (PAS) proteinleri ve mineralleri içermektedir. Sütün elde edildiği hayvanın kritik fonksiyonlarına dayanan genetik değişkenler ve yetiştirildiği yerden kaynaklanan farklılıklar nedeniyle, bu bileşenlerin sütteki miktarları önemli ölçüde değişebilir [18]. Sütün içerisinde bulunan maddeler Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Sütün içerisindeki bileşenler.

2.1.2. Dondurma Üretimi

Dondurma üretim tesislerinde dondurma, sütlü dondurma, yarım yağlı dondurma ve yağsız dondurma olarak farklı türlerde üretilebilmektedir. Bugüne baktığımızda ise; şeker, yumurta, salep, tatlandırıcılar, stabilizatörler, emülgatörler, aroma vericiler ve renklendirici parçacıklar ile artık farklı tarzlarda sunulabilen bir son ürün haline geldiği bilinmektedir. Arşivlerde yer alan geçmiş belgeler, Çinlilerin dondurmaya ilk kez yaklaşık 3000 yıl önce icat ettiğini göstermektedir. Kıtadaki diğer türler, özellikle İtalya, İngiltere ve Fransa'daki önemli türler ilk olarak Çinliler tarafından üretilen dondurmadan esinlenilmiştir. 16. yüzyıla kadar uzanan Avrupa tarihi kayıtlarındaki kaynaklar, kış aylarında dağların üst kısımlarından toplanıp kırılarak buza dönüştürüldüğünü ve buzun

küçük bölmeli mağaralarda depolandığını belirtmektedir. Ancak bugünkü dondurma olarak değil bilindik buz yapısındadır. Dondurma ürünü Avrupa'da ilk kez 13. yüzyılın sonlarına doğru tanınmaya başlanmış ve 1296'da Marco Polo'nun Çin seyahatleri sırasında gözlemediği buzdan yapılan yemek tariflerini Venedik'e getirmesiyle dondurma terimi kullanılmaya başlanmıştır [19].

Bugün dondurma yapmak için kullanılan yöntemler İtalyanlar, Fransızlar ve İngilizler tarafından geliştirilmiştir. İtalyanlar, dünyanın en çok satan ürünü haline gelen ve Kuzey Amerika ve Avrupa'ya yayılan dondurmanın başlıca üreticileri arasında yer almaktadır.

Üretim sürecinde kullanılan birçok karışım ayarı, koku modeli ve üretim süreci nedeniyle çeşitli dondurma türleri vardır. Dondurmalar içeriklerine göre dört türe ayrılır. Bunlar;

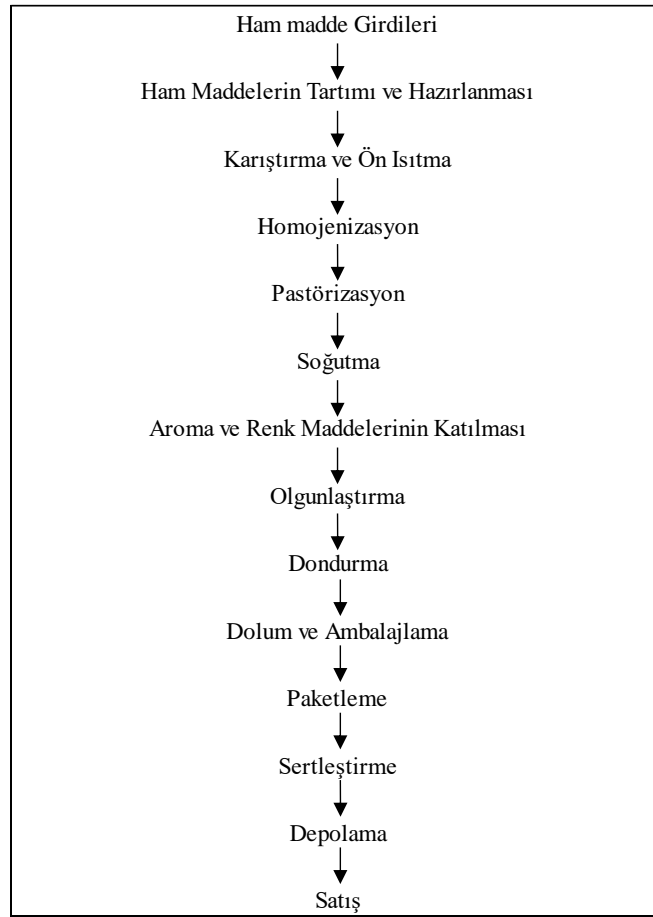
- 1) Süt malzemelerinden yapılan dondurma
- 2) Bitkisel yağ bazlı dondurmalar
- 3) Sütlü meyve ve meyve suyu dondurmaları
- 4) Su, şeker ve meyve konsantresinden yapılan dondurma

Süt, yoğunlaştırılmış süt, krema, tereyağı, şeker, süt tozu ve diğer bileşenler. Süt ürünlerinden üretilen dondurmalar, türüne göre emülgatör, stabilizatör ve aroma bileşenlerinin eklenmesiyle elde edilen dondurmaları içerir. Bitkisel yağ, dondurmalarındaki süt yağından elde edilir ve bunun yerine işlenmiş ve rafine edilmiş hindistancevizi yağı, pamuk tohumu yağı, mısır yağı, soya fasulyesi yağı ve diğer yağlar kullanılır. Bitkisel yağlardan veya bitkisel yağların karışımlarından yapılan dondurmalar, şerbet, meyve ve meyve suyunun yanı sıra bir miktar süt içeren dondurma için kullanılan bir endüstri terimidir. Geleneksel şerbet (su, şeker), meyve veya meyve aromaları, meyve asidi, renklendirici maddeler ve stabilizatörlerle hazırlanan dondurmalar, su, şeker ve meyve konsantresi ile yapılan dondurmalar olarak bilinmektedir. Bazen yağsız dondurma olarak da adlandırılan bu dondurmalar, süt proteini içermemesi, hacim artışının daha az olması ve şeker içeriğinin yüksek olması nedeniyle erime noktasının daha düşük olmasıyla geleneksel dondurmalarından farklılık göstermektedir [20].

2.1.3. Dondurma Üretimi Mix Hazırlama

Kombinasyonun hazırlanması dondurma üretim sürecinin en kritik aşamasıdır. Öncelikle kombinasyonun tarifi hazırlanmalı, ardından formülde yer alacak bileşenlerin yüzde oranları takip edilmelidir. Karışım miktarına göre eklenecek madde miktarının

belirlenmesinin ardından son aşama olarak yüzde oranları belirlenen maddelerin niteliklerine göre birleştirilmesi gerekir [20][21]. Basit karışımlar, tarifteki temel bileşenlerin her birinin tek bir kaynağa sahip olduğu veya yalnızca birinin iki kaynağa sahip olduğu karışımlardır. Bu kombinasyonlar genellikle şeker, süt tozu, krema ve yoğunlaştırılmış süt stabilizatörlerinden yapılıdır. Karmaşık karışımlar, karışıma eklenecek ana bileşenlerden en az birinin birden fazla kaynaktan geldiği karışımlardır. Karmaşık karışımları hesaplarken matematiksel formüller veya cebirsel prosedürler kullanılmaktadır. Kombinasyonun lezzetini ve kalitesini etkilememek için elementlerin miktarları dikkatli bir şekilde hesaplanmalıdır [22]. Şekil 2.2’de Günümüz endüstriyel dondurmaya ait üretim şeması görülmektedir.



Şekil 2.2. Günümüz endüstriyel dondurmaya ait üretim şeması.

2.1.4. Dondurma Üretiminde Kullanılan Maddeler

Dondurmanın hazırlanmasında süt, yağ, şekerler, yağsız süt katıları, stabilizatörler, emülgatörler, tatlandırıcılar ve renklendirici maddelerin tümü mevcut olmalıdır. Dondurmada her gıda ilavesinin kendine has özellikleri vardır. Bu gıda katkı

maddelerinin Türk Gıda Kodeksi tebliğinde belirtilen güvenlik şartlarına uygun olması gerekmektedir [21].

2.1.4.1. Yağ

Dondurmanın yağ içeriği %8 ile %20 arasında değişmektedir. Ayrıca dondurma, kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan biri olan yaklaşık %12 oranında yağ içermesidir. Dondurmanın kalitesi üzerinde olumlu etkisi olan süt yağının yapısı, kıvamı, kokusu ve depolama kapasitesi üzerinde doğrudan etkisi vardır. Krema veya krema, sade tereyağı, süt, tereyağı, süt tozu ve bitkisel yağların tümü üretim sürecindeki süt yağı kaynaklarıdır. Dondurma yapımında bitkisel yağın kullanımı birçok ülkede kısıtlanmıştır. Dondurma tarifinde yetersiz yağ miktarını dengelemek için krema en ideal malzeme olarak kabul edilmektedir. Krema %30 gibi yüksek bir yağ içeriğine sahip olduğundan belirli miktarda sütle karıştırıldığında karışımın yağ içeriği uygun seviyeye ulaşacaktır. Kombinasyondaki krema, dondurmaya daha hacimli bir yapı kazandırarak dokuyu daha yumuşak ve hafif hale getirir [22].

2.1.4.2. Sütün Yağsız Katı Formu

Sütteki su ve yağ dışındaki kuru parçacıklar, dondurmanın kıvamı ve yapısı üzerinde önemli etkiye sahip olan yağsız süt katıdır. Dondurmanın besin değeri, laktoz, protein ve minerallerden oluşan yağsız kuru maddenin varlığıyla artar [20]. Ayrıca havanın eşit şekilde dağılmasını sağlayarak ve hava kabarcıklarının oluşmasına neden olarak donma noktasını düşürerek yapıyı, tadı ve kütleyi iyileştirir [23]. En yaygın kaynaklar süt, yoğunlaştırılmış süt, yağsız süt ve yağsız süt tozudur. Peynir altı suyu ve ayran tozu daha iyi bilinen iki kaynaktır. Dondurma tarifinde yağsız süt katı oranı belirlenirken çok dikkatli olunmalıdır. %12 yağlı dondurma yaparken karışımdaki yağsız kuru madde yüzdesinin %11 ile 11.5 arasında olması gerekir. Aksi takdirde bu matematiksel kusurlar dondurma problemlerinin ortaya çıkmasına neden olacaktır [21].

2.1.4.3. Tatlandırıcılar

Genel olarak dondurma karışımlarının çoğunda bulunan şeker, lezzetin, kıvamın ve katı madde miktarının kontrolünde önemli bir rol oynar. Donma noktasında çalışarak karışımın viskozitesini yükseltir, koku bileşenlerinin etkisini gösterir ve yapısını düzenler. Katkısız saf dondurmada %10-16 oranında bulunması gereken şeker, meyve ve çikolata gibi aroma bileşenlerinde %16-18 oranında bulunabilmektedir. Karışımda bu oranlardan daha fazla şeker kullanılması donma noktasını düşürür ve sertleşme sürecini

zorlaştırır. Ayrıca çok fazla şeker kullanılması dondurmanın yapısını aşırı akışkan hale getirir. Gerekenden daha az şeker kullanılması sıvıda buz kristallerinin oluşmasına neden olmaktadır [20]. Dondurma üretiminde en sık kullanılan şekerler şunlardır:

- Sakaroz,
- Glikoz (dekstroz),
- Nişasta Grubu,
- İvert Şeker (glikoz+fruktoz),
- Sakarin ve sorbitol şeker örnekleridir.

Mükemmel çözünürlüğü ve tatlandırıcı nitelikleri nedeniyle sakaroz, dondurma üretiminde en sık kullanılan tatlandırıcı bileşendir. Sükroz, nişasta şurubu veya glikoz ile değiştirilebilir. Sakkarozdan daha az tatlı olan glikoz ve nişasta şurubu, dondurmanın lezzetini değiştirmeden kuru madde oranını artırır. Dondurma karışımındaki yüksek laktoz seviyesi kumlu bir dokuya neden olabileceğinden tatlandırıcı olarak laktoz kullanılması tavsiye edilmez. Sakarin ve sorbitol genellikle diyet ve diyabetik dondurmalarda bulunur [24].

2.1.4.4. Stabilizatörler

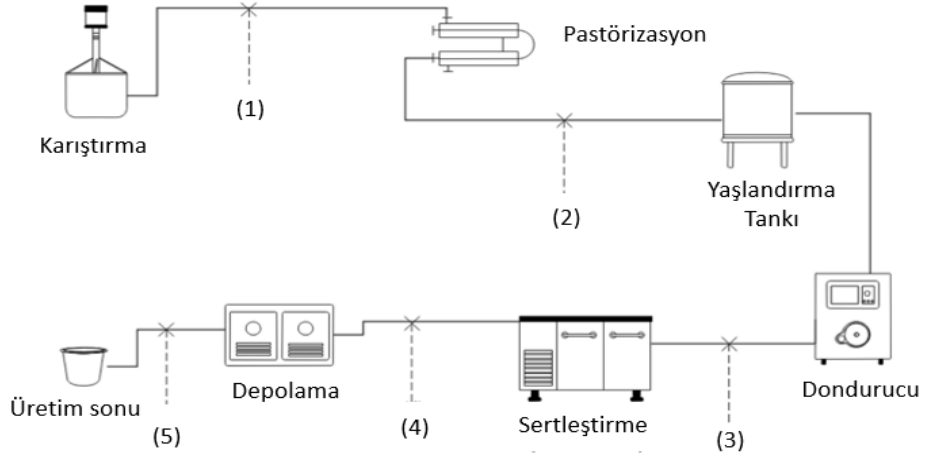
Dondurma karışımına ortalama %0,2-0,4 oranında katılan stabilizatörler, karışımdaki serbest suyu bağlayarak jel yapısını korur. Aşağıda dondurmadaki stabilizatörlerin etkileri ve nitelikleri özetlenmektedir:

- Dondurmanın kıvamını yoğunlaştırıp erime noktasını düşürerek yapının düzenlenmesi
- Eritme işleminin homojen olmasını sağlamak
- Çıktı miktarının artırılması
- Buz kristallerinin oluşumu engellenerek pıhtılaşma önlenir.
- Dondurma karışımına hava girmesine izin vermek.

Dondurma üretiminde çeşitli stabilizatör kaynaklarından yararlanılabilmektedir [20].

2.2. DONDURMA ÜRETİM TESİSLERİNDE ATIKSU OLUŞUMU VE ATIKSULARIN ARITILMASI

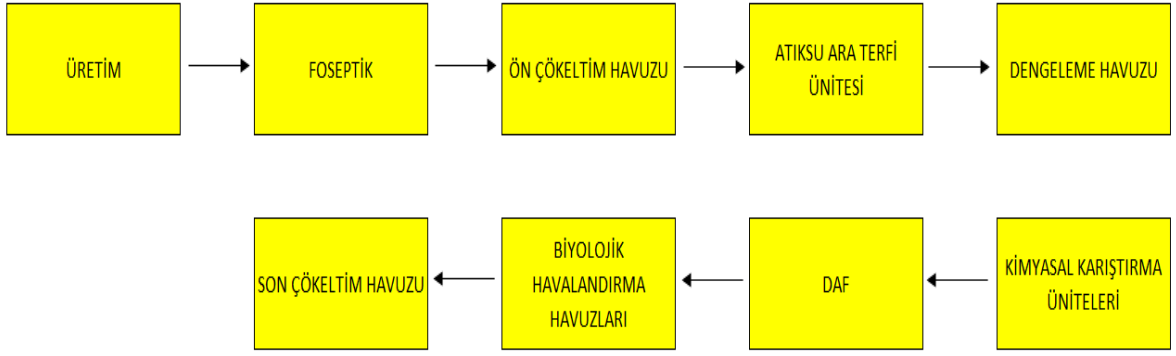
Dondurma üretim sürecine ilişkin akış şeması kabaca Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Dondurmanın üretim aşamasının şematik diyagramı. (1) karıştırma, (2) pastörizasyon, (3) dondurma, (4) sertleştirme ve (5) dondurma üretim sonu [25].

Dondurma üretimi atıksularındaki organik madde miktarı oldukça yüksektir. Bu atıksuların arıtılması için çoğu zaman fiziksel, biyolojik/kimyasal atıksu arıtma yöntemleri birlikte kullanılmaktadır. Dondurma üretiminden çıkan atıksular öncelikle anoksik bir ortam ve koku oluşturmasını önlemek için blower ve difüzör sistemi ile teçhiz edilmiş dengeleme havuzuna gelmektedir.

Dengeleme havuzundan sonra koagülasyon, nötralizasyon ve flokülasyon ünitelerine gelen atıksular gerekli arıtma işlemi sonrasında cazibesiyile DAF ünitesine geçmektedir. Atıksuda büyük miktarlarda yağ bulunur. Çözünmüş hava flotasyonu, söz konusu yağ ayırmak için kullanılan en verimli proseslerden biridir (Çözünmüş Hava Flotasyonu – DAF). Proses boyunca üretilen yağ ayırmak için çözünmüş hava flotasyonuna sahip yağ yüzdürme işlemleri uygulanır. Daha sonra atıksu yüzdürme ünitesinden biyolojik arıtmaya geçmektedir. Biyolojik arıtma için geleneksel aktif çamur sistemi kullanılmaktadır. Biyolojik arıtma sonrasında atıksular son çöktürme havuzuna gelmektedir. Arıtılan atıksu gerekli yönetmelik değerleri sağlandıktan sonra alıcı ortama deşarj edilmektedir. Dondurma üretimi atıksularının arıtıldığı konvansiyonel bir atıksu arıtma tesisi şeması Şekil 2.4'te görülmektedir.

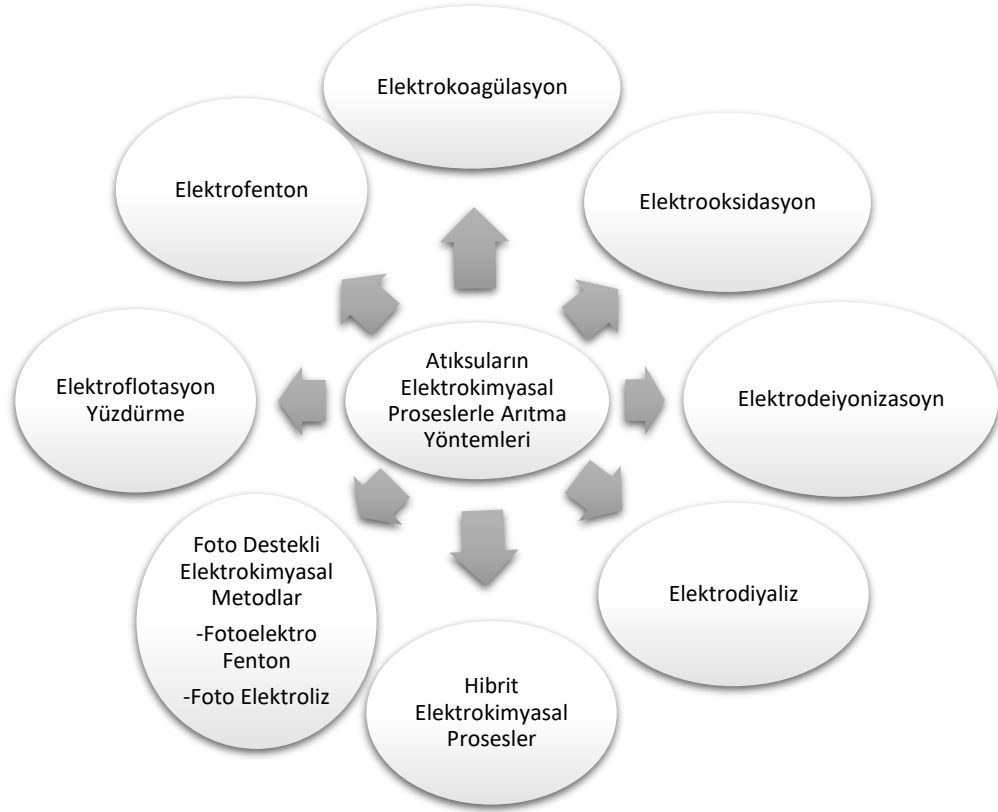


Şekil 2.4. Atıksu arıtma tesisi akım şeması.

Andrade ve arkadaşlarının [26] 2015 yılında nanofiltrasyonla birleştirilmiş aerobik batık membran biyoreaktöründe laboratuvar ölçekli yaptığı çalışmada gerçek süt ürünleri atık suyunun KOI giderim çalışmalarında %99 verim elde edilmiştir. Zkeri ve arkadaşlarının [27] 2021 yılında metajonik hareketli yataklı ve biyofilm reaktörü(anMBBR) ve ardından aerobik MBBR laboratuvar ölçekli yaptığı çalışmada gerçek süt ürünleri atıksuyunun KOI giderim çalışmalarında %93 verim elde edilmiştir.

2.3. ELEKTROKİMYASAL PROSESLER

Süt ve süt ürünleri endüstrisi atıksularının arıtılmasında farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri de elektrokimyasal proseslerdir. Bu prosesler elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon, elektrodializ, elektroflotasyon vb. proseslerdir. Farklı elektrokimyasal prosesler Şekil 2.5'te görülmektedir. Bu proseslerin kullanımı giderilecek kirleticinin türüne, atıksu karakterine göre değişmektedir. Yoğun AKM bulunan atıksuların arıtımında EK prosesi kullanılırken, yüksek organik kirletici içeriğine sahip atıksuların arıtımında EO prosesi kullanılabilir. Atıksulardan kirletici giderim etkinliğinin artırılması amacıyla bu proseslerin hibrit versiyonları da kullanılmaktadır.



Şekil 2.5. Atıksuların arıtımında kullanılan elektrokimyasal prosesler.

2.3.1. Elektro-Fenton Prosesleri (Elektrofenton, Foto-Elektrofenton, Sono-Elektrofenton)

Son yıllarda çeşitli kirleticileri gidermek için elektro-Fenton teknolojisi geliştirilmiş ve bu teknolojinin başarısında katot malzemesi ve yapısının önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir[28]. Hidrojen peroksitin (H_2O_2) bir katot üzerindeki oksijenin indirgenme reaksiyonu yoluyla elektrokimyasal olarak üretildiği elektro-Fenton (E-Fenton) işlemi, sudaki inatçı organik kirleticilerin degradasyonu için etkili bir gelişmiş oksidasyon teknolojisidir [29]. Bu proses, hidroksil radikali H_2O_2 ve eklenen Fe^{+2} organik substratları yok etmek için son derece güçlü ve başarılı bir yöntemdir. Katot malzemeleri, katot üzerinde H_2O_2 üretildiği için E-Fenton işleminde çok önemlidir. Katot performansı, genellikle kirlı suyun arıtılmasından önce H_2O_2 üretim oranı ve akım verimliliği açısından değerlendirilir. Civa, altın ve karbon dahil olmak üzere bazı katotlar H_2O_2 çıkışına izin verir. Bu arada, karbonlu katotlar çevre açısından daha iyi ve ekonomik olarak kabul edilmektedir [30].

Kullanılan elektrotlar, elektrolitik hücrelerde önemli bir kriter olan birim hacim başına yüksek bir yüzey alanı sağlamasına rağmen, hücre direncini artırma ve katot alanının bir

kısmını örtme eğiliminde olan gaz kabarcıklarının yakalanmasında yatan önemli bir dezavantaja sahiptir [31].

EF prosesinde, katodik O₂'nin indirgenmesi ile elektrokimyasal H₂O₂ oluşturulur ve Fe⁺² iyonu eklenince reaksiyon gerçekleşir.



Bu reaksiyon, süperoksit anyonik radikal (O₂) ve H₂O₂ radikal HOO[·] oluşumunu içeren kompleks bir reaksiyondur. EF hidroksil radikallerinin üretimi konusunda diğer yöntemlere göre daha kontrollüdür buda EF'nin bir avantajıdır. H₂O₂'nin devamlı üretilmesi, Fe⁺³ iyonunun katalitik indirgenmesinden dolayı Fe⁺² iyonlarının beraber meydana gelmesi hidroksil radikallerinin oluşmasını sağlar. Reaktifi en az seviyeye indirdiğimiz takdirde işletme maliyetinde düşüş meydana gelecektir bu da prosesin ekonomik uygulanabilirliğini artırır [32].

2.3.2. Elektroflotasyon Prosesi

Elektroflotasyon, kirleticileri su elektrolizinden oluşan küçük hidrojen ve oksijen gazları kabarcıklarıyla bir su kütesinin yüzeyinde yüzdüren basit bir işlemdir. Bu nedenle, katot ve anottaki elektrokimyasal tepkimeler sırasıyla hidrojen evrimi ve oksijen evrimi tepkimeleridir. Elektroflotasyon yönteminin ilk kullanım alanı 1904 yılında Elmore tarafından cevherlerden değerleri minerallerin ayrıştırılması için kullanılmıştır [33].

EF ünitesinin performansı, kirletici giderme verimi ve güç ve/veya kimyasal tüketimle yansıtılır. Kirletici giderme etkinliğinde oluşan kabarcıkların boyutu oldukça önemlidir. Güç tüketimi için, hücre tasarımı, elektrot malzemeleri ve aynı zamanda akım yoğunluğu, su iletkenliği gibi çalışma koşulları ile ilgilidir. Katı parçacıklar yüklenirse, kabarcıklar için zeta potansiyeli önerilir [33]. Genel olarak EF ünitesinin işletme parametreleri optimizasyonunda akım, elektrot tipi, pH ve sıcaklık gibi parametreler ile optimize edilerek en uygun işletme yöntemi belirlenmektedir [34]. EF ünitesinin şematik gösterimi Şekil 2.6'da yer almaktadır.

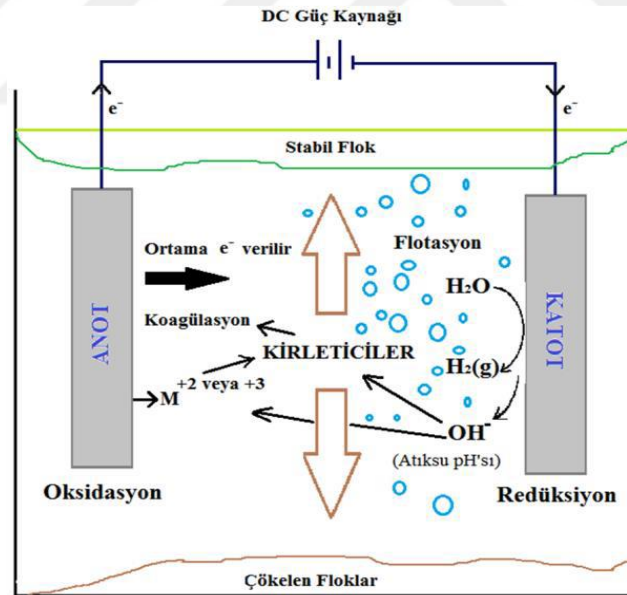
2.3.4. Elektrokoagülasyon (EK) Prosesi

EK prosesi, su/atıksu çözeltisi içerisinde yerleştirilmiş metal elektrotlar ve bu elektrotların bağlı olduğu bir DC güç kaynağı ile mevcut ortama elektrik verilerek ve verilen akımın yoğunluğuna, çözeltinin pH değerine bağlı olarak çözünme oranı değişen elektrot malzemesi ve kirlenmelerin reaksiyona girmesi sonucunda giderilmesini sağlayan bir prosesdir [9][14].

EK yönteminde dikkat edilmesi gereken parametreler şunlardır:

- pH
- Akım yoğunluğu
- Elektroliz süresi
- Elektrot türü
- Karıştırma hızı
- Elektrotlar arası mesafe [14].

EK yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.8'de yer almaktadır.



Şekil 2.8. EK prosesinin şematik gösterimi [14].

EK işleminde, bir DC güç kaynağı ile elektrotlara akım verildiğinde, anot elektrot elektronlar sağlanarak oksitlenir ve katot elektrotu elektronları alarak indirgenir. Katotta metal katyonlarının indirgenmesinin doğrudan bir sonucu olarak hidroksit iyonları üretilir [14][39].

Genel olarak, EK işleminin birbirini takip eden üç aşamayı içerdiği kabul edilir:

- 1.Aşama: Kullanılan elektrotun elektrolitik oksidasyonu ile pıhtılaştırıcıların oluşumu;
- 2.Aşama: Kirletici maddelerin dengesizliği, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması;
- 3.Aşama: Floklar oluşturmak için istikrarsızlaştırılmış aşamaların bir araya getirilmesi [9].

Atıksuların koagülasyonla arıtılmasında, koagülant madde (Fe^{+3} ya da Al^{+3} tuzları vb.) ilave edilmesiyle, organik veya metal içerikli kirleticiler [40][41]. Flokülasyon veya pıhtılaşma prosedürleri ile sudan fiziksel olarak ayrılmadan önce çeşitli pıhtılaşma mekanizmalarını kullanarak pıhtılaşabilmelerinden yararlanırlar [42][43].

Suya pıhtılaştırıcılar eklendiğinde elektriksel çift katmanın uzunluğu genellikle kısalmır. Bu, karşı iyon pıhtılaştırıcıların suda daha yaygın hale gelmesi ve kirleticilerin elektrostatik itme kuvvetlerini azaltmasıyla olur. Bu, hızlı topak oluşumu için gereken yüzey gerilimini ve yük bariyerini düşürür[44].

Aşağıdaki işlemler, kirleticilerin, asılı parçacıkların ve emülsiyonların parçalanma mekanizmalarının kararsız hale getirilmesini açıklamak için kullanılabilir.

- Çözültiden aktarılan akımın yarattığı iyonların etkileşimi ve kullanılan elektrotun çözünmesi, dağılmış çift tabakanın yüklü türler etrafında sıkıştırılmasını sağlar
- Elektrotların elektrokimyasal parçalanmasının yarattığı karşı iyonların neden olduğu atıksuyun iyonik türlerinin yük nötralizasyonu (Elektrostatik parçacıkların doğal itme kuvvetinin azalması nedeniyle, bu karşı iyonlar pıhtılaşma sürecini başlatan Van der Waals kuvvetlerine hakimdir.)
- Koagülasyon kaynaklı flok yapısı ve flok oluşumu ile basit kolloidal partikülleri içine alan ve birbirine bağlayan çamur tabakası oluşumu[9][14].

2.3.4.1. Alüminyum Elektrotlu EK Reaktörlerinde Gerçekleşen Tepkimeler

Al elektrotları kullanılarak EK işleminde Al anotta çözünür (2.2) ve katotta hidrojen gazı (2.4) serbest bırakılır. Anotta, Al'in parçalanması sırasında birçok Al formu oluşturulur. Al türleri, büyük floklar oluşturmak için kirleticilerle birleştiğinde koagülant olarak çalışmaktadır.

Şekil 2.9'da, bir Al elektrotu kullanıldığında EK hücresinde meydana gelen olayları göstermektedir. Al anotları oksidasyon yoluyla suda elektrolitik olarak çözüldüğünde

sulu Al^{3+} türleri oluşur.

Anotta



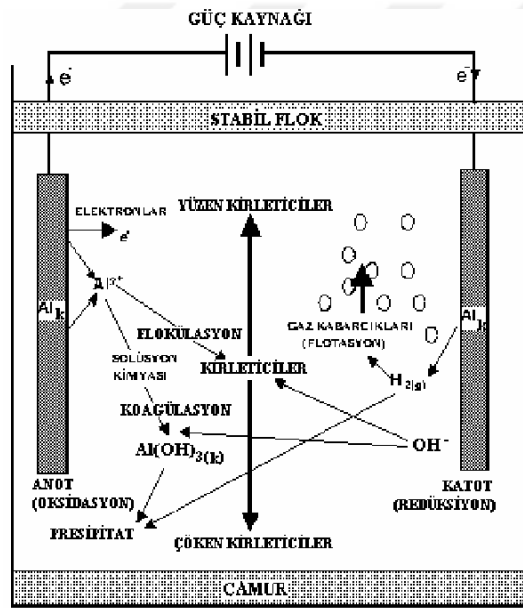
Katotta



Çözeltide

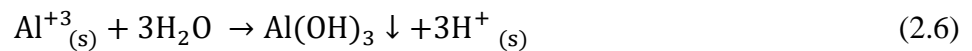


Kimyasal koagülasyona mekanizmaya benzer şekilde, EK işlemindeki pıhtılaştırıcı mekanizması Al elektrotları kullanır. Al^{3+} her iki işlemde de hidrolize edilir, bu da çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleksleri ve çökeltileri ile sonuçlanır[9].



Şekil 2.9. EK Reaktöründe Al Elektrotu kullanırsa gerçekleşebilecek reaksiyonlar.

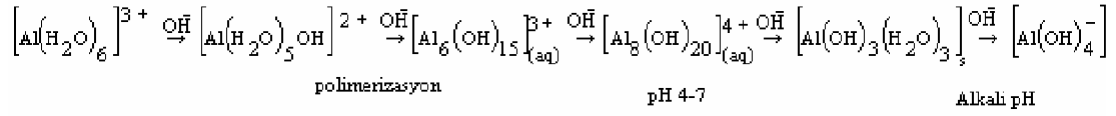
Uygun pH seviyelerinde, alüminyum anot önce $Al(OH)_3$ e ve daha sonrasında takip eden reaksiyonlarla (2.5-2.7) $Al_n(OH)_{3n}$ e polimerleşir. Al^{3+} veya $Al(OH)^{+}_2$ katyonik monomerlerin oluşumunda rol oynar.



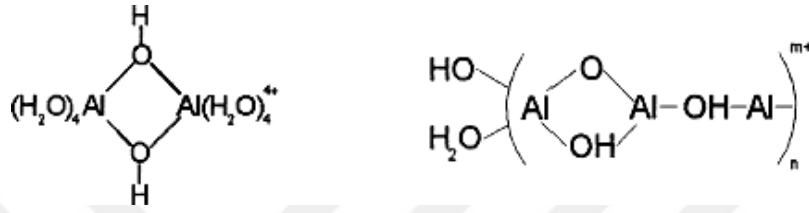
Katotta suyun indirgenmesinin ardından hidrojen üretimi ve hidroksit birikmesi nedeniyle pH yükselir (2.8).



Sulu ortamın pH seviyesine bağlı olarak reaksiyon sonucunda başka Al türleri de oluşturulabilir (Şekil 2.10). Al³⁺ iyonları hidrolize uğrayarak yeni dimerik ve polimerik yapılar (Şekil 2.11) oluşturabilir [45].



Şekil 2.11. EK'de oluşabilecek monomerik yapıda Al türevleri.

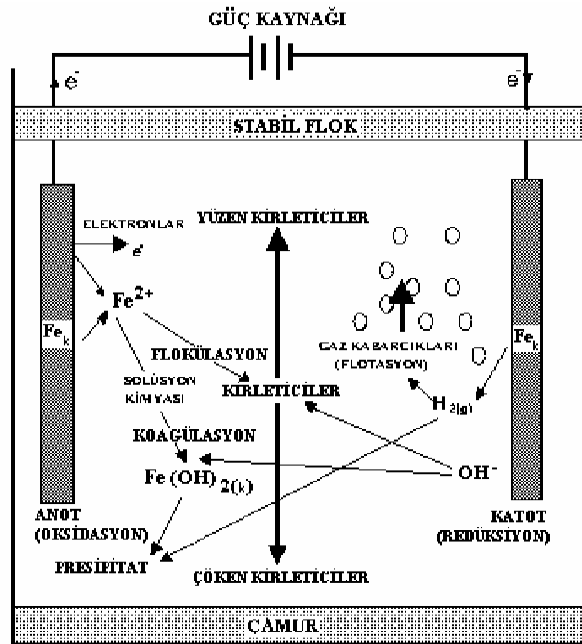


Şekil 2.10. Dimerik ve polimerik Al³⁺ yapıları.

Jel benzeri bir yapıya sahip olan yüklü hidrokso-katyonik kompleksler, kirleticileri adsorbe ederek ve yükü nötralize ederek çökelmeye neden olarak verimli bir şekilde uzaklaştırabilir [9].

2.3.4.2. Demir Elektrotlu EK Reaktörlerinde Gerçekleşen Tepkimeler

Şekil 2.12, bir demir elektrot kullanıldığında EK hücresinin işleyişini göstermektedir.

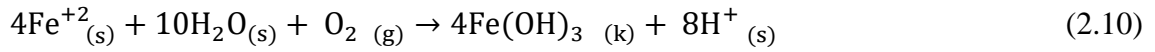


Şekil 2.12. EK Reaktöründe Fe Elektrotu kullanırsa gerçekleşebilecek reaksiyonlar.

Elektrolitik sistem, demirin oksidasyonunun bir sonucu olarak demir hidroksit, $\text{Fe}(\text{OH})_n$ (burada $n=2$ ya da 3) üretir[9][14]. $\text{Fe}(\text{OH})_n$ sentezi için iki farklı yöntem önerilmiştir.

1.Yöntem

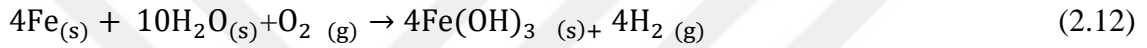
Anotta



Katotta



Çözeltide



2.Mekanizma

Anotta



Katotta



Çözeltide



Al ve Fe elektrotları, kirleticilerin giderilmesindeki etkinlikleri, düşük maliyetleri ve erişilebilirlikleri nedeniyle EK prosesinde en sık kullanılan elektrot türleridir[14][46].

Yeni üretilen amorf $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ "sweep flokları", koloidal parçacıkları yakalayan geniş bir yüzey alanına sahip olduklarından, çözülmüş organik bileşiklerin hızlı adsorpsiyonu için avantajlıdır. Bu nedenle, bu topaklar, yüzdürme veya çökeltme gibi yöntemler kullanılarak sulu çözeltilerden ekstrakte edilmesi kolaydır[47].

Cl^- 'nin doğrudan oksidasyonu ile anot potansiyeli yüksek olduğunda anotta aşağıdaki ikincil reaksiyonlar gerçekleşir[48].



pH seviyesi 3-4 seviyesinden büyükse, üretilen klor bir dismutasyon (kimyasal reaksiyon sonucunda bir malzemedan çıkan iki farklı ürün) sürecinden geçer.



2.3.4.3. Elektrokoagülasyonun avantajları ve dezavantajları

Geleneksel fiziko-kimyasal koagülasyon yöntemiyle karşılaştırıldığında, elektrokoagülasyon tekniğinin önemli avantajları vardır. Çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenen temel avantajlar aşağıda verilmiştir [41][49].

1. Koagülasyona göre daha etkin olması
2. Etkin organik madde giderimi,
3. pH kontrolüne gerek olmaması (özellikle EK prosesinde)
4. Anottan elektroliz yöntemiyle koagülantlar oluşturulabilmesi.
5. Daha az miktarda kimyasal ve daha az enerji tüketimi ihtiyacı vardır,
6. Proses sonunda oluşan çamur miktarının az olması,
7. Düşük işletme maliyeti sunması.

Bu yöntemin dezavantajlarına baktığımızda karşımıza çıkan birkaç problem şu şekilde sıralanabilir [41];

1. Devamlı olarak çalışma gerçekleştiğinden elektrotların yüzeyinde çamur birikmesi,
2. Koagülasyon ile karşılaştırıldığında, daha az çamur üretilir, ancak buna rağmen çamur, çevreye doğrudan deşarjını engelleyen önemli seviyelerde demir ve alüminyum iyonları içerir.
3. Anodun tükenmesi
4. Kalsiyum, magnezyum ve diğer mineraller gerçek atıksularda bulunabilir. H₂ salınımı ve akım akışı, katotta hidroksitlerin birikmesiyle durdurulur. Bunu çözmek için alternatif akım ve aynı anot ve katot malzemesi kullanılabilir,

5. Prosesin kullanıldığı bölgelerde elektrik kullanımı maliyetli olabilir.

2.3.4.4. EK yönteminde dikkat edilmesi gereken parametreler

a) pH:

Elektrokimyasal ortamın pH'ı, elektrokoagülasyon işlemi sırasında değişebilmektedir. Ortamın başlangıç pH'ı ve prosedür için seçilen elektrotların türü bu parametreyi etkiler. Geniş bir pH aralığında çeşitli literatür araştırmalarında çok yüksek verimler görülmüştür. Elektrokoagülasyon prosesinde üretilen metal hidroksitlerin çözünürlüğü, bir öncü olarak belirlenmesi gereken ilk pH değişkenine bağlıdır. Yüksek verim elde etmek için pH'ın belirli bir seviyede ayarlanması gerekir.

Elektrot olarak alüminyum kullanıldığında, çözeltinin başlangıç pH'ı asidik ($\text{pH} < 8$) ise, sistemin çıkış suyunun pH'ı orijinal pH'dan daha büyük olacaktır ve eğer başlangıç pH'ı bazik ise ($\text{pH} > 8$), daha düşük olacaktır. Ek olarak, her koşulda, eğer demir elektrot kullanılıyorsa, atıksuyun pH'ı başlangıç pH değerinden daha büyüktür. Bu bulgular, elektrokoagülasyon yönteminin alkali ortamlarda bir miktar tamponlama kabiliyetine sahip olduğunu göstermektedir. İner tuzlar (Na_2SO_4), potasyum bromür ve halojenli tuzlar (NaCl , NaNO_3) elektrokoagülasyon etkinliğini artırabilir ve atıksuyun iletkenliğini gerekli seviyeye yükseltebilir. Atmosfer klorür içeriyorsa, SO_4^{2-} ve HCO_3^- gibi negatif iyonların etkileri azalabilir. Optimum çalışma için proses ortamındaki anyonların %20'sinin klorür iyonları olması tavsiye edilir. Magnezyum veya kalsiyum iyonları, elektrot yüzeyinde izole bir tabaka oluşturan sülfat ve karbonat iyonlarının bir sonucu olarak çöker. Elektrotlar arasındaki voltaj, ortaya çıkan yalıtkan tabaka tarafından yükseltilir. Sonuç olarak mevcut verimlilik zarar görür [33].

b) Akım Yoğunluğu:

"Birim elektrot (e^-) alanı başına akım" terimi, akım yoğunluğunu ifade eder. Elektrokoagülasyon işleminin ne kadar hızlı çalıştığını etkileyen bir faktördür. Potansiyel sıcaklık artışı ve fazla oksijeni hesaba katmak için düzenlenmelidir. Elektrotlardan yayılan Fe^{2+} veya Al^{3+} iyonlarının miktarı, elektrokoagülasyon prosedüründe kullanılan akımın miktarına bağlıdır [50].

Bu parametre, ortamdaki çözünmüş elektrot miktarına, üretilen yumakların boyutuna, renk gidermenin etkinliğini etkileyecek gaz kabarcıklarının miktarına ve gaz kabarcıklarının boyutuna bağlıdır. Bu değişkeni yükselttikçe gaz

kabarcıklarının boyutu küçülür ve yoğunlukları artar. Çamur yüzdürme, tepeye doğru daha büyük bir akış ve daha hızlı bir kirletici uzaklaştırma burada belirtilmiştir. Faraday Kanunları herhangi bir elektrokimyasal süreci tanımlamak için kullanılabilir. Elektrokoagülasyon sürecinde, Faraday Yasası, anodun çözünmesini ve çözeltiliye iyonların girişini tanımlar. 1. Faraday Yasasına göre kullanılan elektrotlardan alınan metal miktarı uygulanan akımla doğru orantılıdır. Oluşan gaz kabarcıklarının boyutu, metal iyonlarından pıhtı oluşumu hızı ve reaksiyon hızının tümü akımdan etkilenir. Enerji kullanımı ve arıtma maliyetleri akımla birlikte artmaktadır. Sürecin yönü, sürecin verimliliği üzerinde doğrudan bir etkisi olduğu için akım yoğunluğu tarafından belirlenir. Anotların birleşik alanına göre tahmin edilen ideal akım ve akım yoğunluğu belirlenmelidir[51][52].

c) Elektroliz Süresi:

Tüm arıtım işlemlerinde en önemli değişkenler arasındadır. Elektroliz süresi yanlış seçilirse gerekli maliyet verimini elde etmek imkansızdır. Elektroliz süresinin optimize edildiğinden emin olmak önemlidir. Elektrokoagülasyon işlemi sırasında bekleme süresi gereğinden daha kısa süre verildiğinde istenilen koagülant üretimi gerçekleşmez ve istenilen verim elde edilemez. Bu iyonların iyon konsantrasyonu ve hidroksit yumakları, uzun süreli arıtma tekniklerinde yükselir. Maliyet, çamur ve köpük oluşumu ve koku oluşumu onu uygunsuz kılar [53].

d) Elektrot Türü:

Elektrokoagülasyonun arıtım verimini etkileyen en önemli değişkenlerden bir tanesidir. Atıksudaki kirleticilerin, elektrokimyasal arıtmanın türünü tanımlayan giderim verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değişken çok önemlidir çünkü farklı konfigürasyonlar çeşitli tekniklerle kullanılabilir. Örneğin elektrot tipleri mevcut akım ile birlikte çözünme gerçekleştirir. Ancak elektrokoagülasyon sırasında üretilen radikallerin (OH^\cdot) etkisiyle çözünme gerçekleşmez. Elektrot olarak genellikle demir ve alüminyum kullanılır, ancak elektrooksidasyon işlemi için rutenyum, titanyum, platin vb. elektrotlar seçilir [54].

e) Elektrotlar Arası Mesafe:

Elektrokoagülasyon işleminin etkinliği diğer faktörlerle karşılaştırıldığında bu ölçü

önemsizdir. Elektrotlar arasındaki boşluk ayarlanmalıdır. Başka bir deyişle, çok uzak veya çok yakın olmamalıdır. Elektrokimyasal olarak oluşturulan gaz kabarcıkları nedeniyle mesafe yaklaştıkça daha fazla hava boşluklu hidrodinamik görülebilir. Sonuç olarak, pıhtılaştırıcılar ve kirleticiler arasında aşırı bir kütle transferi ve reaktivite oranı vardır. Buna ek olarak, kesikli reaktörler için gerekli elektrokoagülasyon verimine ulaşmak için işlem süresini ve sürekli sistemler için anot ile katot arasındaki kalma süresini tanımlar. Reaktör hacmi hesaplandıktan sonra, karmaşık sistem elektrotlarındaki mesafe, elektrokoagülasyon cihazında kullanılacak elektrot miktarını belirler. Elektrotlar arasındaki boşluk genişledikçe potansiyel fark orantılı olarak büyür. Artan güç kullanımının bir sonucu olarak prosedür daha az maliyetli hale gelir. Elektrotlar birbirine yaklaştıkça adsorpsiyon özelliği ve yumak üretim hızı azalmaktadır [52][55].

2.3.5. Elektrooksidasyon Prosesi

Elektrooksidasyonda (EO), kirleticiler doğrudan veya dolaylı bir oksidasyon işlemi ile bozunur. Doğrudan anodik oksidasyon işleminde, kirleticiler anot yüzeyine adsorbe edilir ve daha sonra anodik elektron transfer reaksiyonu ile yok edilir. Dolaylı oksidasyon sürecinde, hipoklorit / klor, ozon ve hidrojen peroksit gibi güçlü oksidanlar elektrokimyasal olarak üretilir. Kirleticiler daha sonra oluşan oksidanın oksidasyon reaksiyonu ile toplu bir çözelti içinde yok edilir. Tüm oksidanlar yerinde üretilir ve hemen kullanılır [56].

EO işleminde, atıksuda bulunan organik kirleticiler tamamen CO₂'ye mineralize eder ve bu organik madde, anodik elektron transfer reaksiyonu ve işlem sırasında oluşan hidroksil radikalleri, hidrojen peroksit ve çözeltide hipoklorit/klor gibi güçlü oksidanlar tarafından okside edilerek verimin artırılmasını sağlamıştır[57].

Anodik reaksiyonlar

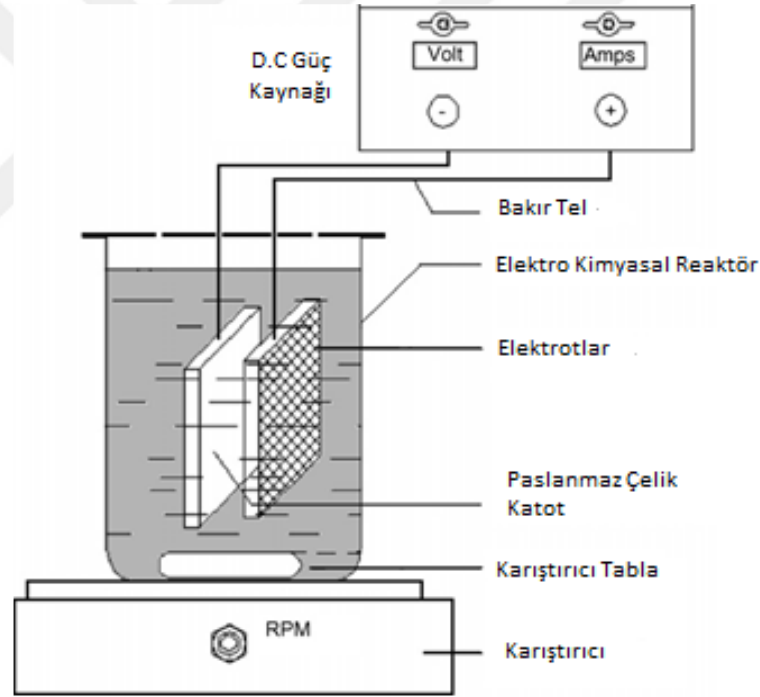


Katodik reaksiyonlar





EO işlemleri çok kirli atıkları işleyebilir, oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında çalışabilir, Temiz bir tekniktir, zararlı veya pahalı olabilecek herhangi bir kimyasal reaktife ihtiyaç duymaz, kirleticilerin pıhtılaşma, membran, filtrasyon ve adsorpsiyon işlemlerinin aksine nihai ürüne kadar veya ürünler tarafından daha az toksik hale gelebilmesi, kolayca çalıştırılabilir ve ayrıca oksitleyici maddeler yerinde üretildiği ve EO işlemleri sırasında kullanıldığı için optimum güvenlik durumu olması, kimyasal oksidasyonun aksine kimyasal reaktiflerin ilave edilmesine gerek olmaması, istenmeyen reaksiyon yan ürünleri ve çamur üretmemesi ayrıca biyolojik olarak parçalanamaz organik maddeleri mineralize edebilen ve azot türlerini ortadan kaldırabilen, çevresel açıdan elverişli bir teknolojidir[58][59][60]. Şekil 2.13’de EO prosesinin şematik görünümü yer almaktadır.

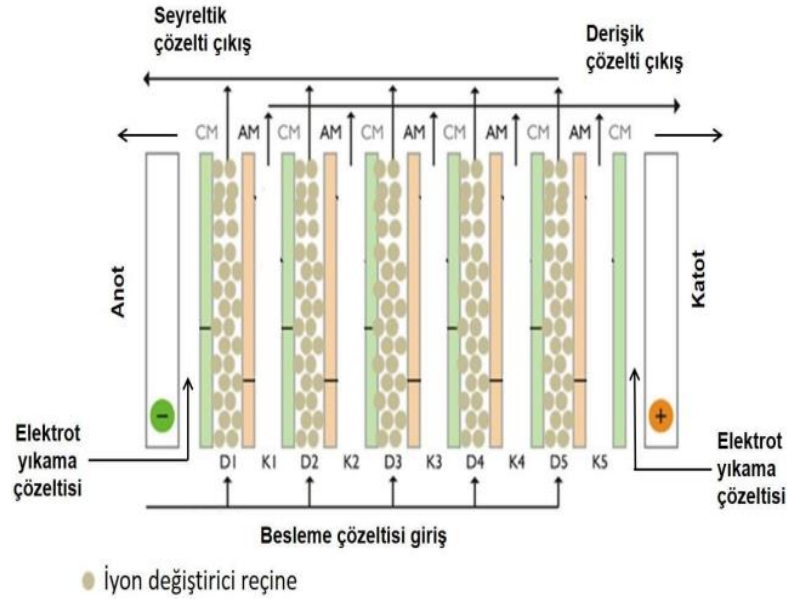


Şekil 2.13. EO prosesinin şematik gösterimi [61].

2.3.6. Elektrodeiyonizasyon Prosesi

İyon değişirme reçineleri ve elektrodializ sistemi, elektrodeiyonizasyon olarak bilinen hibrit sistemi oluşturmak için beraber yürütülen proseslerdir. Bu teknikle iyonik veya iyonik olmayan organizmalar sudan kolaylıkla elimine edilebilir. Seyreltik, konsantre ve elektrot bölmeleri EDI hücrelerini oluşturur. Seyreltik haznesinin içine iyon değişirme reçinesi konur. İyon değişirme reçineleri, iyonların iyon değişirme zarları boyunca

hareket etmesini kolaylaştırır, bu da bu bölmedeki elektrik direncini azaltır. Sonuç olarak, elektrodializ ve iyon değiştirme tekniklerinin, polarizasyon ve kimyasal rejenerasyon dahil olmak üzere birçok dezavantajını azaltır[11]. Elektrodializ yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.14'te yer almaktadır.



Şekil 2.14. Elektrodializ sisteminin çalışma prensibi (AM: Anyon değiştirici membran, CM: kation değiştirici membran, D: seyreltik bölme, K: derişik bölme)[11].

2.3.7. Hibrit Elektrokimyasal Prosesler

Birden fazla elektrokimyasal prosesin art arda ya da eşzamanlı olarak uygulandığı proseslerdir. Elektrokoagülasyon ve Elektrokimyasal oksidasyon prosesi birbiri ardına uygulanabileceği gibi elektrot türlerine bağlı olarak eşzamanlı olarak da gerçekleştirilebilmektedir. Hibrit proseslerde amaç, elektrokimyasal proseslerin atıksu arıtma etkinliğini artırmaktır.

Chanworawoot ve arkadaşları [62] laboratuvar ortamında, bir kağıt hamuru ve kağıt fabrikası tesisinden çıkan atıksuyu oda sıcaklığında elektrokimyasal olarak arıtımını incelemiştir. Elektrokimyasal yaklaşım, birim KOİ başına daha düşük işletme maliyetine sahiptir ve kirletici seviyelerini düşürmede daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha az çamur üretimi gerçekleşmiştir. İncelenen tüm kirleticilerin arıtılmasının etkinliği, atıksuyun seyreltilmesinden, dolaşan suyun akış hızından, akımın yoğunluğundan ve sodyum klorür içeriğinden etkilenmiştir. Rengin, toplam biyolojik ve toplam kimyasal oksijen ihtiyacının (BOİ ve KOİ) ve toplam askıda ve çözünmüş katıların ortadan kaldırılması, etkili olabileceğini göstermiştir.

Optimizasyonun ardından, kesikli modda çalışan elektrokimyasal proses renk, BOİ ve KOİ giderimini sırasıyla yaklaşık %98, %98 ve %97 oranında iyileştirirken, sürekli modda çalışan elektrokimyasal proses renk, BOİ ve KOİ'yi sırasıyla yaklaşık %91, %83 ve %86 seviyelerinde azaltmıştır. Elde edilen sonuçlar, elektrokimyasal yaklaşımın hem arıtma etkinliği hem de işletme maliyetleri açısından üstün olduğunu göstermiştir.

Atalay ve arkadaşları [63] deneysel çalışmalar için çalışma modları kesikli ve sürekli olarak iki farklı yöntem seçilmiştir. Deneysel çalışmalar kesikli sistem için 0,5 L ve sürekli sistem için 1,5 L kapasiteli grafit keçe elektrot donanımlı bölünmemiş bir elektrokimyasal reaktörde gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada, tekstil sektöründe atıksu arıtımı için elektro-Fenton (EF) ve adsorpsiyon proseslerinin kesikli ve sürekli akış teknikleri incelenmiştir. Hibrit EF/adsorpsiyon işlemlerinde bir adsorban olarak sepiyolit kullanılmıştır. Reaksiyon süresi, akım yoğunluğu, Fe^{2+} konsantrasyonu, sepiyolit dozajı ve akış hızı gibi bir dizi değişkenin bağlantılı süreçlerin ne kadar iyi çalıştığı üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Hibrit EF/adsorpsiyon prosesleri, sinerjistik bir etki nedeniyle tek başına EF sürecine kıyasla KOİ ve TOK'un tekstil atıksuyundan uzaklaştırılmasında daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, grafit keçe elektrotlu tek EF tekniği kullanılarak gerçek tekstil atıksuyundan KOİ ve TOK giderim verimliliği sırasıyla %58 ve %36 idi. Eşleştirilmiş EF/adsorpsiyon işlemlerinde KOİ ve TOK giderim verimliliği sırasıyla %85 ve %63'e yükselmiştir. Ek olarak, EF ile adsorpsiyon proseslerinin KOİ ve TOK giderme verimlilikleri arasındaki bağlantıyı hesaplamak için bir Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli geliştirilmiştir. KOİ ve TOK giderimleri için, hem toplu hem de sürekli modlarda, YSA modeli tarafından yapılan teorik tahmin ile gerçek veriler arasında güçlü bir korelasyon keşfedildi. Ek olarak, EF/adsorpsiyon bağlantılı sistem, çeşitli akış hızlarında sürekli akış modunda çalıştırılmıştır. 25 mL dk-1 akış hızında (karşılık gelen HRT 60 dk idi) renk giderme etkinliğinin %90'a yakın olduğu ve KOİ ve TOK giderme etkinliklerinin sırasıyla %92 ve %60 olduğu bulunmuştur. Toplam istatistikler, tekstil atıksu arıtımının EF ve adsorpsiyon prosedürlerini birleştirerek daha sürdürülebilir ve verimli olabileceğini göstermektedir.

Juang ve arkadaşları [64] yapmış olduğu bu çalışmada, partiküllerin ve refrakter organiklerin boya atıksuyundan eş zamanlı olarak uzaklaştırılması için yeni bir BDD/Ti elektrooksidasyon-mikro filtrasyon (EO/MF) hibrit sistemi geliştirmiş ve sonuçlarını değerlendirmiştir. Anot olarak BDD/Ti, katot olarak paslanmaz çelik (PÇ) ve pratik filtreleme için arada bir seramik membran ile sistem boru şeklinde tasarlanmıştır. Asit

Sarı 36 (AY-36), sentetik boya atıksuyunda model organik kirletici olarak kullanılırken, süspansiyonun parçacık yapısını oluşturmak için kaolin eklenmiştir. pH 3'te çalışmalar, 30 mA/cm² akım yoğunluğu ile sürekli yukarı akış modunda yürütülmüştür. Boyalı atıksuda tamamen KOİ giderildi ve atıksudan renk, bulanıklık %90'dan fazla oranda giderilmiştir, bu da MF kullanarak partiküllerin uzaklaştırılmasının EO performansını bozmayacağını göstermektedir. Sonuç olarak, BDD/Ti-EO/MF tek kademeli hibrit sistem, boya üretiminden kaynaklanan atıksuyu arıtmanın etkili bir yolu olabileceği tespit edilmiştir.

Linares-hernández ve arkadaşları [57] arıtılmamış atıksularda elektrokoagülasyon için en iyi çalışma koşulları ilk olarak oluşturulmuştur. pH 8'de, 800 A/m²'lik bir akım yoğunluğunun KOİ'nin yaklaşık %50'sini ortadan kaldırdığı görülmüştür. Atıksu herhangi bir pH ayarlaması yapılmadan 800 A/m²'de elektrooksidize edildiğinde, organik bileşiklerin tamamen mineralleşmesinin 21 saat ve KOİ'nin %50'sinin ortadan kaldırılmasının 3 saat sürdüğü gösterilmiştir. Sonuç olarak iki prosedür entegre edilmiş ve optimize edilmiştir. Elektrokoagülasyonda olduğu gibi aynı pH, 800 A/m² ve 60 dakika elektrooksidasyon için ideal çalışma koşulları olarak bulunmuştur. İki yöntem sırayla uygulandığında KOİ eliminasyonunun 90 dakikada %99'a yaklaştığı gösterilmiştir.

Çizelge 2.1'de hibrit elektrokimyasal proseslerle ilgili yapılan çalışmalara ait özet bilgiler verilmiştir.

Atıksuların arıtımında hibrit elektrokimyasal proseslerin kullanımını konusunda yapılan çalışmalarda 2 farklı elektrokimyasal prosesin kullanıldığı veya elektrokimyasal proseslerin farklı bir arıtma tekniği ile entegre edildiği sistemler olduğu görülmektedir [66-74]. Eş zamanlı aynı reaktör içerisinde hibrit elektrot türlerinin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal sistemler üzerine çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir. Hibrit elektrokimyasal prosesler genellikle diğer proseslere göre daha verimli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Çizelge 2.1. Literatürde hibrit elektrokimyasal prosesler ile yapılan çalışmalar.

Kirletici	Kirletici Konst.	Proses	pH	Reaks. Süresi (dk)	Elektrot türü	Akım Yoğunluğu (mA / cm ²)	Kirletici Giderimi (%)	Kaynak
Renk	-	EK+Mik. filtr.	2-11	6	EK→Fe	5 10 20	96	[66]
TOK (mg/L), KOİ (mg/L), Bulanıklık (NTU)	65 310 35	EK+AD. EK+CWAO	5	10-70	EK→Al	25	EK+AD.→9 1, 25, 96 EK+CWAO → 62, 37, 92	[67]
KOİ (mg/L), TOK (mg/L)	325 52	EK ve ardından EF	EK→8.7 5 EK+EF →3	60	EK→Fe EK+EF→BD D+Karbon keçe	EK→20 EK+EF→ 10	EK→61-35 EK+EF→95 -96	[68]
KOİ(mg/ L), TOK(mg/ L), Bulanıklık (NTU)	267 52 72	EK EK+EF EK+Peroksi Koag. EK+Anadodi k Oks.	EK→8.7 5 EK+AO →3		EK→Fe EK+EF→Fe/ BDD+Karbon keçe EK+PC→Fe + Karbon keçe EK+AO→Fe / BDD+PÇ	EK:10-20 EK+EF:5-10 EK+PC:5-10 EK+AO:5-20	EK:61-44- 92 EK+EF:98.5 -98.1-100	[69]

KOİ (mg/L), TÇK (mg/L) Renk (nm)	380 ± 25 3,17± 0,2 436→1, 04m ⁻¹ 525→1, 27m ⁻¹ 620→2, 45 m ⁻¹	EK EO	phEK→ 4 EO→6,5 EK+EO →9	süre5 27,5 50	EK→Al EO→Ti/PÇ	30 A/m ² 75 A/m ² 120 A/m ²	EK:65-51 EO:70-45 EK+EO(ren k):84-93-97	[70]
Renk (Pt- Co) KOİ (mg/L) Bulanıklı k (NTU)	2100±5 2690±1 0 1500±7	EK→Al EK→Fe EK→Ti NF EK+NF EK+NF EK+NF	7	120	EK→Al EK→Fe EK→Ti NF	20 mA / cm ²	EK(Al)→93 -64-99 NF→87-74- 99 EK+NF→9 5-81-99	[71]
KOİ (mg/L) TOK (mg/L) Renk (660nm)	720 164 1.2	Kimyasal Pıhtılaşma+E O	5,6	45	EO→BDD+ Fe	15	93.5 75 100	[72]
KOİ (mg/L) TOK (mg/L)	702 225	EK+EO	4	29.63	EK→Fe+Ti EO→Grft+Ti	10 mA / cm ²	100 70	[73]
KOİ (mg/L) Fosfat (mg/L)	990 6.9	EK+EO	6,6	90	EK→Fe+Ti EO→Ti /	0,6A	93,5 97	[74]

3. MATERYAL METOT

3.1. ATIKSUYUN TEMİNİ VE ÖZELLİKLERİ

Çalışmada kullanılan dondurma atıksuyu, Bursa’da bulunan ve dondurma üretimi yapan bir fabrikadan temin edilmiştir. Temin edilen atıksuyun özellikleri Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Dondurma üretim atıksuyunun karakterizasyonu.

Parametre	Değer	Birim
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	5,300	mg/L
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	3,117	mg/ L
pH	4-5	-
Yağ ve Gres	756	mg/ L
Toplam Azot	69	mg/ L
Toplam Fosfor	14	mg/ L
Toplam Organik Karbon	1500	mg/ L

3.2. DENEY DÜZENEGİ

3.2.1. Kesikli Akış İçin Reaktör Tasarımı

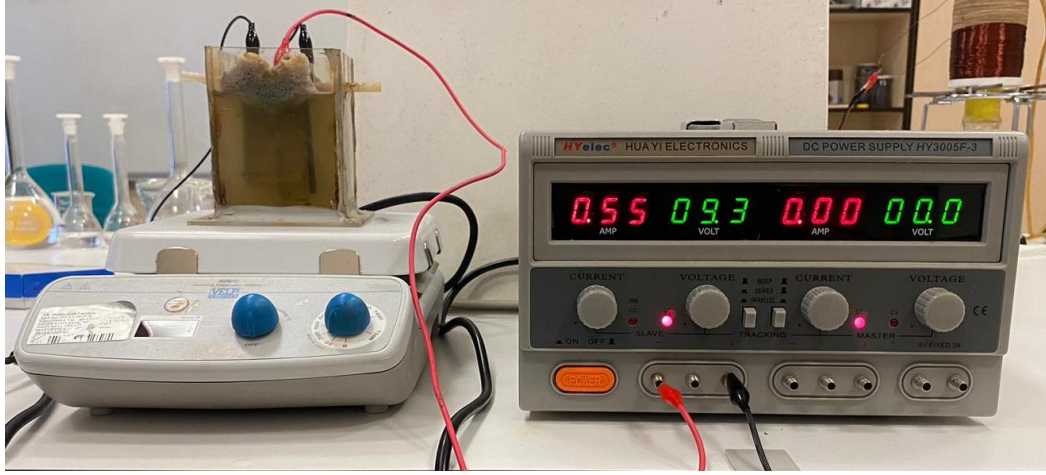
Deneyisel çalışmalarda 500 mL kapasiteli pleksiglastan yapılmış bir reaktöre elektrotlar yerleştirilerek ve her deneyde test aşamaları için 480 mL’lik bir numune kullanılmıştır. Elektrot bağlantı sistemi, her elektrot arasında 5 mm boşluk olacak şekilde tasarlanmıştır. Al elektrot sistemi için elektrot malzemesinin boyutları 35*70*0.5 mm, Fe elektrot sistemi için 35*70*0.3 mm’dir. Ancak her iki elektrot tipi için de suda kalan ve elektrolizin meydana geldiği boyutlar 35*45 mm’dir.

3.2.2. Deneyisel İşlem

Bütün deneyisel çalışmalar oda sıcaklığında (~25°C) yapılmıştır. Deneylerde pleksiglas reaktör kabının içerisine 480 mL atıksu eklenmiştir. Elektrotlar, planlanan elektrot bağlantı sistemine yerleştirildiğinde elektroliz işlemi başlanmış ve reaktördeki atıksu manyetik karıştırıcı ile 150 rpm ‘de karıştırılmıştır.

Elektrot yüzeyleri önce aseton ile temizlenmiştir. Daha sonra elektrot yüzeylerinde birikebilecek kalıntılar, her deneyden sonra %15’lik HCl solüsyonunda iki dakika

bekletilerek çıkarılmıştır. Daha sonra elektrotlar kurutularak, hassas terazide tartılmış ve distile su ile temizlendikten sonra bir sonraki deneyde kullanılmıştır. Şekil 3.1' de deneysel çalışmalarda kullanılan düzeneğe ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.

3.3. DONDURMA ATIKSUYUNDA PH, İLETKENLİK, TDS, AKM, KOİ ÖLÇÜMÜ VE SEM/EDS ANALİZİ

3.3.1. pH ölçümü

Elektrometrik metoda (Standard Metod 4500-H+) göre WTW Multi 3510 IDS pH metre kullanılmıştır [75].

3.3.2. İletkenlik Ölçümü

Hach 44600 model iletkenlik/TDS metre kullanılarak mS/cm olarak belirlenmiştir.

3.3.3. TDS Ölçümü

Hach 44600 model iletkenlik/TDS metre kullanılarak g/L olarak belirlenmiştir.

3.3.4. AKM Ölçümü

AKM ölçümü Standart Metoda (SM 2540-D) göre tespit edilmiştir [75].

3.3.5. TOK Ölçümü

TOK konsantrasyonu Shimadzu TOK cihazı (L model) ile TS 8195 EN 1484 metoduna göre belirlenmiştir.

3.3.6. KOİ Ölçümü

KOİ konsantrasyonlarının belirlenmesi için Standart Metot (5220 D) kullanılmıştır [75].

3.3.7. SEM/EDS Analizi

SEM analizleri FEI Quanta FED 450 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

3.4. DENEYSEL VERİLERİ HESAPLAMAK İÇİN KULLANILAN EŞİTLİKLER

3.4.1. Akım Yoğunluğu Hesaplamak İçin Kullanılacak Eşitlik

Reaktöre verilen akım yoğunluğunun Eşitlik 3.1 yer alan formül ile hesaplanmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.1)$$

Denklemdede;

J: Mevcut Akım yoğunluğu, A/m²

I: Mevcut Akım şiddeti, Amper

A: Aktif yüzey alanı, cm²

3.4.2. Akım Verimi

Elektrokimyasal oksidasyon prosesinin teknik fizibilitesi genellikle KOİ giderimi açısından değerlendirilmektedir. Giderilen KOİ, akım verimliliği kullanılarak kirletici konsantrasyonunda bir azalmaya neden olan elektrik akımı miktarına dönüştürülebilir. Akım verimliliği, ilgili elektrot reaksiyonu tarafından tüketilen elektriğin devreden geçen elektriğe oranını ifade eder. KOİ giderimine dayalı akım verimliliği (A.V.) Eşitlik 3.2'deki gibi hesaplanmıştır [76].

$$\text{Akım Verimliliği (A. V.)} = n_0 \cdot F \cdot v \cdot \frac{KOİ_0 - KOİ_t}{M_{O_2} \cdot i \cdot t} \quad (3.2)$$

Burada, A.V.: Akım verimliliği, n₀: suyun oksidasyonu için gerekli elektron sayısıdır (n = 4), F: Faraday sabitidir (96485 C.mol⁻¹), v ise atıksu (m³), KOİ₀ ve KOİ_t ise sırasıyla, atıksudaki başlangıçta ve oksidasyondan sonra kalan KOİ konsantrasyonlarıdır. (g/L), M_{O₂}: oksijenin moleküler ağırlığı (32 g.mol⁻¹), I uygulanan akımdır (A), t ise elektroliz süresidir (saniye)[76].

3.4.3. Toplam Çözünen Demir ve Alüminyum Miktarı

Toplam çözünen Fe ve Al miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır

$$M_T = M_A + M_K \quad (3.5)$$

M_K: uygulamada katot elektrottaki çözünen madde (g)

3.5. TÜKETİLEN ENERJİ

Elektrokimyasal proseslerde enerji tüketimi kirlenme giderim verimini ve işletme maliyetini etkileyen en önemli parametrelerden biri olması nedeniyle deneysel çalışmalarda değerlendirilmesi gerekir. Enerji tüketimi Eşitlik (3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$E. T. = \frac{V.i.t}{v} \quad (3.6)$$

Burada, E.T.: Enerji Tüketimi (kWh/m³), V: Volt (V), i: Akım (A), t: Zaman (saat), v: Toplam atıksu hacmi (m³)

3.6. ORTALAMA OKSİDASYON DEĞERİ

Atıksulardaki organik kirlenmelerin biyolojik bozunma etkinliklerinin değerlendirildiği parametrelerden biri de Ortalama Oksidasyon değeridir. Ortalama oksidasyon değeri Eşitlik 3.7’de verilen formül ile hesaplanmaktadır [77].

$$OOD = 4 - 1.5 * \left(\frac{KO_i}{TOK} \right) \quad (3.7)$$

3.7. KARBON OKSİDASYON DEĞERİ

Atıksulardaki organik kirlenmelerin biyolojik bozunma etkinliklerinin değerlendirildiği parametrelerden biri de Karbon Oksidasyon değeridir. Karbon oksidasyon değeri Eşitlik 3.8’de verilen formül ile hesaplanmaktadır [77].

$$KOD = 4 - 1.5 * \left(\frac{KO_i}{TOK_0} \right) \quad (3.8)$$

4. BULGULAR VE ÖNERİLER

4.1. Fe/PC/TiRuO₂ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

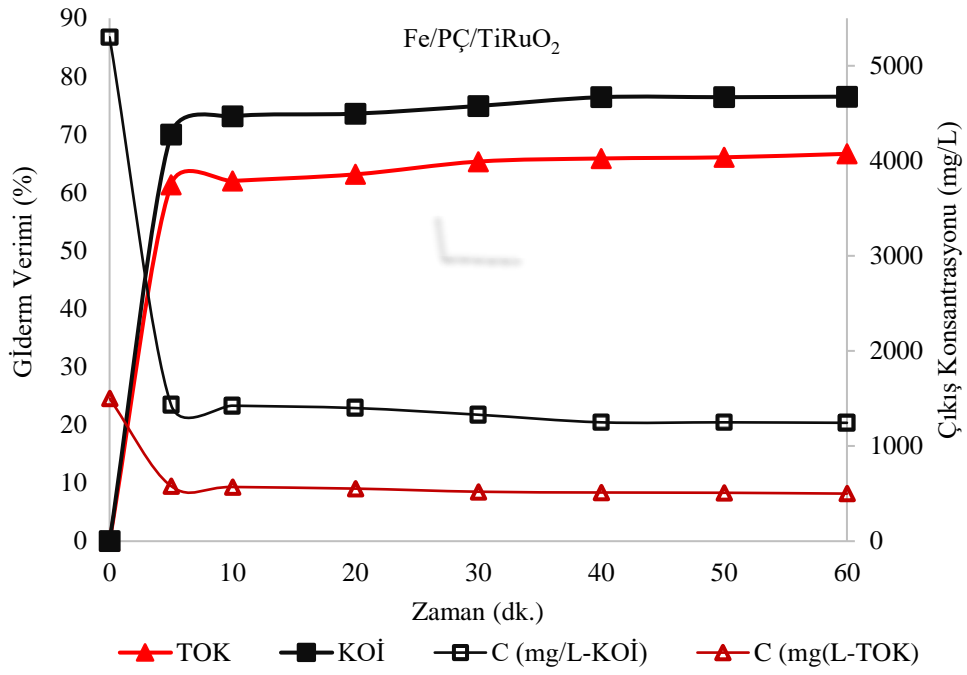
Çizelge 4.1’de Fe/PC/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,66-8,14 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 5,2-5,35V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-4,05 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1250-1435 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 680-725 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1.3 ten 2,75’e yükselirken, OOD değeri -1.3 ten 1,24’e yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,46-5,73 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Fe/PC/TiRuO₂ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	TOK Giderim Verimi (%)	KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	5,66	3,71	1435	70,02	725	51,67	2,56	1,03	0,46
10	6,17	3,75	1425	73,11	712	52,53	2,57	0,99	0,90
20	6,82	3,95	1400	73,59	690	54	2,6	0,96	1,81
30	7,41	4,05	1330	74,91	680	54,67	2,67	1,06	2,79
40	8	3,95	1250	76,42	670	55,33	2,75	1,20	3,61
50	8,14	3,91	1250	76,42	660	56	2,75	1,16	4,56
60	8,14	3,69	1245	76,42	680	54,67	2,75	1,24	5,73

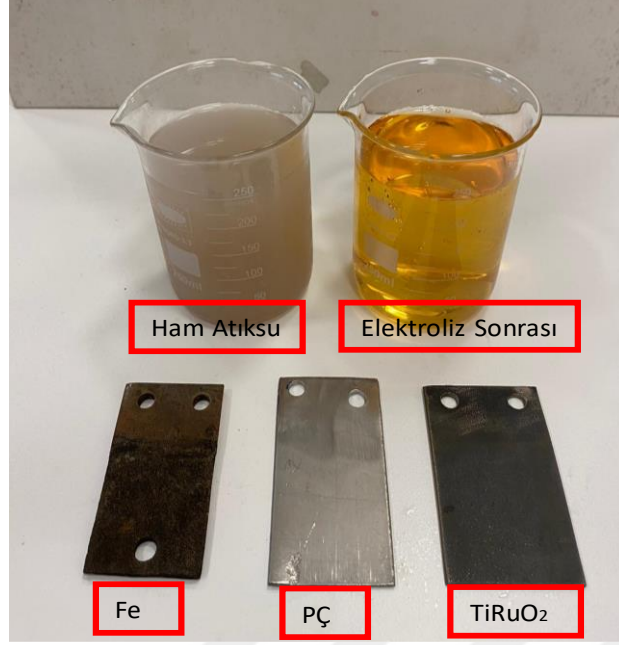
Şekil 4.1’de Fe/PC/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Fe/PC/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %70-76,4 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 51,67-56 aralığında değişim

göstermiştir.



Şekil 4.1. Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

Ham atıksu ve Fe/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.2’de görülmektedir. Fe/PÇ elektrot bağlantısında sistem EK prosesi olarak çalışmaktadır. Bu nedenle Fe’nin anodik çözünmesi ile su ortamında dahil olan Fe iyonlarının oksitlenmesi nedeniyle çıkış suyunda turuncu renk gözlenmiştir.



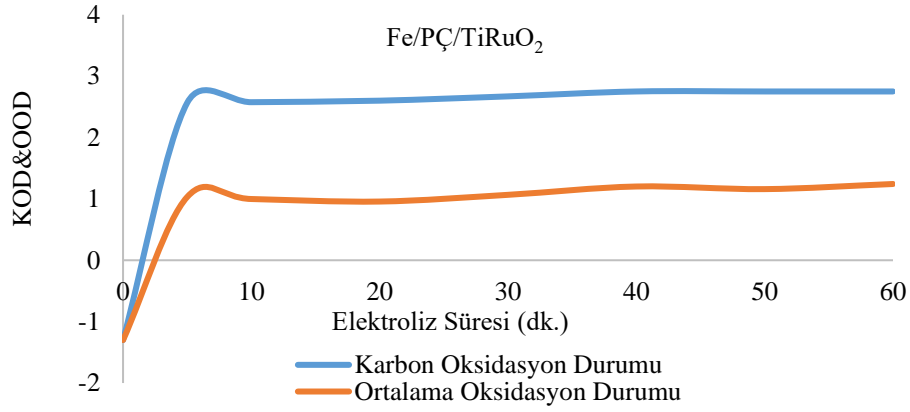
Şekil 4.2. Fe/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.

4.1.1. Fe/PÇ/TiRuO₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.3'de Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

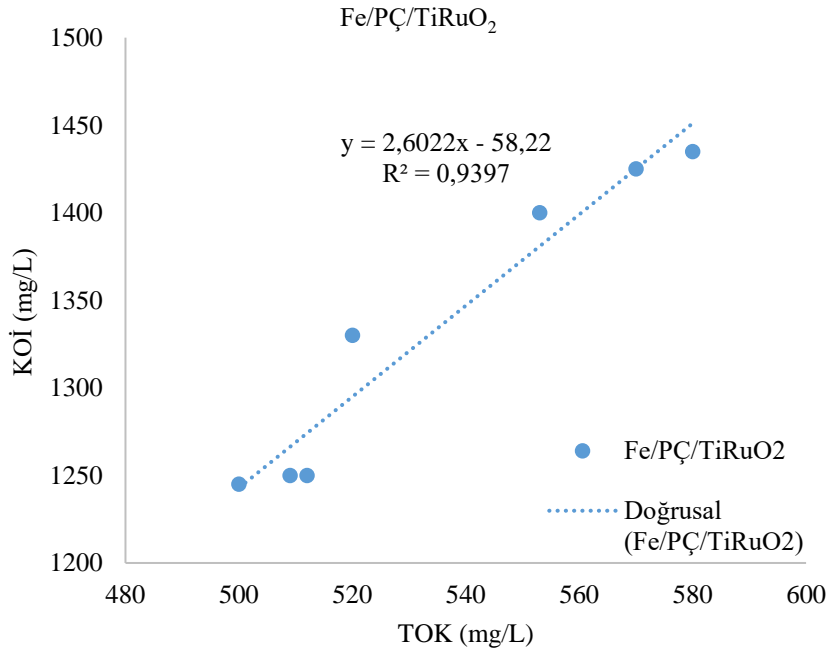
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılırken, KOİ parametresi proses verimliliğinin göstergesi olarak kullanılır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını gösterdiğini göstermektedir [77].



Şekil 4.3. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

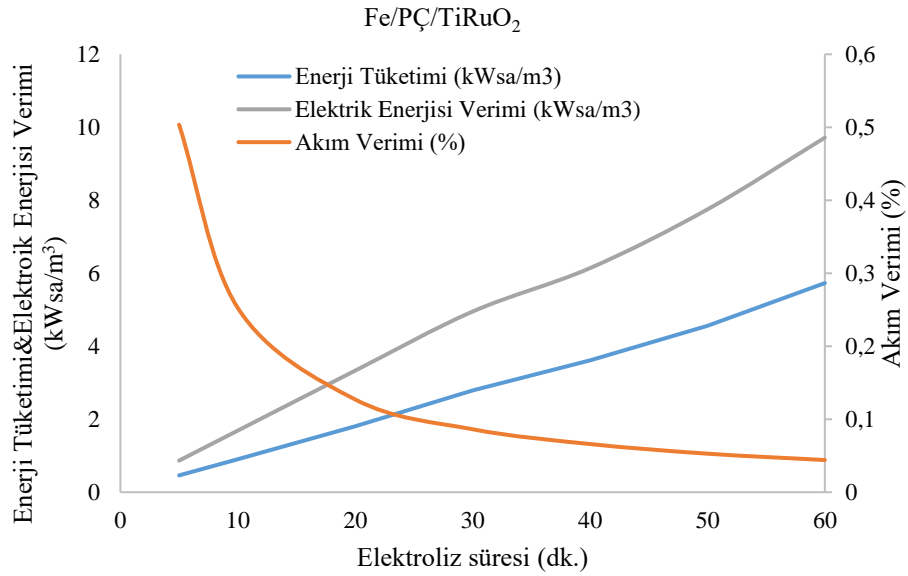
Şekil 4.3'de, Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.4'de Fe/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 2.6 (Bu oran aşağıdaki denklemdeki x in önündeki katsayı) olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.4. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.1.2. Fe/PÇ/TiRuO₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,46'ten 5,73 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 0,86'dan 9,71 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,50'ten 0,044'e azalmıştır (Şekil 4.5). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].



Şekil 4.5. Fe/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.2. Al/PÇ/TiRuO₂ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

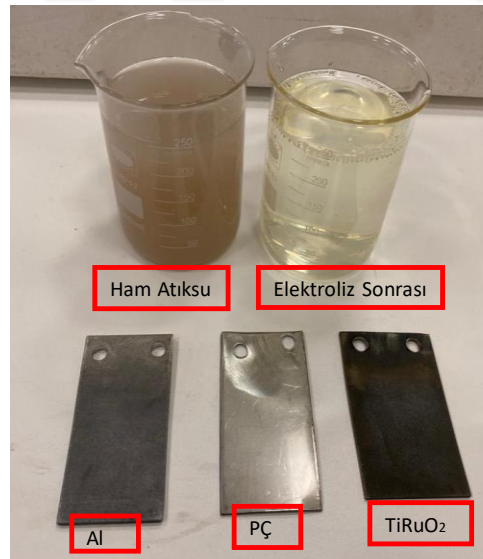
Çizelge 4.2'de Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,73-7,52 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 9,15-9,45V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-2,6 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1440-1950 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK

değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 840-960 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 2,56'ye yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 1,42'ye yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,82-6,35 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2. Al /PÇ/ TiRuO₂ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	TOK Giderim Verimi (%)	KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	5,73	2,35	1950	63,20	960	36	2,05	0,95	0,82
10	6,03	2,6	1840	65,28	930	38	2,16	1,03	1,64
20	6,41	2,6	1732	67,32	900	40	2,26	1,11	3,26
30	7,52	2,47	1532	71,09	850	43	2,46	1,29	4,76
40	7,36	2,35	1440	72,83	840	44	2,56	1,42	6,35

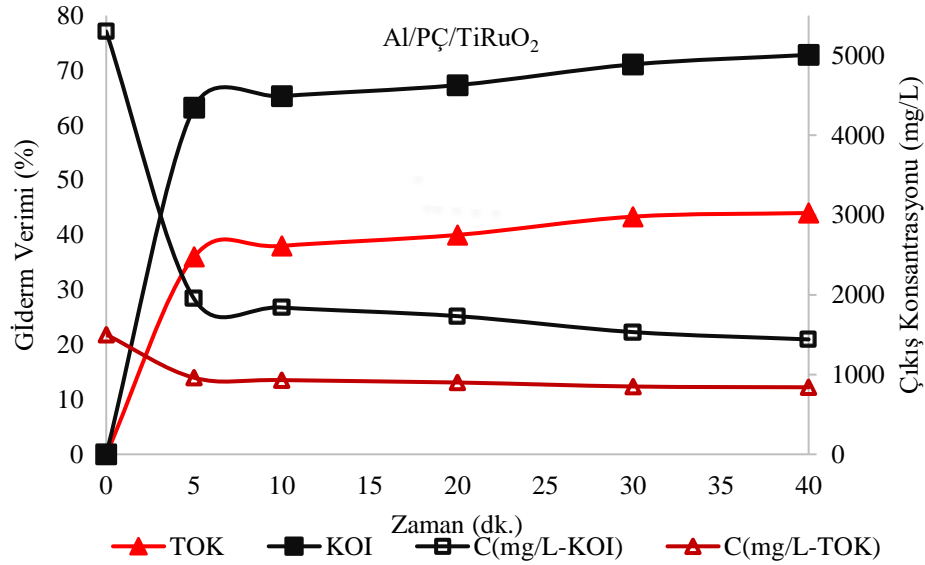
Ham atıksu ve Al/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.6'de görülmektedir.



Şekil 4.6. Al/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.

Şekil 4.7'de Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot

bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proste KOİ giderim verimi %63,20-72,83 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 36-44 aralığında değişim göstermiştir.



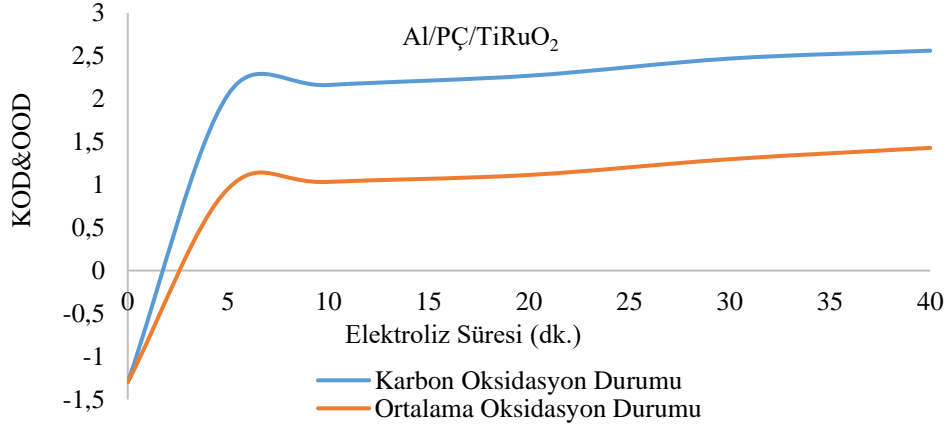
Şekil 4.7. Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

4.2.1. Al/PÇ/TiRuO₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.8'de Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

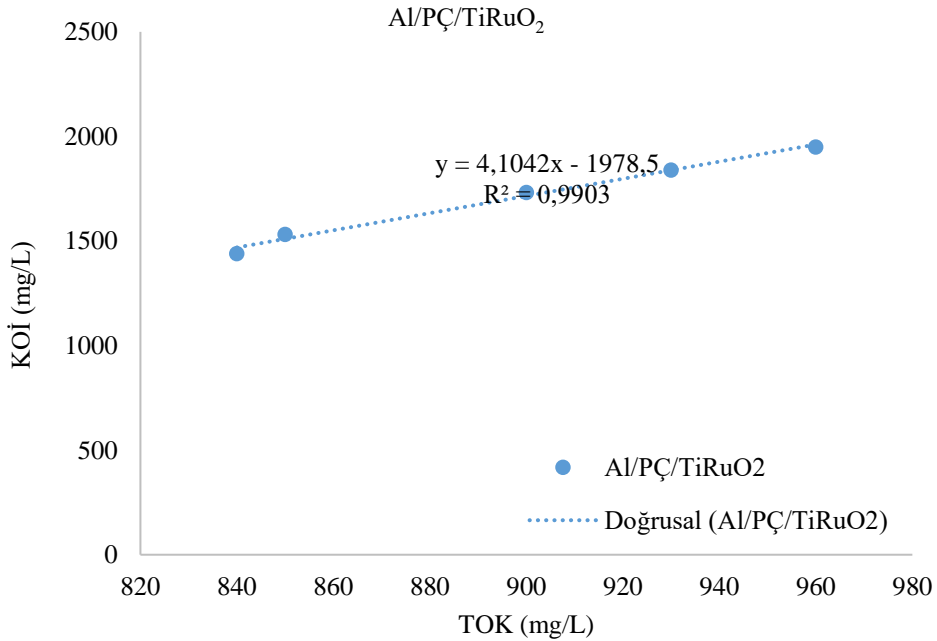
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını göstermektedir [77].



Şekil 4.8.Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

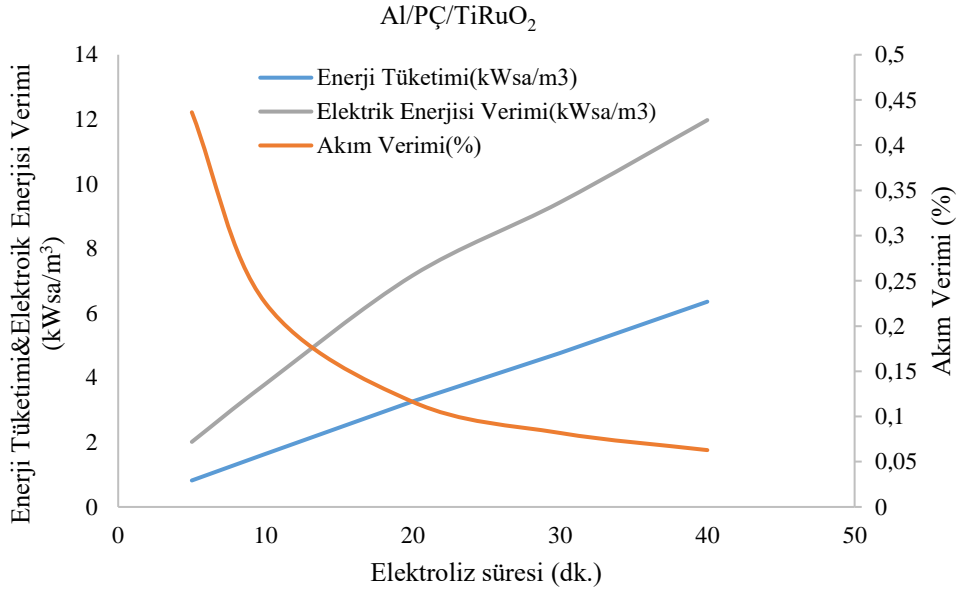
Şekil 4.8’de Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.9’da Al/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 4.1 olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.9. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.2.2. Al/PC/TiRuO₂ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,82'ten 6,35 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 2,01'den 11,97 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,43'ten 0,062'e azalmıştır (Şekil 4.10). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir[76]. Kuleyin ve arkadaşlarının[76] 2021 yılında yaptığı çalışmada biyolojik olarak arıtılmış tekstil atık sularının grafit elektrotlar kullanılarak ileri arıtımında elektro-Fenton (EF) teknolojisinin etkinliği araştırılmıştır. Etkin pH değerinin 3 ve reaksiyon süresinin 30 dk olduğu tespit edilmiştir. Renk, KOI, TOK giderim verimleri için sırasıyla %89, %88 ve %45 giderim verimleri elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Al/PC/TiRuO₂ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.3. Fe/PC/Grafit HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

Çizelge 4.3'de Fe/PC/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit

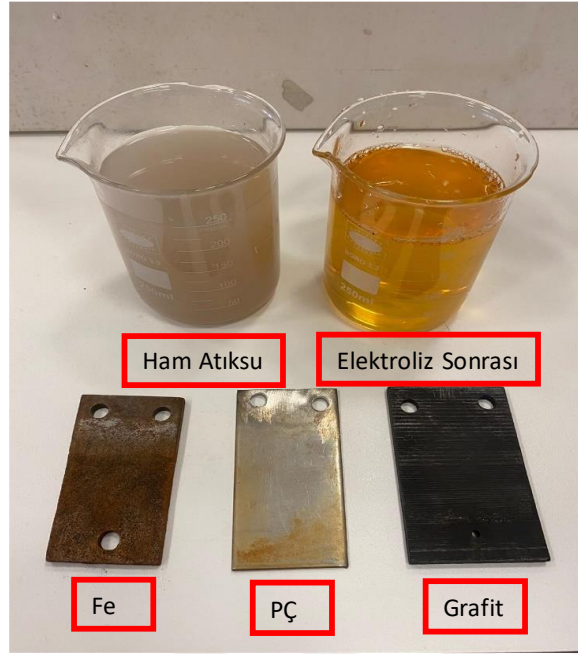
elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 7,18-9,53 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,75-10V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-3,46 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 2150-2300 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 800-900 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 1,85'e yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 0,16'e yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,86-7,81 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Fe/PC/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

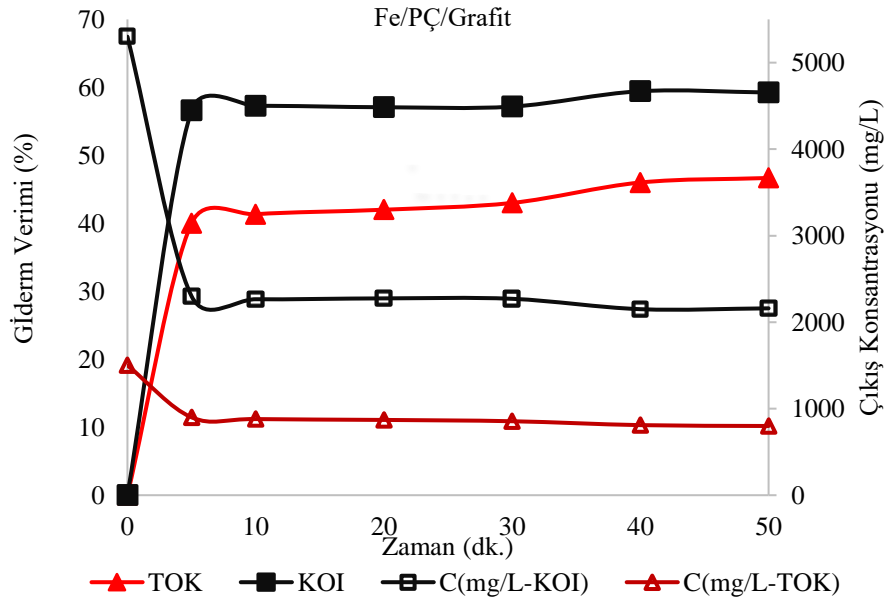
Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ		TOK		KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
			KOİ (mg/L)	Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	Giderim Verimi (%)			
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	7,18	3,2	2300	56,60	900	40	1,7	0,16	0,86
10	7,33	3,26	2265	57,26	880	41,33	1,73	0,13	1,70
20	7,75	3,46	2275	57,07	870	42	1,72	0,07	3,05
30	8,1	3,45	2270	57,16	855	43	1,73	0,01	4,55
40	9,17	3,33	2150	59,43	810	46	1,85	0,01	6,25
50	9,53	3,17	2160	59,24	800	46,67	1,84	-0,05	7,81

Şekil 4.12'de Fe/PC/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Fe/PC/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %56,60-59,43 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 40-46,67 aralığında değişim göstermiştir.

Ham atıksu ve Fe/PC/Grafit hibrit elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Fe/PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



Şekil 4.12. Fe/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

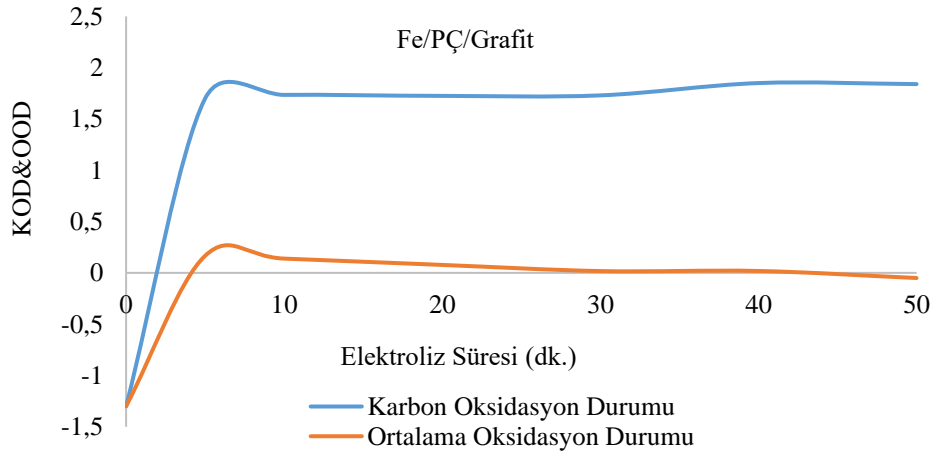
4.3.1. Fe/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.13’de Fe/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal

prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

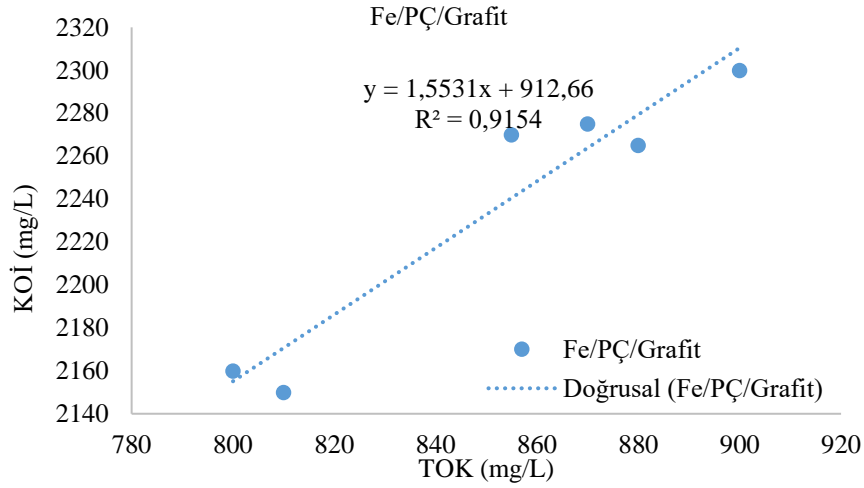
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını göstermektedir [77].



Şekil 4.13. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

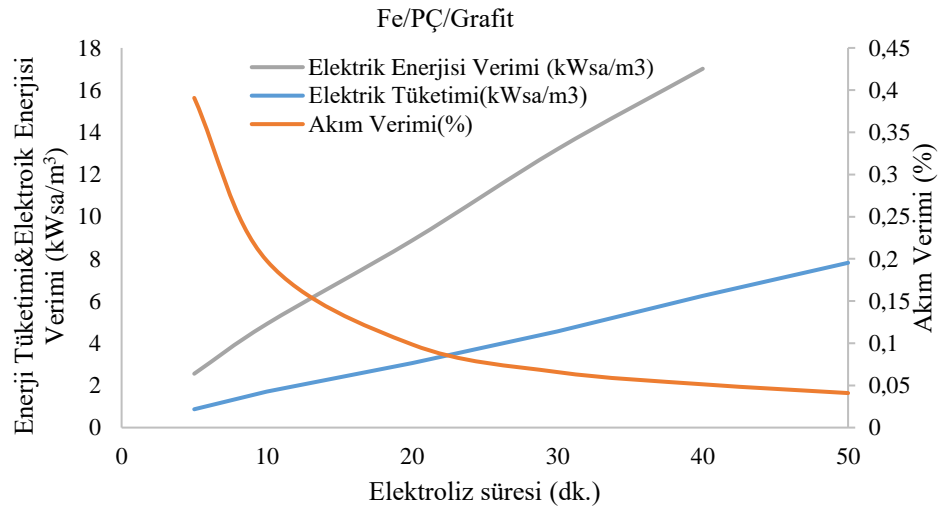
Şekil 4.13'de, Fe/PC/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.14'de Fe/PC/Grafit hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 1,55 (olarak belirlenmiştir). Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.14. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.3.2. Fe/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,86'dan 7,81 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 2,55'ten 21,37 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,39'dan 0,040'a düşmüştür (Şekil 4.15). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].



Şekil 4.15. Fe/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.4. Al/PÇ/Grafit ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

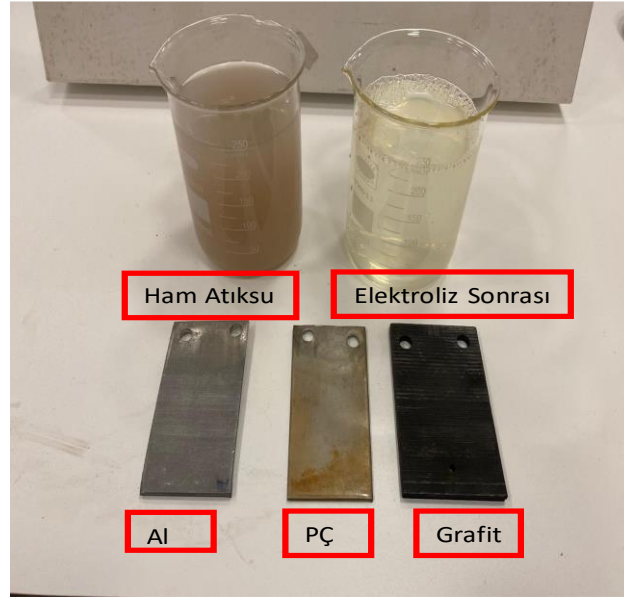
Çizelge 4.4'te Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 4,35-5,02 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,45-9V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,25-2,55 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1440-1950 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 840-960 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 2,56'ya yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 1,42'ye yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,82-6,35 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. Al /PÇ/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

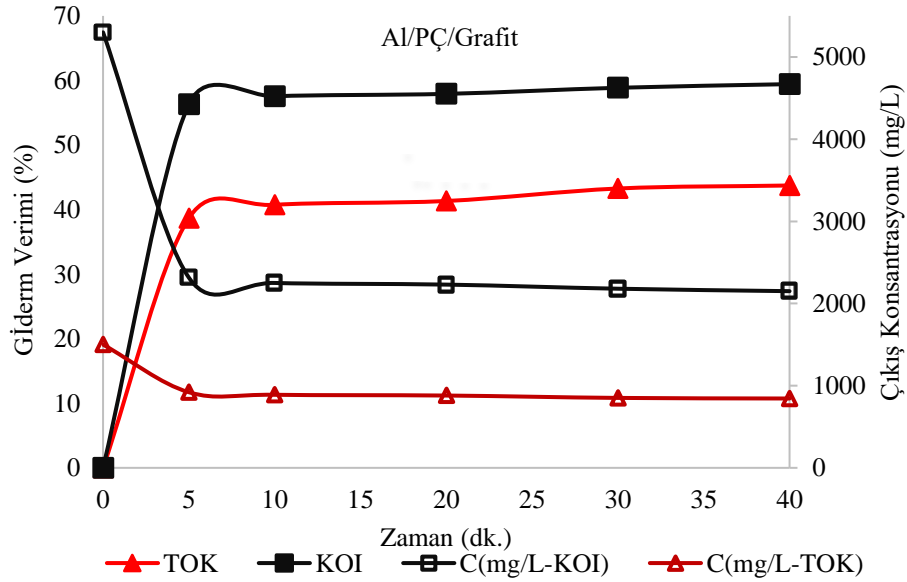
Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ		TOK		KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
			Çıkış KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	TOK Giderim Verimi (%)			
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	4,35	2,5	2315	56,32	960	36	1,68	0,22	0,78
10	4,5	2,45	2250	57,54	930	38	1,75	0,20	1,56
20	4,74	2,4	2230	57,92	900	40	1,77	0,19	3,07
30	4,9	2,3	2180	58,86	850	43	1,82	0,15	4,47
40	5,02	2,25	2150	59,43	840	44	1,85	0,17	5,86

Şekil 4.17'de Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %56,32-59,43 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 36-44 aralığında değişim göstermiştir.

Ham atıksu ve Al/PÇ/Grafit hibrit elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. Al /PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



Şekil 4.17. Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

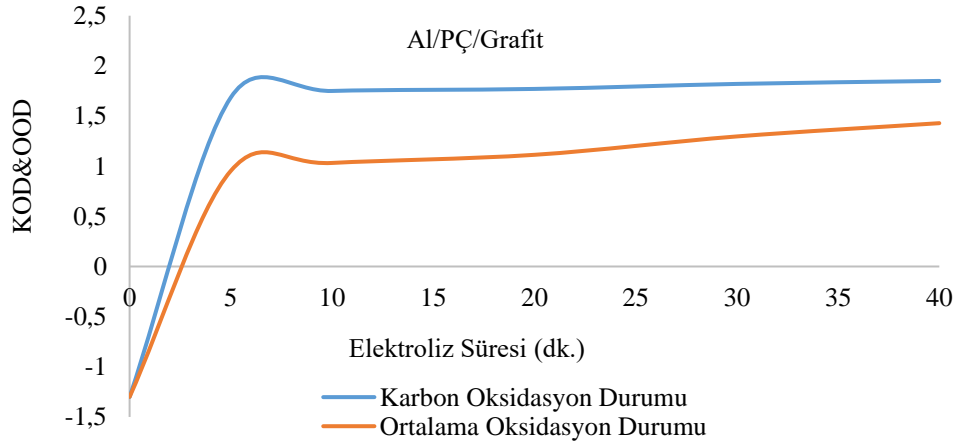
4.4.1. Al/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.18’de Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından

sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

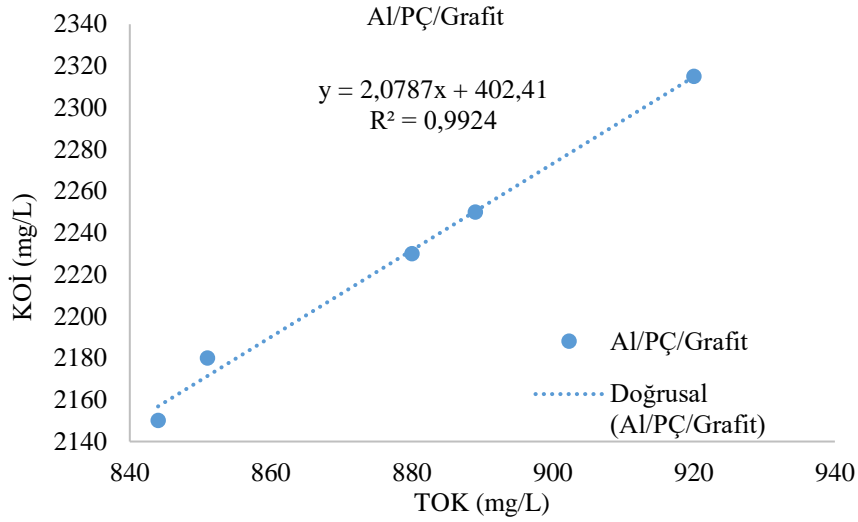
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını göstermektedir [77].



Şekil 4.18. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

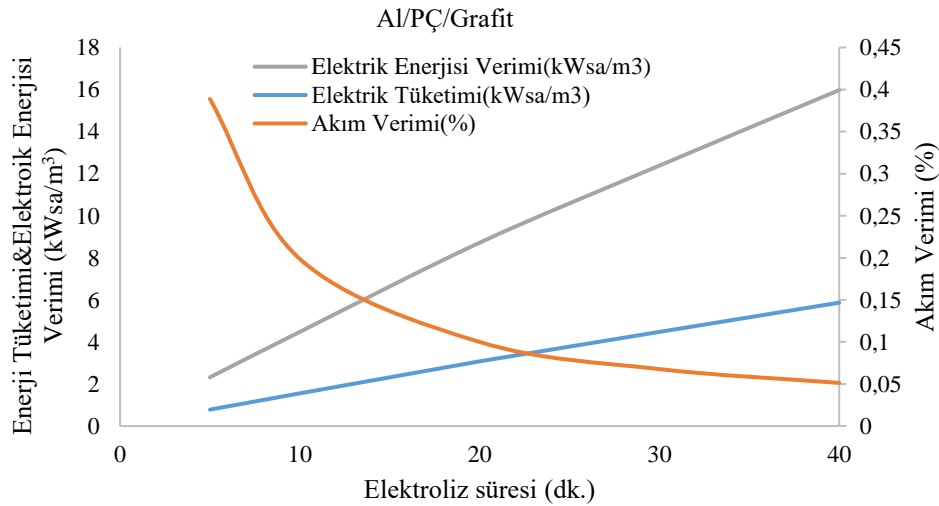
Şekil 4.18'de, Al/PC/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.19'da Al/PC/Grafit hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 2,07 olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.19. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.4.2. Al/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,78'den 5,86 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 2,31'den 15,97 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,38'dan 0,051'a azalmıştır (Şekil 4.20). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].



Şekil 4.20. Al/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.5. Al/PÇ/Al ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

Çizelge 4.5’de Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,8-6,21 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,70-9V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,15-1,96 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1595-1990 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 700-920 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 2,40’ya yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 0,80’ye yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,76-6,14 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

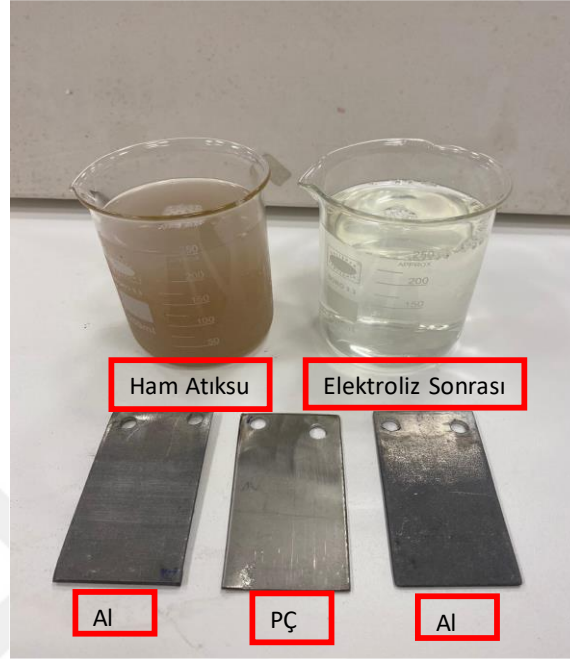
Çizelge 4.5. Al /PÇ/Al Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ		TOK		KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
			(mg/L)	Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	Giderim Verimi (%)			
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	5,8	2,15	1990	62,45	920	38,67	2,01	0,75	0,76
10	5,94	2,10	1890	64,33	860	42,67	2,11	0,70	1,53
20	6	2,05	1850	65,09	840	44	2,15	0,69	3,07
30	6,21	2,00	1705	67,83	800	46,67	2,29	0,80	4,61
40	6,24	1,96	1595	69,90	700	53,33	2,40	0,58	6,14

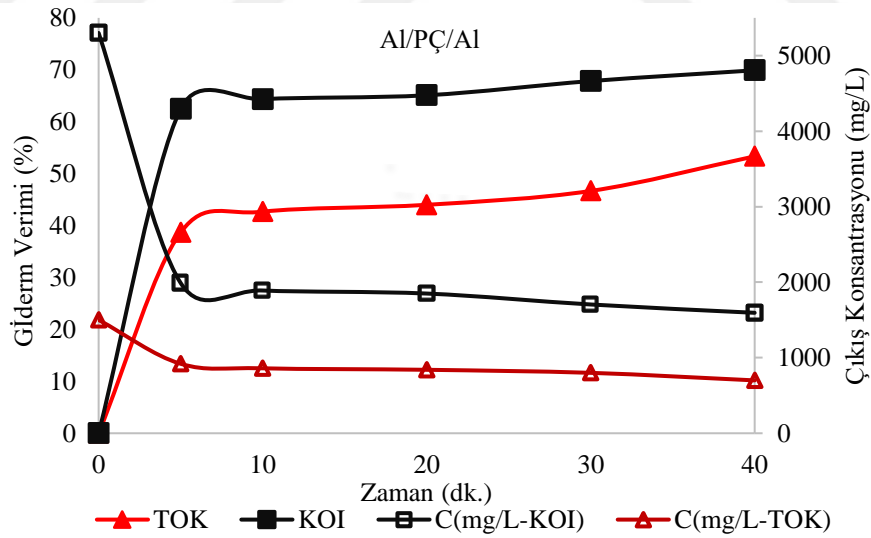
Şekil 4.22’de Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %62,45-69,90 aralığında değişim gösterirken. TOK giderim verimi 38,67-53,33 aralığında değişim göstermiştir. Süt endüstrisi atıksularından KOİ ve bulanıklık giderimini tespit etmek için yapılan deneysel çalışmada; pH 7, 43 A/m² akım yoğunluğu ve 25 dakikalık akım süresindeki alüminyum elektrotlar kullanılarak %61 KOİ ve %100 bulanıklık giderme verimi elde edilmiştir[79].Başka bir alüminyum elektrot kombinasyonunun kullanıldığı çalışmada ise sadece 2,5 V akım oluşturarak KOİ giderim verimi üzerine çalışılmıştır. Bu deney

sonucunda %55,5'lik KOI giderim verimi elde edilmiştir[80].

Ham atıksu ve Al/PÇ/Al elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.21. Al /PÇ/Al elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



Şekil 4.22. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

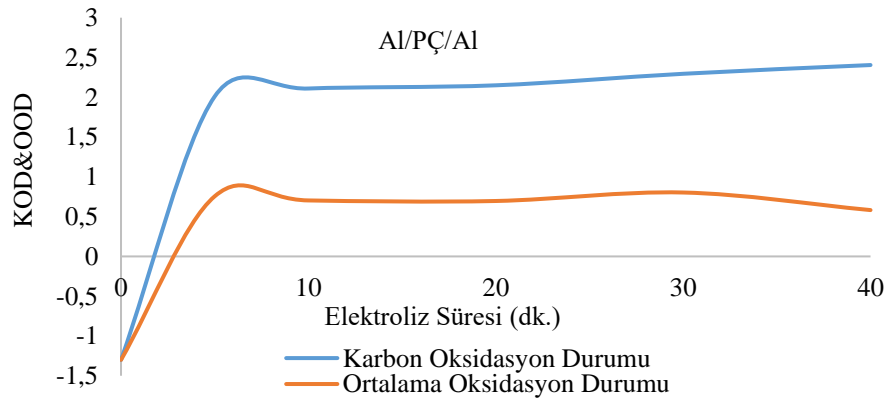
4.5.1. Al/PÇ/Al Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.23'de Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin

Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

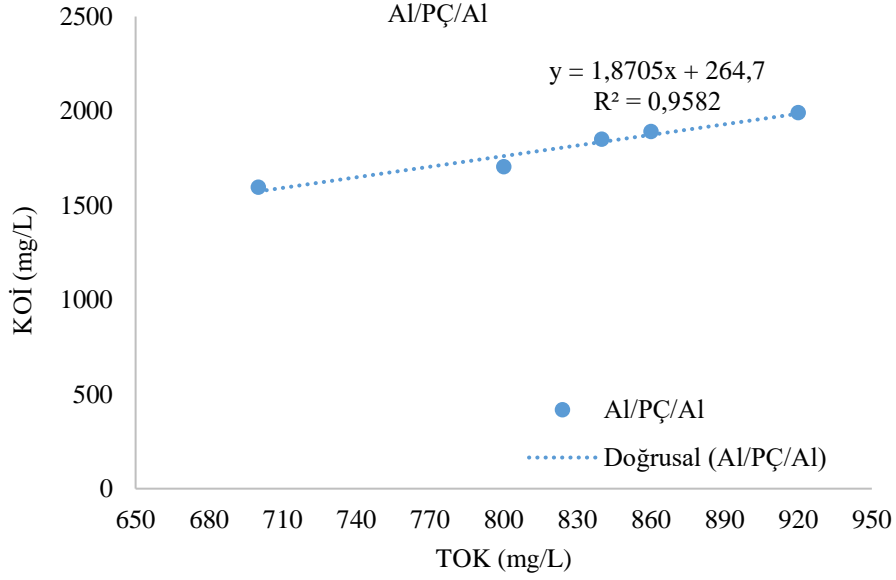
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını göstermektedir [77].



Şekil 4.23. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

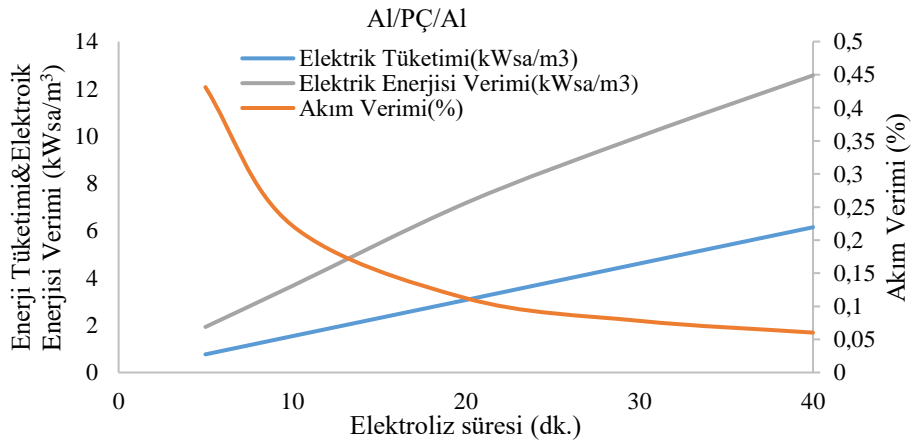
Şekil 4.23'de, Al/PC/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.24'te Al/PC/Al elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 1,87 olarak belirlenmiştir, Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.24. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.5.2. Al/PÇ/Al Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,76'den 6,14 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 1,92'den 12,57 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,43'ten 0,060'a azalmıştır (Şekil 4.25). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].



Şekil 4.25. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.6. Fe/PÇ/Fe ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

Çizelge 4.6’de Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,8-8,2 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 7,5-7,65V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,45-2,77 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1855-200 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 735-840 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 2,14’a yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 0,21’e yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,66-5,20 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

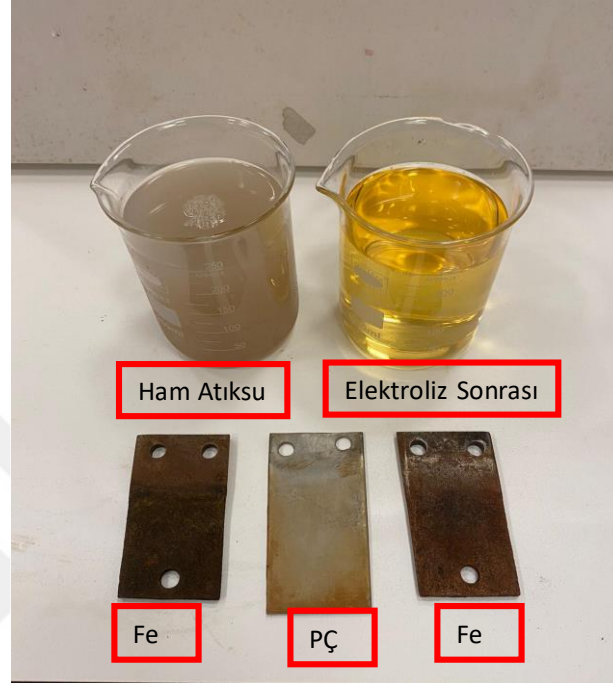
Çizelge 4.6. Fe /PÇ/Fe Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ		TOK		KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
			(mg/L)	Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	Giderim Verimi (%)			
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	5,8	2,7	2000	62,26	840	44	2	0,42	0,66
10	6,35	2,77	2020	61,88	820	45,33	1,98	0,30	1,32
20	7,48	2,7	1900	64,15	760	49,33	2,1	0,25	2,60
30	7,94	2,6	1835	65,37	745	50,33	2,16	0,30	3,90
40	8,2	2,45	1855	65	735	51	2,14	0,21	5,20

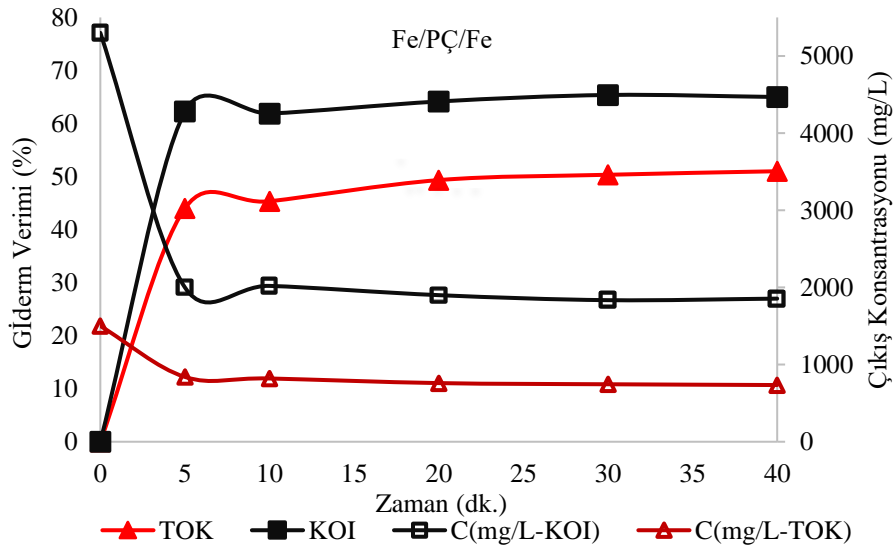
Şekil 4.27’de Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %62,26-65 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 44-51 aralığında değişim göstermiştir. Süt endüstrisi atıksularından yağ-gres ve KOİ’nin uzaklaştırılmasını ispatlamak için yapılan deneysel çalışmada, 1 dakikalık akım süresi boyunca pH 7 ve 6 A/m² akım yoğunluğunda demir elektrotlu bir EK yöntemi kullanılmıştır. Bu arıtım sonucunda ise yağ-gres ve KOİ’de %99 giderim verimi elde edilmiştir[81]. Başka bir demir elektrot kullanıldığı çalışmada ise KOİ ve bulanıklık giderim verimi üzerine çalışılmıştır. Uygulanan potansiyel yoğunluğu 5,0 V

ve 60 dakikalık reaksiyon süresi belirlenmiştir. Bu deney sonucunda KOİ ve bulanıklık giderimi sırasıyla %97 ve %99 oranında azalmıştır[82].

Ham atıksu ve Fe /PÇ/Fe elektrot türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal reaktör ile arıtım sonrası atıksuyun görselleri Şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.26. Fe /PÇ/Fe elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



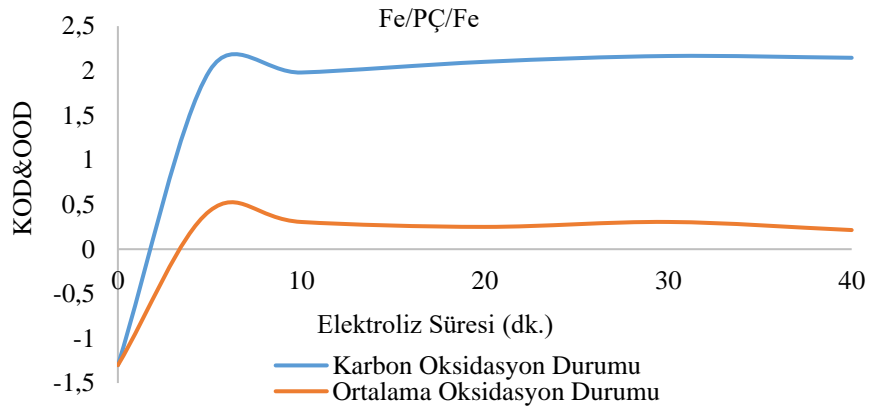
Şekil 4.27. Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

4.6.1. Fe/PÇ/Fe Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.28’de Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

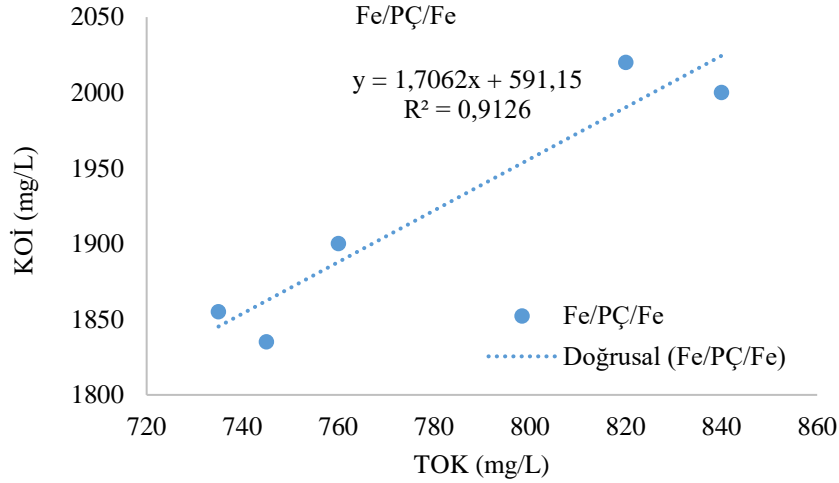
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD’deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını göstermektedir [77].



Şekil 4.28. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

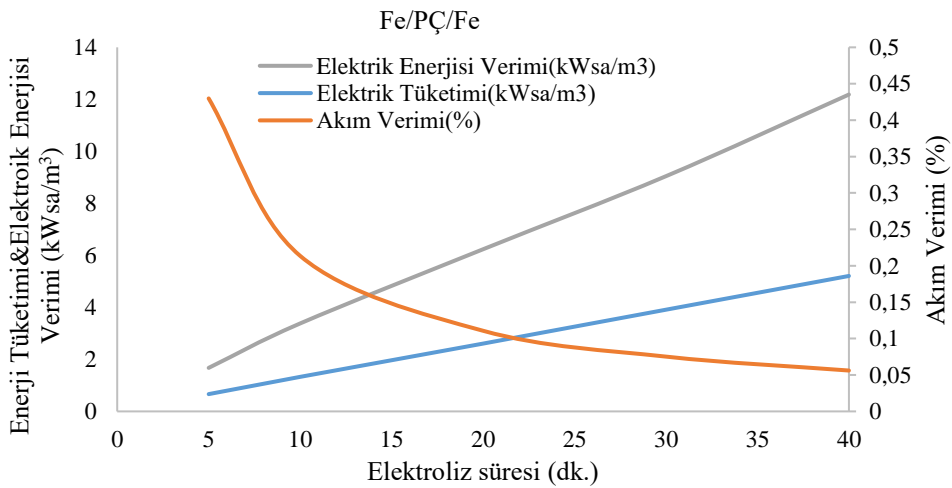
Şekil 4.28’de, Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.29’da Fe/PÇ/Fe elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 1,70 olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.29. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.6.2. Fe/PÇ/Fe Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,66'den 5,2 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 1,67'den 12,18 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,42'den 0,056'ya azalmıştır (Şekil 4.30). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].



Şekil 4.30. Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.7. TiRuO₂/PÇ/Grafit HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

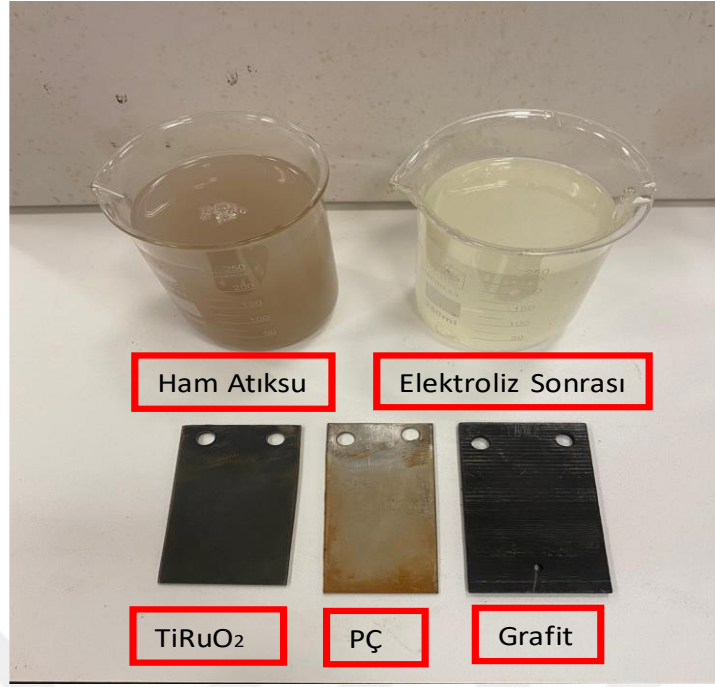
Çizelge 4.7’de TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 6,97-8,3 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 11-11,8V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 1,15-1,97 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1970-2260 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 812-890 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 2,03’e yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 0,36’ya yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 1,02-7,63 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7. TiRuO₂/PÇ/Grafit Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

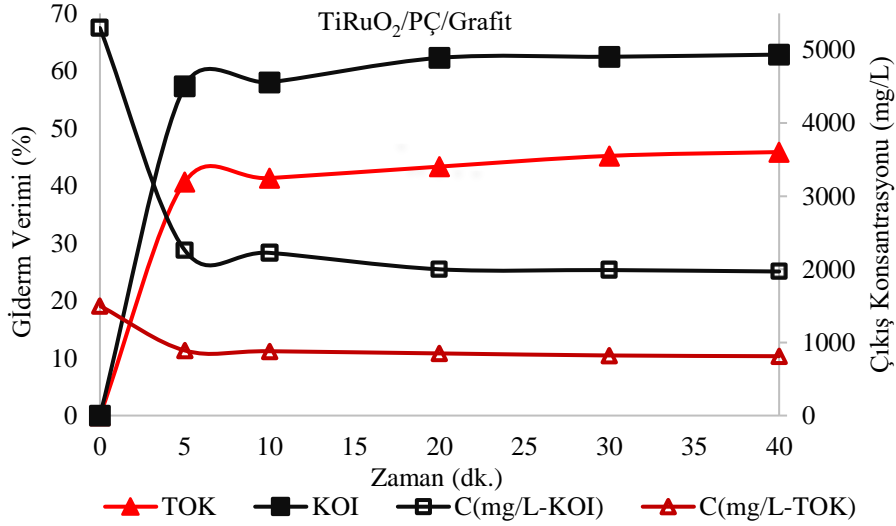
Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	TOK Giderim Verimi (%)	KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
5	5	1,15	2260	57,35	890	40,67	1,74	0,19	1,02
10	6,35	1,45	2225	58,01	880	41,33	1,77	0,20	2,03
20	7,48	1,61	2000	62,26	850	43,33	2	0,47	3,81
30	7,94	1,84	1990	62,45	822	45,2	2,01	0,36	5,72
40	8,2	1,97	1970	62,83	812	45,87	2,03	0,36	7,63

Şekil 4.32’de TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ giderim verimi %57,35-62,83 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi 40,67-45,87 aralığında değişim göstermiştir.

TiRuO₂/PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal bağlantı türlerinin kullanıldığı arıtım öncesi ve sonrası fark Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31. TiRuO₂/PÇ/Grafit hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



Şekil 4.32. TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

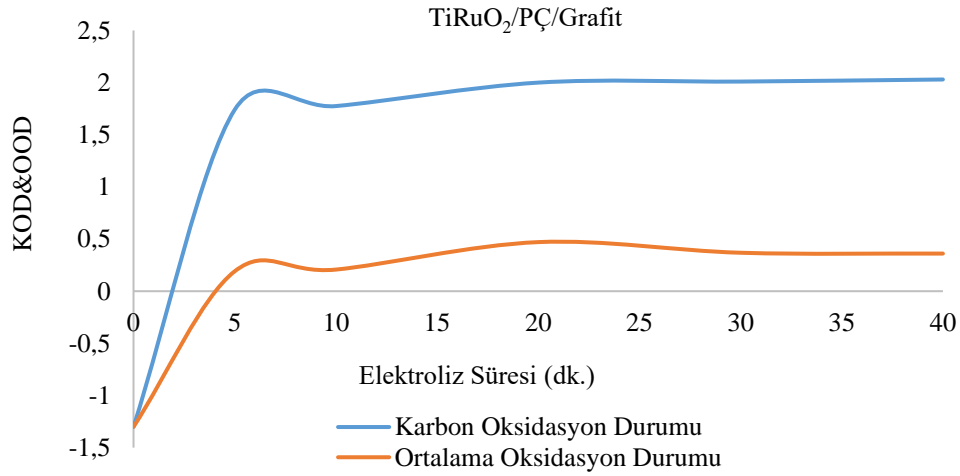
4.7.1. TiRuO₂/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.33'te TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon

durumu bakımından sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

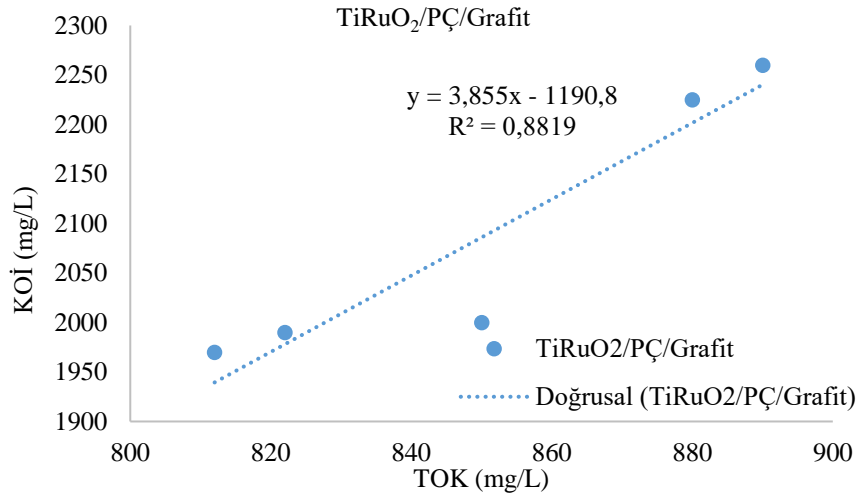
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılmaktadır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını ifade etmektedir [77].



Şekil 4.33. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

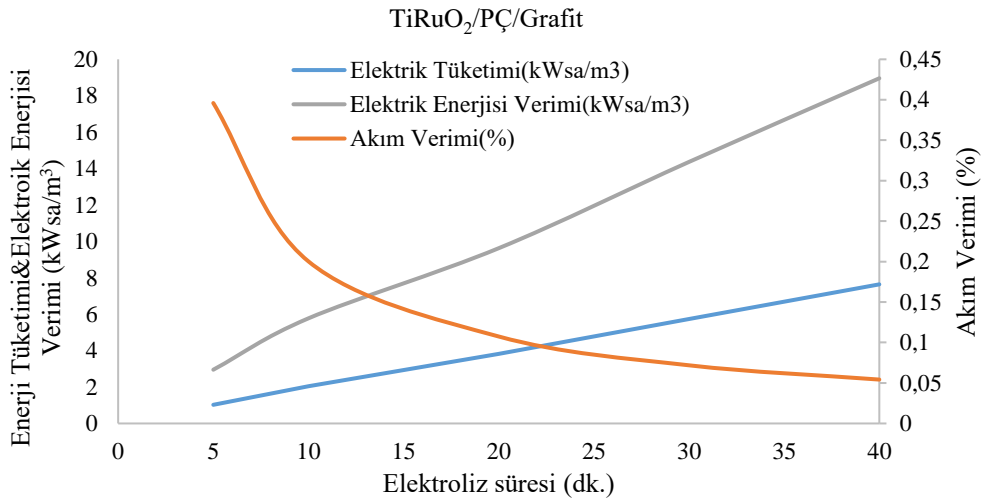
Şekil 4.33'te, TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.34'te TiRuO₂/PÇ/Grafit hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOİ arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOİ oranı 3,85 olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOİ oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.34. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOİ arasındaki ilişki.

4.7.2. TiRuO₂/PÇ/Grafit Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 1,02'den 7,63 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 2,95'den 18,95 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,39'den 0,054'e azalmıştır (Şekil 4.35). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir[76].



Şekil 4.35. TiRuO₂/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.8. BDD/PÇ/PÇ HİBRİT ELEKTROT BAĞLANTI SİSTEMİNİN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL REAKTÖRDE ELEKTROLİZ SÜRESİNİN KOİ VE TOK GİDERİMİNE ETKİSİ

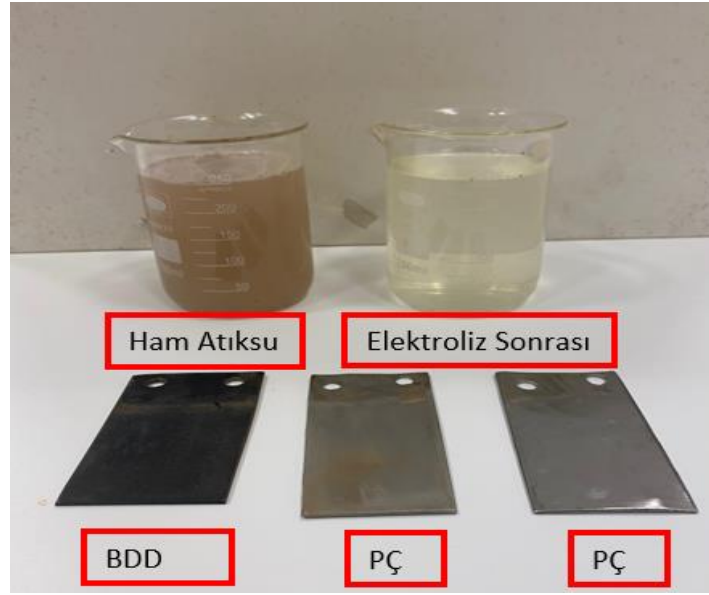
Çizelge 4.8’de BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin deneysel çalışma sonuçları verilmiştir. Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 4,2 olarak gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 5,25-5,3V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 0,01-0,7 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1200-215 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 500-200 mg/L olarak tespit edilmiştir. KOD değeri -1,3 ten 3,78’e yükselirken, OOD değeri -1,3 ten 2,38’ya yükselmiştir. Deney sırasında enerji tüketimi 0,92-5,46 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8. BDD/PÇ/PÇ Elektrot bağlantı sistemi deneysel çalışma sonuçları.

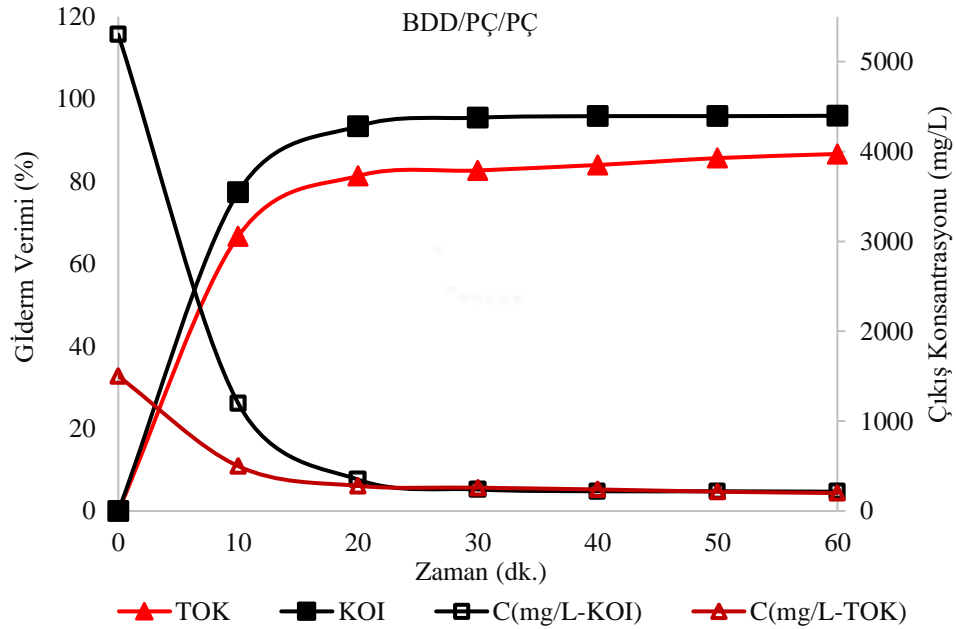
Süre(dk)	Çıkış pH	Çıkış İletkenlik (mS/cm)	Çıkış KOİ		TOK		KOD	OOD	Enerji Tüketimi kWsa/m ³
			KOİ (mg/L)	Giderim Verimi (%)	ÇIKIŞ TOK (mg/L)	Giderim Verimi (%)			
0	4,52	2,55	5300	-	1500	-	-1,3	-1,3	-
10	4,2	0,01	1200	77,35	500	66,66	2,8	0,4	0,92
20	4,2	0,01	350	93,39	280	81,33	3,65	2,12	1,82
30	4,2	0,56	240	95,47	260	82,66	3,76	2,61	2,73
40	4,2	0,56	220	95,84	240	84	3,78	2,62	3,68
50	4,2	0,7	220	95,84	215	85,66	3,78	2,46	4,55
60	4,2	0,7	215	95,94	200	86,66	3,78	2,38	5,46

Şekil 4.37’de BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK giderim verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesste KOİ giderim verimi %77,35-95,94 aralığında değişim gösterirken, TOK giderim verimi %66,66-86,66 aralığında değişim göstermiştir.

BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrokimyasal bağlantı türlerinin kullanıldığı arıtım öncesi ve sonrası fark Şekil 4.36’da verilmiştir



Şekil 4.36. BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrokimyasal proses arıtım öncesi ve sonrası karşılaştırma.



Şekil 4.37. BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin KOİ-TOK Giderim Verimlerinin, çıkış KOİ-TOK konsantrasyonlarının elektroliz süresi ile değişimi.

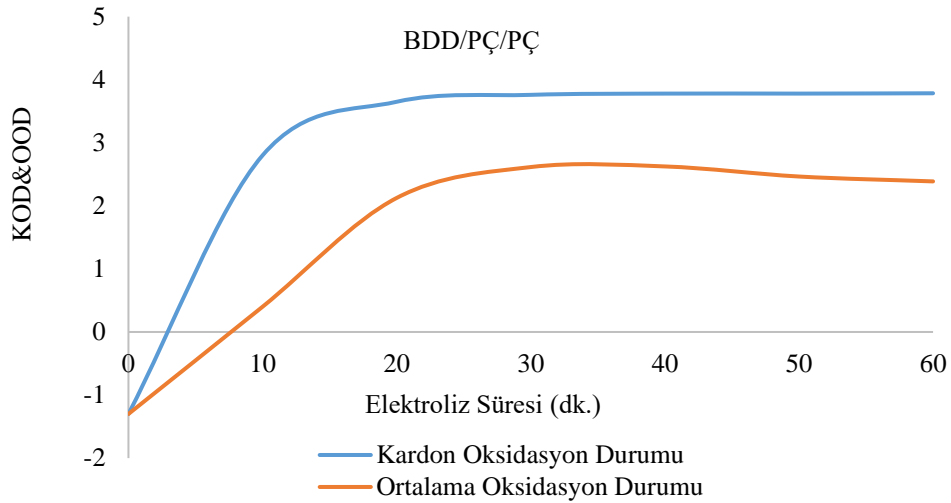
4.8.1. BDD/PÇ/PÇ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Biyo-Bozunurluk Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.38’da BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi verilmiştir. Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumu bakımından

sürenin artmasıyla bu değerlerin arttığı belirlenmiştir. Bu değerlerin artması etkin oksidasyon sürecinin işlediğini göstermektedir.

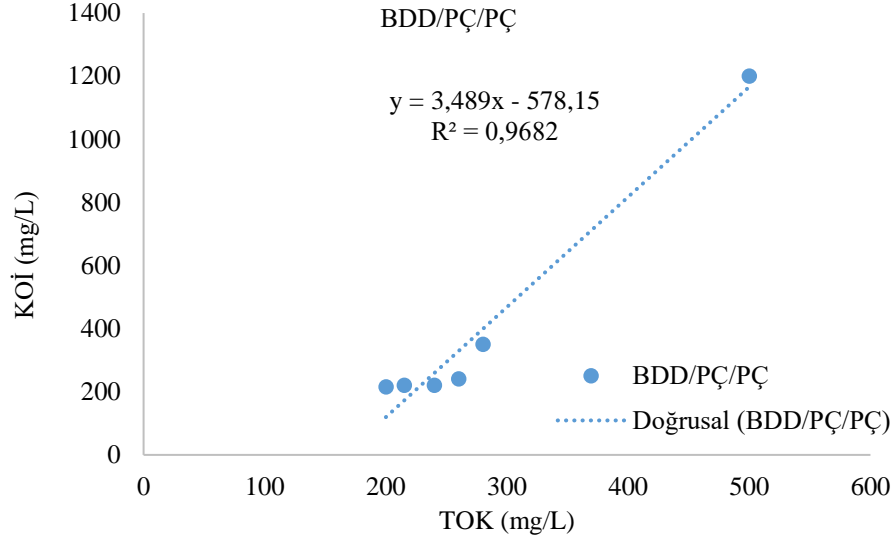
Ortalama oksidasyon durumu (OOD) ve karbon oksidasyon durumu (KOD) parametreleri hibrit elektrokimyasal prosesler sonrasında atıksuların biyolojik bozunabilirliğinin belirlenmesinde kullanılan iki önemli parametredir. OOD atıksuyun biyobozunurluğundaki değişikliklere neden olan varyasyonları belirlemek için kullanılır [77].

OOD, atıksuda kalan organik bileşiklerin genel bir ölçüsü olarak kullanılabilirken, KOD, atıksudan CO₂ formundaki karbonun elimine edilmesini temsil eder. Yüksek KOD değerleri, proses çıkışındaki organik bileşiklerin esas olarak organik asitlerden oluştuğunu ve OOD'deki artışın biyolojik bozunabilirliğin arttığını ifade eder [77].



Şekil 4.38. Karbon/Ortalama oksidasyon değerlerinin zamanla değişimi.

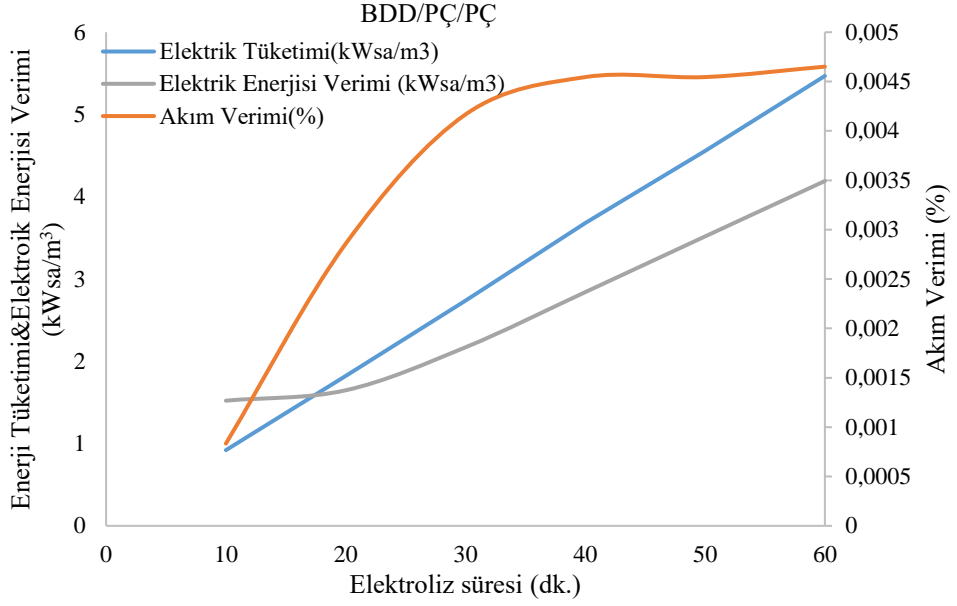
Şekil 4.38'de BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı hibrit elektrokimyasal prosesin Karbon oksidasyon ve ortalama oksidasyon durumlarının elektroliz süresi ile değişimi prosesin belirli bir noktasında KOİ değerinin TOK değerine oranı, mevcut organik atıksu bileşenlerinin türü hakkında fikir vermektedir. Şekil 4.39'da TiRuO₂/PÇ/Grafit hibrit elektrot türünün kullanıldığı elektrokimyasal reaktör için TOK/KOI arasındaki ilişki verilmiştir. Buna göre, TOK/KOI oranı 3,48 olarak belirlenmiştir. Yüksek TOK/KOI oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir [78].



Şekil 4.39. Dondurma üretimi atıksuyu için TOK/KOI arasındaki ilişki.

4.8.2. BDD/PÇ/PÇ Hibrit Elektrot Bağlantı Sisteminin Kullanıldığı Elektrokimyasal Reaktörün Enerji Tüketimi, Enerji Ve Akım Verimliliği Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Enerji tüketimi, atıksuyun elektrokimyasal arıtımı için en önemli konudur. Reaksiyon süresinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi hibrit elektrot bağlantı sisteminde belirlenmiştir. Enerji tüketimi elektroliz süresinin artmasıyla 0,92'den 5,46 kWsa/m³'e, elektrik enerjisi verimi 1,52'den 4,19 kWsa/m³'e artış gösterirken, akım verimi 0,00083'ten 0,0046'e artmıştır (Şekil 4.40). Bu durum, atıksudaki bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması ve OH⁻'nin üretilen bileşikleri verimli bir şekilde bozunamaması ile açıklanabilir [76].

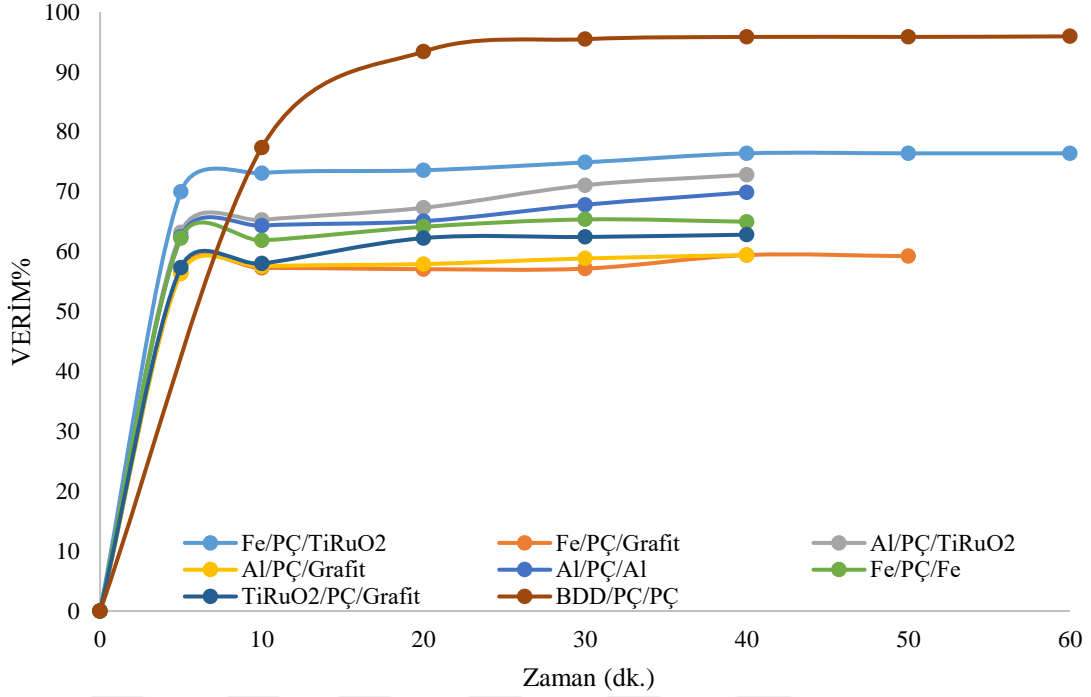


Şekil 4.40. BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrot bağlantı sistemi için Enerji tüketimi (E.T.), enerji verimliliği (E.V.) ve akım verimliliği (A.V.).

4.9. ELEKTROT BAĞLANTI TÜRLERİNİN KOİ/TOK GİDERİM VERİMİNE ETKİSİ

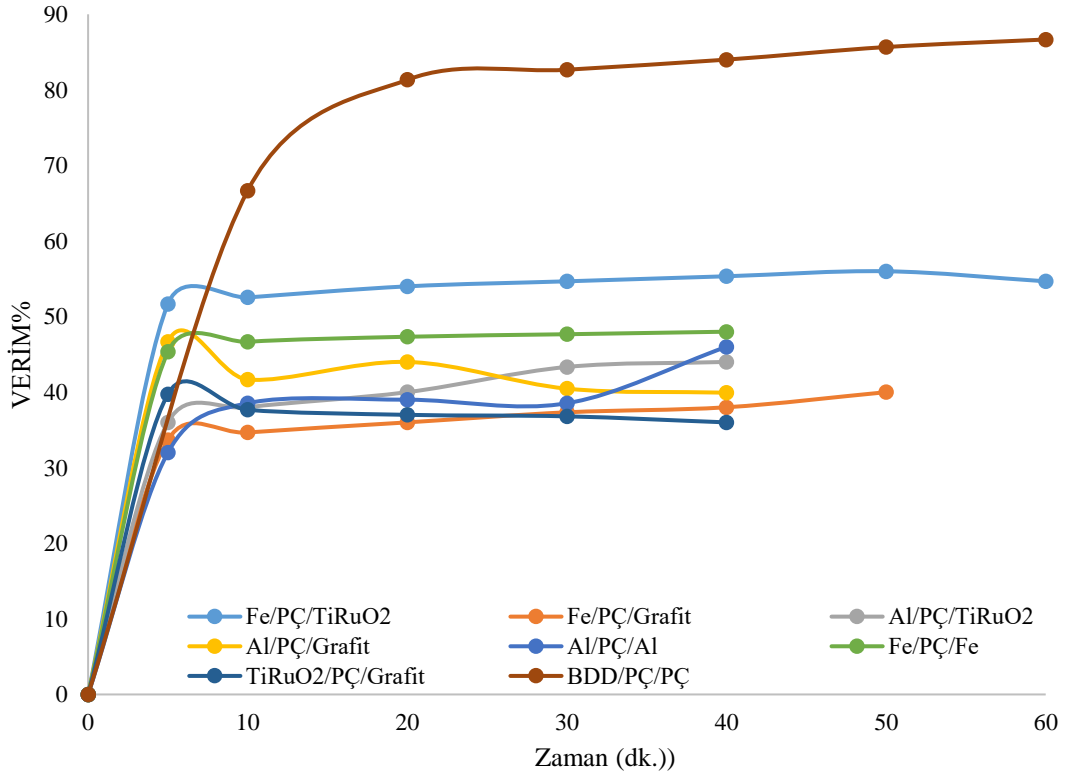
Şekil 4.41’de farklı elektrot türlerinin KOİ giderim verimine etkisi verilmiştir. Buna göre, En yüksek KOİ giderim verimi %95 ile BDD/PÇ/PÇ elektrot türünde elde edilmiştir. En düşük KOİ giderim verimi %59 ile Al/PÇ/Grafit elektrot türünde elde edilmiştir. Elektrokimyasal reaktörün sadece elektrokoagülasyon olarak kullanıldığı Al/PÇ/Al ve Fe/PÇ/Fe elektrot türlerinde KOİ giderim verimleri sırasıyla % 70 ve %65 olurken, sadece elektrooksidasyon olarak TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türünde %63 olarak belirlenmiştir.

Yüksek KOİ gideriminden düşük KOİ giderimine doğru sıralanacak olursa BDD/PÇ/PÇ>FePÇ/TiRuO₂>Al/PÇ/TiRuO₂>Al/PÇ/Al>Fe/PÇ/Fe>TiRuO₂/PÇ/Grafit>Fe/PÇ/Grafit>Al/PÇ/Grafit olarak sırasıyla %95,%76, %73, %70, %65, %63, %60, %59 elde edilmiştir.



Şekil 4.41. Farklı Elektrot bağlantı türlerinin KOİ Giderim verimine etkisi.

Şekil 4.42’de farklı elektrot bağlantı türlerinin kullanıldığı elektrokimyasal prosesler için TOK giderim verimine etkisi verilmiştir.



Şekil 4.42. Farklı Elektrot bağlantı türlerinin TOK Giderim verimine etkisi.

Gonzales-Olmos ve arkadaşlarının[83] 2018 yılında yapmış olduğu bu çalışmada, bir atıksu arıtma tesisinden çıkan atık su, bir ultrafiltrasyon membranının kirlenmesini kontrol etmek amacıyla bor katkılı elmas (BDD) elektrotlar kullanılarak bir elektrokimyasal hücre ile ön işleme tabi tutulmuştur. Sonuçlara bakıldığında, elektrokimyasal ön arıtmanın, uygulanan akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte zar ötesi basıncı (TMP) ve dolayısıyla membran kirlenmesini %36-67 oranında azalttığını göstermiştir. Çözünmüş organik karbonun ve bulanıklığın membran prosesi ile uzaklaştırılması, elektro-oksidasyon ön işlemi kullanılarak sırasıyla %40 ve %41 oranında arttırılmıştır. Ön arıtma aşamasında Çözünmüş organik karbonun uzaklaştırılması, ulaşılan maksimum TMP ile iyi bir korelasyon gösterdiği gözlemlenmiştir. Elektro-oksidasyonun bir ön arıtma aşaması olarak uygulanması, membran kirlenmesini azaltmak ve suyun yeniden kullanım uygulamaları için su kalitesini artırmak için umut verici bir alternatif olduğuna işaret etmektedir.

Demiral'ın[84] yapmış olduğu bu araştırmada sızıntı suyu aşamalı bir proses kullanılarak arıtmaya çalışılmıştır. EO işleminden sonra toplanan atık su, elektrooksidasyon (EO) tekniğinin ve KOİ gideriminin etkinliğini arttırmak amacıyla bir adsorpsiyon prosedürüne tabi tutulmuştur. EO'da paslanmaz çelik elektrotlar anot ve katot olarak görev yaparken, adsorpsiyon işleminde zeolit, kil, kitosan, CeO₂/PANI ve ZnO/PANI gibi laboratuvarında sentezlenen adsorbanlar kullanılmıştır. pH'ın, iletkenliğin, akım yoğunluğunun ve reaksiyon süresinin EO tekniğiyle arıtım üzerindeki etkileri araştırılmıştır; Sonuçları değerlendirmek için renk ve KOİ verimliliği kullanılmıştır. Arıtma araştırmasında atık suyun orijinal pH'ı (7,6), iletkenliği (12,62 µs) ve akım yoğunluğu (4,06 mA/cm²) kullanılmıştır. 30 dakikalık reaksiyon süresinde rengin %89'u, KOİ'nin %30'u kısmen giderilmiştir. KOİ giderimini arttırmak için EO prosesinden atık su adsorpsiyon prosesine eklenmiştir. %60 CeO₂/PANI ve %50 kil ile en iyi KOİ giderim verimliliği 150 rpm karıştırma hızında, 0,5 gram adsorban miktarında ve 120 dakikalık reaksiyon süresinde elde edilmiştir. Ayrıca atık suyun başlangıç pH'ı ve iletkenliği açısından en büyük sonuçları elde etmenin ekonomik açıdan avantajlı olduğu da düşünülmektedir. Bu bilgi ve araştırma bulguları ışığında sızıntı suyunun arıtımında art arda uygulanan elektrooksidasyon-adsorpsiyon yöntemlerinin kullanılabileceği gösterilmiştir.

Altın'ın[85] yaptığı bu çalışmanın amacı kağıt sektöründeki atık suları temizlemek için EF tekniğini kullanmasıdır. Kağıt endüstrisinden gelen atık suyun arıtılması söz konusu

olduğunda, deneysel araştırmaların bulgularına dayanarak EF yaklaşımının KOİ'yi biyolojik arıtma tekniklerinden daha etkili bir şekilde giderdiği bulunmuştur. Bununla birlikte, çok sayıda faktör yöntemin arıtma etkinliğini etkilemektedir. Bu nedenle, arıtma süresi, başlangıç pH'ı, başlangıç H₂O₂ konsantrasyonu ve uygulanan akım büyüklüğü gibi operasyonel parametrelerin dikkatle seçilmesi önemlidir. Çalışma, ideal çalışma ayarlarının, 2,5'lik bir başlangıç pH'ı, 1000 mg/L'lik bir başlangıç H₂O₂ konsantrasyonu ve 20 dakikalık bir arıtma süresi olduğunu ve bunların hepsinin 1,0 A sürekli DC akımında olduğunu göstermiştir. Yöntemin geniş ölçekli kullanımları, ideal koşullar altında gereken yüksek H₂O₂ konsantrasyonu nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle gelecekteki araştırmalar, kendiliğinden H₂O₂ oluşum süreçlerini hızlandıracak süreç iyileştirmelerine odaklanmalıdır.

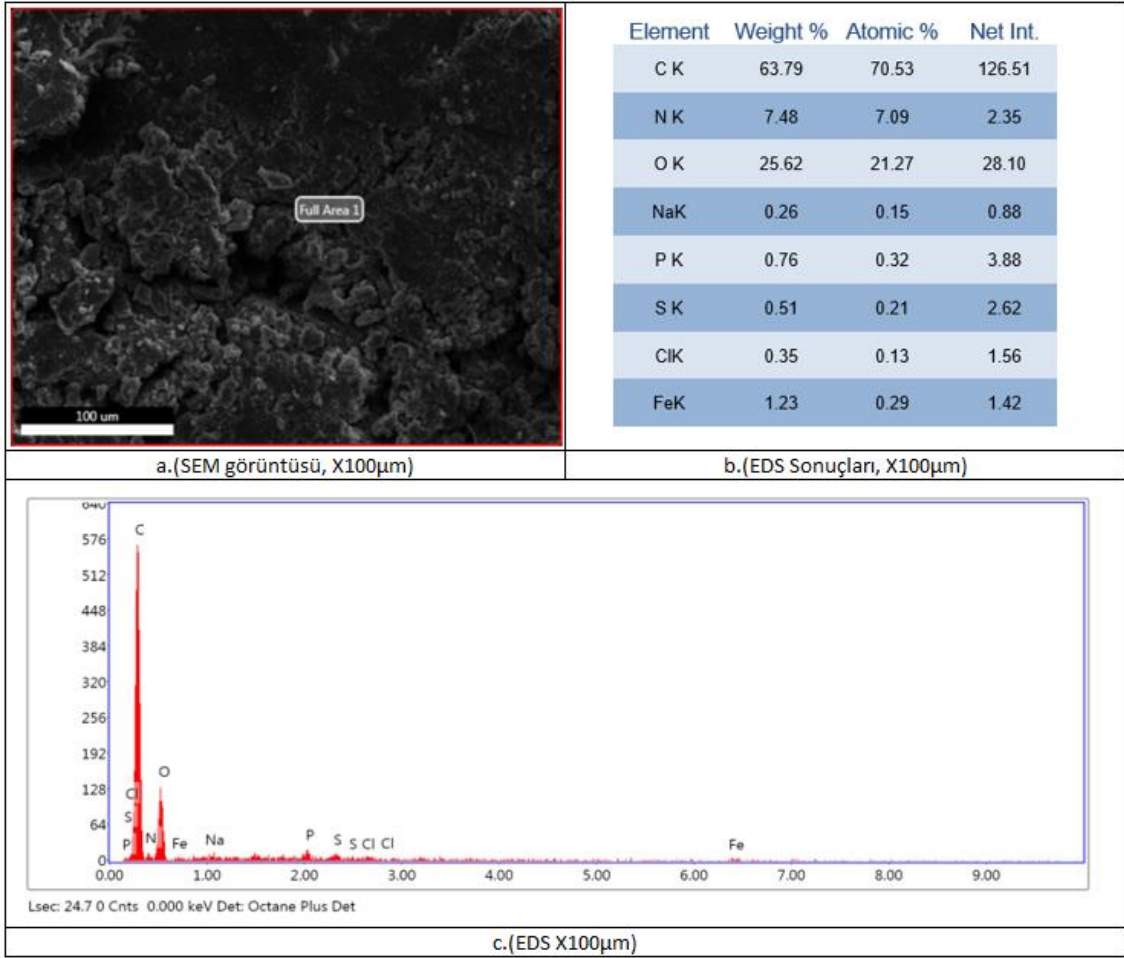
Tanattı'nın[86] yapmış olduğu bu çalışmada, tavuk mezbahalarında arıtılan atık sularda başlangıç pH'ının, akım yoğunluğunun, tuz miktarının ve başlangıç konsantrasyonunun demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak TOK, TN ve KOİ giderim verimleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. pH'ın tavuk mezbahalarından çıkan atık suyun arıtılma kabiliyetini nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneilerin yapılabilmesi için pH 3 ile 9 arasında değiştirilmiştir. Elde edilen verilere göre ideal pH'ın 5 olduğu bulunmuştur. Diğer pH seviyeleriyle karşılaştırıldığında, pH 5, her iki elektrot için de %10 daha fazla verimlilik sağlar. Yağ-gres, TOK, Toplam azot ve KOİ'nin uzaklaştırma verimliliklerinin akım yoğunluğundan etkilenmediği keşfedilmiştir. Optimum uzaklaştırma sonuçları, 5 dakikalık bir elektroliz periyodu için pH 5 ve 0,639 mA/cm²'de kaydedilmiştir. Demir elektrot yerine Al elektrot kullanıldığında daha yüksek giderim verimliliği elde edildiği görülmüştür.

Öztürk'ün[87] yapmış olduğu bu çalışmada fenolün elektrokatalitik parçalanmasını incelemek için elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon olmak üzere iki proses birleştirilmiştir.. Çalışmada Ti/Pt-Fe ve Ti/Pt-Al elektrot çiftleri kullanılmıştır. Fenol giderme oranı, elektrot malzemesi, başlangıç pH değeri, uygulanan akım ve sıcaklık dahil olmak üzere çeşitli operasyonel parametrelere göre değerlendirilmiştir. Deneysel bulgulara göre, Ti/Pt-Fe elektrot sistemi, pH 7,56'da ve 2 A akımla üç saatlik işlemden sonra fenolün %98'inden fazlasını uzaklaştırmıştır. Hibrit işleme fenol giderim mekanizmasını kavramak için kinetik incelemeler de yapılmıştır. pH 7.56'da hibrit prosesin reaksiyon kinetiğinin sözde birinci dereceden reaksiyon yasasını takip ettiği ve uygulanan akım arttıkça k_{obs} değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, gelişen

hidroksit floklarının fenolün hibrit prostenen uzaklaştırılmasından sorumlu olduğu ve difüzyon prosesinin öncelikle eş zamanlı adsorpsiyon için reaksiyon hızını düzenlediği gösterilmiştir. Çalışmada, hibrit prosesin fenolün bozunması ve uzaklaştırılması sırasında ortaya çıkan yan ürünleri tanımlanmıştır. Atıksu, yeniden kullanım için sınır değerlerin çok az altında olmasına rağmen, nihai fenol içeriği ve operasyon sonunda belirlenen demir katyonları değerinin gösterdiği gibi alıcı ortama deşarj kriterlerini karşılamaktadır. Bu durumda, daha etkili bir hibrit sistem oluşturmak için EO-EK hibrit prosesine ek olarak demiri ortadan kaldıracak filtreleme veya havalandırma prosedürleri de kullanılabilir. Ayrıca işlem süresi uzatılarak fenolün tamamen uzaklaştırılması sağlanabilir.

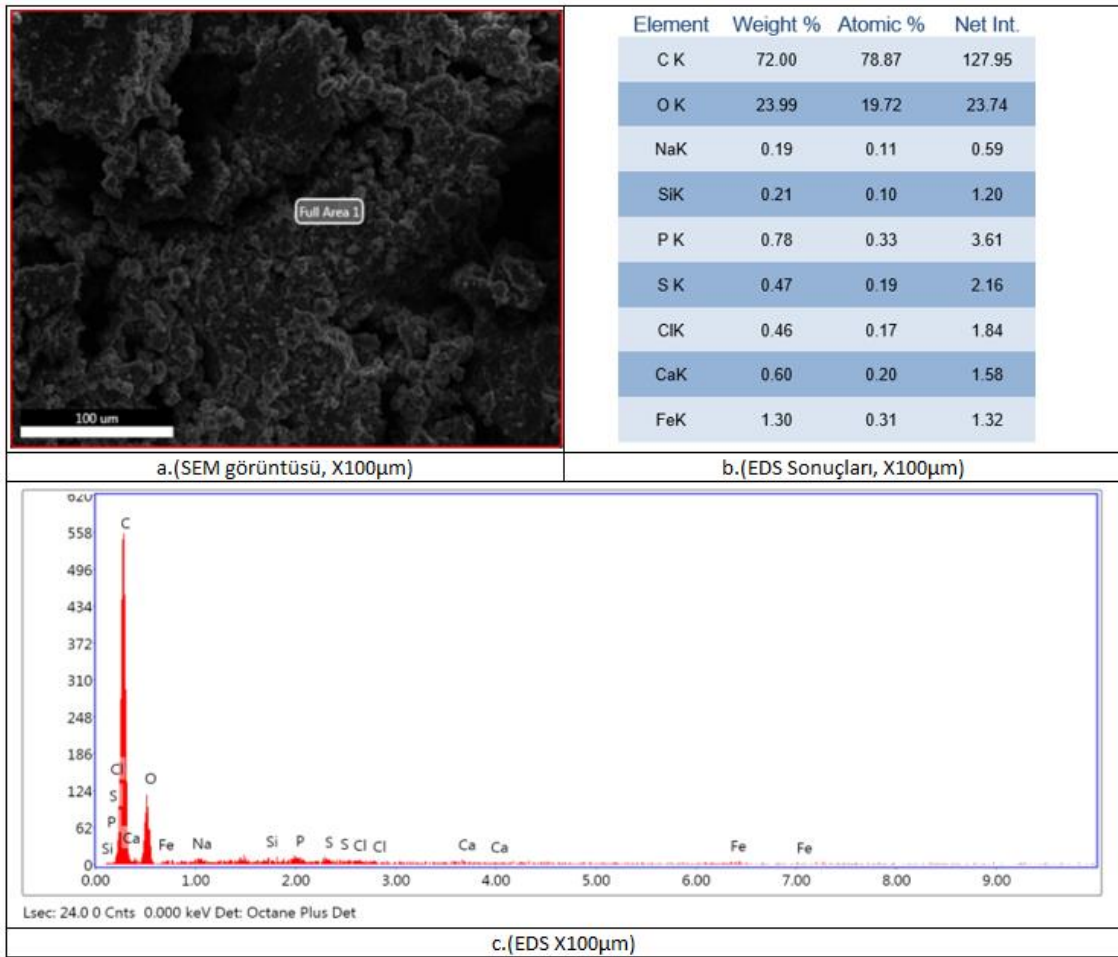
4.10. ÇÖZÜNÜR ELEKTROTLARIN KULLANILDIĞI ELEKTROKİMYASAL PROSELER SONRASI OLUŞAN ARITMA ÇAMURUNUN ANALİZİ

Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proste, başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,66-8,14 aralığında değiştirdiği gözlenmiştir, Ortalama voltaj değeri 5,2-5,35V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-4,05 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1250-1435 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 680-725 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.43) bakıldığında, ortamda Fe elementleri görülmektedir.



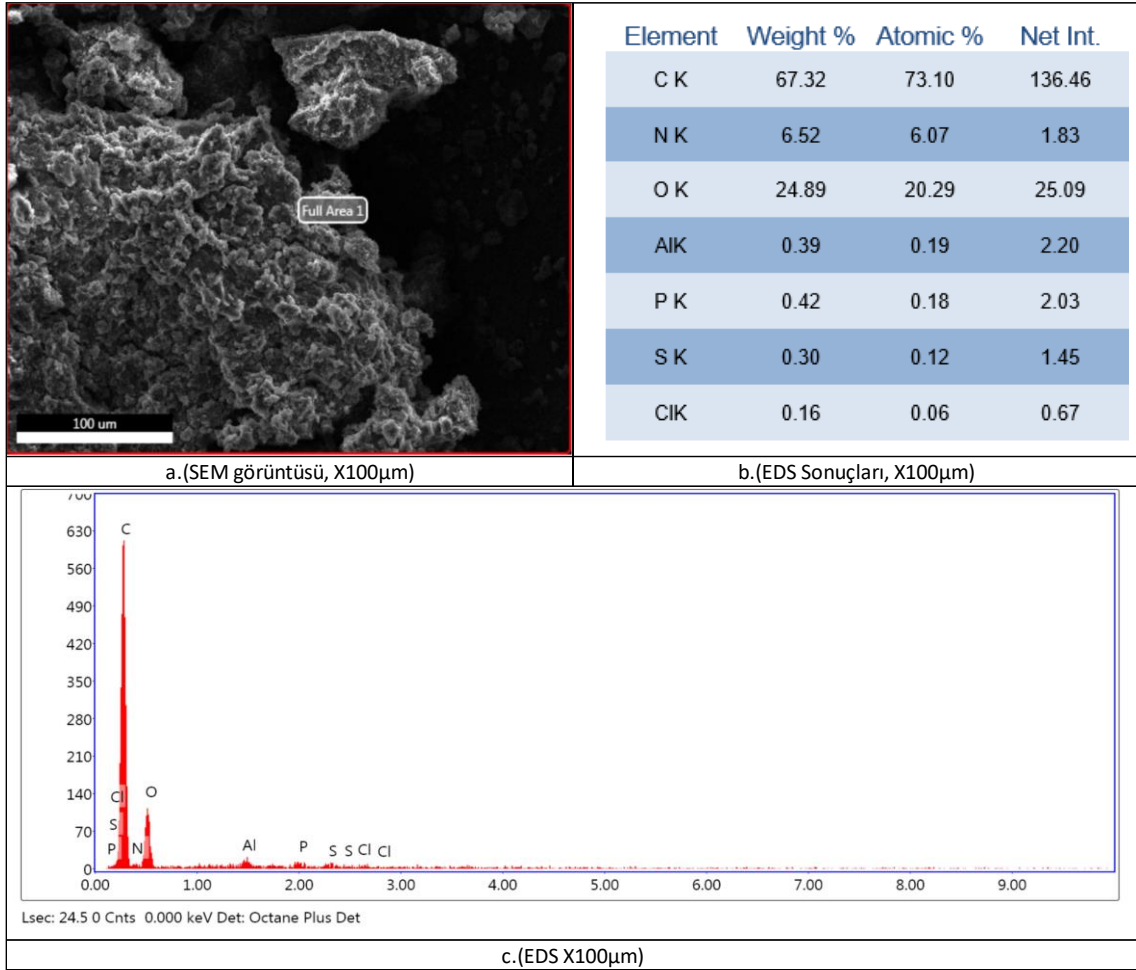
Şekil 4.43. Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proste KOİ ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

Fe/PÇ/Grafit elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proste, başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 7,18-9,53 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,75-10V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-3,46 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 2150-2300 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 800-900 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.44) bakıldığında, ortamda Fe elementleri görülmektedir.



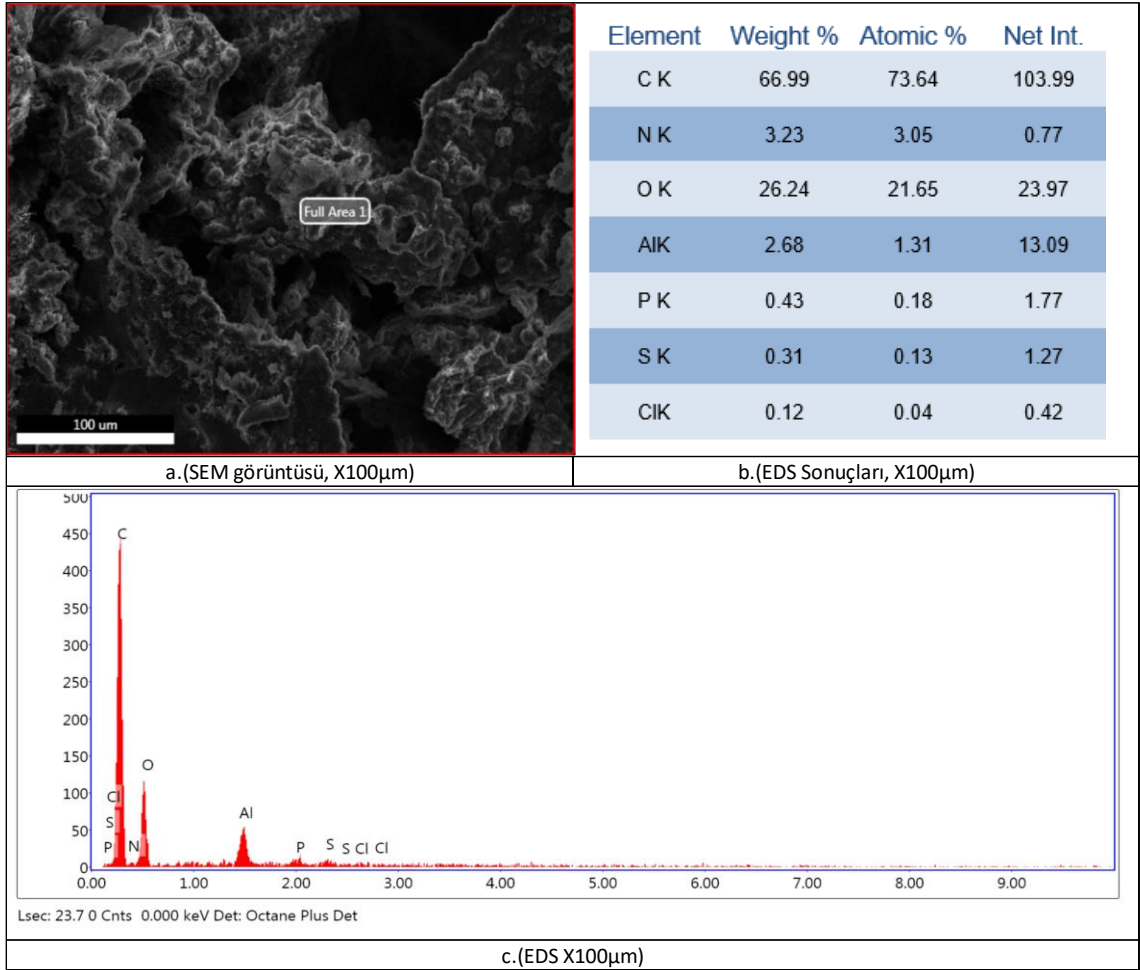
Şekil 4.44. Fe/PÇ/Grafit elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

Al/PÇ/TiRuO₂'nin elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste, Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,73-7,52 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 9,15-9,45V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,55-2,6 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1440-1950 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 840-960 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.45) bakıldığında, ortamda Al elementleri görülmektedir.



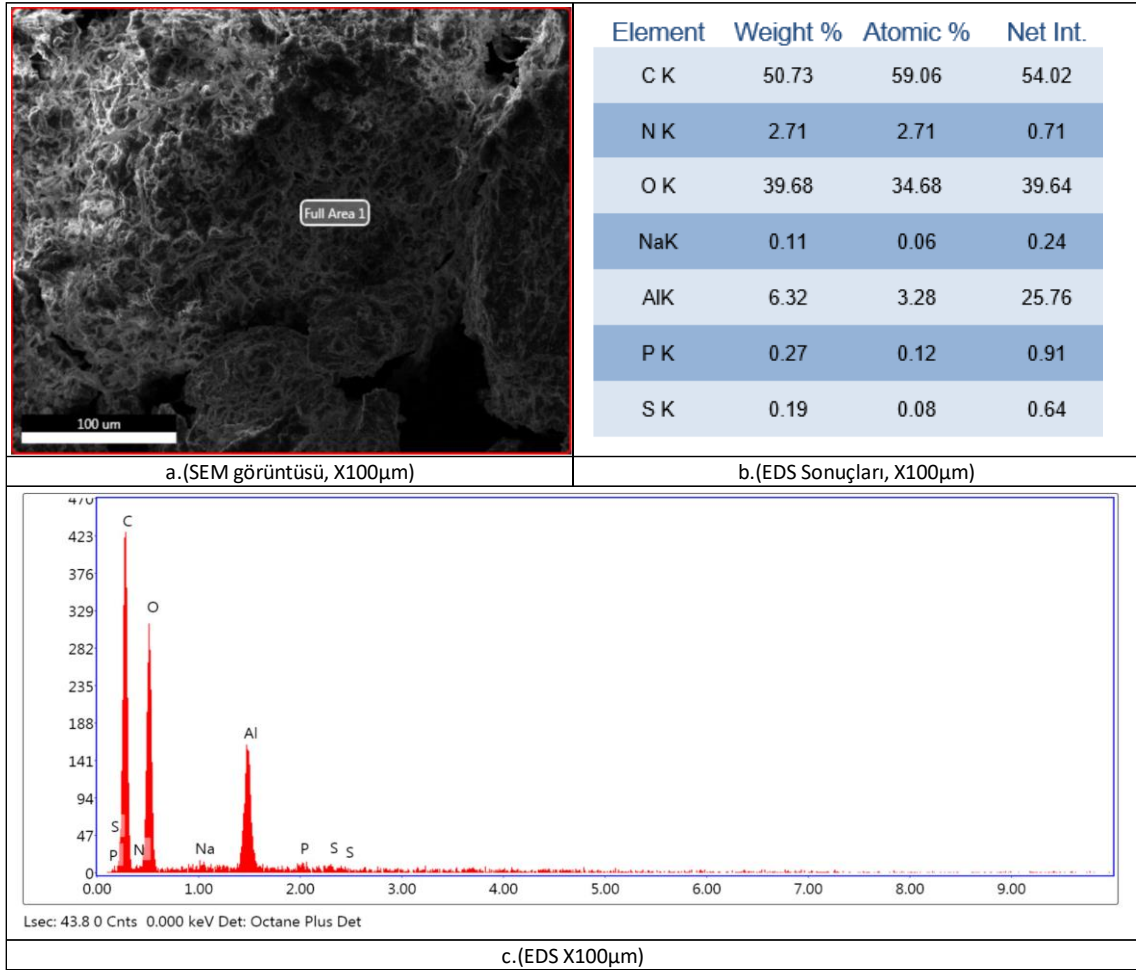
Şekil 4.45. Al/PC/TiRuO₂ elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOİ ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

Al/PC/Grafit elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste, başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 4,35-5,02 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,45-9V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,25-2,55 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1440-1950 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 840-960 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.46) bakıldığında, ortamda Al elementleri görülmektedir.



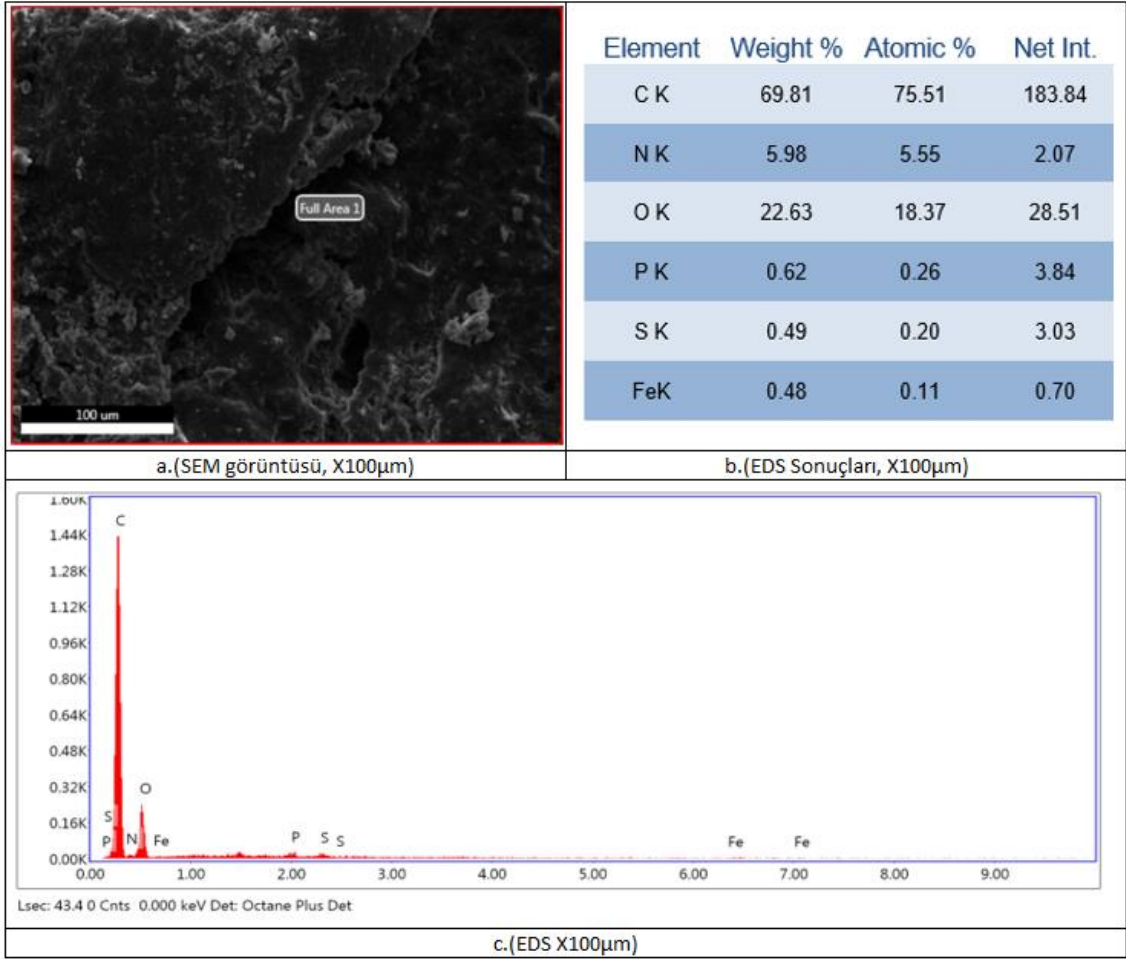
Şekil 4.46. Al/PC/Grafite elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proste KOİ ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

Al/PC/Al elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proste, Başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,8-6,21 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 8,70-9V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,15-1,96 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1595-1990 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 700-920 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.47) bakıldığında, ortamda Al elementleri görülmektedir.



Şekil 4.47. Al/PC/Al elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proseste KOİ ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

Fe/PC/Fe elektrotunun kullanıldığı elektrokimyasal proseste, başlangıç pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında 5,8-8,2 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Ortalama voltaj değeri 7,5-7,65V olarak tespit edilirken, iletkenlik değeri 2,45-2,77 mS/cm aralığında değişim göstermiştir. 5300 mg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip atıksuyun çıkış KOİ değerleri 1855-200 mg/L aralığında değişim göstermiştir. 1500 mg/L TOK değerine sahip atıksuyun çıkış TOK konsantrasyonu değerleri 735-840 mg/L olarak tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına (Şekil 4.48) bakıldığında, ortamda Al elementleri görülmektedir.



Şekil 4.48. Fe/PC/Fe elektrotunun kullanıldığı hibrit elektrokimyasal proseste KOI ve TOK giderimi için yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamur karakteristiği.

5. SONUÇLAR

Süt ve süt ürünleri kapsamında dondurma üretiminden kaynaklanan atıksuların eşzamanlı hibrit elektrokimyasal metotlar ile arıtımı konusunda literatüre katkı sağlamak amacıyla yapılan tez çalışmasında elde edilen sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda özetlenmiştir.

- Al/PÇ/Al ve Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantılı elektrokimyasal proseslerin kullanıldığı EK prosesi ile KOİ ve TOK giderim verimleri araştırılmıştır. Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EK prosesinde ham atıksu pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında (0-40 dk. aralığında) 5,8-6,21 aralığında, Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı türünde ise 5,8-8,2 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Fe elektrotlarının kullanıldığı sistemde reaksiyon süresi sonunda pH'nın 7'nin üzerine çıkması atıksu deşarj aralığı olan 6-9'a uyduğunu ve pH ayarlaması yapılmaksızın deşarj edilebileceğini göstermiştir. Bunun yanında Al/PÇ/Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EK prosesi ve Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EK prosesinde yaklaşık olarak %5 daha etkin olurken, TOK giderim verimi açısından hemen hemen aynı etkinliği göstermiştir. Dondurma atıksularının biyolojik bozunurluğunun belirlenmesi amacıyla OOD, KOD gibi parametreler incelenmiştir. Al için KOD -1,3'ten 2,4'e yükselirken, Fe için KOD -1,3'ten 2,14'e yükselmiştir. Yine Al için OOD -1,3'ten 0,58'e yükselirken, Fe için -1,3'ten 0,42'ye yükselmiştir. Aynı zamanda KOİ/TOK oranına bakıldığında Al ve Fe elektrot türü için sırasıyla 1,87 ve 1,70 olarak belirlenmiştir. Yüksek KOİ/TOK oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir. KOD, OOD ve KOİ/TOK oranına bakıldığında Al/PÇ/Al elektrot bağlantı türünün, Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı türünün kullanıldığı EK prosesine göre biyolojik bozunma etkinliğinin daha yüksek olduğunu ispatlamaktadır.

- Deney sırasında maksimum enerji tüketimi Al/PÇ/Al ve Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı sistemi için sırasıyla, 6,14 kWsa/m³ ve 5,20 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu da Al elektrot bağlantılı EK prosesinin enerji tüketiminin yaklaşık %18 daha fazla olduğunu göstermektedir. Her iki elektrot bağlantı türü için enerji tüketimi ve elektrik enerjisi verimi elektroliz süresinin artmasıyla artarken, akım verimi atıksudaki biyo-bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması nedeniyle azalmıştır.

- Al/PÇ/Al ve Fe/PÇ/Fe elektrot bağlantı türünün kullanıldığı EK prosesinin dondurma üretim atıksularının ön arıtımında alternatif bir proses olarak kullanılabileceği, verim açısından %5'lik bir farkla Al elektrot türünün, enerji tüketimi açısından % 18'lik fark ile Fe elektrot türünün tercih edilebileceği düşünülmektedir.
- Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit hibrit elektrot bağlantılı elektrokimyasal proseslerin kullanıldığı çalışmada KOİ ve TOK giderim verimleri araştırılmıştır. Fe/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı elektrokimyasal processte ham atıksu pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında (0-60 dk. aralığında) 5,66-8,14 aralığında, Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı türünde deneysel çalışma sırasında (0-40 dk. aralığında) ise 5,73-7,52 aralığında, Fe/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türünde deneysel çalışma sırasında (0-50 dk. aralığında) ise 7,18-9,53 aralığında, Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türünde deneysel çalışma sırasında (0-40 dk. aralığında) ise 4,35-5,02 aralığında değiştiği gözlenmiştir. Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit elektrotlarının kullanıldığı sistemde reaksiyon süresi sonunda pH'nın 7'nin üzerine çıkması atıksu deşarj aralığı olan 6-9'a uyduğunu ve pH ayarlaması yapılmaksızın deşarj edilebileceğini, Al/PÇ/Grafit elektrotlarının kullanıldığı sistemde reaksiyon süresi sonunda pH'nın 7'nin altında olduğunu ve atıksu deşarj aralığı olan 6-9'a uymadığını ve pH ayarlaması yapılmaksızın deşarj edilemeyeceğini göstermiştir. Bunun yanında Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit prosesinde KOİ ve TOK verimi açısından Fe/PÇ/TiRuO₂ daha etkin olmuştur. Dondurma atıksularının biyolojik bozunurluğunun belirlenmesi amacıyla OOD, KOD gibi parametreler incelenmiştir. Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit için sırasıyla KOD -1,3'ten 2,75, 2,56, 1,84, 1,85 'e yükselmiştir. Yine Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit için sırasıyla OOD -1,3'ten 1,24, 1,42, 0,166, 0,22'ye yükselmiştir. Aynı zamanda KOİ/TOK oranına bakıldığında Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit için sırasıyla 2,6, 4,1, 1,55, 2,07 olarak belirlenmiştir. Yüksek KOİ/TOK oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir. KOD, OOD ve KOİ/TOK oranına bakıldığında Al/PÇ/Al elektrot bağlantı türünün, Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot bağlantı türünün kullanıldığı elektrokimyasal processe göre biyolojik bozunma etkinliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.
- Deney sırasında maksimum enerji tüketimi Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit için sırasıyla, 5,73 kWsa/m³, 6,35 kWsa/m³, 7,81 kWsa/m³, 5,86 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu da Al/PÇ/TiRuO₂ prosesinin enerji tüketiminin

yaklaşık %23 daha fazla olduğunu göstermektedir. Hibrit elektrot bağlantı türleri için enerji tüketimi ve elektrik enerjisi verimi elektroliz süresinin artmasıyla artarken, akım verimi atıksudaki biyo-bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması nedeniyle azalmıştır.

- Fe/PÇ/TiRuO₂, Al/PÇ/TiRuO₂, Fe/PÇ/Grafit, Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türlerinin kullanıldığı EK prosesinin dondurma üretim atıksularının ön arıtımında alternatif bir proses olarak kullanılabilceği, verim açısından %4'lük bir farkla Fe/PÇ/TiRuO₂ hibrit elektrot türünün, enerji tüketimi açısından %23'lük fark ile Al/PÇ/TiRuO₂ elektrot türünün tercih edilebileceği düşünülmektedir.

- TiRuO₂/PÇ/Grafit, BDD/PÇ/PÇ hibrit elektrot bağlantılı elektrokimyasal proseslerin kullanıldığı aşamalarda KOİ ve TOK giderim verimleri araştırılmıştır. TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EO prosesinde ham atıksu pH değeri 4,52 iken deneysel çalışma sırasında (0-40 dk. aralığında) 5-8,2 aralığında, BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı türünde ise 4,2 olarak gözlenmiştir. TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot türlerinin kullanıldığı sistemde reaksiyon süresi sonunda pH'nın 7'nin üzerine çıkması atıksu deşarj aralığı olan 6-9'a uyduğunu ve pH ayarlaması yapılmaksızın deşarj edilebileceğini göstermiştir. Bunun yanında BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EO prosesi ve TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı EO prosesinde yaklaşık olarak %33 daha etkin olurken, TOK giderim verimi açısından BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sistemi yaklaşık %41 daha etkin olmuştur. Biyolojik bozunurluk parametreleri TiRuO₂/PÇ/Grafit için KOD -1,3'ten 2,03'e yükselirken, BDD/PÇ/PÇ için KOD -1,3'ten 3,78'e yükselmiştir. Yine TiRuO₂/PÇ/Grafit için OOD -1,3'ten 0,36'ya yükselirken, BDD/PÇ/PÇ için -1,3'ten 2,38'e yükselmiştir. Aynı zamanda KOİ/TOK oranına bakıldığında TiRuO₂/PÇ/Grafit ve BDD/PÇ/PÇ elektrot türü için sırasıyla 3,85 ve 3,48 olarak belirlenmiştir. Yüksek KOİ/TOK oranı organik maddelerin etkin şekilde bozunduğunu ifade etmektedir. KOD, OOD ve KOİ/TOK oranına bakıldığında BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı türünün, TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türünün kullanıldığı EO prosesine göre biyolojik bozunma etkinliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Deney sırasında maksimum enerji tüketimi TiRuO₂/PÇ/Grafit ve BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı sistemi için sırasıyla, 7,63 kWsa/m³ ve 5,460 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu da TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantılı EK prosesinin enerji tüketiminin yaklaşık %40 daha fazla olduğunu göstermektedir. Her iki elektrot bağlantı

türü için enerji tüketimi ve elektrik enerjisi verimi elektroliz süresinin artmasıyla artarken, akım verimi atıksudaki biyo-bozunabilir bileşiklerin konsantrasyonunun azalması nedeniyle azalmıştır.

- TiRuO₂/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türünün kullanıldığı elektrokimyasal proses ile dondurma üretim atıksularının ön arıtımında alternatif bir proses olarak ve BDD/PÇ/PÇ elektrot bağlantı türünün kullanıldığı elektrokimyasal proses ile dondurma üretim atıksularının ön ve/veya ana arıtımında alternatif bir proses olarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

- Yüksek KOİ gideriminden düşük KOİ giderimine göre, BDD/PÇ/PÇ > Fe/PÇ/TiRuO₂ > Al/PÇ/TiRuO₂ > Al/PÇ/Al > Fe/PÇ/Fe > TiRuO₂/PÇ/Grafit > Fe/PÇ/Grafit > Al/PÇ/Grafit olarak sırasıyla %95, %76, %73, %70, %65, %63, %60, %59 olarak tespit edilmiştir.

- Tüm bu değerlendirmeler ışığında, Fe/PÇ/TiRuO₂ > Al/PÇ/TiRuO₂ > Al/PÇ/Al > Fe/PÇ/Fe > TiRuO₂/PÇ/Grafit > Fe/PÇ/Grafit > Al/PÇ/Grafit elektrot bağlantı türlerinin ön arıtma amacıyla kullanılma potansiyeli bulunurken, BDD/PÇ/PÇ elektrot türünde atıksuların geri kazanımı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Balfaih,, Z.Nopiah, N.Saibani. A conceptual Framework for Supply Chain Performance in Desalination Industry. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(2) 95-101, 2016.
- [2] P. Garcia-caparros, J. I. Contreras, R. Baeza, M. L. Segura, and M. T. Lao, “Integral Management of Irrigation Water in Intensive Horticultural Systems of Almera,” *Sustainability (Switzerland)*, pp. 1–21, 2017, doi: 10.3390/su9122271.
- [3] A. U. oktem, “Türkiye’nin su riskleri raporu,” İstanbul, 2014. [Online]. Available: https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/turkiyenin_su_riskleri__raporu_we_b.pdf?4180/turkiyenin-su-riskleri-raporu.
- [4] N. W. Arnell, “Climate change and global water resources : SRES emissions and socio-economic scenarios,” *Global Environmental Change*, vol. 14, pp. 31–52, 2004, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2003.10.006.
- [5] H. G. Hız, “Farklı yöntemler ile artıtlmış kentsel atıksuların tarımsal sulama suyu olarak kullanımı: mersin ili, mezitli ve kızkalesi atıksu arıtma tesisleri rneği,” Yüksek Lisans Tezi, evre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye, 2022.
- [6] M. Garrido-Baserba, A. Hospido, R. Reif, M. Molinos-Senante, J. Comas, and M. Poch, “Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant,” *Enviromental Modelling & Software*, vol. 56, pp. 74–82, 2014, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.11.008.
- [7] D. K. Chatterjee, “World Commission on Environment and Development,” *Encyclopedia of Global Justice*, pp. 1163–1163, 2011, doi: 10.1007/978-1-4020-9160-5_1126.
- [8] M. Uğurlu, “Removal of some inorganic compounds from paper mill effluents by the electrocoagulation method,” *G.U. Journal of Science*, 17(3):85-99, 2004.
- [9] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga, and D. L. Cocke, “Electrocoagulation (EC) — science and applications,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 84, pp. 29–41, 2001.
- [10] E. Aytaç, “Elektrodiyaliz yöntemi ile atıksulardan kurşun, bakır ve nikel gideriminin araştırılması,” Doktora tezi, evre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye, 2016.
- [11] G. Soysüren, “Ultrafiltrasyon(uf) - elektrodeiyonizasyon(edı) hibrit sistemi ile bor giderilmesi,” Doktora Tezi, Kimya Anabilim Dalı, Analitik Kimya Yüksek Lisans Programı, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2021.
- [12] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo, and C. A. Martnez-Huitle, “Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 801, no. November 2016, pp. 267–299, 2017, doi: 10.1016/j.jelechem.2017.07.047.
- [13] F. Özyonar and M. U. Korkmaz, “Sequential use of the electrocoagulation-

- electrooxidation processes for domestic wastewater treatment,” *Chemosphere*, vol. 290, no. October 2021, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133172.
- [14] M. Solak, “Elektrokoagülasyon prosesleri ile atıksulardan fosfat giderimi ve prosesin optimizasyonu,” Doktora tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2013.
- [15] O. Serçinoğlu and P. Özbek, “HLA Proteinlerinin GNM Metodu ile Dinamik Karakterizasyonu Dynamic Characterization of HLA Molecules by GNM,” *Journal of Science and Engineering*, vol. 20, no. 59, pp. 201–211, 2018, doi: 10.21205/deufmd.
- [16] B. A. Fil, “Antep fıstığı işleme atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle arıtılması,” Doktora tezi, Çevre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2014.
- [17] M. Solak, "Endüstriyel atıksu arıtımında geleneksel ve yeni nesil elektrokimyasal tekniklerin incelenmesi" *Mühendislik Alanında Gelişmeler*, 1. baskı. Ankara, Türkiye: Platanus Yayın Grubu, 2023, böl.15, ss. 295-337.
- [18] R. Hepşen, “Süt endüstrisi atıksularının membran teknolojisi ile geri kazanımı ve deneysel tasarım uygulaması,” Yüksek Lisans tezi, Çevre Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [19] E. Öztürk, H. Yaman, “Dondurmanın Tarihsel Gelişimi ile Kültürlerarası Düzeyde Karşılaştırması,” *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, 7 (3), 2336-2359, 2019.
- [20] Megep, “Gıda teknolojisi dondurma,” *T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Gıda Teknolojisi*, Ankara, Türkiye. böl 1.1, ss. 7-8, 2011.
- [21] T. Çaybaşı, “Üzüm çekirdeği katkılı dondurma ile sade dondurmanın duyu analizi ve fonksiyonel özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Gastronomi Ve Mutfak Sanatları Ana Bilim Dalı, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye, 2023.
- [22] B. Uyanık, “Coğrafi işaretli kars kaşarı dondurması,” Yüksek Lisans Tezi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2021.
- [23] İ. Arslanoğlu, “Dondurma yapımında yulaf ezmesinin kullanımı dondurma reçetelerinin oluşturulması ve tanımlayıcı profil testinin yapılması,” Yüksek Lisans Tezi, Gastronomi Anabilim Dalı, Gastronomi Programı, İstanbul Okan Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2022.
- [24] Ş. Demir, “Ayva çekirdeği ekstraktının dondurma üretiminde etkisi,” Yüksek Lisans tezi, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2019.
- [25] K. Rathnakumar, J. Ortega-Anaya, R. Jimenez-Flores, and S. I. Martínez-Monteağudo, “Partition of milk phospholipids during ice cream manufacturing,” *Journal of Dairy Science*, vol. 106, no. 11, pp. 7501–7514, 2023, doi: 10.3168/jds.2022-23145.
- [26] L. H. Andrade, F. D. S. Mendes, J. C. Espindola, and M. C. S. Amaral, “Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: Technical and economic feasibility,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 735–747, 2015, doi: 10.1590/0104-6632.20150323s00003133.

- [27] E. Zkeri, A. Iliopoulou, A. Katsara, A. Korda, M. Aloupi, G. Gatidou, M. S. Fountoulakis and A. S. Stasinakis, "Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment," *Bioresource Technology*, vol. 323, no. December 2020, p. 124629, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124629.
- [28] E. Brillas and S. Garcia-segura, "Benchmarking recent advances and innovative technology approaches of Fenton , photo-Fenton , electro-Fenton , and related processes : A review on the relevance of phenol as model molecule," *Separation and Purification Technology*, vol. 237, no. September 2019, p. 116337, 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2019.116337.
- [29] E. Isarain-chávez, C. Arias, P. L. Cabot, F. Centellas, R. M. Rodriguez, J. A. Garrido and E. Brillas " Mineralization of the drug β -blocker atenolol by electro-Fenton and photoelectro-Fenton using an air-diffusion cathode for H₂O₂ electrogeneration combined with a carbon-felt cathode for Fe²⁺ regeneration," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 96, pp. 361–369, 2010, doi: 10.1016/j.apcatb.2010.02.033.
- [30] P. C. Foller and H. Tech, "Processes for the production of mixtures of caustic soda and hydrogen peroxide via the reduction of oxygen," *Journal Of Applied Electrochemistry*, vol. 25, no. 41, pp. 613–627, 1995.
- [31] M. Pazos and M. Á. Sanromán, "Advances in the Electro-Fenton Process for Remediation of Recalcitrant Organic Compounds," *Chemical Engineering Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 609–617, 2012, doi: 10.1002/ceat.201100321.
- [32] E. Gürtekin ve N. Şekerdağ, Bir İleri Oksidasyon Prosesi : Fenton proses. *Mühendislik Bilim Dergisi*, 14 (3), 229-326, 2008.
- [33] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment", *Separation and Purification Technology*, 38, ss. 11-41, 2004.
- [34] H. Akbaş, "Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 2014.
- [35] F.Özyonar, "Su ve atıksu arıtımında elektroflotasyon prosesi," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (2), 730–745, 2020.
- [36] M.Can, A.B. Etemoğlu ve C. Avcı, "Deniz suyundan tatlı su eldesinin teknik ve ekonomik analizi," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7 (1), 147–160, 2002.
- [37] S. Özdemir, C. Özdemir, F. Yangınlar ve M. Yılmaz, "Süt sanayiinde elektrodiyalizin kullanımı," *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, no. 4, pp. 587–590, 2008.
- [38] F. İlhan, "Elektrodiyaliz proseslerinden kaynaklanan konsantre akımın minimizasyonu ve tekrar kullanılabilirliğini incelenmesi : Tekstil atıksuyu örneği," *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 5, pp. 1–1, 2017, doi: 10.16984/saufenbilder.304492.
- [39] M. Kobya, E. Demirbas, A. Dedeli, and M. T. Sensoy, "Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, pp. 326–334, 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.092.
- [40] C. S. Lee, J. Robinson, and M. F. Chong, "A review on application of flocculants

- in wastewater treatment,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 6, pp. 489–508, 2014, doi: 10.1016/j.psep.2014.04.010.
- [41] M. Kasaplar, “Otomotiv endüstrisi atıksularının arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin uygulanması,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2019.
- [42] W. Balla, A. H. Essadki, B. Gourich, A. Dassaa, H. Chenik, and M. Azzi, “Electrocoagulation/electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, no. 1–3, pp. 710–716, 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.097.
- [43] A. K. Verma, R. R. Dash, and P. Bhunia, “A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters,” *Journal of Environmental Management*, vol. 93, no. 1, pp. 154–168, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.09.012.
- [44] T. Missana and A. Adell, “On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 230, no. 1, pp. 150–156, 2000, doi: 10.1006/jcis.2000.7003.
- [45] M. Solak, “Elektrokoagülasyon prosesi ile mermer atıksularının arıtılması,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2007.
- [46] X. Chen, G. Chen, and P. L. Yue, “Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation,” *Separation and Purification Technology*, vol. 19, pp. 65–76, 2000.
- [47] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. T. Can, and M. Sozbir, “Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater,” *Sustainable Environment Research*, vol. 37, pp. 117–125, 2004, doi: 10.1016/j.seppur.2003.09.002
- [48] L. Monser and N. Adhoumi “Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation,” *Chemical Engineering and Processing*, vol. 43, pp. 1281–1287, 2004, doi: 10.1016/j.cep.2003.12.001.
- [49] E. Brillas and C. A. Martínez-Huitle, “Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 166–167, pp. 603–643, 2015, doi: 10.1016/j.apcatb.2014.11.016.
- [50] M. Ozacar, “The decolorization of C . I . Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, pp. 1369–1376, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.100.
- [51] A. E. Yilmaz, R. Boncukcuo, and M. M. Kocakerim, “The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 125, pp. 160–165, 2005.
- [52] A. N. Yücel, “Endüstriyel atıksularda bulunan çoklu boyar maddelerin elektrokoagülasyonla giderilmesi,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2021.
- [53] F. Özyonar and B. Karagözoğlu, “Treatment of textile wastewater by electrocoagulation process,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 28, no. 1, pp. 29–37, 2012.

- [54] T. Kasap, “Kağıt Endüstrisi atıksularının peroksit ilaveli elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında cevap yüzey yöntemi,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [55] A. Aygün, “Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon,” Doktora tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2012.
- [56] D. Rajkumar and K. Palanivelu, “Electrochemical treatment of industrial wastewater,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 113, no. July 2003, pp. 123–129, 2004, doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.05.039.
- [57] A. García-García, V. Martínez-Miranda, I. G. Martínez-Cienfuegos, P. T. Almazán-Sánchez, M. Castañeda-Juárez, and I. Linares-Hernández, “Industrial wastewater treatment by electrocoagulation-electrooxidation processes powered by solar cells,” *Fuel*, vol. 149, pp. 46–54, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.09.080.
- [58] S. M. Sarabi, “Tungsten oksit film kaplı elektrotlar ile farklı organik kirlilik yüküne sahip atıksuların elektrooksidasyon prosesi ile arıtımı,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, İzmit, Türkiye, 2020.
- [59] E. Gengec, “Treatment of highly toxic cardboard plant wastewater by a combination of electrocoagulation and electrooxidation processes,” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 145, no. June, pp. 184–192, 2017, doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.07.032.
- [60] T. C. Orhan, E. Gengec, and M. Kobya, “Journal of Water Process Engineering TOC and COD removal from instant coffee and coffee products production wastewater by chemical coagulation assisted electrooxidation,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 28, no. January, pp. 28–35, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.01.002.
- [61] T. Kaygusuz, “Elektrokimyasaloksidasyon yönteminin tekstil atıksularının arıtılabilirliğine etkilerinin tamölçekli araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye 2013.
- [62] K. Chanworrawoot, “Treatment of wastewater from pulp and paper mill industry by electrochemical methods in membrane reactor,” *Journal of Environmental Management*, vol. 113, pp. 399–406, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.09.021.
- [63] H. Atalay, “Combining Electro-Fenton and adsorption processes for reclamation of textile industry wastewater and modeling by Artificial neural Networks,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 921, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.jelechem.2022.116652.
- [64] Y. Juang, E. Nurhayati, C. Huang, J. R. Pan, and S. Huang, “A hybrid electrochemical advanced oxidation / microfiltration system using BDD / Ti anode for acid yellow 36 dye wastewater treatment,” *Separation and Purification Technology*, vol. 120, pp. 289–295, 2013, doi: 10.1016/j.seppur.2013.09.042.
- [65] I. Linares-hernández, C. Barrera-díaz, B. Bilyeu, P. Juárez-garcíarojas, and E. Campos-medina, “A combined electrocoagulation – electrooxidation treatment for industrial wastewater,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 175, pp. 688–694,

2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.064.

- [66] N. N. Abdulrazzaq, B. H. Al-sabbagh, and H. A. Shanshool, "Coupling of electrocoagulation and microflotation for the removal of textile dyes from aqueous solutions," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, no. October 2020, p. 101906, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101906.
- [67] Ö. Bulca, B. Palas, S. Atalay, and G. Ersöz, "Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, no. July 2020, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101821.
- [68] H. Afanga, H. Zazou, F. E. Titchou, Y. Rakhila, R. A. Akbour, A. Elmchaouri, J. Ghanbaja and M. Hamdani, "Integrated electrochemical processes for textile industry wastewater treatment: System performances and sludge settling characteristics," *Sustainable Environment Research*, vol. 30, no. 1, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1186/s42834-019-0043-2.
- [69] H. Zazou, H. Afanga, S. Akhouairi, H. Ouchtak, A. A. Addi, R. A. Akbour, A. Assabbane, J. Douch, A. Elmchaouri, J. Duplay, A. Jada. and M. Hamdani, "Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 28, no. February, pp. 214–221, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.02.006.
- [70] M. Solak, "Hibrit elektrokoagülasyon/elektrooksidasyon prosesleri ile denim ürün üretim atıksularının arıtımı," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, pp. 780–786, 2019, doi: 10.19113/sdufenbed.533386.
- [71] T. Tavangar, K. Jalali, M. A. Alaei Shahmirzadi, and M. Karimi, "Toward real textile wastewater treatment: Membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation – Nanofiltration process," *Separation and Purification Technology*, vol. 216, no. January, pp. 115–125, 2019, doi: 10.1016/j.seppur.2019.01.070.
- [72] E. GilPavas, I. Dobrosz-Gómez, and M. Á. Gómez-García, "Optimization of sequential chemical coagulation - electro-oxidation process for the treatment of an industrial textile wastewater," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 22, no. January, pp. 73–79, 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.01.005.
- [73] E. GilPavas, P. Arbeláez-Castaño, J. Medina, and D. A. Acosta, "Combined electrocoagulation and electro-oxidation of industrial textile wastewater treatment in a continuous multi-stage reactor," *Water Science and Technology*, vol. 76, no. 9, pp. 2515–2525, 2017, doi: 10.2166/wst.2017.415.
- [74] A. S. Naje, S. Chelliapan, Z. Zakaria, and S. A. Abbas, "Enhancement of an electrocoagulation process for the treatment of textile wastewater under combined electrical connections using titanium plates," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 10, no. 6, pp. 4495–4512, 2015
- [75] APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," Washington D.C., 2005.
- [76] A. Kuleyin, A. Gök, and F. Akbal, "Treatment of textile industry wastewater by electro-Fenton process using graphite electrodes in batch and continuous mode," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 1, 2021, doi:

10.1016/j.jece.2020.104782.

- [77] E. GilPavas and S. Correa-Sánchez, “Optimization of the heterogeneous electro-Fenton process assisted by scrap zero-valent iron for treating textile wastewater: Assessment of toxicity and biodegradability,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 32, no. August, p. 100924, 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100924.
- [78] M. Kobya and S. Delipinar, “Treatment of the baker’s yeast wastewater by electrocoagulation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, no. 1–3, pp. 1133–1140, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.019..
- [79] S. Tchamango, C. P. Nanseu-Njiki, E. Ngameni, D. Hadjiev, and A. Darchen, “Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes,” *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 4, pp. 947–952, 2010, doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.026.
- [80] J. Akansha, P. V Nidheesh, A. Gopinath, K. V Anupama, and M. S. Kumar, “Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process,” *Chemosphere*, vol. 253, p. 126652, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126652.
- [81] I. A. Şengil and M. Özacar, “Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 2, pp. 1197–1205, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.009.
- [82] M. S. Melchior, M. Piovesan, V. R. Becegato, V. A. Becegato, E. B. Tambourgi, and A. T. Paulino, “Treatment of wastewater from the dairy industry using electrocoagulation and solid whey recovery,” *Journal of Environmental Management*, vol. 182, pp. 574–580, 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.08.022.
- [83] R. Gonzalez-Olmos, A. Penadés, and G. Garcia, “Electro-oxidation as efficient pretreatment to minimize the membrane fouling in water reuse processes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 552, no. October 2017, pp. 124–131, 2018, doi: 10.1016/j.memsci.2018.01.041.
- [84] D. Demiral, “Düzenli depolama alanı atıksularının elektrokimyasal yöntemler ile arıtılabilirliği”, Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, İzmit, Türkiye, 2020.
- [85] P. P. K. Holt, G. W. Barton, M. Wark, and C. A. Mitchell, “A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 211, no. 2002, pp. 233–248, 2002..
- [86] N. P. Tanattı, “Kanatlı hayvan kesimhane atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabilirliği,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2009.
- [87] H. Öztürk, “Elektrooksidasyon-elektrokoagülasyon hibrit prosesiyle fenol giderimi: reaksiyon kinetiği ve metabolitlerin belirlenmesi,” Yüksek lisans tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, İzmit, Türkiye, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Abdulkerim AKYÜZ

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Çevre Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2024
Y. Lisans	İş Sağlığı ve Güvenliği	Bursa Teknik Üniversitesi	2022
Lisans	Çevre Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019