

**SERAMİK ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON
YÖNTEMİ İLE ARITILMASI**

Güray EMİR

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 1408F373**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Güray EMİR'in "Seramik Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtılması" başlıklı **Çevre Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 22.12.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim- Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Prof. Dr. Yusuf YAVUZ
Üye	: Yard. Doç. Dr. Filiz BAYRAKÇI KAREL
Üye	: Yard. Doç. Dr. Alime ÇITAK

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERAMİK ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITILMASI

Güray EMİR

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ
2015, 107 sayfa

Seramik endüstrisi Türkiye’de yaygın endüstri dallarından bir tanesidir. Elektrokoagülasyon yöntemi bir ileri arıtma işlemidir. Bu yöntemin çeşitli atıksu tiplerinde başarılı uygulamaları mevcuttur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, Bilecik İl Sınırları içerisinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasından alınan atıksu numunesi elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmıştır. Yapılan çalışmalarda akım yoğunluğu, elektrot tipi ve destek elektrolit derişiminin seramik endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımına olan etkisinin incelemesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği hükümleri ile karşılaştırılmış ve bu yöntem ile arıtılan atıksuyun deşarj kriterlerini sağladığı gözlemlenmiştir. Ham atıksuda deşarj limitlerinin üzerinde bulunan parametrelerden Askıda Katı Madde’de %99 üzerinde giderim gerçekleştirilmiştir. Deşarj limitlerinin altında bulunan parametrelerden ise Kadmiyum’da % 80, Çinko’da %86, Kurşun’da %99 üzerinde giderim gerçekleştirilmiştir. Deneylerin ardından enerji ve elektrot maliyeti üzerine de hesaplamalar yapılmış olup en uygulanabilir arıtımın demir elektrot ile 1 mA/cm² akım yoğunluğunda elde edildiği saptanmıştır. Destek elektrolit derişimi ile ilgili yapılan deneylerde ise destek elektrolit kullanmamanın en ekonomik seçenek olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca zeta potansiyeli ve partikül boyutu gibi çökelme karakteristiğini doğrudan etkileyen parametreler ölçülmüştür. Zeta potansiyelinin -20,6 mV’den, -6,02mV’ye, boyut parametrelerinden d_{0,5}’in ise 8,537 µm’den 4,009 µm’ye elektrokoagülasyon ile düşürüldüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak elektrokoagülasyon yönteminin seramik endüstrisi atıksularının arıtımında iyi bir alternatif olabileceği ortaya konmuştur. Çalışmalar laboratuvar ölçekli olup pilot ve tam ölçekli tesislerde denenmesi önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: Seramik Endüstrisi Atıksuyu, Elektrokimyasal Arıtım, Elektrokoagülasyon, AKM Giderimi

ABSTRACT

Master of Sciences Thesis

TREATMENT OF CERAMIC INDUSTRY WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION METHOD

Güray EMİR

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Environmental Engineering Program

Supervisor: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ
2015, 107 pages

Ceramic industry is one of the prevalent industry subsections in Turkey. Electrocoagulation method is an advanced wastewater treatment process. There are successful applications on various wastewaters for this method. In the study within the scope of this thesis, wastewater sample, taken from a ceramic factory that located in Bilecik-Turkey, was treated with the electrocoagulation method. In this study, it was aimed to survey current density, electrode type and support electrolyte concentration effects on the treatment of ceramic wastewater by the electrocoagulation method. Results of the experiments are compared Water Pollution Control Regulation of Turkey and it is observed that the wastewater is useful for discharging after treatment. The removal rate of Suspended Solid, one of the water pollution parameters that is above on discharge limits in raw wastewater, is bigger than 99%. The removal rate of Cadmium, Zinc and Lead; water pollution parameters that are below down the discharge limits in raw wastewater; is bigger than 80%, 86% and 99% in a row. After the experiments some calculations about energy and electrode cost was done and the best available treatment confirmed with ferric electrode at the current density of $1\text{mA}/\text{cm}^2$. In the experiments about support electrolyte concentration, the option of non-use support electrolyte is determined as the economically most available option. In addition, parameters that directly effects on settlement characteristics like zeta potential and particle size are measured. Zeta potential is decreased from $-20,6\text{ mV}$ to $-6,02\text{ mV}$ and particle size parameter $d_{0,5}$ is decreased from $8,537\text{ }\mu\text{m}$ to $4,009\text{ }\mu\text{m}$. As a conclusion, that electrocoagulation method is a good alternative for the treatment of the ceramic industry wastewater is determined. This study was laboratory scale and it can be suggested that trying on pilot and full scale plants.

Keywords: Ceramic Industry Wastewater, Electrochemical Treatment, Electrocoagulation, Suspended Solids Removal

TEŞEKKÜR

Çalışma süresi boyunca bana desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve ihtiyacım olan her an bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Yusuf YAVUZ'a teşekkür ederim.

KOİ analizlerinde ve elektron mikroskobu ile yapılan çalışmalarda verdiği destekten ötürü Uzm. Fadime KARAER'e, metal analizlerindeki desteğinden ötürü Araş. Gör. Akif ARI'ya, sistem kurulumu sırasında tecrübesini benimle paylaşan doktora öğrencisi Seval YILMAZ'a ve katkılarından dolayı bölümümüzdeki tüm hocalarım ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Partikül boyut ölçümlerindeki desteklerinden dolayı Tekniker Göksel YILMAZ'a (Seramik Araştırma Merkezi) ve yüksek lisans öğrencisi Tayfun ÖZMEN'e (Malzeme Mühendisliği Bölümü) teşekkür ederim.

Tez kapsamında yaptığım çalışmalara maddi katkılarından ötürü Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na teşekkür ederim.

Hayat boyu hep yanımda olan anneme, babama, ablama ve onu tanıdığım gündün beri bana en büyük desteği veren eşim Nergiz EMİR'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. SERAMİK ENDÜSTRİSİ	3
2.1. Seramik Endüstrisi Genel Tanıtımı	3
2.2. Seramik Endüstrisi Atıksuları	5
2.3. Seramik Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Mevcut Yöntemler	7
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ	11
3.1. Elektrokoagülasyon.....	11
3.1.1. Elektrokoagülasyonda bağlantı çeşitleri	13
3.1.2. Elektrokoagülasyonda akış çeşitleri.....	15
3.1.3. Elektrokoagülasyonu etkileyen faktörler	17
3.2. Elektrokoksidadasyon	19
3.3. Elektrofлотasyon	21
3.4. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	21
3.4.1. Elektrokoagülasyon ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar	21
3.4.2. Benzer atıksular ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar.....	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM	28
4.1. Materyal	28
4.2. Yöntem.....	31
4.2.1. Akım yoğunluğunun arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi	31
4.2.2. Elektrolit derişiminin arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi	32
4.2.3. Elektrot tiplerinin arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi.....	33
4.2.4. AKM analizi.....	33
4.2.5. pH analizi	34

4.2.6. Bulanıklık analizi	34
4.2.7. KOİ analizi	34
4.2.8. Metal analizi.....	35
4.2.9. Zeta potansiyeli analizi	36
4.2.10. Boyut ölçümü	38
5. BULGULAR	39
5.1. Akım Yoğunluğunun Arıtılabilirliğe Olan Etkisi	39
5.1.1. Demir elektrotlar ile yapılan çalışmalar	39
5.1.2. Alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalar	42
5.1.3. En düşük akım yoğunluğunda zamana bağlı giderim verimi	45
5.1.4. Maliyet hesaplamaları	47
5.1.5. Metal giderimi	69
5.1.6. KOİ analiz sonuçları	71
5.1.7. Zeta potansiyeli analiz sonuçları	71
5.1.8. pH analiz sonuçları.....	73
5.2. Destek Elektrolit Derişiminin Arıtılabilirliğe Olan Etkisi	73
5.2.1. Demir elektrot ile yapılan çalışmalar	74
5.2.2. Alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalar	77
5.2.3. Destek elektrolit maliyeti	79
5.3. Elektrot Tipinin Arıtılabilirliğe Olan Etkisi	81
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	87
EK -1 Akım Yoğunluğu Hesabı	93
EK 2- Örnek Enerji Maliyeti Hesabı.....	94
EK 3- Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı- Demir Elektrot.....	95
EK 4- Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı- Alüminyum Elektrot	96
EK 5- Boyut Ölçümleri	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Seramik endüstrisi genel akış diyagramı	4
Şekil 2. 2. 4 Farklı seramik türü için üretim akış diyagramı.....	4
Şekil 2. 3. Türkiye’de su tüketiminin kullanım amacına göre dağılımı.....	6
Şekil 2. 4. Zeta potansiyeli, çift tabaka, sert tabaka ve kaygan tabaka	9
Şekil 2. 5. Seramik endüstrisi atıksu arıtma tesisleri genel akış diyagramı	9
Şekil 3. 1. Örnek monopolar bağlantı	14
Şekil 3. 2. Örnek bipolar bağlantı	15
Şekil 3. 3. Paralel akış.....	16
Şekil 3. 4. Seri akış.....	16
Şekil 3. 5. Alüminyum hidroksit türlerinin pH’a bağlı olarak derişim değişimi ..	19
Şekil 3. 6. Doğrudan oksidasyon.....	20
Şekil 4. 1. Güç kaynağı	28
Şekil 4. 2. Deneyde kullanılan elektrotlar (demir elektrot).....	29
Şekil 4. 3. Kutup değiştirici	29
Şekil 4. 4. Elektrot demeti (demir).....	30
Şekil 4. 5. Elektrokoagülasyon düzeneği	30
Şekil 4. 6. Zeta potansiyeli ölçüm küveti.....	36
Şekil 4. 7. Lazer kırınım metodu çalışma prensibi	38
Şekil 5. 1. $t=10$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	40
Şekil 5. 2. $t=5$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	40
Şekil 5. 3. $t=2,5$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	41
Şekil 5. 4. $t=10$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	41
Şekil 5. 5. $t=5$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	42
Şekil 5. 6. $t=2,5$ dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	42
Şekil 5. 7. $t=10$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	43
Şekil 5. 8. $t=5$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	43
Şekil 5. 9. $t=2,5$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi	44
Şekil 5. 10. $t=10$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	44
Şekil 5. 11. $t=5$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	45
Şekil 5. 12. $t=2,5$ dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi	45
Şekil 5. 13. Al elektrot, 1 mA/cm^2 ; AKM giderimi verimi, zaman ilişkisi.....	46

Şekil 5. 14. Fe elektrot, 1 mA/cm ² ; AKM giderimi verimi, zaman ilişkisi.....	46
Şekil 5. 15. Fe elektrot; giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi	68
Şekil 5. 16. Al elektrot; giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi	69
Şekil 5. 17. Kurşun gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi	70
Şekil 5. 18. Kadmiyum gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi	70
Şekil 5. 19. Çinko gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi	71
Şekil 5. 20. Demir elektrot - zeta potansiyeli ölçümleri	72
Şekil 5. 21. Alüminyum elektrot - zeta potansiyeli ölçümleri	73
Şekil 5. 22. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi giderim verimi ilişkisi.....	75
Şekil 5. 23. Fe elektrot destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi.....	76
Şekil 5. 24. Al elektrot; destek elektrolit derişimi giderim verimi ilişkisi.....	77
Şekil 5. 25. Al elektrot destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi.....	78
Şekil 5. 26. Fe elektrot, t=2,5 dk; akım yoğunluğu, AKM çıkış derişimi ilişkisi .	82
Şekil 5. 27. Al elektrot, t=2,5 dk; akım yoğunluğu, AKM çıkış derişimi ilişkisi .	83
Şekil 5. 28. Giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi	84
Şekil EK 5. 1. Ham atıksu partikül boyut dağılımı	97
Şekil EK 5. 2. Ham atıksu SEM görüntüsü.....	97
Şekil EK 5. 3. Fe elektrot,1 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	98
Şekil EK 5. 4. Fe elektrot, 1 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	98
Şekil EK 5. 5. Fe elektrot,10 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	99
Şekil EK 5. 6. Fe elektrot, 10 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	99
Şekil EK 5. 7. Fe elektrot,20 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	100
Şekil EK 5. 8. Fe elektrot, 20 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	100
Şekil EK 5. 9. Fe elektrot,30 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	101
Şekil EK 5. 10. Fe elektrot, 30 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	101
Şekil EK 5. 11. Fe elektrot,40 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	102
Şekil EK 5. 12. Fe elektrot, 40 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	102
Şekil EK 5. 13. Al elektrot,1 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	103
Şekil EK 5. 14. Al elektrot, 1 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	103
Şekil EK 5. 15. Al elektrot,10 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	104
Şekil EK 5. 16. Al elektrot, 10 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	104
Şekil EK 5. 17. Al elektrot,20 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	105

Şekil EK 5. 18. Al elektrot, 20 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	105
Şekil EK 5. 19. Al elektrot, 30 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı	106
Şekil EK 5. 20. Al elektrot, 30 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	106
Şekil EK 5. 21. Al elektrot, 40 mA/cm ² ; partikül boyut dağılımı.....	107
Şekil EK 5. 22. Al elektrot, 40 mA/cm ² ; SEM görüntüsü.....	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2. 1. Seramik endüstrisi atıksuları deşarj standartları	7
Çizelge 4. 1. Ham atıksu karakterizasyonu	28
Çizelge 5. 1. Akım şiddeti- akım yoğunluğu ilişkisi.....	39
Çizelge 5. 2. Fe elektrot, t=10 dk; enerji maliyeti hesapları	48
Çizelge 5. 3. Fe elektrot, t=5 dk; enerji maliyeti hesapları	49
Çizelge 5. 4. Fe elektrot, t=2,5 dk; enerji maliyeti hesapları	50
Çizelge 5. 5. Al elektrot, t=10 dk; enerji maliyeti hesapları	51
Çizelge 5. 6. Al elektrot, t=5 dk; enerji maliyeti hesapları	52
Çizelge 5. 7. Al elektrot, t=2,5 dk; enerji maliyeti hesapları	53
Çizelge 5. 8. Fe elektrot, t=10 dk; elektrot maliyeti hesapları	55
Çizelge 5. 9. Fe elektrot, t=5 dk; elektrot maliyeti hesapları	56
Çizelge 5. 10. Fe elektrot, t=2,5 dk; elektrot maliyeti hesapları	57
Çizelge 5. 11. Al elektrot, t=10 dk; elektrot maliyeti hesapları	58
Çizelge 5. 12. Al elektrot, t=5 dk; elektrot maliyeti hesapları	59
Çizelge 5. 13. Al elektrot, t=2,5 dk; elektrot maliyeti hesapları	60
Çizelge 5. 14. Fe elektrot, t=10 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	62
Çizelge 5. 15. Fe elektrot, t=5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	63
Çizelge 5. 16. Fe elektrot, t=2,5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	64
Çizelge 5. 17. Al elektrot, t=10 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	65
Çizelge 5. 18. Al elektrot, t=5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	66
Çizelge 5. 19. Al elektrot, t=2,5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi	67
Çizelge 5. 20. KOİ ölçümleri	71
Çizelge 5. 21. Fe elektrotlarla yapılan çalışmada zeta potansiyeli ölçümleri	72
Çizelge 5. 22. Al elektrotlarla yapılan çalışmada zeta potansiyeli ölçümleri	73
Çizelge 5. 23. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi, giderim verimi ilişkisi.....	74
Çizelge 5. 24. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi.....	75
Çizelge 5. 25. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi toplam maliyet ilişkisi.....	76
Çizelge 5. 26. Al elektrot; destek elektrolit derişimi, giderim verimi ilişkisi.....	77
Çizelge 5. 27. Al elektrot; destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi.....	78
Çizelge 5. 28. Al elektrot; destek elektrolit derişimi toplam maliyet ilişkisi.....	79
Çizelge 5. 29. Destek elektrolit derişimi maliyet ilişkisi	79

Çizelge 5. 30. Fe elektrot; en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi...	80
Çizelge 5. 31. Al elektrot; en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi..	81
Çizelge 5. 32. Fe elektrot, $t=2,5$ dk; AKM çıkış konsantrasyonları	82
Çizelge 5. 33. Al elektrot, $t=2,5$ dk; AKM çıkış konsantrasyonları	83
Çizelge 5. 34. $t=2,5$ dk tepkime süresi için giderilen AKM başına maliyetler	83
Çizelge EK 5. 1. Ham atıksuyun $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri	97
Çizelge EK 5. 2. Fe elektrot, 1 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	98
Çizelge EK 5. 3. Fe elektrot, 10 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	99
Çizelge EK 5. 4. Fe elektrot, 20 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	100
Çizelge EK 5. 5. Fe elektrot, 30 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	101
Çizelge EK 5. 6. Fe elektrot, 40 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	102
Çizelge EK 5. 7. Al elektrot, 1 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	103
Çizelge EK 5. 8. Al elektrot, 10 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	104
Çizelge EK 5. 9. Al elektrot, 20 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	105
Çizelge EK 5. 10. Al elektrot, 30 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	106
Çizelge EK 5. 11. Al elektrot, 40 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri.....	107

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SKKY	: Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği
M.Ö.	: Milattan önce
AKM	: Askıda Katı Madde
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
A	: Amper
W	: Watt
kWh	: Kilo Watt Saat
μ S	: Mikro Siemens
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TS	: Türk Standardı
ISO	: Uluslararası Standart Teşkilatı
krş.	: Kuruş
TL	: Türk Lirası
C	: Coulomb
mM	: Mili Molar
EPA	: Amerikan Çevre Koruma Ajansı
Fe	: Demir
Al	: Alüminyum
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
DAS	: Demir Amonyum Sülfat

1. GİRİŞ

Seramik endüstrisi ülkemizde yaygın bir endüstri olup seramik üretimi sırasında yüksek miktarda atıksu oluşmaktadır. Atıksular arıtılmadan alıcı ortama verildiğinde çevresel problemlere neden olabilmektedir. Üretim sonucunda, oluşan atıksuların doğru yöntemle arıtımı ekonomik ve çevresel açıdan son derece önemlidir.

Elektrokoagülasyon ileri elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden biridir. Elektrokoagülasyon yöntemi; koagülantın (pıhtılaştırıcı) sistem içinde, elektrotlardan elektrik akımı geçirilmesi sonucu oluşan elektrokimyasal tepkimelerle üretilmesine dayanır. Üretilen koagülant, kirleticilerin çökmesini sağlayarak sistemden giderilmesine katkı sunar. Elektrokoagülasyon yönteminde oluşan çamur, daha kolay çöken ve susuzlaştırılabilen bir yapıdadır. Elektrokoagülasyon etkisi kanıtlanmış ve kolayca uygulanabilir bir yöntemdir. Sisteme kimyasal madde eklenmesine ihtiyaç duyulmaması veya diğer yöntemlere göre ihmal edilebilecek kadar az kimyasal madde eklenmesi, basit donanım ve daha az iş gücü gerektirmesi, daha küçük alanlarda uygulanabilir olması ve ikincil kirlilik oluşturmaması yöntemin avantajlarından biridir. Bu avantajlarından dolayı son yıllarda yöntem üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada Türkiye'deki seramik endüstrisinin yeri, üretim süreçleri, bu süreçlerden çıkan atıksuyun özellikleri, çevreye etkileri, mevzuata göre hangi şartlar altında alıcı ortama deşarj edilebileceği incelenmiş ve seramik endüstrisi atıksularının elektrokimyasal yöntemlerden elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda deneyler yapılmıştır. Deneylerde üç parametrenin seramik endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmasına etkisi incelenmiştir. Bu parametreler; akım yoğunluğu, destek elektrolit miktarı ve elektrot tipidir.

Akım yoğunluğunun, seramik endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmasındaki etkisine ilişkin yapılan çalışmada, sistem demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak farklı akım yoğunluklarında çalıştırılmıştır.

Elektrolit derişiminin arıtım üzerindeki etkisine ilişkin yapılan çalışmada, sistem farklı elektrot tipleri ile sabit akım yoğunluğunda farklı elektrolit derişimlerinde çalıştırılmıştır.

Elektrot tipinin arıtım üzerindeki etkisine ilişkin yapılan çalışmada ise alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak farklı akım yoğunluklarında çalışılmıştır.

Yapılan tüm çalışmalarda giriş ve çıkış sularında bazı su kirletici parametreler ölçülmüş ve ülkemizde uygulanan deşarj standartları ile karşılaştırılarak uygulanabilirliği ile ilgili fikir edinilmiştir. Bunun yanı sıra, sistem çalışması sırasında uygulanan elektriksel gerilimler ve akım şiddetleri kaydedilerek harcanan enerji ve enerjiden kaynaklanan maliyet hesaplanmıştır. Ayrıca Faraday Kanunu'ndan yararlanılarak teorik olarak harcanan elektrot miktarı ve sarf edilen elektrotlardan kaynaklanan maliyet hesaplanmıştır.

Yapılan deneylerde Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde (SKKY) verilen standartların sağlandığı gözlemlenmiştir. Askıda Katı Madde'de %99, Cd'de %80, Zn'de %86, Pb'de %99'un üzerinde giderim gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon ile atıksuyun stabilitesi düşürülerek daha kolay çökebilir hale getirilmiştir. Ham atıksuyun zeta potansiyeli -20,7 mV'dan, elektrokoagülasyon ile -6,02 mV'a indirilmiştir.

Atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımının maliyet olarak diğer arıtım yöntemlerinden daha uygun olduğu belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesi; seramik endüstrisi atıksularının arıtımında güçlü bir alternatif olarak ortaya konulmuştur.

2. SERAMİK ENDÜSTRİSİ

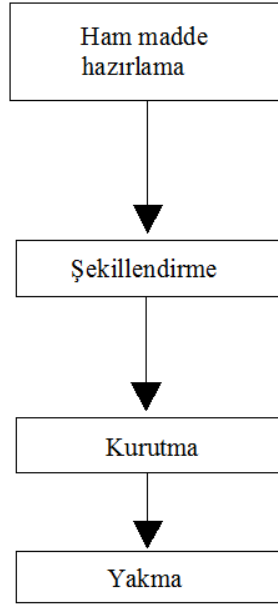
2.1. Seramik Endüstrisi Genel Tanıtımı

Seramik, inorganik malzemeden oluşan kütlenin şekillendirilmesi, sırlanması ve pişirilmesi işlemleri yoluyla sert ürün imalatını gerçekleştiren bilim, teknoloji ve sanat dalını ifade eden bir sözcüktür. Seramik kapsamı içinde porselen, cam, çimento, fayans, kiremit, tuğla, çömlek, drenaj boruları, zımpara taşları, ferroelektrikler, metal manyetikler, sentetik tek kristaller ve uzay roket seramikleri yer almaktadır [1]. Klorit, illit, montmorillonit, kaolinit gibi kil grupları ve mermer, vollastonit, dolomit, talk, boksit, zirkonyum, silikat gibi kayaç ve mineral çeşitleri seramik endüstrisinde kullanılan ham maddelerdir [2].

Seramik, insanlığın alet geliştirmeye başladıktan sonra ilk kullandığı teknolojilerdendir. Tarihi M.Ö. 6000 yılına kadar dayanır. İlk seramik örnekleri Avrupa'da ortaya çıkmıştır. Anadolu'da da neolitik çağ başlangıcıyla beraber seramik sıklıkla kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Eski toplumlarda seramik; saklama kabı, dinsel öneme sahip işaret ve heykel, aydınlatma kandili, tuğla, kiremit, su yolu, ocak, ölümlerin küllerinin saklandığı kap yapımında kullanılmıştır. Toplumlar yerleşik yaşama geçtikçe seramiğin kullanımı artmış ve sanatsal yönü de önem kazanmıştır [3].

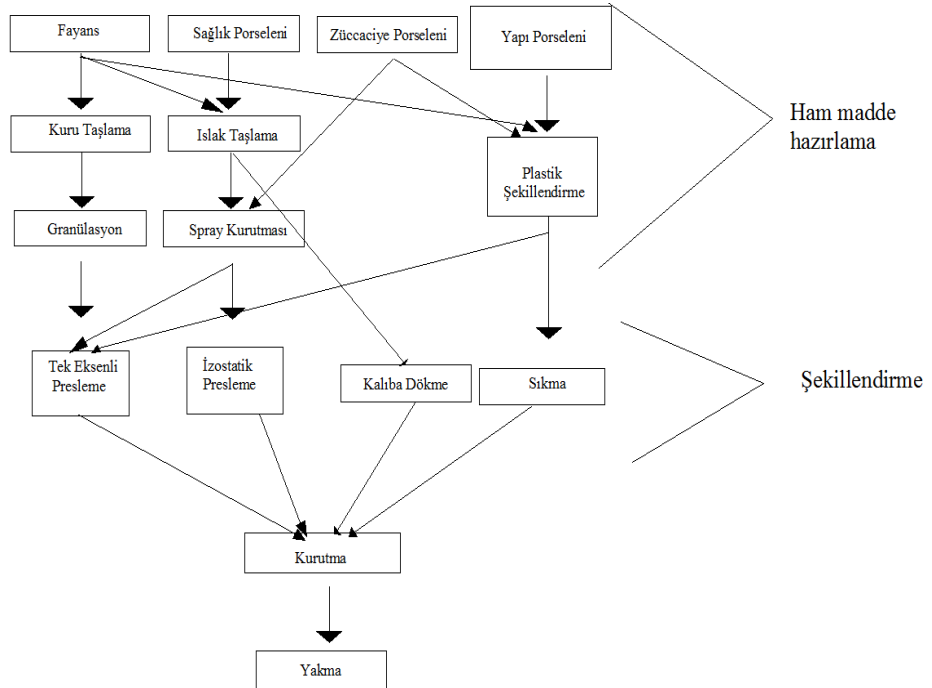
Neolitik çağın başlangıcında; seramik genel olarak el ve ilkel aletler vasıtası ile üretilmiştir. Bulgular M.Ö. 3000 yılında çömlekçi çarkının kullanılmaya başladığını göstermektedir [4]. Buhar makinesinin kullanılmasına kadar küçük atölyelerde üretilen seramik; sanayi devrimiyle birlikte, fabrikalarda seri üretilen bir nesne haline gelmiştir.

Bir seramik fabrikasında genel olarak; ham madde hazırlama (çamur), şekillendirme (kalıp), kurutma, ve yakma bölümleri bulunmaktadır. Şekil 2.1'de seramik endüstrisi genel akış diyagramı verilmiştir [5].



Şekil 2. 1. Seramik endüstrisi genel akış diyagramı

Bu bölümlere ek olarak seramik ürününün türüne göre çeşitli bölümler eklenebilir. Şekil 2.2’de 4 farklı seramik ürün için akış diyagramı verilmiştir [5].



Şekil 2. 2. 4 Farklı seramik türü için üretim akış diyagramı

Seramik ürünler aşağıdaki başlıklarda incelenebilir [6]:

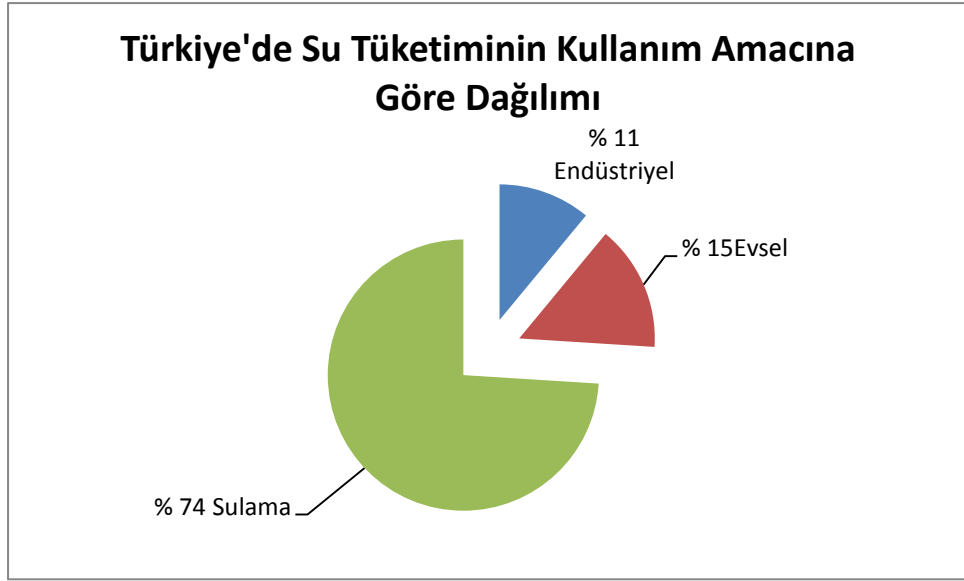
- Seramik Kaplama Malzemeleri
- Seramik Sağlık Gereçleri
- Refrakter Ateş Tuğlaları
- Seramik Ham Maddeleri
- Seramik Mutfak- Sofra Eşyaları
- Teknik Seramik

Seramik; Türkiye’de 1950’li yıllardan itibaren endüstriyel olarak üretilmeye başlanmıştır. Özellikle 1980’li yıllardan itibaren artan işçi ve enerji maliyetleri seramik endüstrisinin gelişmekte olan ülkelere kaymasına sebep olmuştur. Türkiye’de gelişmekte olan bir ülke olduğu için, bu tarihlerden itibaren Türk seramik sanayi hızla büyümüştür [7]. 1980’li yıllardan sonra en gelişmiş üretim teknolojileri ülkemizde de uygulanmıştır [6]. 2013 yılı itibariyle, Türkiye seramik üretim hacminde Dünya’da beşinci, Avrupa’da ise üçüncü konumdadır [8]. Ülkemizde yerli seramik talebinin %99’u iç üretimden karşılanmaktadır [9]. Türkiye’de seramik üretimi özellikle Sakarya Havzası’nda yoğunlaşmış durumdadır [6 , 7]. Bilecik, Kütahya, Eskişehir Bölgesi Türkiye seramik üretim kapasitesinin yaklaşık % 40’ını bünyesinde barındırmaktadır [6]. Bu durumun nedeni olarak, bölgeden elde edilen ham maddenin seramik üretimine elverişli olması ve ulaşım avantajları gösterilebilir.

2.2. Seramik Endüstrisi Atıksuları

Seramik endüstrisinde atıksular genel olarak çamur ünitesinde, kalıp bölümünde dökümhanede, sır hazırlamada ve yıkama kısmında oluşmakta ve Askıda Katı Madde (AKM) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) parametreleri yüksek derişimde bulunmaktadır [10 , 11] Seramik endüstrisi atıksuları bulanık, açık kahverengi veya beyaz renktedir. Endüstri tipine bağlı olarak seramik endüstrisi ham atıksuları 5000- 55000 mg/L arasında AKM içerir. Ton ürün başına ise 30 ile 180 kg arasında AKM açığa çıkar [10]. Ayrıca bazı ağır metal çeşitleri de, çeşitli seramik üretim tesislerinde açığa çıkarak atıksu ve toprak karakterizasyonunu etkilemektedirler [12 , 13].

Türkiye 2000’li yıllardan önce su zengini sayılabilecek bir ülke iken, günümüzde su sıkıntısı çeken ülkelerden biridir. Bunun nedeni olarak su yönetimindeki yanlışlıklar, artan nüfus ile birlikte tüm sektörlerde artan su talebi, küresel iklim değişikliği gösterilebilir [14]. Mevcut durumda Türkiye’deki su tüketiminin %74’lük kısmını sulama, %15’lik kısmını evsel su kullanımı, %11’lik kısmını endüstriyel su kullanımı oluşturmaktadır [15]. Şekil 2.3’te Türkiye’de su tüketiminin kullanım amacına göre dağılımı verilmiştir.



Şekil 2. 3. Türkiye’de su tüketiminin kullanım amacına göre dağılımı

Önümüzdeki 10 yıllık dönemde Türkiye’deki endüstriyel su tüketiminin toplam, tüketimin %20’sini oluşturacağına ilişkin projeksiyonlar mevcuttur [14 , 15]. Seramik endüstrisi bazı bölgelerde yoğunlaştığı için, bu bölgelerde seramik endüstrisi atıksuyunun daha verimli arıtılması önem kazanmıştır. Örnek olarak Sakarya Havzası’nın alt havzalarından olan Porsuk Çayı Alt Havzası’nda üretilen toplam atıksuyun yaklaşık %4’ü seramik endüstrisi atıksularından kaynaklanmaktadır. Yine bu bölgede arıtılan seramik endüstrisi atıksuyunun büyük kısmı proseste yeniden kullanılmaktadır [16]. Bu durum bazı bölgelerde seramik endüstrisi atıksuyunun daha yüksek verimlerle arıtılması gereksinimini ortaya çıkarmaktadır.

31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı Resmi Gazete ’de yayımlanarak yürürlüğe giren Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği ülkemizin yeraltı ve yerüstü su

kaynakları potansiyelinin korunması ve en iyi biçimde kullanımının sağlanması için, su kirlenmesinin önlenmesini sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir şekilde gerçekleştirmek üzere gerekli olan hukuki ve teknik esasları belirlemeyi amaçlamaktadır. Yönetmelikte suların korunması, havza planı-havza koruma planı ve suların korunacağı kirletici etkenler ile ilgili ilkeler belirtilmiş olup sanayi tipine bağlı olarak endüstriyel atıksu deşarj standartları da belirlenmiştir. Seramik endüstrisi atıksuları ise Yönetmeliğin “Ekler” başlığı altında verilen Tablo 7.4’ deki (Maden Sanayii (Seramik ve Topraktan Çanak-Çömlek Yapımı ve Benzerleri)) standartlara uymaları halinde alıcı ortama deşarj edilebilir. Alıcı ortam söz konusu Yönetmelikte “Atıksuların deşarj edildiği veya dolaylı olarak karıştığı göl, akarsu, kıyı ve deniz suları ile yeraltı suları gibi yakın veya uzak çevre” olarak tanımlanmıştır. Çizelge 2.1’de söz konusu standartlar verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Seramik endüstrisi atıksuları deşarj standartları

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	80	-
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	100	-
KURŞUN (Pb)	(mg/L)	1	-
KADMİYUM (Cd)	(mg/L)	0.1	-
ÇİNKO (Zn)	(mg/L)	3	-
pH	-	6 - 9	6 - 9

Çizelgeden de anlaşılacağı üzere, yönetmeliğe uygun deşarj sağlayabilmek için seramik endüstrisi atıksularındaki AKM ve KOİ parametreleri yüksek verimle artırılmalı, pH için 6-9 arasında değer sağlanmalı ve atıksuda Pb, Cd, Zn gibi parametreler belirli limitlerin üzerinde olmamalıdır.

2.3. Seramik Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Mevcut Yöntemler

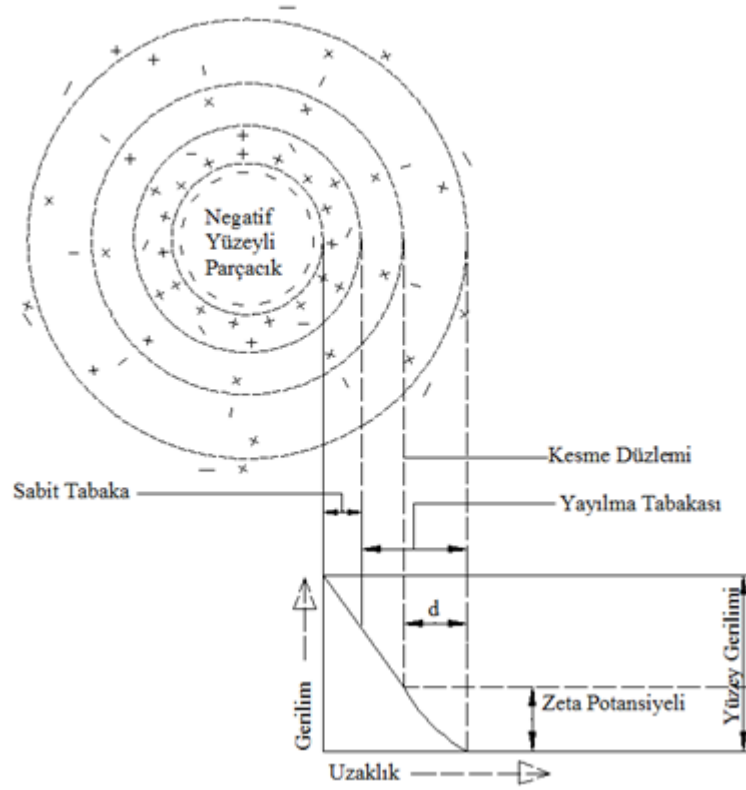
Sulara çeşitli kimyasallar ekleyerek, çökelme özellikleri iyi olmayan küçük çaplı askıda katı ve kolloidlerin daha iyi çökelebilen parçacıklar (yumaklar) haline getirilmesi koagülasyon-flokülasyon olarak isimlendirilir [17].

Bir sistemdeki kolloidal yapılara etki eden iki temel kuvvet vardır. Bu kuvvetler; itme ve çekme kuvvetleridir. Çekme kuvvetlerinin en önemlisi Van der Waals kuvveti; itme kuvvetlerinin en önemlisi ise elektrostatik kuvvettir. Elektrostatik kuvvet zeta potansiyeli ile orantılı olup sistem çökme karakteristikleriyle doğrudan ilgilidir.

Zeta potansiyeli kolloid içeren karışımlar için çok önemli bir parametredir. Kolloidlerin atıksu içinde birbirleri ile yumak oluşturması ile doğrudan ilgilidir. Çünkü bir parçacığın çökmesindeki en önemli parametrelerden biri onun boyutudur. Çekme kuvvetlerinin itme kuvvetlerinden büyük olduğu durumlarda tanecik boyutu büyür ve çökme daha olası hale gelir. Sisteme koagülant ilavesi ve koagülasyon prosesinin temel fiziksel çalışma prensibi bu şekilde işlemektedir.

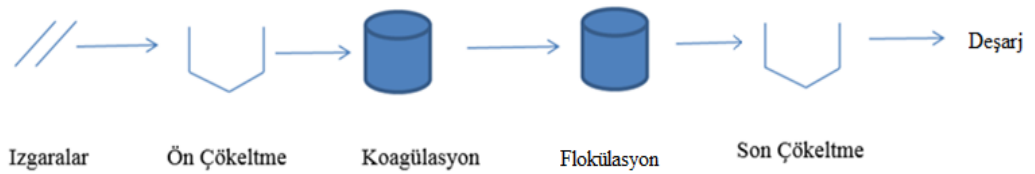
Yüklü haldeki parçacıklar Şekil 2.4'te gösterildiği gibi karşıt yüklü iyonları yüzeyine çeker. Karşıt yüklü iyonların sıkışık bir biçimde bulunduğu tabaka sabit tabaka olarak adlandırılır. Sabit tabakanın dışında yayılma tabakası bulunur. Yayılma tabakasının bittiği noktada gerilim 0'a yakınsar. Parçacık ile hareket eden sıvının bittiği düzlem kesme yüzeyi olarak adlandırılır. Kesme yüzeyindeki durgun yük gerilimi ise, zeta potansiyeli olarak isimlendirilmektedir. Zeta potansiyelinin 0'a olan uzaklığı parçacığın sahip olduğu itme kuvveti ile doğru orantılıdır. Başka bir deyişle zeta potansiyelinin yüksekliği ile çöktürme verimi arasında doğrudan ilişki vardır.

Kolloid içeren atıksularda arıtım yapılacaksa, suyun zeta potansiyelini 0'a yaklaştırmak arıtma verimini arttıracaktır.



Şekil 2. 4. Zeta potansiyeli, çift tabaka, sert tabaka ve kaygan tabaka

Seramik endüstrisi atıksularının arıtılmasında en çok kullanılan yöntem kimyasal koagülasyon yöntemidir. Kimyasal koagülasyondan sonra oluşan floklar son çöktürme tankı ile giderilir. Bazı sistemlerde koagülasyondan önce ön çöktürme tankı da kullanılabilir. Bu ünite sisteme eklenen koagülant miktarında ve dolayısıyla sistem işletme maliyetinin düşmesinde önemli rol oynar. Şekil 2.5'te seramik endüstrisi atıksu arıtma tesisinin genel akım şeması verilmiştir.



Şekil 2. 5. Seramik endüstrisi atıksu arıtma tesisleri genel akış diyagramı

Koagülasyonun mekanizması açısından sistemin pH'ının önemi büyüktür. Çünkü pH hangi metal tuzunun sistemde aktif olacağını belirleyen en önemli

parametredir. Örnek olarak, negatif yüklü kolloidleri gidermede genel olarak pH 5-6,5 aralığı uygundur [17].

Alkalinite de koagülasyonun mekanizmasını belirleyen önemli bir parametredir. Alkalinite sulara pH'ı tamponlayıcı özellik taşıdığından ve koagülant ilavesi sistemdeki hidrojen iyonları derişiminde bir yükselmeye neden olacağından bazı durumlarda suya alkalinite eklenilebilir.

Koagülasyon için en çok kullanılan kimyasallar alum, demir (II) sülfat, demir (III) sülfat, demir (III) klorür ve kireçtir. Bazı durumlarda yumaklaşmayı hızlandırmak için pıhtılaşıma yardımcıları sisteme ilave edilebilir. Burada amaç alkaliniteyi yükseltmek olabildiği gibi; polielektrolitler gibi kolloidal yapılar arasında köprü kurmayı kolaylaştırmak, pH ayarlamak veya tanecik derişimini arttırarak pıhtılaştırmayı hızlandırmak da olabilmektedir [18].

En uygun kimyasal koagülant dozajını tespit etmek amacıyla jar test denilen testler yapılmaktadır. Bu testler arıtmak istenen suya farklı miktarda koagülant ilavesi ile konik kaplarda çökelme hızının izlenmesine dayanmaktadır.

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM YÖNTEMLERİ

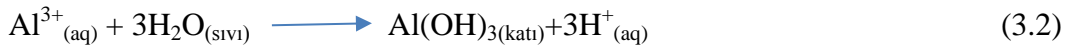
Atıksuların çok çeşitli arıtım yöntemleri olmakla birlikte elektrokimyasal arıtma da ileri arıtım tekniklerinden bir tanesidir. Elektrokimyasal proseslerde elektrot olarak, demir, alüminyum, grafit, titanyum, karbon, işlenmiş çelik, kullanılır [19]. Temelde elektrokimyasal arıtma üç farklı başlıkta incelenebilir [20]. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Elektrokoagülasyon
- 2- Elektrooksidasyon
- 3- Elektroflotasyon

3.1. Elektrokoagülasyon

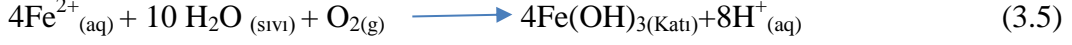
Elektrokoagülasyon elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden bir tanesidir. Koagülasyon atıksudaki küçük parçacıklardan daha büyük parçacıklar veya flok oluşması şeklinde tanımlanabilir [21]. Elektrokoagülasyon ile kimyasal koagülasyon arasındaki fark metal tuzlarının oluşumundan kaynaklanır. Elektrokoagülasyon uygulamasında koagülasyon ve çöktürme dışarıdan kimyasal (koagülant) ilavesi ile değil; elektrotlarda oluşan tepkimeler ile sağlanır [19]. Elektrokoagülasyon prosesinde en çok demir ve alüminyum elektrotlar kullanılır. Demir ve alüminyumun daha çok tercih edilme nedeni ucuzluğu, kolay elde edilebilirliği ve etkisinin kanıtlanmış olmasıdır [19].

Alüminyum elektrotların kullanıldığı sistemlerde aşağıdaki tepkimeler gerçekleşir [22]:



Demir elektrotların kullanıldığı sistemlerde iki farklı mekanizmada tepkimeler gerçekleşir [22 , 23]:

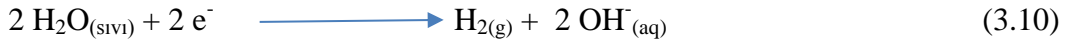
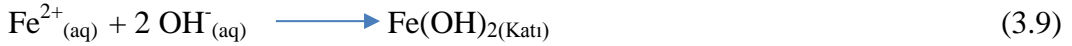
1. Mekanizma



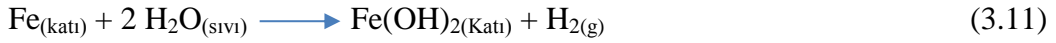
Tüm Tepkime:



2. Mekanizma



Tüm Tepkime:



Elektrokoagülasyon; güvenlik, çok yönlülük, otomasyona uyumluluk, çevreye uyumluluk, enerji verimliliği, kolay yönetilebilirlik, kısa bekleme süresi, hiç kimyasal kullanılmaması veya ihmal edilebilecek kadar az kimyasal gerekmesi, düşük çamur üretimi gibi nedenlerle avantajlı bir prosestir [19]. Geçmişten bu yana çeşitli büyük ölçekli arıtma tesislerinde de uygulanagelmiştir. Bu arıtma tesislerinin bir kısmı halen çalışmakta olup bir kısmı ise çeşitli nedenlerle kapatılmıştır [24]. Elektrokoagülasyonda koagülant anottaki tepkime vasıtası ile oluşmaktadır. Bu yüzden anot üzerinde bir film tabakası tepkime verimini düşürebilir. Bu durumun engellenmesi için kutup değiştirici kullanmak etkili bir yöntemdir [24 , 25].

Elektrokoagülasyon prosesinde koagülasyon anotta oluşan polimerik metaller vasıtası ile sağlanmaktadır. Bu polimerik hidroksitler mükemmel koagülantlardır. Koagülasyon anotta oluşan metal katyonlarının negatif yüklü kirletici parçacığa doğru elektroforetik hareketinin bir sonucu olarak oluşur. Burada arıtımın mekanizması kimyasal tepkimeler, çökelme ve kolloidal maddelerin fiziksel olarak polimerik hidroksitlere eklenmesi olarak ele alınabilir. Arıtım sırasında oluşan hacim olarak daha büyük yapılar elektroflotasyon, çöktürme veya filtrasyonla sistem dışına aktarılabilir [24]. Elektroflotasyon anot ve katotta meydana gelen elektrokimyasal tepkimeler sonucu H₂ ve O₂ gazlarının açığa çıkmasına dayanmaktadır.

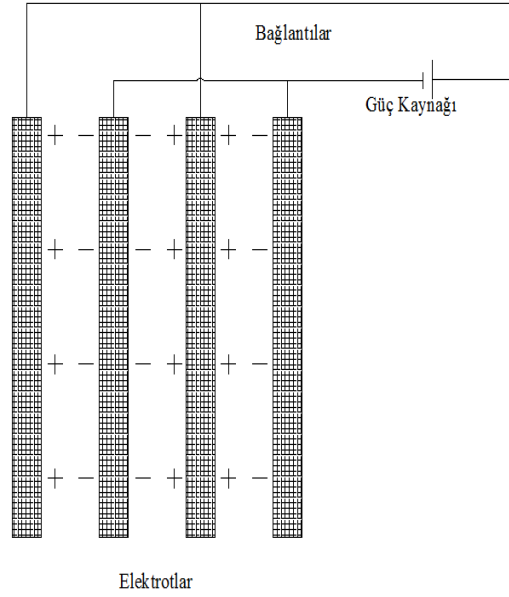
Elektrokoagülasyon yöntemi; çöp sızıntı suyu, restoran atıksuyu, tuzlu su, zift kumu ve petrol atıksuyu, evsel atıksu, çamaşırhane atıksuyu, nitrat ve arsenikli atıksular ile kimyasal ve mekanik cilalama endüstrisi atıksuyu arıtımında başarıyla kullanılmaktadır [22].

3.1.1. Elektrokoagülasyonda bağlantı çeşitleri

Elektrokoagülasyon düzeneklerinde en az iki elektrot ihtiyacı duyuluyorsa da, genellikle iki elektrottan fazlası kullanılır. Burada amaç, tepkime alanını artırarak sistemin verimini yükseltmektir. Elektrokoagülasyon düzenekleri, bağlantı şekillerine göre iki başlık altında incelenebilir. Bunlar; monopolar ve bipolar bağlantı şekilleridir [24].

Monopolar bağlantılı elektrotlar

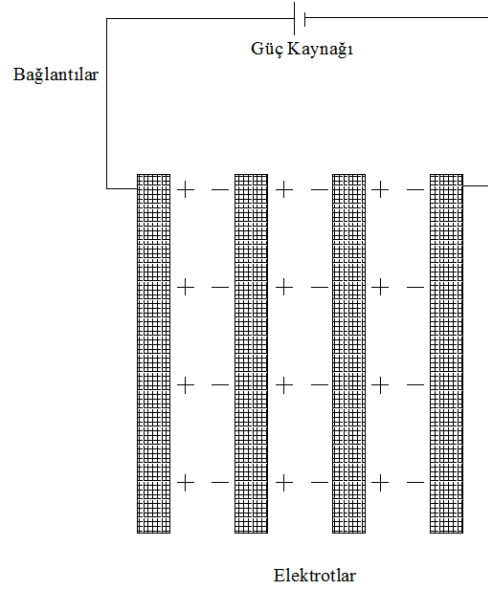
Monopolar bağlantı yönteminde, ardışık elektrotlar farklı yükler ile yüklenirler. Sistemde her elektrotun güç kaynağı ile doğrudan bağlantısı vardır. Ardışık elektrotların farklı yük ile yüklenmesi, aynı tepkimeler tüm elektrotlarda gözlemlenmediği için elektrot aşınımlarının farklı miktarda olmasına sebep olur. Bu durumu gidermek için kutup değiştirici kullanılabilir. Monopolar bağlantı örneği Şekil 3.1’de verilmiştir [24].



Şekil 3. 1. Örnek monopolar bağlantı

Bipolar bağlantılı elektrotlar

Bipolar bağlantı yönteminde ise aynı elektrotların farklı yüzleri farklı yüklerle yüklenmiş haldedir. Sistemde her elektrot güç kaynağı ile bağlı değildir. Yalnızca en dıştaki elektrotlar farklı yükler ile yüklenerek sistemdeki elektrotların farklı yüzlerinin farklı yükler ile yüklenmesi sağlanır. Bu bağlantı şeklinin kullanıldığı durumda bütün elektrotlarda harcama gözlemlenir. Kutup değiştirici kullanılması elektrotların tüm yüzlerinin birbiri ile aynı derecede tükenmesine sebep olacaktır [24]. Bipolar bağlantı örneği Şekil 3.2’de verilmiştir.



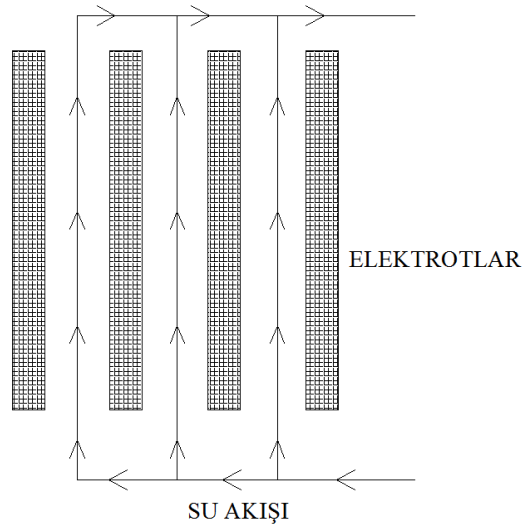
Şekil 3. 2. Örnek bipolar bağlantı

3.1.2. Elektrokoagülasyonda akış çeşitleri

Sistem tasarımı elektrotların bağlantı şekillerine göre sınıflandırıldığı gibi, akışın şekline göre de sınıflandırılabilir. Çok çeşitli akış şekilleri olmasına rağmen, en çok kullanılan akış şekli paralel ve seri akışlardır [24].

Paralel akış

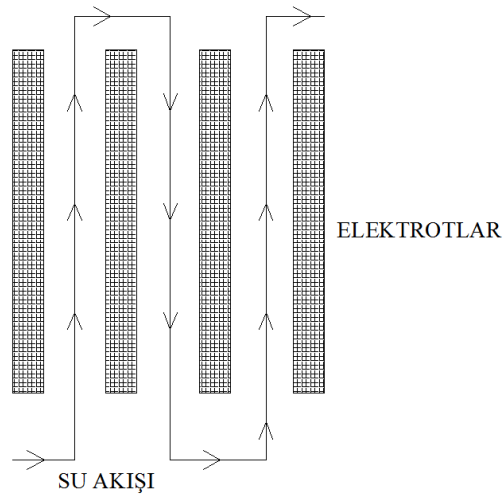
Paralel akışlarda arıtılacak olan su, elektrotların arasından bir kereye mahsus olmak üzere, paralel plakalar arasından geçer. Bu akış türünü oluşturacak yapının kurulması seri akışı sağlayacak elektrot demetinin kurulmasına göre daha kolaydır. Ayrıca sistemi belirli akım yoğunluğunda çalıştırmak için gereken potansiyel fark seri bağlı sisteme göre daha düşüktür. Bu sistemlerin dezavantajı ise elektrot pasifikasyonlarına daha fazla rastlanması ve genel bekletme süresinin daha az olmasına bağlı olarak sistemlerin veriminin daha düşük olmasıdır. Elektrot pasifikasyonları genel olarak alüminyum elektrotlarda gözlemlenmektedir [24].



Şekil 3. 3. Paralel akış

Seri akış

Seri bağlı akışlarda arıtılacak olan su tüm elektrotların arasından arıtım boyunca geçer. Bu durum bekletme süresini arttırarak sistemi verimli hale getirmektedir. Bu sistemlerin dezavantajı aynı akım yoğunluğuna ulaşmak için uygulanması gereken potansiyel farkın çok daha fazla olması ve maliyetin artmasıdır [24].



Şekil 3. 4. Seri akış

3.1.3. Elektrokoagülasyonu etkileyen faktörler

Elektrokoagülasyonun mekanizması su ortamının kimyası ile doğrudan ilişkilidir [26]. Su ortamının kimyası ile ilgili olarak iletkenliğe, pH'a ve sıcaklığa, kullanıcı tarafından doğrudan müdahale edilebilen parametrelerden ise akım yoğunluğuna bağlıdır [19 , 24].

Akım yoğunluğunun etkisi

Elektrot demetinden geçen akımın aktif yüzey alanına oranı akım yoğunluğu olarak isimlendirilmektedir. Akım yoğunluğu sistemin verimini etkileyen en önemli parametre olmasının yanı sıra sistemde doğrudan müdahale edilebilen tek parametredir [24]. Genel olarak $A\text{ cm}^{-2}$ veya mA cm^{-2} olarak birimlendirilir.

Akım yoğunluğunun sistem verimini etkileme mekanizması, sisteme elektrokimyasal tepkimeler ile oluşan koagülant miktarının, akım yoğunluğu ile doğru orantılı olarak gerçekleşmesine dayanır [27]. Akım yoğunluğunun koagülant miktarı ile doğru orantılı olması Faraday kanunları ile açıklanmıştır [24]:

$$m = \frac{I * t * M}{F * z} \quad (3.12)$$

Bu denklemde;

m: Sarf edilen elektrot miktarını (g)

I: Akım şiddeti (A)

M: Elektrot materyalinin molar kütleini (g/mol)

F: Faraday sabitini (C/mol)

z: Elektrot materyalinin değerliğini (adet)

Denklemden de anlaşılacağı üzere sistemden geçen akım yoğunluğu arttıkça elektrotta daha fazla çözünme ve bununla bağlantılı olarak daha fazla metal hidroksit polimeri oluşması sağlanır. Bu durum sistem verimini doğrudan etkiler.

İletkenliğin etkisi

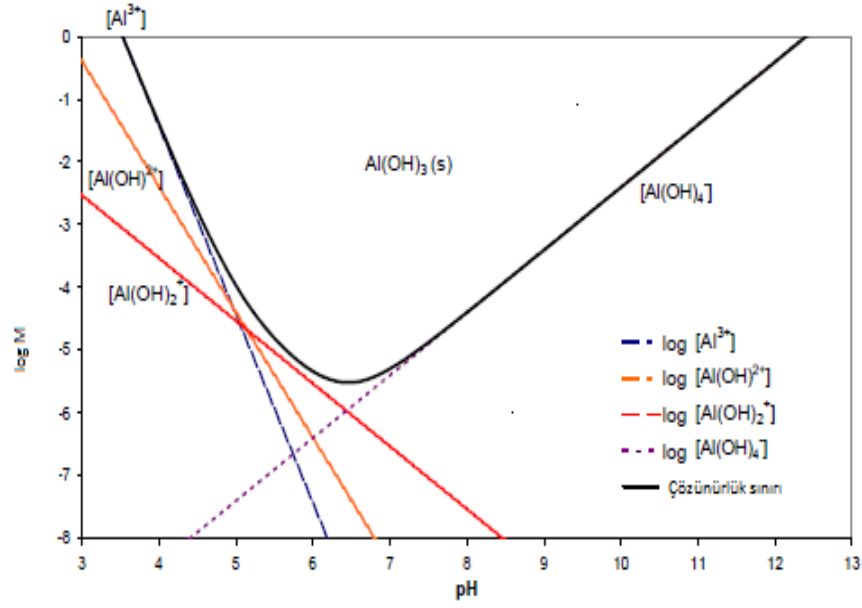
Eğer atıksu iletkenliği düşükse, aynı akım yoğunluğuna ulaşmak için gereken potansiyel fark artar. Bu durum elektrot pasifikasyonuna ve maliyet artışına sebep olmaktadır. Genellikle NaCl, NaNO₃, Na₂SO₄ ve NaH₂PO₄ gibi tuzlar iletkenliği arttırmak için sisteme eklenebilir. NaCl eklenmesi klorit derişimini de arttıracğından dezenfeksiyona da katkı sağlar. Ayrıca Cl⁻ derişiminin artması CO₃⁻², SO₄⁻² gibi Ca⁺² ve Mg⁺² iyonları ile birleştirerek oksit tabakası oluşturan ve elektrotlar üzerinde negatif etkide bulunan iyonların etkinliğini azaltmaktadır. Genel olarak iletkenliği arttıran iyonlar elektrokoagülasyona olumlu etki yapsa da; NO₃⁻ gibi neredeyse hiç olumlu etkisi olmayan iyonlar da mevcuttur [24].

Sıcaklık etkisi

Sıcaklık elektrokoagülasyon prosesinde belirleyici bir parametredir. Yapılan çalışmalar, 2-30 °C arasında elektrotlar üzerinde oluşan oksit katmanının çözünürlüğünün artması sonucu sistem veriminin hızla arttığını, ancak 60 °C'den sonra metal hidroksitlerinin de kolloidal halden çözülmüş hale geçmesi sonucu arıtma veriminin düştüğünü göstermiştir [24].

pH etkisi

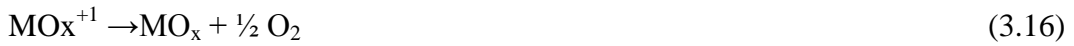
Suların pH'ı hem elektrokoagülasyonda hem de koagülasyonda önemli bir belirleyicidir. 4-9 pH aralığında Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺, Al₂(OH)₂⁴⁺, Al(OH)₃, Al₁₃(OH)₃₂⁷⁺ gibi yüzeyleri yüksek miktarda pozitif yük içeren türler aktif olur. Bu durum koagülasyonu kolaylaştırıcıdır. Bununla beraber, pH 10'un üzerine çıktığında ortamda bulunan dominant tür Al(OH)₄⁻'dir. Koagülasyon hızı aniden azalma gösterir. pH 3'ün de altına indiği zaman ise sistemde Al³⁺ dominant türdür. Bu türün koagülant etkisi yoktur. Şekil 3.5'te pH'a bağlı olarak alüminyum hidroksit türlerinin derişim değışimi verilmiştir.



Şekil 3. 5. Alüminyum hidroksit türlerinin pH'a bağlı olarak derişim değişimi

3.2. Elektrooksidasyon

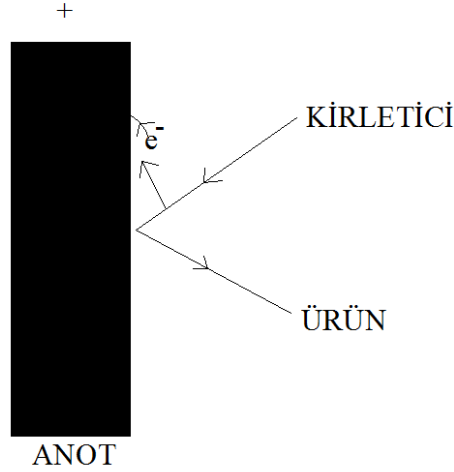
Elektrooksidasyon yöntemi elektrokimyasal yöntemlerden biri olup, elektrooksidasyon prosesinde tüm oksidasyon prosesleri elektron kaybı ile olmaktadır. Birçok maddenin elektrooksidasyonu değişik şekillerde gerçekleşebilir. Elektrooksidasyon son ürünleri H₂O ve CO₂ gibi maddeler veya ara kademelerde oluşan radikaller de olabilir. Elektrooksidasyon tepkimeleri metal elektrot yüzeylerinde oluşur. Aşağıda elektrooksidasyon sırasında oluşan tepkimeler verilmiştir [28]:



Tepkimelerden de anlaşılacağı üzere, sonuçta elektrotlarda herhangi bir tükenme olmamaktadır. Elektrooksidasyon prosesinde elektrot materyali bu duruma uygun olarak seçilir. Genel olarak grafit veya titanyum gibi inert malzemeler kullanılır. Elektrokoagülasyon yöntemi ile elektrooksidasyon yönteminin sistem tasarımı açısından temel farklılığı elektrot seçimidir.

Elektrooksidasyon yöntemi; doğrudan ve dolaylı oksidasyon olarak iki başlık altında incelenebilir [29].

Doğrudan oksidasyon yönteminde, kirleticiler ilk etapta anot üzerinde birikirler. Burada elektrooksidasyon vasıtası ile yükseltgenerek giderim gerçekleşir. Şekil 3.6'da doğrudan oksidasyonun şematik açıklaması verilmiştir [30].



Şekil 3. 6. Doğrudan oksidasyon

Dolaylı oksidasyon yönteminde ise, sistem içinde elektrotların üzerinde olmayan bir bölgede radikallerin oluşumu ve daha sonra bu radikallerin elektrokimyasal tepkimeye katılması gözlemlenmektedir. Söz konusu durumda kirleticinin oksidasyonu metal yüzeyindeki elektrokimyasal tepkimeden sonra, fakat elektrokimyasal tepkimenin sonucu olarak oluşmaktadır. [29]

Elektrooksidasyon prosesi bazı durumlarda anodik klor üretebilmekte ve bu da sistemde dezenfektan olarak görev yapabilmektedir.

Elektrooksidasyon sistemlerinde en önemli parametre elektrot tipidir. Elektrot materyalinin inert olması gerekmektedir. Akım yoğunluğu sistemin verim ve maliyetini belirleyen önemli bir parametredir. Arıtma süresi arıtım verimini

etkilemekte, sistem pH'ı OH⁻ oluşum mekanizmasına doğrudan etki etmekte, sıcaklık tepkime kinetiğini etkilemekte, iletkenlik ise maliyeti etkileyen bir parametre olarak ele alınmaktadır.

3.3. Elektroflotasyon

Elektroflotasyon yönteminde sistemden elektrik akımı geçer ve elektrotların yüzeyinde H₂ ve O₂ kabarcıkları oluşur. Bu gaz kabarcıkları kolloidler ile beraber sıvı yüzeyine çıkararak su ortamından giderilebilmektedir. Katotta H₂ anotta ise O₂ gazı açığa çıkar [29].

Elektroflotasyon yöntemi, çok düşük boyutta askıda katıları ve yağları gidermede etkili bir yöntemdir. Yöntem zeytinyağı atıksularını, yağlı atıksularını, maden atıksularını, gıda endüstrisi atıksularını, kok kömürü atıksularını, restoran atıksularını, süt endüstrisi atıksularını ve evsel atıksuları arıtmakta kullanılabilir.

3.4. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

3.4.1. Elektrokoagülasyon ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar

Elektrokoagülasyon yöntemi üzerine daha önce yapılmış çok fazla çalışma bulunmaktadır. Ancak seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmasına ilişkin bir çalışma mevcut değildir.

Elektrokoagülasyon ile ilgili yapılan son çalışmalar aşağıda verilmiştir:

- Bir yarı iletken üretim tesisinde ön arıtılmış suyun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtımında, demir-alüminyum hibrit elektrot kullanarak krom (VI) ve florit giderimi incelenmiş, giderim anlık olarak ölçülmüş, demir elektrotun anot olduğu durumda krom (VI) gideriminin daha yüksek olduğu, alüminyum elektrotun anot olduğu durumda ise florit gideriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışma, bahsi geçen arıtma teknolojisinin Cezayir deşarj standartlarını sağladığı, krom (VI)'da %99, floritte ise %80'in üzerinde giderim olduğu gözlemlenmiştir [31].
- 100 mg/L nikel içeren bir model atıksu, sürekli sistemde 120 cm² aktif yüzey alanına sahip aralarında 10 mm boşluk bulunan alüminyum elektrotlar vasıtasıyla elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmış, optimum koşullarda %98,5'e kadar giderim verimi gözlemlenmiştir. Sistemde

bekletme süresinin sistem verimine etkisi de incelenmiş ve 1-20 dakika arasında giderim veriminin %9'dan %98,5'e kadar arttığı; ancak 20 dakikadan sonra düşüş gözlemlendiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada pH'nin sistem giderim verimine etkisi incelenmiş ve asidik koşullarda arıtımın daha iyi gerçekleştiği belirlenmiştir [32].

- Membran yardımcı elektrokoagülasyon sisteminin yağlı atıksuları arıtması ile ilgili bir çalışmada, demir ve alüminyum elektrot kullanılmış ve %65'ten %98,5'e kadar kirlilik giderimi gözlemlenmiştir. Sistem 4-50 mA/cm² arasında akım yoğunlukları ile çalıştırılmış olup en iyi arıtım verimi 50 mA/cm² akım yoğunluğunda gözlemlenmiştir. Bunun yanında pH'nin etkisi incelenmiş ve asidik koşullarda sistemin daha iyi arıtım yaptığı tespit edilmiştir [33].
- Petrol ve metal endüstrilerinden alınan gerçek atıksudan, elektrokoagülasyon yöntemiyle, toksik metal gideriminin incelendiği bir çalışmada mangan %89 mertebesinde, bakır ve çinko %100'e yakın oranlarda giderildiği gözlemlenerek, sistemde elektrotlar arası mesafenin arıtım verimi üzerine etkisi incelenmiş ve 2 cm mesafenin en iyi sonuçları verdiği anlaşılmıştır. En iyi giderimin olduğu durumda elektrik sarfiyatının 2,55 kWh/m³ olduğu anlaşılmıştır [34].
- Kompost üretim tesisinden kaynaklanan sızıntı sularında, elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon yöntemiyle KOİ ve AKM gideriminin incelendiği bir çalışmada sürekli reaktör kullanılmış olup %90'a kadar KOİ ve %73'e kadar AKM giderimi gözlemlendiği ve bu kalitede çıkış suyunun Amerikan (EPA) standartlarına uygun olduğu belirtilmiştir [35].
- Metilen mavisinin ardışık olarak elektrokoagülasyon ve kurutulmuş muz kabuğu adsorpsiyonu ile giderildiği bir çalışmada %99'a kadar renk giderimi gözlemlenmiştir. Çalışmada 2,5-10 mA/cm² akım yoğunlukları ile çalışılmış olup en büyük giderimin 10 mA/cm² akım yoğunluğunda gözlemlendiği belirtilmiştir. Ayrıca giriş konsantrasyonunun giderim verimine etkisi incelenmiş ve düşük konsantrasyonda daha iyi giderim verimi gözlemlendiği anlaşılmıştır [36].

- Farklı kaynaklardan alınmış organik kirletici içeren suların elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmasında elektrot tiplerinin etkisini inceleyen bir çalışmada %92'ye kadar doğal organik madde (NOM) giderimi gözlemlenmiş ve aynı çalışmada farklı işletme sürelerinin de giderim verimine etkisi incelenmiştir. En iyi renk gideriminin hibrit elektrotlar ile 25 dakika sürede olduğu belirtilmiştir [37].
- Mezbaha atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtıldığı bir çalışmada renk ve KOİ giderimi incelenmiş; sonuç olarak %90 mertebesinde KOİ giderimi, %95 mertebesinde renk giderimi gözlemlenmiştir. En uygulanabilir sonuçlar pH 8 mertebesinde 30 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 1 g/L NaCl destek elektrolit derişimi kullanılarak elde edilmiştir [38].
- Gerçek tekstil endüstrisi atıksularının arıtılmasında enerji tüketimi ve biyobozunurluk geliştirmesi açısından elektrokimyasal fenton, elektrofenton ve peroksi koagülasyon yöntemlerinin karşılaştırmasını konu alan bir çalışmada %77-%94 aralığında renk giderimi gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada BOİ₅/KOİ oranı 0,137'den 0,3 mertebesinin üstüne getirilmiş ve böylelikle atıksuyun biyobozunurluğu arttırılmıştır [39].
- Kaynak çözeltisi (fountain solution) baskı ve matbaa sektöründe kullanılan çözeltilerden biridir. Atık kaynak çözeltisinden elektrokoagülasyon-elektroflotasyon yöntemiyle ağır metal giderimini konu alan bir çalışmada %80 ile 95 arasında bakır ve çinko giderimi gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada, işletme sürelerine bağlı metal giderimi incelenmiş ve en yüksek giderim veriminin t=60 dakika sürede gerçekleştiği tespit edilmiştir [40].
- Güneş panelleri üretim endüstrisinden kaynaklanan atıksudan (photovoltaic wastewater) elektrokoagülasyon yöntemiyle florür giderimini konu alan bir çalışmada %95'in üzerinde florür giderimi gözlemlenmiştir. Çalışmada en iyi giderim veriminin 37,03 A/m² akım yoğunluğunda t=120 dakika işletme süresinde ve pH 9 mertebesindeyken gerçekleştiği tespit edilmiştir [41].
- Flurbiprofen iltihap ile mücadelede kullanılan ve birçok ilacın yapısında bulunan bir maddedir. Elektrokoagülasyon yöntemiyle flurbiprofen

giderimini inceleyen bir çalışmada, flurbiprofenin bazik koşullarda iyi giderilemediği, optimum koşullarda %82'ye kadar giderim verimi sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışmada en uygun sonuçlar sistem 2,5 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH=6,5 mertebesinde çalıştığında elde edilmiştir. [42].

- Elektrokoagülasyon yöntemiyle sulardan sertlik giderimini inceleyen bir çalışmada, %70'e varan kalsiyum ve magnezyum giderimi, %80'e varan baryum giderimi, %74'e varan stronsiyum giderimi gözlemlenmiştir [43].
- Elektrokoagülasyon sırasında elektrotların üzerinde oluşan pasifikasyonlarda pH, Cr(VI) konsantrasyonu ve akım yoğunluğunun etkisinin incelendiği bir çalışmada sözü geçen parametrelerin pasifikasyona etkisini gösteren bir grafik oluşturulmuştur. Çalışmada destek elektrolit olarak 1g/L K₂SO₄ kullanılmış olup 10-590 saniye aralığında bekletme süresiyle sistem çalıştırılmış ve kısa işletme sürelerinde daha kalıcı film tabakaları oluştuğu gözlemlenmiştir [44].
- Metal kaplama endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ve ağır metallerin giderilmesi konusunda yapılan bir çalışmada, Cu²⁺, Cr³⁺, Ni²⁺ ve Zn²⁺ iyonlarının %97 mertebesinin üzerinde giderildiği gözlemlenmiştir. 4 mA/cm² akım yoğunluğunda pH 9,56 değerinde ve 45 dakika bekletme süresiyle en iyi sonuç elde edilmiştir [45].
- Radyoaktif elementlerden stronsiyum ve sezyumun sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon yöntemiyle giderilmesi hakkında yapılan bir çalışmada; %97 stronsiyum, %96,8 sezyum giderimi gözlemlenmiştir. En iyi giderim verimi, sistem 0,08 A/dm² akım yoğunluğunda çalıştırılarak pH 7 değerinde elde edilmiştir. Çalışmada elektrotlar arası mesafenin giderim verimine etkisi de incelenmiş ve 2-11 mm arasındaki elektrot mesafesinde denemeler yapılmıştır. En iyi sonuç 11 mm aralıklı elektrotlar ile sağlanmıştır. [46].
- Peyniraltı atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda yapılan bir çalışmada; 15500 mg/L KOİ'nin 2200 mg/L seviyelerine kadar arıtıldığı gözlemlenmiştir. En iyi giderim verimi pH

4,54 değerinde 60 mA/cm^2 akım yoğunluğunda elde edilmiş ve optimum bekletme süresi 20 dakika olarak belirlenmiştir [47].

- Model atıksudan, demir elektrotlar ile Cr^{6+} ve Cr^{3+} iyonlarının giderildiği bir çalışmada, 1.09 kWh/m^3 güç ile %99,97 oranında Cr^{3+} , 2.299 kWh/m^3 güç ile %94,97 oranında Cr^{6+} giderildiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca destek elektrolit (NaCl) derişiminin maliyete etkisi de incelenmiş ve optimum NaCl derişiminin; Cr^{3+} iyonu için 1 g/L, Cr^{6+} iyonu için ise 1,5 g/L olduğu belirlenmiştir. Bu derişimlerde destek elektrolitin gereken enerji miktarını Cr^{3+} iyonu için %66, Cr^{6+} iyonu için ise %42 mertebesinde azalttığı ifade edilmiştir [48].
- Alüminyum endüstrisinde en büyük çevresel etki zararlı boksit artıklarının toplandığı kırmızı çamur barajlarında (red mud dam) oluşmaktadır. Kırmızı çamur barajlarından alınan suyun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda yapılan çalışmada; V, Si, Al, As, Mo ve Ga iyonlarının sırasıyla %97,68, %82,65, %98,22, %99,44, %99,69 ve %99,95 oranında giderildiği, optimum koşullarda 2.138 kg/m^3 çamur oluştuğu ve arıtma maliyetinin 0.813 €/m^3 olduğu gözlemlenmiştir [49].
- Acı yeraltısuyunun (brackish groundwater) elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda yapılan bir çalışmada; Cr^{6+} iyonunun neredeyse tamamının giderildiği, optimum koşullarda 0.75 kWh/m^3 enerji harcandığı ve sistemin $0.03\$/\text{m}^3$ maliyet ile çalıştığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca karıştırmanın elektrokoagülasyona olan etkisini incelemek amacıyla havalı karıştırıcı ile deneyler yapılmış, 0-4 L/dk debilerle sisteme hava ilave edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, en iyi giderimin 4 L/dk hava debisi ile elde edildiği anlaşılmıştır. [50].
- Kömür damarı suyunun elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konusunda yapılan bir çalışmada, kalsiyumun ve baryumun tamamına yakınının, magnezyumun %87,9'unun, stronsiyumun %99,3'ünün ve silikatların %98,3'ünün giderildiği gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada bor ve florit gideriminde başarısız olunmuş giderimler sırasıyla %13,3 ve %44 mertebesinde olmuştur [51].

3.4.2. Benzer atıksular ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar

Seramik endüstrisi atıksuları arıtımı ile ilgili çalışmalar bu başlık altında verilmiştir. Seramik endüstrisi atıksuları yoğun miktarda kil ve mineral içerdiği için, kil ve mineral giderimini konu alan çeşitli çalışmalar da bu başlık altında sıralanmıştır:

- Sağlık ile ilgili porselen gereçleri ve seramik üretimi yapan tesislerin atıksuları ile ilgili yapılan bir çalışmada, atıksulara alum eklenmesi sonucu kimyasal arıtım yaparak, AKM gideriminin incelendiği bir çalışmada atıksular öncelikle kimyasal eklenmeden bekletilmiş ve çökeltme karakteristikleri incelenmiştir. Bu halde giren AKM'nin %70-80 mertebesinde giderildiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın daha sonraki aşamasında sisteme alum eklenmiş ve bu şekilde giderim yapılmıştır. Farklı giriş özelliklerine sahip atıksular için optimum miktar farklı olduğu halde, genel olarak alum miktarı arttıkça giderim veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada karıştırma hızının 5. dakikadan sonra bulanıklığa olan etkisi araştırılmış ve en iyi sonucun 5000 devir/dakika karıştırma hızında elde edildiği anlaşılmıştır [10].
- Seramik endüstrisi atıksularının kimyasal arıtılabilirliği konulu bir çalışmada, atıksulara alum eklenerek öncelikle jar test düzeneğinde çöktürülmüş ve devamında granüler aktif karbon uygulayarak arıtım gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, %98 AKM ve %94 KOİ giderimi sağlanmıştır [2].
- Seramik endüstrisi atıksularının biyolojik olarak arıtılması konulu bir çalışmada; kimyasal arıtımın çıkışından alınan su numunesi 20 saat alıkonma süresiyle, çamur yaşı 20 gün olan biyolojik reaktörde arıtılmış, KOİ 720 mg/L'den 40 mg/L'ye düşmüş ve çıkış suyunda AKM ise 40-60 mg/L aralığında ölçülmüştür. [11]
- Yüksek miktarda AKM ve mineral içeren mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konulu çalışmada; %99,8 mertebesinde AKM giderimi gözlemlenmiştir. Optimum arıtım koşullarına pH 9 ve 15 mA/cm² akım yoğunluğu değerlerinde ulaşılmıştır. Deneylerde reaktör olarak 250 mL beher ve 162 cm² yüzey alanına sahip elektrot

demeti kullanılmış olup hızlı karıştırma için 500 devir/dakika, yavaş karıştırma için 60 devir/dakika karıştırma hızı uygulanmıştır. Deneylede monopolar alüminyum elektrotların işletme maliyetinin demir elektrotlardan daha az olduğu ortaya konulmuştur [52].

- Kil gideriminde elektrokoagölasyon ve kimyasal koagölasyon yönteminin karşılaştırıldığı bir çalışmada sistem çeşitli miktarlarda koagölant eklentisiyle çalıştırılmıştır. Giderim veriminin 4 mg/L Al konsantrasyonuna kadar çok fazla etkilenmediği, 4-20 mg/L Al aralığında giderim veriminin hızla arttığı gözlemlenmiştir. 2 A akım şiddetinin (elektrot yüzey alanı verilmediği için akım yoğunluğu hesaplanamamıştır) kirletici düzeyini en hızlı biçimde dūřürdüđu ifade edilmiştir. Sisteme eklenen birim alüminyum başına ise en yüksek giderim veriminin 0,25 A değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemde zeta potansiyelleri çeşitli zaman aralıklarında ölçölerek izoelektrik noktaya hangi zaman aralığında ulaşılacağı tespit edilmiştir. [53]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

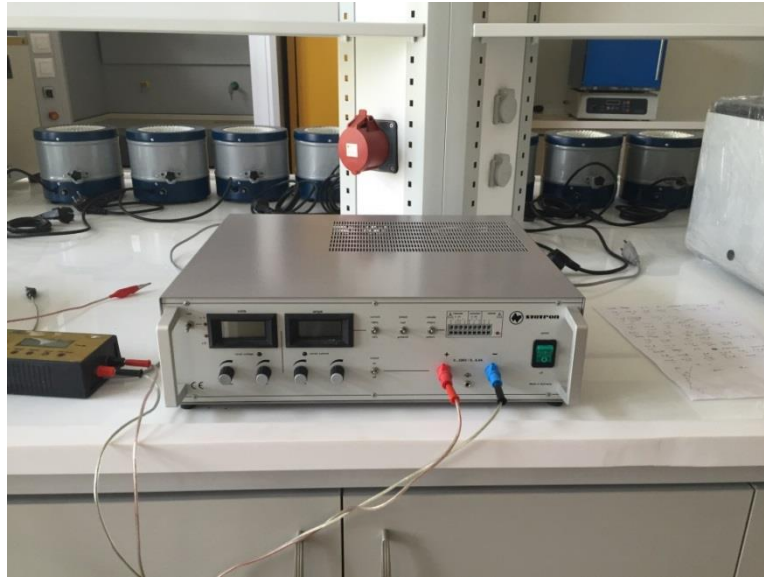
4.1. Materyal

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konulu çalışmada, Bilecik il sınırları içerisinde faaliyet gösteren bir seramik fabrikasının ön arıtmadan çıkan atıksuyu kullanılmıştır. Atıksu karakterizasyonu Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Ham atıksu karakterizasyonu

Parametre	Değer
AKM	1800 mg/L
KOİ	18,72 mg/L
Pb	0,11 µg/L
Cd	0,32 µg/L
Zn	4,88 µg/L
pH	8,68
Bulanıklık	1550 NTU
Zeta Potansiyeli	-20,7 mV
Elektriksel İletkenlik	1568 µS/cm

Elektrokoagülasyon düzeneğinde güç kaynağı olarak Statron Marka (220 V girişli 0-300 V ve 0-4 A) çıkışlı cihaz kullanılmıştır. Cihazın fotoğrafı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 1. Güç kaynağı

Elektrokoagülasyon düzeneğinde elektrot olarak 3,8x5,8 (cm) boyutlarında alüminyum ve demir plakalar kullanılmıştır. Elektrotların görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



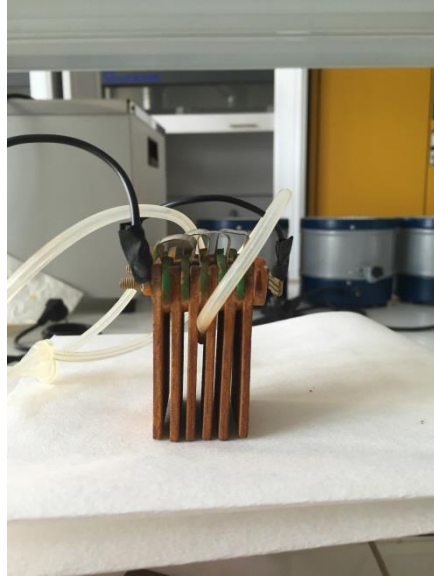
Şekil 4. 2. Deneyde kullanılan elektrotlar (demir elektrot)

Elektrokoagülasyon düzeneğinde elektrik iletimi bağlantı kabloları ile sağlanmıştır. Elektrotların üzerinde film tabakası oluşumunu engellemek ve elektrotların aynı düzeyde aşınmasını sağlamak için kutup değiştirici kullanılmıştır. Kutup değiştiricinin fotoğrafı Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4. 3. Kutup değiştirici

Elektrotlar birbirine yalıtkan serum lastiği, vida, somun, su contası, rondela (pul) ve metal plaka vasıtası ile monopolar olarak yani; ardışık elektrotların farklı yüklerle yükleneceği şekilde bağlanmış ve elektrot demeti oluşturulmuştur. Elektrot demetinin fotoğrafı Şekil 4.4'te verilmiştir.

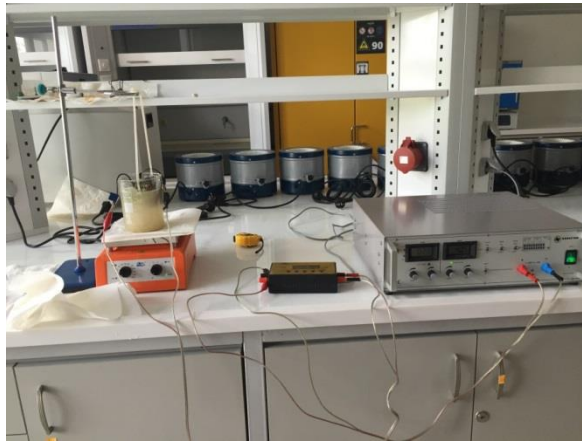


Şekil 4. 4. Elektrot demeti (demir)

Elektrot demetini belirli bir yükseklikte tutmak için büret askısı kullanılmıştır. Reaktör olarak 600 mL beher kullanılmıştır.

Elektrokoagülasyon düzeneğinde karışımı sağlamak için manyetik karıştırıcı(A&E LAB) ve manyetik balık kullanılmıştır.

Elektrokoagülasyon düzeneğine ait fotoğraf Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4. 5. Elektrokoagülasyon düzeneği

AKM analizleri için filtre kağıdı (Sartorius Stedim Biotech 0,45 µm selüloz-asetat), hassas terazi (Precisa XB220 A), etüv, desikatör ve süzme düzeneği kullanılmıştır.

pH ölçümleri için pH metre (Thermo Scientific) kullanılmıştır.

Zeta Potansiyeli analizi için Malvern Zetaseizer Nano ZS cihazı kullanılmıştır.

Parçacık boyut ölçümleri için Malvern Mastersizer 2000 cihazı kullanılmıştır.

KOİ analizleri için termoreaktör ve cam malzemeler kullanılmıştır.

Metal analizleri için Agilent 8800 ICP-MS Triple Quad marka eşleşmiş kutuplu plazma-çift quadropollü kütle spektrometrisi cihazı kullanılmıştır.

4.2. Yöntem

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ile ilgili yapılan çalışmada, akım yoğunluğunun, destek elektrolit derişiminin ve elektrot tiplerinin arıtılabilirliğe olan etkileri araştırılmıştır.

Arıtma işlemi sonucunda bulanıklık, AKM, kurşun, çinko, kadmiyum ve pH parametreleri ölçülmüş ve SKKY deşarj standartları ile karşılaştırılıp alıcı ortama deşarj edilip edilemeyeceği değerlendirilmiştir. Ayrıca atıksuların zeta potansiyelleri ölçülerek çökebilme davranışları ile ilgili fikir edinilmiştir.

4.2.1. Akım yoğunluğunun arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ile ilgili yapılan çalışmada, akım yoğunluğunun arıtılabilirliğe olan etkisini araştırmak amacıyla belirli tepkime sürelerinde ve belirli elektrot tipleriyle akım yoğunluğunu değiştirerek deneyler yapılmıştır.

Yapılan deneyler sırasında belirli zaman aralıklarında potansiyel farklar kaydedilmiştir. Bu veriler güç ve maliyet hesabında kullanılmıştır. Elektriksel güç formülü aşağıda verilmiştir:

$$P=I^2*R=I*V \quad (4.1)$$

Formülde;

P= Güç(W)

I= Akım şiddeti (A)

R= Direnç (Ω)

V= Potansiyel fark (V)

Enerji maliyeti hesaplamalarında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verileri kullanılmıştır.

Deneylede atıksular ölçüm yapılmadan önce 1 saat süre ile çöktürülmüştür. Deney sonucunda AKM, pH, Bulanıklık parametreleri ölçülerek giderim verimi hesaplanmış ve SKKY’de verilen deşarj kriterlerine uyulup uyulmadığı kontrol edilmiştir. Giderim verimi formülü aşağıda verilmiştir:

$$R= 100*\frac{C_0-C}{C} \quad (4.2)$$

Bu formülde;

R= Giderim verimi (%)

C_0 = İlk konsantrasyon (mg/L)

C= Tepkime sonucunda oluşan konsantrasyon (mg/L)

4.2.2. Elektrolit derişiminin arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ile ilgili yapılan çalışmada, elektrolit derişiminin arıtılabilirliğe olan etkisini araştırmak amacıyla belirli tepkime sürelerinde ve belirli elektrot tipleriyle çalışılmış, her elektrot tipi ve tepkime süresi için elektrolit derişimi değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

Yapılan deneyler sırasında belirli zaman aralıklarında potansiyel farklar kaydedilmiştir. Bu veriler güç ve maliyet hesabında kullanılmıştır.

Enerji maliyeti hesaplamalarında EPDK verileri kullanılmıştır.

Deneylede atıksular ölçüm yapılmadan önce 1 saat süre ile çöktürülmüştür. Deney sonucunda AKM, pH, Bulanıklık parametreleri ölçülerek giderim verimi hesaplanmış ve SKKY’de verilen deşarj kriterlerine uyulup uyulmadığı kontrol edilmiştir.

4.2.3. Elektrot tiplerinin arıtılabilirliğe olan etkisinin belirlenmesi

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması ile ilgili yapılan çalışmada, elektrot tipinin arıtılabilirliğe olan etkisini araştırmak amacıyla belirli tepkime sürelerinde ve akım yoğunluklarıyla çalışılmış, her tepkime süresi ve akım yoğunluğu için elektrot tipi değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

Yapılan deneyler sırasında belirli zaman aralıklarında potansiyel farklar kaydedilmiştir. Bu veriler güç ve maliyet hesabında kullanılmıştır.

Enerji maliyeti hesaplamalarında EPDK verileri kullanılmıştır.

Deneylerde atıksular ölçüm yapılmadan önce 1 saat süre ile çöktürülmüştür. Deney sonucunda AKM, pH, Bulanıklık parametreleri ölçülerek giderim verimi hesaplanmış ve SKKY'de verilen deşarj kriterlerine uyulup uyulmadığı kontrol edilmiştir.

4.2.4. AKM analizi

AKM, filtre ile süzülendiğinde filtrenin üzerinde kalan madde olarak tanımlanır. Estetik nedenlerle sularda ve atıksularda istenmeyen bir kirleticidir. Ayrıca AKM, suyun güneş geçirgenliğini azaltır ve güneş ışınlarının suyun aşağı kısımlarına geçememesine neden olur. Bu durum fotosentetik canlıların faaliyetlerini engeller ve dolaylı olarak anaerobik ortam oluşumuna yol açar. Bu bağlamda, AKM önemli su kirletici parametrelerden bir tanesidir. [54].

AKM, su numunesinin filtreden geçmeyen kısmının 103 °C'de etüvde kurutulması, desikatörde soğutulması ve tartılması yoluyla tayin edilmiştir. Deney adımları şu şekildedir [17]:

- Sabit tartıma getirilmiş boş filtre tartılır.
- Filtre kağıdı süzme setine yerleştirilir.
- Bir yandan vakum uygulayarak 3 kez 20'şer mL saf su ile yıkanır.
- Suların hepsi süzülene kadar beklenir.
- Uygun miktarda numune filtre kağıdından süzülür. (Filtre kağıdında kalan ağırlığın 10-200 mg arasında olması gereklidir.)
- Dolu filtre kağıdı etüvde 103-105 °C'de bir saat kurutulur.
- Desikatörde soğutulduktan sonra tartım yapılır.

- Ardışık iki tartım arasında fark kalmayana kadar desikatörde soğutma ve etüvde kurutma işlemleri tekrarlanır.

$$AKM \text{ (mg/L)} = (A-B)/V_{\text{numune}} \quad (4.3)$$

Formülde;

A= Dolu filtre kağıdı ağırlığı (mg)

B= Boş filtre kağıdı ağırlığı (mg)

V_{numune} = Kullanılan numune hacmi (L)

4.2.5. pH analizi

pH sudaki hidrojen iyon derişiminin bir ölçütüdür ve sudaki hidrojen iyon derişiminin 10 tabanında logaritmasının negatif değeri alınarak hesaplanır [55]. pH su ve atıksularda çevre mühendisliği açısından önemli bir parametredir.

Deneyleerde standart pH çözeltileri ile kalibrasyon yapıldıktan sonra pH metre vasıtasıyla pH ölçümü gerçekleştirilmiştir. pH ölçümleri, problemlerin ucunda oluşan elektrokimyasal tepkimelere dayanmaktadır.

4.2.6. Bulanıklık analizi

Bulanıklık, sulardaki ışık geçirgenliği ile ters orantılı bir büyüklük olup, parçacıkların varlığı sonucu oluşan puslu görüntü olarak tanımlanır [56]. Çevresel açıdan önemi AKM ile aynı nedenlere dayanmakla birlikte, cihazlar vasıtası ile AKM'den çok daha hızlı ölçülebilen bir parametredir.

Yapılan çalışmalarda bulanıklık nefelometrik prensipler ile ölçülmüştür. Nefelometrik yöntemde cihaz partiküllerden yansıyan ışığı ölçmektedir. Ölçüm prensibi, numunenin aydınlatılması sonucu ışık yoğunluğundaki azalmanın dedektörler vasıtası ile ölçülmesine dayanır. Sonuçlar NTU (nefelometrik bulanıklık birimi) cinsindedir [17].

4.2.7. KOİ analizi

KOİ, evsel ve endüstriyel atıksuların kirlilik derecesini belirlemede en çok kullanılan parametrelerden biri olup organik maddelerin redoks tepkimeleri ile oksitlenmesi için gereken oksijen miktarı olarak tanımlanır [17]. BOİ deneyinden farklı olarak, kısa sürede sonuç alınabilmesi sebebiyle çok kullanılan bir parametredir [57].

KOİ ölçümleri TS 2789 ISO 6060 standardına dayanarak yapılmış olup deney adımları şu şekildedir:

- DAS derişiminin bulunması amacıyla; 10 mL potasyum dikromat çözeltisi H₂SO₄ çözeltisi ile 100 mL'ye seyreltilir. 2-3 damla ferroin indikatörü eklenerek DAS çözeltisi ile titrasyon yapılır. Kullanılan DAS çözeltisi hacmi (V) formül 4.4'te yerine konularak DAS molaritesi (C) hesaplanır.

$$C = 2,4/V \quad (4.4)$$

- 1 mL numune alınarak deney tüpüne aktarılır.
- 0,5 mL potasyum dikromat örneğin üzerine ilave edilir.
- Soğutarak azar azar 15 mL gümüşlü sülfürik asit çözeltisi ilave edilir.
- Gümüşlü sülfat-sülfürik asit çözeltisinden 1,5 mL alınarak örneğin üzerine ilave edilir.
- Numune 2 saat süreyle 150 °C'de bekletilir.
- Örnek 60 °C'ye gelene kadar soğutulur.
- Örnek tüpü 4,5 mL saf su ile yıkanır ve erlene boşaltılır. Erlene 2-3 Damla ferroin indikatörü eklenerek demir amonyum sülfat (DAS) ile renk yeşilden kırmızıya dönene kadar titre edilir.
- Şahit numune (saf su) için aynı işlemler tekrarlanır.

$$KOİ = \frac{(a-b) \times C \times 8000}{V_{numune}} \quad (4.5)$$

Formülde;

a= Şahit numune için harcanan DAS sarfiyatı (mL)

b= Numune için harcanan DAS sarfiyatı (mL)

V_{numune}= Kullanılan numune hacmi (mL)

C= DAS çözeltisi molaritesi(M)

4.2.8. Metal analizi

Sularda bulunan metal kirliliği, suda yaşayan veya suyu kullanan canlıların sağlığı için olumsuz etkiler yaratabilmektedir [58]. Bazı metal türleri dokularda birikerek biyoakümülyasyona neden olmakta, birçok metal türü zehirli, kanserojen ve mutajen etki göstermektedir.

Metal analizleri Agilent 8800 ICP-MS Triple Quad marka eşleşmiş kutuplu plazma-çift quadropollü kütle spektrometrisi cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın kalibrasyonu sertifikalı çoklu element standartları örnek matrikslerinde seyreltilerek yapılmıştır. Kalibrasyon için 0; 2; 5; 10; 50; 100; 250; 500; 1000 ve 2500 µg/L'lik çözeltiler hazırlanmış ve cihaza tanıtılmıştır. Kalibrasyonun doğruluğu TMRAIN-04 (A simulated rain sample for trace elements – Air Canada) analizleri ile kontrol edilmiştir.

4.2.9. Zeta potansiyeli analizi

Atıksuyun zeta potansiyeli Malvern Nano ZS marka cihaz vasıtasıyla elektroforetik mobilitelerinden yararlanılarak Smoluchowski metodu ile belirlenmiştir.

Elektrik alanın etkisiyle bir parçacığın hareket ettirilmesi elektroforez olarak adlandırılır. Bir parçacığın sürüklenme hızının o parçacığa etki eden elektrik alan kuvvetine oranı ise elektroforetik mobilitayı verir:

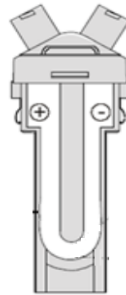
$$\mu_e = v/E \quad (4.9)$$

μ_e = Elektroforetik mobilite

v = Sürüklenme hızı

E = Elektrik alan kuvveti

Cihaz Şekil 4.6'da verilen kuvvetler vasıtası ile elektroforetik mobilitayı ölçmektedir.



Şekil 4. 6. Zeta potansiyeli ölçüm kuvveti

Ölçüm sırasında dinamik ışık saçılımı metodu kullanılmaktadır. Metod bir ışının parçacık ile etkileşimi ardından oluşan frekans değişiminin; elektroforetik

mobilité, ışığın gönderildiği açı ve ilk dalga boyunun bir fonksiyonu olmasına dayanır.

$$\Delta f = 2 \mu_e \sin(\theta/2) / \lambda \quad (4.10)$$

Δf = Işığın frekans değişimi

μ_e =Elektroforetik mobilité

θ = ölçüm açısı

λ =Işık dalga boyu

Daha sonra Smoluchowski ve Henry eşitlikleri vasıtası ile zeta potansiyeli hesaplanmaktadır.

$$\mu_e = \frac{2 * \epsilon * z * f(Ka)}{3 * \eta} \quad (4.11)$$

μ_e =Elektroforetik mobilité

ϵ = Dielektrik sabiti

z = Zeta potansiyeli

$f(Ka)$ =Henry eşitliği

η = vizkozite

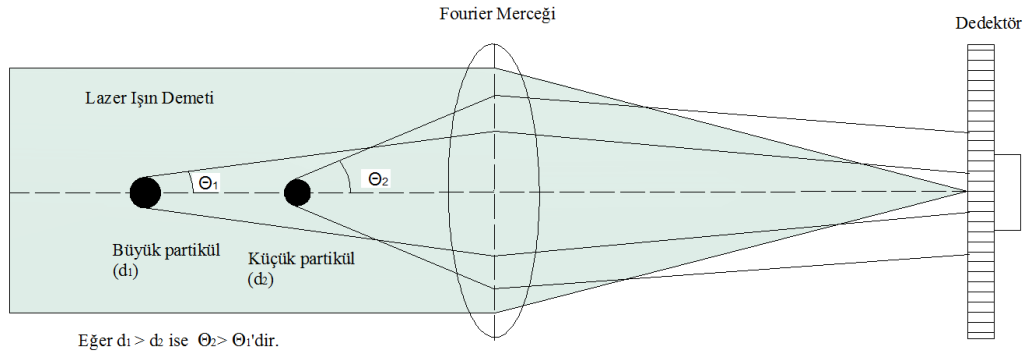
Cihaz $f(Ka)$ değerini polar çözücüler için 1,5, apolar çözücüler için 1 almaktadır. ϵ ve η değerleri ölçüm sıcaklığına bağlı olarak denkleme cihaz tarafından atanmaktadır.

Dinamik ışık saçılımı metodu ile zeta potansiyeli ölçümü yapılırken deney adımları şu şekildedir:

- Cihaz ve bilgisayar çalıştırılır. Cihaz çalıştıktan sonra duyarlı ölçümler için yarım saat beklenir.
- Yazılım çalıştırılır.
- Gerekli bilgiler girildikten sonra zeta potansiyeli ölçüm küveti kabarcık oluşumuna neden olmayacak şekilde doldurulur.
- Küvet hazneye yerleştirilip kapak kapatılır.
- Ölçüm başlatılır.
- Sonuçlar kaydedilir.

4.2.10. Boyut ölçümü

Partikül boyut ölçümleri lazer kırınım yöntemi metodundan yararlanılarak Malvern Mastersizer 2000 cihaz vasıtasıyla yapılmıştır. 1970'li yıllardan beri kullanılan lazer kırınım yöntemi bir çok sektörde yararlanılan partikül boyut ölçümlerini başarıyla gerçekleştirmektedir. Yöntemin temel prensibi; lazer ışınlarının önünde bulunan partiküllerin lazer ışınlarını boyutları ile ters orantılı olarak kırınımına uğratmasına dayanır. Şekil 4.7'de bu ilişki açıklanmaktadır [59].



Şekil 4. 7. Lazer kırınım metodu çalışma prensibi

Lazer kırınım metodu ile ölçüm yapılırken deney adımları şu şekildedir:

- Cihaz ve bilgisayar çalıştırılır. Cihaz çalıştıktan sonra duyarlı ölçümler için yarım saat beklenir.
- Yazılım çalıştırılır.
- Bilgisayarla gerekli girdiler yapıldıktan sonra kuvet hava kabarcığı oluşumuna yol açmadan saf su ile doldurulur.
- Arka plan ölçümü gerçekleştirilir.
- Küvete analiz edilmek istenen numune yeterli miktarda koyulduktan sonra ölçüm gerçekleştirilir.
- Sonuçlar kaydedilir.

5. BULGULAR

5.1. Akım Yoğunluğunun Arıtılabilirliğe Olan Etkisi

Akım yoğunluğunun seramik endüstrisi atıksuyunun artımına etkisini incelemek amacıyla Çizelge 5.1’de verilen akım şiddetlerinde, hem demir elektrot hem de alüminyum elektrot vasıtasıyla çalışmalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda aktif elektrot alanı $\sim 100 \text{ cm}^2$ olmaktadır (EK-1). Çizelge 5.1’de her akım şiddetine karşılık mA/cm^2 cinsinden akım yoğunlukları da verilmiştir.

Çizelge 5. 1. Akım şiddeti- akım yoğunluğu ilişkisi

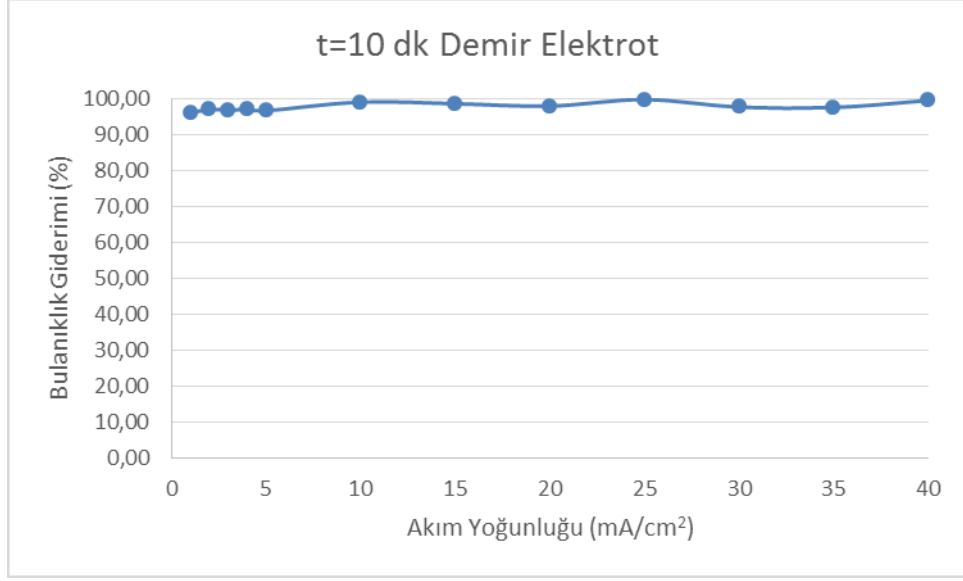
Akım Şiddeti (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)
0,1	1
0,2	2
0,3	3
0,4	4
0,5	5
1	10
1,5	15
2	20
2,5	25
3	30
3,5	35
4	40

5.1.1. Demir elektrotlar ile yapılan çalışmalar

Bulanıklık giderimi

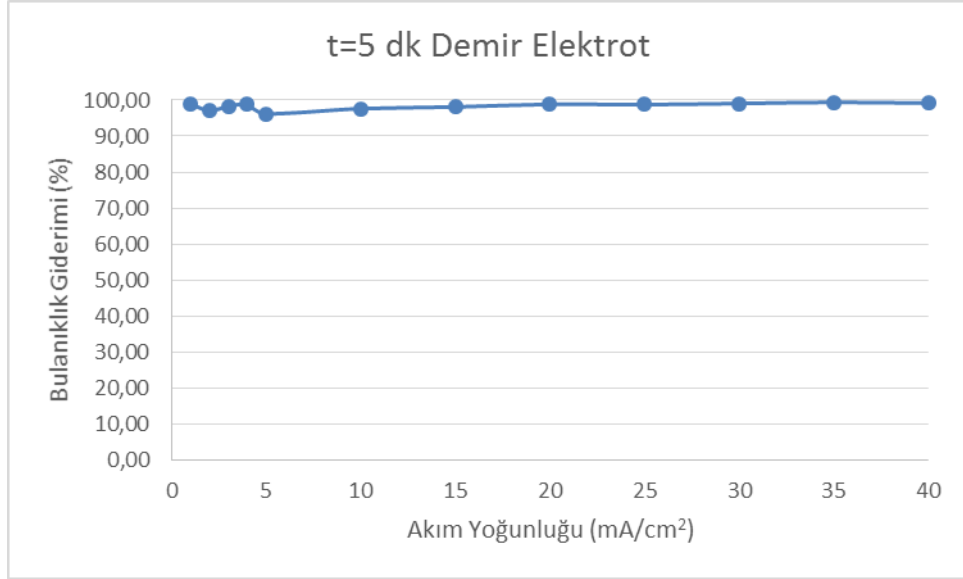
Deneyler 2,5, 5 ve 10 dk sürdürülmüş, deneyler boyunca belirli aralıklarla oluşan potansiyel farklar kaydedilmiştir.

10 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



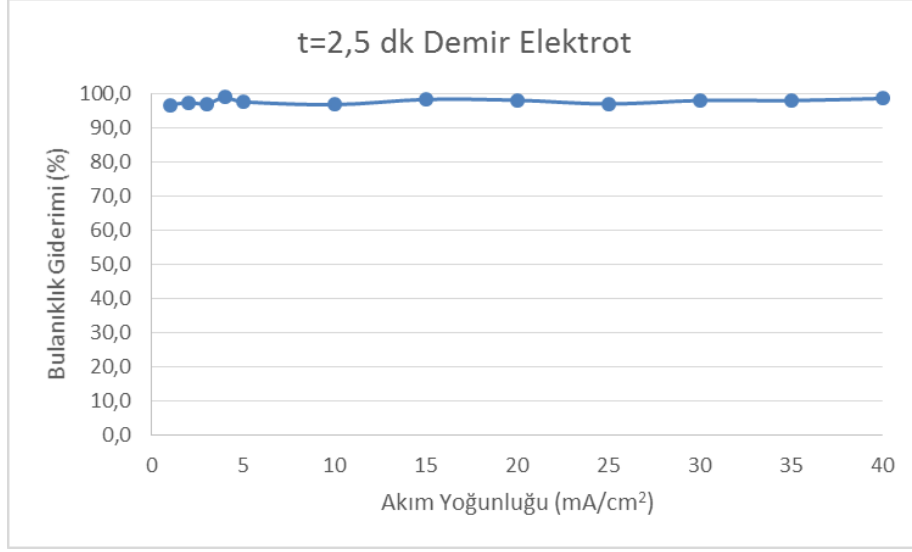
Şekil 5. 1. t=10 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

5 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5. 2. t=5 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

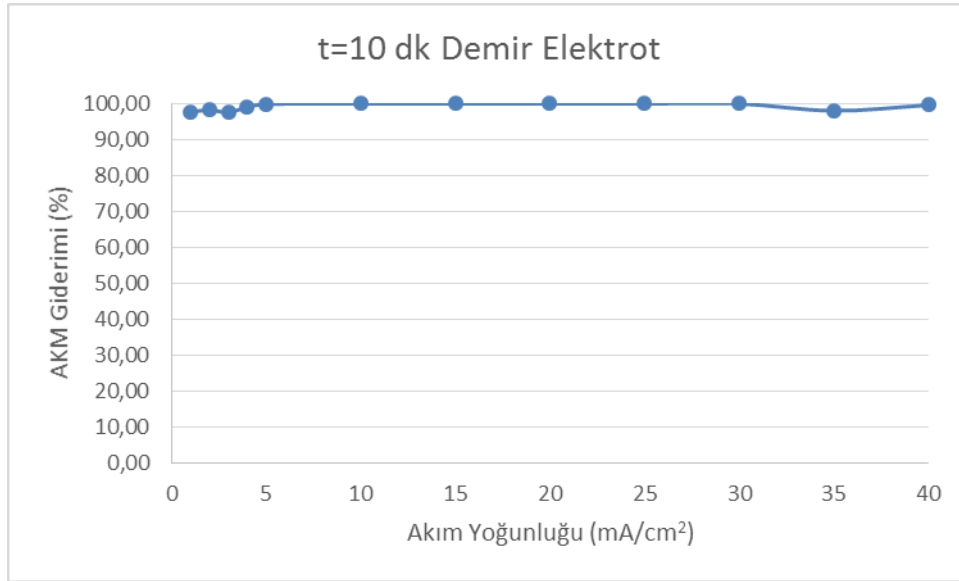
2,5 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5. 3. t=2,5 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

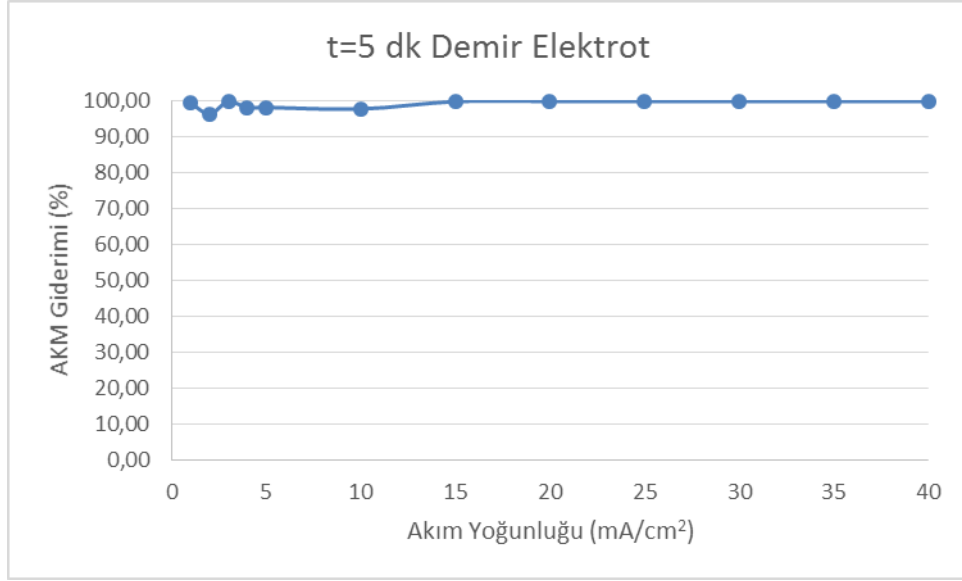
AKM giderimi

10 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.4'te verilmiştir.



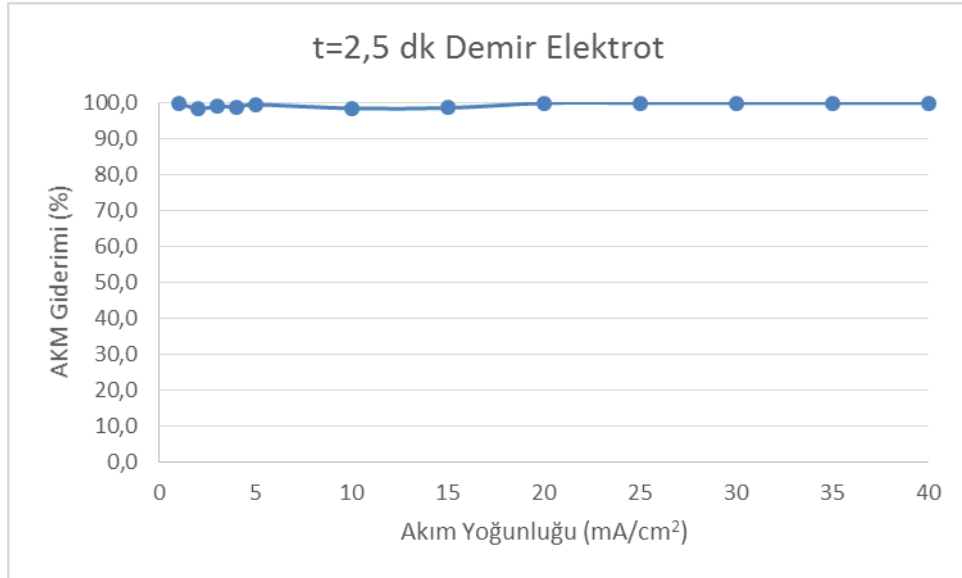
Şekil 5. 4. t=10 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

5 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.5' de verilmiştir.



Şekil 5. 5. t=5 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

2,5 dk tepkime süresinde demir elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.6’da verilmiştir.

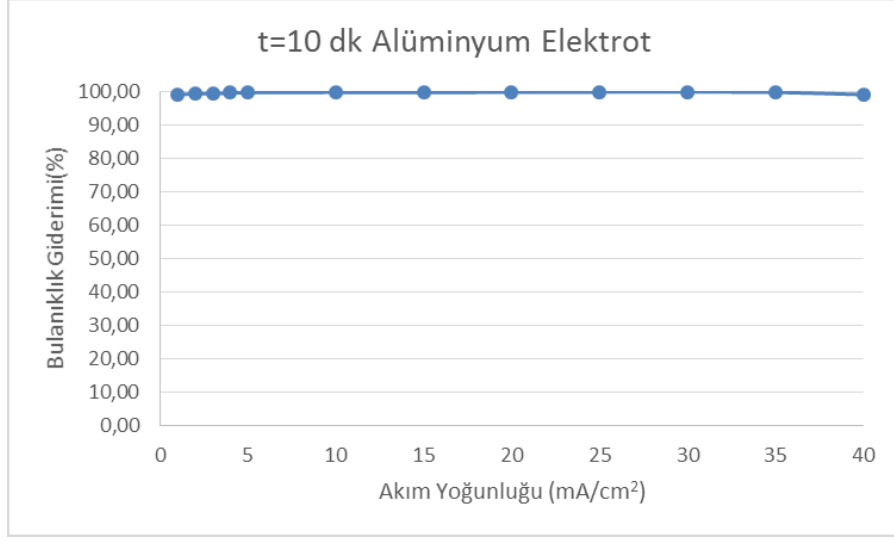


Şekil 5. 6. t=2,5 dk, Fe elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

5.1.2. Alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalar

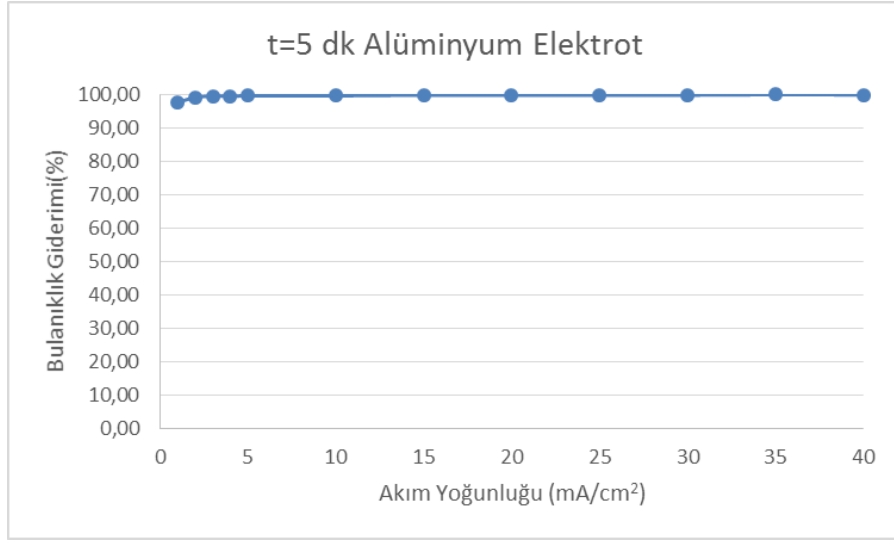
Bulanıklık giderimi

10 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.7’de verilmiştir.



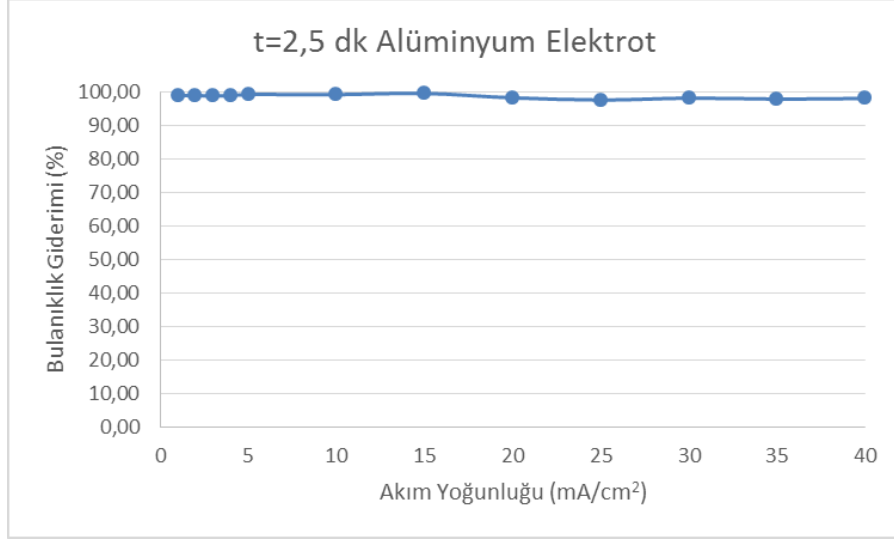
Şekil 5. 7. t=10 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

5 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5. 8. t=5 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

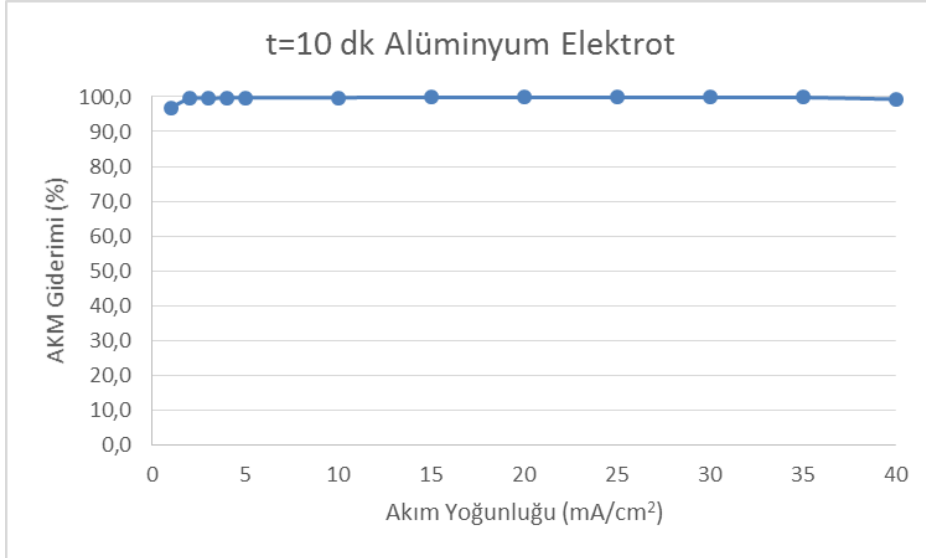
2,5 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak bulanıklık giderimi Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5. 9. t=2,5 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, bulanıklık giderimi ilişkisi

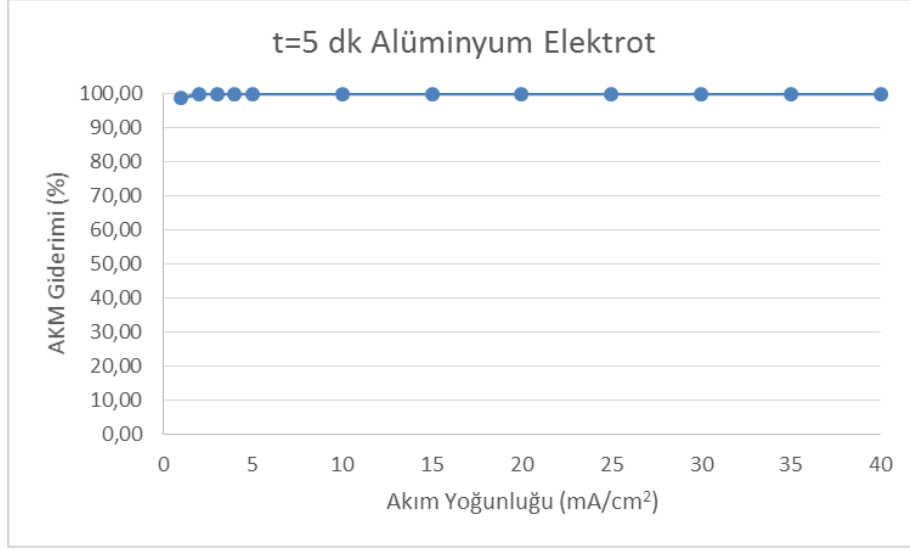
AKM giderimi

10 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.10’da verilmiştir.



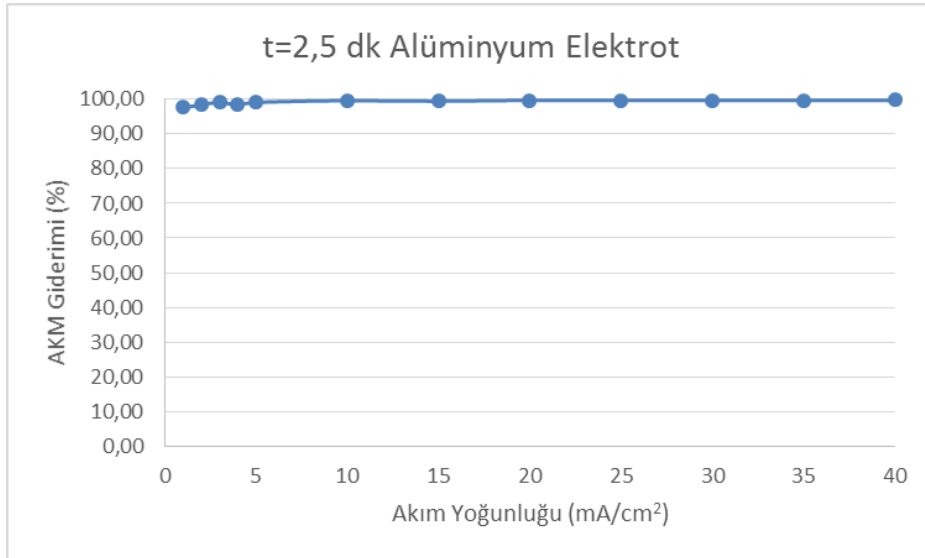
Şekil 5. 10. t=10 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

5 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5. 11. t=5 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

2,5 dk tepkime süresinde alüminyum elektrotlar ile çalışıldığı zaman, akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM giderimi Şekil 5.12’de verilmiştir.

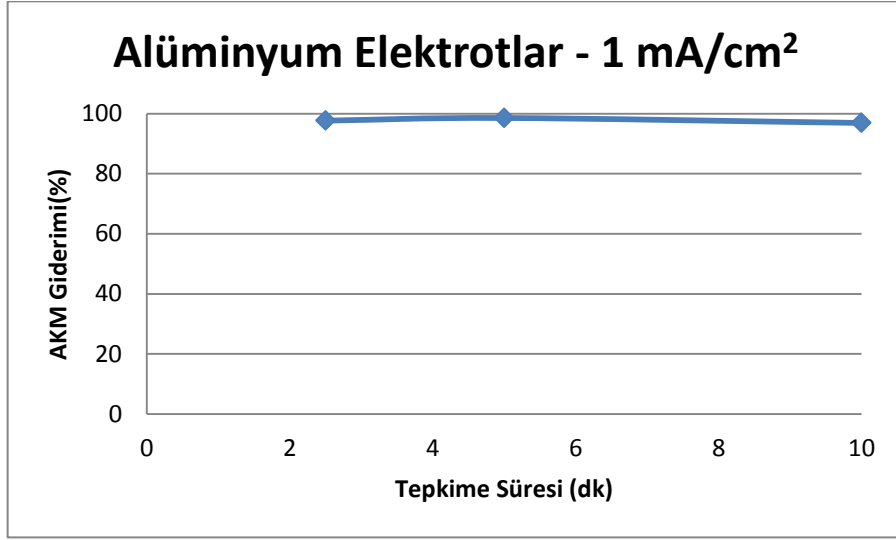


Şekil 5. 12. t=2,5 dk, Al elektrot; akım yoğunluğu, AKM giderimi ilişkisi

5.1.3. En düşük akım yoğunluğunda zamana bağlı giderim verimi

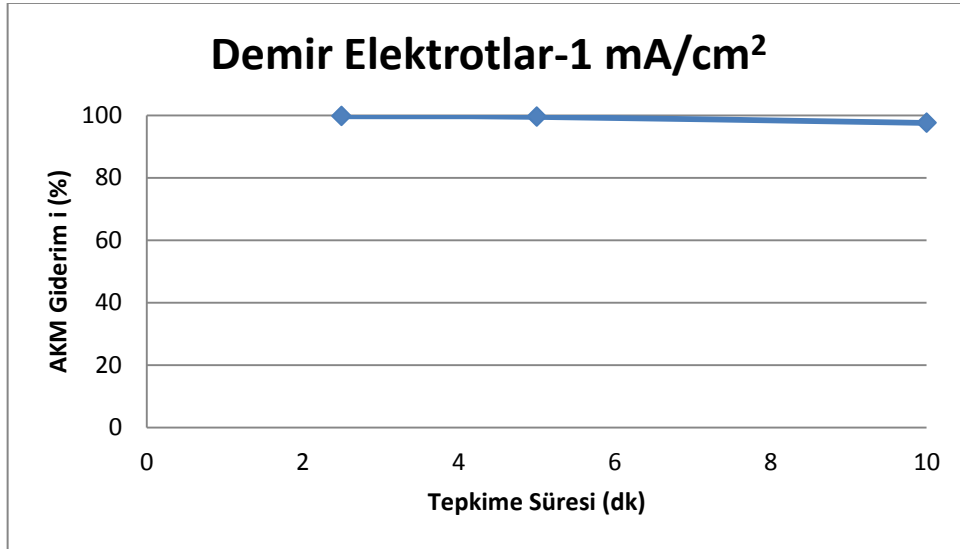
Akım yoğunluğunun yüksekliği enerji sarfiyatını arttıracığından, tepkime süresinin uzaması ise gerekli tank boyutlarında artışa neden olacağından maliyeti arttıracaktır. Grafiklerden anlaşıldığı üzere, deşarj standartlarını sağlamak için uzun tepkime süresine veya yüksek akım yoğunluğuna ihtiyaç duyulmamaktadır.

En az enerji gereksinimi olan 1 mA/cm^2 akım yoğunluğunda alüminyum elektrot için AKM giderim veriminin zamana bağlı değişimi Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5. 13. Al elektrot, 1 mA/cm^2 ; AKM giderimi verimi, zaman ilişkisi

1 mA/cm^2 akım yoğunluğunda demir elektrot kullanılarak yapılan çalışmada AKM giderim veriminin zamana bağlı değişimi Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5. 14. Fe elektrot, 1 mA/cm^2 ; AKM giderimi verimi, zaman ilişkisi

5.1.4. Maliyet hesaplamaları

Enerji maliyeti

Sistem çalışırken potansiyel farklar kaydedilmiş ve bu potansiyel farkların ortalaması alınarak belirli akım şiddetleri için ortalama potansiyel farklar hesaplanmıştır. Ortalama potansiyel farklar, sistemin çalıştığı akım şiddeti ile çarpılarak ortalama güçler hesaplanmıştır. Tepkime süresinin saat cinsinden karşılığı ortalama güç ile çarpılarak kWh cinsinden harcanan enerjiler bulunmuştur. Burada bulunan harcanan enerji miktarı 500 mL suyu arıtmak içindir. Oran orantı ile m³ su arıtımı için harcanan enerji miktarı bulunur. Son olarak, EPDK web sitesinden sanayi işletmeleri için birim enerji fiyatları alınarak harcanan enerji miktarı ile çarpılmış ve gerekli maliyet hesaplanmıştır.

01.04.2015 tarihinde açıklanan tüketim tarifesine göre sanayiciler için perakende tek zamanlı enerji bedeli 18,2871 krş./kWh'dır. [60]

Sonraki sayfalarda 2,5, 5 ve 10 dakika bekletme süreleri için, demir ve alüminyum elektrotların enerji sarfiyatları ile ilgili hesaplama çizelgeleri verilmiştir.

Çizelge 5. 2. Fe elektrot, t=10 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	2	0,0002	0,00003	0,07	18,2871	0,001	1,2
0,2	2	2	0,0004	0,00007	0,13	18,2871	0,001	2,4
0,3	3	2,5	0,0008	0,00013	0,25	18,2871	0,002	4,6
0,4	4	3	0,0012	0,0002	0,4	18,2871	0,004	7,3
0,5	5	3	0,0015	0,00025	0,5	18,2871	0,005	9,1
1	10	5	0,005	0,00083	1,67	18,2871	0,015	30,5
1,5	15	7	0,0105	0,00175	3,5	18,2871	0,032	64
2	20	8	0,016	0,00267	5,33	18,2871	0,049	97,5
2,5	25	9,6	0,024	0,004	8	18,2871	0,073	146,3
3	30	9,6	0,0288	0,0048	9,6	18,2871	0,088	175,6
3,5	35	13,2	0,0462	0,0077	15,4	18,2871	0,141	281,6
4	40	18,2	0,0728	0,01213	24,27	18,2871	0,222	443,8

Çizelge 5. 3. Fe elektrot, t=5 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	1	0,0001	0,00001	0,0167	18,2871	0,00015	0,3
0,2	2	2	0,0004	0,00003	0,0667	18,2871	0,00061	1,2
0,3	3	3	0,0009	0,00008	0,15	18,2871	0,00137	2,7
0,4	4	3	0,0012	0,0001	0,2	18,2871	0,00183	3,7
0,5	5	4,3	0,0022	0,00018	0,3583	18,2871	0,00328	6,6
1	10	5,3	0,0053	0,00044	0,8833	18,2871	0,00808	16,2
1,5	15	8	0,012	0,001	2	18,2871	0,01829	36,6
2	20	10	0,02	0,00167	3,3333	18,2871	0,03048	61
2,5	25	12	0,03	0,0025	5	18,2871	0,04572	91,4
3	30	14	0,042	0,0035	7	18,2871	0,064	128
3,5	35	15,3	0,0536	0,00446	8,925	18,2871	0,08161	163,2
4	40	17	0,068	0,00567	11,3333	18,2871	0,10363	207,3

Çizelge 5. 4. Fe elektrot, t=2,5 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	1	0,0001	0,000004	0,0083	18,2871	0,00008	0,2
0,2	2	2	0,0004	0,00002	0,0333	18,2871	0,0003	0,6
0,3	3	3	0,0009	0,00004	0,075	18,2871	0,00069	1,4
0,4	4	4	0,0016	0,00007	0,1333	18,2871	0,00122	2,4
0,5	5	4	0,002	0,00008	0,1667	18,2871	0,00152	3
1	10	7,5	0,0075	0,00031	0,625	18,2871	0,00571	11,4
1,5	15	9	0,0135	0,00056	1,125	18,2871	0,01029	20,6
2	20	15,5	0,031	0,00129	2,5833	18,2871	0,02362	47,2
2,5	25	17	0,0425	0,00177	3,5417	18,2871	0,03238	64,8
3	30	20	0,06	0,0025	5	18,2871	0,04572	91,4
3,5	35	20	0,07	0,00292	5,8333	18,2871	0,05334	106,7
4	40	22	0,088	0,00367	7,3333	18,2871	0,06705	134,1

Çizelge 5. 5. Al elektrot, t=10 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	2	0,0002	0,00003	0,0667	18,2871	0,0006	1,2
0,2	2	2,6	0,0005	0,00009	0,1733	18,2871	0,0016	3,2
0,3	3	3,2	0,001	0,00016	0,32	18,2871	0,0029	5,9
0,4	4	4	0,0016	0,00027	0,5333	18,2871	0,0049	9,8
0,5	5	6,2	0,0031	0,00052	1,0333	18,2871	0,0095	18,9
1	10	8	0,008	0,00133	2,6667	18,2871	0,0244	48,8
1,5	15	10,8	0,0162	0,0027	5,4	18,2871	0,0494	98,8
2	20	13,2	0,0264	0,0044	8,8	18,2871	0,0805	160,9
2,5	25	13,4	0,0335	0,00558	11,1667	18,2871	0,1021	204,2
3	30	15,4	0,0462	0,0077	15,4	18,2871	0,1408	281,6
3,5	35	17,4	0,0609	0,01015	20,3	18,2871	0,1856	371,2
4	40	18,8	0,0752	0,01253	25,0667	18,2871	0,2292	458,4

Çizelge 5. 6. Al elektrot, t=5 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	2,3	0,0002	0,00002	0,04	18,2871	0,0004	0,7
0,2	2	3,7	0,0007	0,00006	0,12	18,2871	0,0011	2,3
0,3	3	4,3	0,0013	0,00011	0,22	18,2871	0,002	3,9
0,4	4	5,3	0,0021	0,00018	0,35	18,2871	0,0032	6,5
0,5	5	6,3	0,0032	0,00026	0,53	18,2871	0,0048	9,6
1	10	9	0,009	0,00075	1,5	18,2871	0,0137	27,4
1,5	15	12	0,018	0,0015	3	18,2871	0,0274	54,9
2	20	16,7	0,0334	0,00278	5,57	18,2871	0,0509	101,8
2,5	25	20,3	0,0508	0,00423	8,46	18,2871	0,0773	154,7
3	30	22	0,066	0,0055	11	18,2871	0,1006	201,2
3,5	35	23,3	0,0816	0,0068	13,59	18,2871	0,1243	248,6
4	40	25,7	0,1028	0,00857	17,13	18,2871	0,1567	313,3

Çizelge 5. 7. Al elektrot, t=2,5 dk; enerji maliyeti hesapları

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Ortalama Potansiyel Fark (Volt)	Ortalama Güç (kW)	Enerji Tüketimi (kWh/500 mL)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)
0,1	1	1	0,0001	0,000004	0,01	18,2871	0,00008	0,2
0,2	2	2	0,0004	0,00002	0,03	18,2871	0,0003	0,6
0,3	3	3	0,0009	0,00004	0,08	18,2871	0,00069	1,4
0,4	4	4,5	0,0018	0,00008	0,15	18,2871	0,00137	2,7
0,5	5	6	0,003	0,00013	0,25	18,2871	0,00229	4,6
1	10	7	0,007	0,00029	0,58	18,2871	0,00533	10,7
1,5	15	9	0,0135	0,00056	1,13	18,2871	0,01029	20,6
2	20	14,5	0,029	0,00121	2,42	18,2871	0,0221	44,2
2,5	25	17	0,0425	0,00177	3,54	18,2871	0,03238	64,8
3	30	19	0,057	0,00238	4,75	18,2871	0,04343	86,9
3,5	35	20	0,07	0,00292	5,83	18,2871	0,05334	106,7
4	40	21	0,084	0,0035	7	18,2871	0,064	128

Elektrot maliyeti

Elektrokoagülasyon prosesinde enerji maliyetinden sonra en önemli maliyet parametresi sarf edilen elektrotların yenilenmesinden kaynaklanan maliyettir.

Elektrokoagülasyon prosesi sırasında elektrot materyallerinde tükenme olmaktadır. Tükenme miktarı devreden geçen akım şiddeti ile orantılıdır. Bu orantı Faraday yasaları ile açıklanmaktadır (Bkz. 3.12).

Yapılan çalışmada elde edilen değerler Denklem 3.12’de yerlerine yazılarak elektrot sarfiyatları hesaplanmıştır. Hesaplanan miktarlar 500 mL’lik atıksuyun arıtılması için harcanan miktarlardır. Bu hesaplama sonra oran orantı kurarak m^3 başına sarf edilen elektrot miktarları hesaplanmıştır. Bulunan değerler elektrot materyali birim fiyatı ile çarpılarak maliyete geçilmiştir.

Elektrot materyalleri birim fiyatları şu şekildedir [61]:

Demir: 1500 TL/ton

Alüminyum: 5000 TL/ton

Mevcut pH aralığında $Fe(OH)_3$ türü baskın olduğundan demirin değeri 3 alınmıştır.

Sonraki sayfalarda 2,5, 5 ve 10 dakika bekletme süreleri için, demir ve alüminyum elektrotların elektrot sarfiyatları ve bu sarfiyatlardan kaynaklanan maliyet ile ilgili hesaplama çizelgeleri verilmiştir.

Çizelge 5. 8. Fe elektrot, t=10 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütlesi (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	55,845	96485	3	0,012	23,15	1500	0,002	3,5
2	0,2	55,845	96485	3	0,023	46,3	1500	0,003	6,9
3	0,3	55,845	96485	3	0,035	69,46	1500	0,005	10,4
4	0,4	55,845	96485	3	0,046	92,61	1500	0,007	13,9
5	0,5	55,845	96485	3	0,058	115,76	1500	0,009	17,4
10	1	55,845	96485	3	0,116	231,52	1500	0,017	34,7
15	1,5	55,845	96485	3	0,174	347,28	1500	0,026	52,1
20	2	55,845	96485	3	0,232	463,04	1500	0,035	69,5
25	2,5	55,845	96485	3	0,289	578,79	1500	0,043	86,8
30	3	55,845	96485	3	0,347	694,55	1500	0,052	104,2
35	3,5	55,845	96485	3	0,405	810,31	1500	0,061	121,5
40	4	55,845	96485	3	0,463	926,07	1500	0,069	138,9

Çizelge 5. 9. Fe elektrot, t=5 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütle (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	55,845	96485	3	0,006	11,6	1500	0,001	1,7
2	0,2	55,845	96485	3	0,012	23,2	1500	0,002	3,5
3	0,3	55,845	96485	3	0,017	34,7	1500	0,003	5,2
4	0,4	55,845	96485	3	0,023	46,3	1500	0,003	6,9
5	0,5	55,845	96485	3	0,029	57,9	1500	0,004	8,7
10	1	55,845	96485	3	0,058	115,8	1500	0,009	17,4
15	1,5	55,845	96485	3	0,087	173,6	1500	0,013	26
20	2	55,845	96485	3	0,116	231,5	1500	0,017	34,7
25	2,5	55,845	96485	3	0,145	289,4	1500	0,022	43,4
30	3	55,845	96485	3	0,174	347,3	1500	0,026	52,1
35	3,5	55,845	96485	3	0,203	405,2	1500	0,03	60,8
40	4	55,845	96485	3	0,232	463	1500	0,035	69,5

Çizelge 5. 10. Fe elektrot, t=2,5 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütle (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	55,845	96485	3	0,003	5,8	1500	0,0004	0,9
2	0,2	55,845	96485	3	0,006	11,6	1500	0,0009	1,7
3	0,3	55,845	96485	3	0,009	17,4	1500	0,0013	2,6
4	0,4	55,845	96485	3	0,012	23,1	1500	0,0017	3,5
5	0,5	55,845	96485	3	0,014	28,9	1500	0,0022	4,3
10	1	55,845	96485	3	0,029	57,9	1500	0,0043	8,7
15	1,5	55,845	96485	3	0,043	86,8	1500	0,0065	13
20	2	55,845	96485	3	0,058	115,7	1500	0,0087	17,4
25	2,5	55,845	96485	3	0,072	144,7	1500	0,0109	21,7
30	3	55,845	96485	3	0,087	173,6	1500	0,013	26
35	3,5	55,845	96485	3	0,101	202,6	1500	0,0152	30,4
40	4	55,845	96485	3	0,116	231,5	1500	0,0174	34,7

Çizelge 5. 11. Al elektrot, t=10 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütle (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	26,9815	96485	3	0,006	11,186	5000	0,003	5,6
2	0,2	26,9815	96485	3	0,011	22,372	5000	0,006	11,2
3	0,3	26,9815	96485	3	0,017	33,557	5000	0,008	16,8
4	0,4	26,9815	96485	3	0,022	44,743	5000	0,011	22,4
5	0,5	26,9815	96485	3	0,028	55,929	5000	0,014	28
10	1	26,9815	96485	3	0,056	111,858	5000	0,028	55,9
15	1,5	26,9815	96485	3	0,084	167,787	5000	0,042	83,9
20	2	26,9815	96485	3	0,112	223,716	5000	0,056	111,9
25	2,5	26,9815	96485	3	0,14	279,645	5000	0,07	139,8
30	3	26,9815	96485	3	0,168	335,573	5000	0,084	167,8
35	3,5	26,9815	96485	3	0,196	391,502	5000	0,098	195,8
40	4	26,9815	96485	3	0,224	447,431	5000	0,112	223,7

Çizelge 5. 12. Al elektrot, t=5 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütle (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	26,9815	96485	3	0,003	5,6	5000	0,001	2,8
2	0,2	26,9815	96485	3	0,006	11,2	5000	0,003	5,6
3	0,3	26,9815	96485	3	0,008	16,8	5000	0,004	8,4
4	0,4	26,9815	96485	3	0,011	22,4	5000	0,006	11,2
5	0,5	26,9815	96485	3	0,014	28	5000	0,007	14
10	1	26,9815	96485	3	0,028	55,9	5000	0,014	28
15	1,5	26,9815	96485	3	0,042	83,9	5000	0,021	41,9
20	2	26,9815	96485	3	0,056	111,9	5000	0,028	55,9
25	2,5	26,9815	96485	3	0,07	139,8	5000	0,035	69,9
30	3	26,9815	96485	3	0,084	167,8	5000	0,042	83,9
35	3,5	26,9815	96485	3	0,098	195,8	5000	0,049	97,9
40	4	26,9815	96485	3	0,112	223,7	5000	0,056	111,9

Çizelge 5. 13. Al elektrot, t=2,5 dk; elektrot maliyeti hesapları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Akım Şiddeti (Amper)	Demirin Molar Kütle (g/mol)	Faraday Sabiti (C/mol)	Değerlik Elektron	Harcanan Kütle (Teorik) (g/500 mL)	Harcanan Kütle (Teorik) (g/m ³)	Birim Fiyat (TL/ton)	Elektrot Maliyet (krş./500 mL)	Elektrot Maliyet (krş./m ³)
1	0,1	26,9815	96485	3	0,001	2,8	5000	0,001	1,4
2	0,2	26,9815	96485	3	0,003	5,6	5000	0,001	2,8
3	0,3	26,9815	96485	3	0,004	8,4	5000	0,002	4,2
4	0,4	26,9815	96485	3	0,006	11,2	5000	0,003	5,6
5	0,5	26,9815	96485	3	0,007	14	5000	0,003	7
10	1	26,9815	96485	3	0,014	28	5000	0,007	14
15	1,5	26,9815	96485	3	0,021	41,9	5000	0,01	21
20	2	26,9815	96485	3	0,028	55,9	5000	0,014	28
25	2,5	26,9815	96485	3	0,035	69,9	5000	0,017	35
30	3	26,9815	96485	3	0,042	83,9	5000	0,021	41,9
35	3,5	26,9815	96485	3	0,049	97,9	5000	0,024	48,9
40	4	26,9815	96485	3	0,056	111,9	5000	0,028	55,9

Toplam maliyet

Çizelge 5.2'den 5.7'ye kadar olan enerji maliyeti çizelgeleri ile Çizelge 5.8'den 5.13'e kadar olan elektrot maliyeti çizelgeleri bütünleştirilmiş, bütünleştirilen maliyet çizelgeleri Çizelge 5.14, Çizelge 5.15, Çizelge 5.16, Çizelge 5.17, Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5. 14. Fe elektrot, t=10 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,001	1,2	0,002	3,5	0,003	4,7
2	0,001	2,4	0,003	6,9	0,004	9,3
3	0,002	4,6	0,005	10,4	0,007	15
4	0,004	7,3	0,007	13,9	0,011	21,2
5	0,005	9,1	0,009	17,4	0,014	26,5
10	0,015	30,5	0,017	34,7	0,032	65,2
15	0,032	64	0,026	52,1	0,058	116,1
20	0,049	97,5	0,035	69,5	0,084	167
25	0,073	146,3	0,043	86,8	0,116	233,1
30	0,088	175,6	0,052	104,2	0,14	279,8
35	0,141	281,6	0,061	121,5	0,202	403,1
40	0,222	443,8	0,069	138,9	0,291	582,7

Çizelge 5. 15. Fe elektrot, t=5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,00015	0,3	0,001	1,7	0,001	2
2	0,00061	1,2	0,002	3,5	0,003	4,7
3	0,00137	2,7	0,003	5,2	0,004	7,9
4	0,00183	3,7	0,003	6,9	0,005	10,6
5	0,00328	6,6	0,004	8,7	0,007	15,3
10	0,00808	16,2	0,009	17,4	0,017	33,6
15	0,01829	36,6	0,013	26	0,031	62,6
20	0,03048	61	0,017	34,7	0,047	95,7
25	0,04572	91,4	0,022	43,4	0,068	134,8
30	0,064	128	0,026	52,1	0,09	180,1
35	0,08161	163,2	0,03	60,8	0,112	224
40	0,10363	207,3	0,035	69,5	0,139	276,8

Çizelge 5. 16. Fe elektrot, t=2,5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,00008	0,2	0,0004	0,9	0,0005	1,1
2	0,0003	0,6	0,0009	1,7	0,0012	2,3
3	0,00069	1,4	0,0013	2,6	0,002	4
4	0,00122	2,4	0,0017	3,5	0,003	5,9
5	0,00152	3	0,0022	4,3	0,0037	7,3
10	0,00571	11,4	0,0043	8,7	0,0101	20,1
15	0,01029	20,6	0,0065	13	0,0168	33,6
20	0,02362	47,2	0,0087	17,4	0,0323	64,6
25	0,03238	64,8	0,0109	21,7	0,0432	86,5
30	0,04572	91,4	0,013	26	0,0587	117,4
35	0,05334	106,7	0,0152	30,4	0,0685	137,1
40	0,06705	134,1	0,0174	34,7	0,0844	168,8

Çizelge 5. 17. Al elektrot, t=10 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,0006	1,2	0,003	5,6	0,003	6,8
2	0,0016	3,2	0,006	11,2	0,007	14,4
3	0,0029	5,9	0,008	16,8	0,011	22,7
4	0,0049	9,8	0,011	22,4	0,016	32,2
5	0,0095	18,9	0,014	28	0,023	46,9
10	0,0244	48,8	0,028	55,9	0,052	104,7
15	0,0494	98,8	0,042	83,9	0,091	182,7
20	0,0805	160,9	0,056	111,9	0,136	272,8
25	0,1021	204,2	0,07	139,8	0,172	344
30	0,1408	281,6	0,084	167,8	0,225	449,4
35	0,1856	371,2	0,098	195,8	0,283	567
40	0,2292	458,4	0,112	223,7	0,341	682,1

Çizelge 5. 18. Al elektrot, t=5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,0004	0,7	0,001	2,8	0,002	3,5
2	0,0011	2,3	0,003	5,6	0,004	7,9
3	0,002	3,9	0,004	8,4	0,006	12,3
4	0,0032	6,5	0,006	11,2	0,009	17,7
5	0,0048	9,6	0,007	14	0,012	23,6
10	0,0137	27,4	0,014	28	0,028	55,4
15	0,0274	54,9	0,021	41,9	0,048	96,8
20	0,0509	101,8	0,028	55,9	0,079	157,7
25	0,0773	154,7	0,035	69,9	0,112	224,6
30	0,1006	201,2	0,042	83,9	0,143	285,1
35	0,1243	248,6	0,049	97,9	0,173	346,5
40	0,1567	313,3	0,056	111,9	0,213	425,2

Çizelge 5. 19. Al elektrot, t=2,5 dk; oluşan toplam maliyet çizelgesi

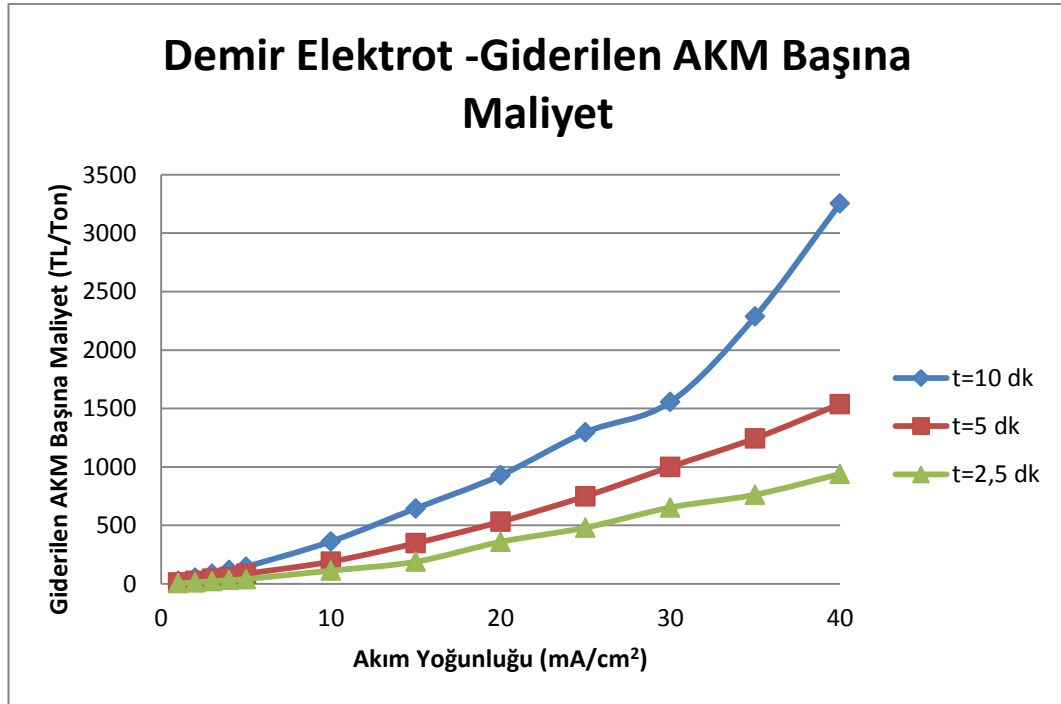
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Enerji Maliyeti (krş./500 mL)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./500 mL)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./500 mL)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
1	0,0001	0,2	0,001	1,4	0,001	1,6
2	0,0003	0,6	0,001	2,8	0,002	3,4
3	0,00069	1,4	0,002	4,2	0,003	5,6
4	0,00137	2,7	0,003	5,6	0,004	8,3
5	0,00229	4,6	0,003	7	0,006	11,6
10	0,00533	10,7	0,007	14	0,012	24,6
15	0,01029	20,6	0,01	21	0,021	41,6
20	0,0221	44,2	0,014	28	0,036	72,2
25	0,03238	64,8	0,017	35	0,05	99,7
30	0,04343	86,9	0,021	41,9	0,064	128,8
35	0,05334	106,7	0,024	48,9	0,078	155,6
40	0,064	128	0,028	55,9	0,092	183,9

Giderilen AKM başına maliyet

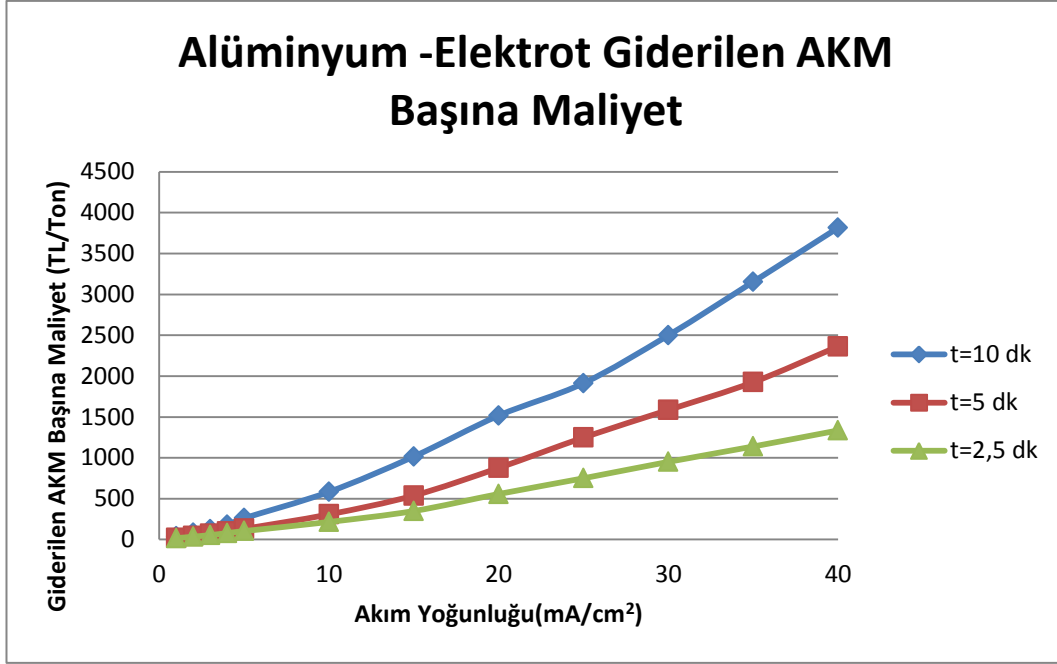
Hangi akım yoğunluğunda, hangi elektrot ile çalışma yapılacağı iki kritere bağlı olarak belirlenir. Bunlardan birincisi, sistemin SKKY’de verilen deşarj kriterlerini sağlayıp sağlamadığıdır. Diğer parametre ise, maliyettir. Yapılan deneylerde verili tüm akım yoğunlukları için sistemin deşarj standartlarını sağladığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, en uygun akım yoğunluğu belirlenirken en önemli kriter maliyet olmaktadır.

Maliyet parametresi ise çeşitli biçimlerde hesaplanabileceği gibi, giderilen AKM kütlesi başına da hesaplanabilir.

Demir ve alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalarda giderilen AKM başına maliyetler sırasıyla Şekil 5.15 ve 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5. 15. Fe elektrot; giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi



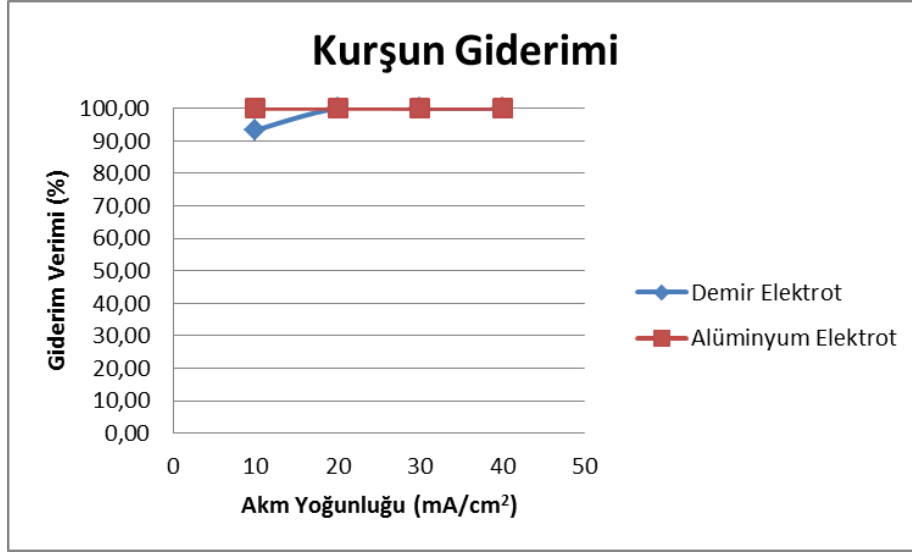
Şekil 5. 16. Al elektrot; giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi

5.1.5. Metal giderimi

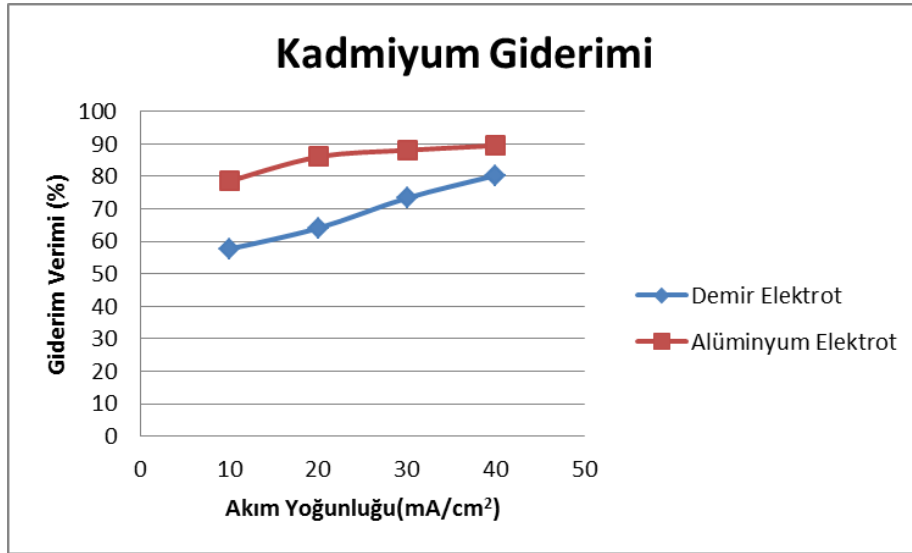
Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğinde seramik endüstrisi atıksuları için kurşun, kadmiyum ve çinko elementleri ile ilgili alıcı ortama deşarj standartları bulunmaktadır. Deşarj edilebilecek konsantrasyonlar bu elementler için sırasıyla 1; 0,1 ve 3 mg/L'dir.

Bilecik il sınırları içerisindeki bir seramik fabrikasından alınan ham atıksuyun kurşun, kadmiyum ve çinko konsantrasyonları sırasıyla 0,11; 0,32 ve 4,88 µg/L olarak ölçülmüştür.

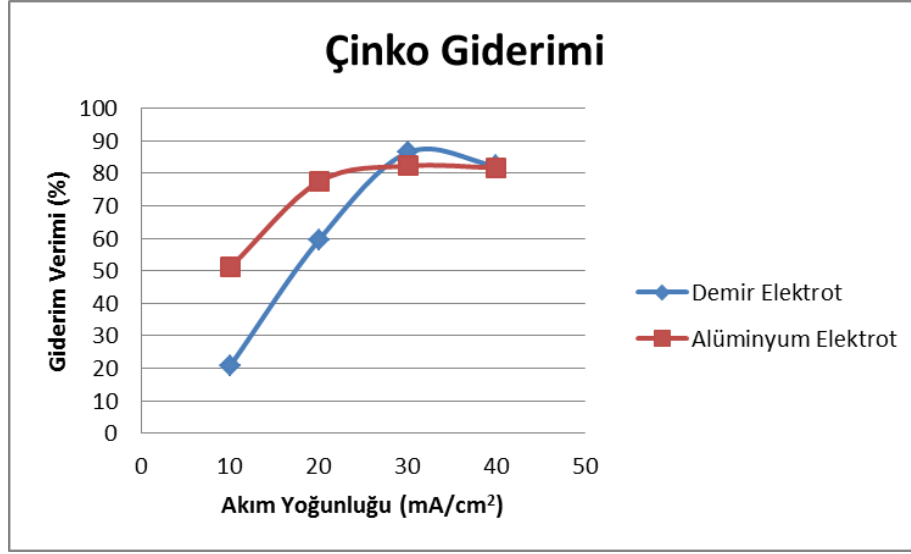
Yapılan çalışmada atık su 1 saat ön çöktürme işleminin ardından, 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunluğunda 2,5 dk süreyle elektrokoagülasyona tabi tutulmuş ve 1 saat çöktürüldükten sonra numune alınarak söz konusu metaller analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucu Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilen grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 5. 17. Kurşun gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi



Şekil 5. 18. Kadmiyum gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi



Şekil 5. 19. Çinko gideriminin akım yoğunluğuna bağlı olarak değişimi

5.1.6. KOİ analiz sonuçları

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği hükümlerine göre seramik endüstrisi atıksularının alıcı ortama KOİ deşarj limiti 80 mg/L'dir. Deneylede kullanılan ham atıksuyun KOİ konsantrasyonu ise 18 mg/L olarak ölçülmüştür.

Yapılan çalışmada atık su 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunluğunda 2,5 dk süreyle elektrokoagülasyona tabi tutulmuş ve 1 saat çöktürüldükten sonra numune alınarak söz konusu KOİ konsantrasyonları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.20'de verilmiştir.

Çizelge 5. 20. KOİ ölçümleri

		Demir Elektrot	Alüminyum Elektrot
	Akım Yoğunluğu	KOİ (mg/L)	KOİ (mg/L)
Ham Atıksu		18,72	18,72
	1	9,36	18,72
	2	0	37,44
	3	0	9,36
	4	9,36	18,72

5.1.7. Zeta potansiyeli analiz sonuçları

Demir elektrotla yapılan çalışmalar

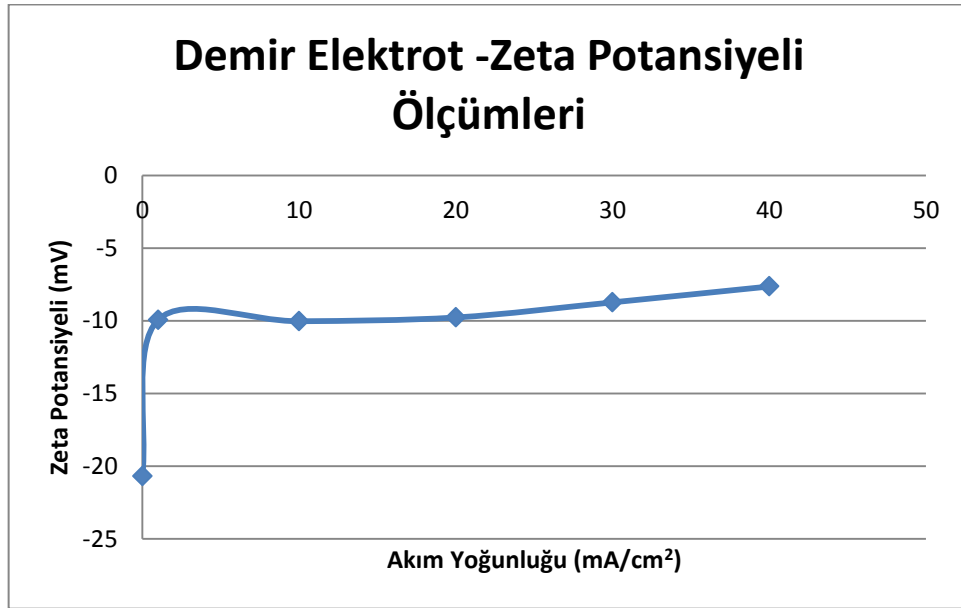
Demir elektrot ile yapılan çalışmada; seramik endüstrisi atıksuyuna 1, 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunlukları ile 2.5 dakika tepkime süresince

elektrokoagülasyon uygulanmış ve 1 saat çöktürmenin ardından zeta potansiyelleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.21’de verilmiştir.

Çizelge 5. 21. Fe elektrotlarla yapılan çalışmada zeta potansiyeli ölçümleri

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Zeta Potansiyeli (mV)
0	-20,7
1	-9,94
10	-10,03
20	-9,77
30	-8,73
40	-7,64

Çizelge 5.21’de verilen değerler Şekil 5.20’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5. 20. Demir elektrot - zeta potansiyeli ölçümleri

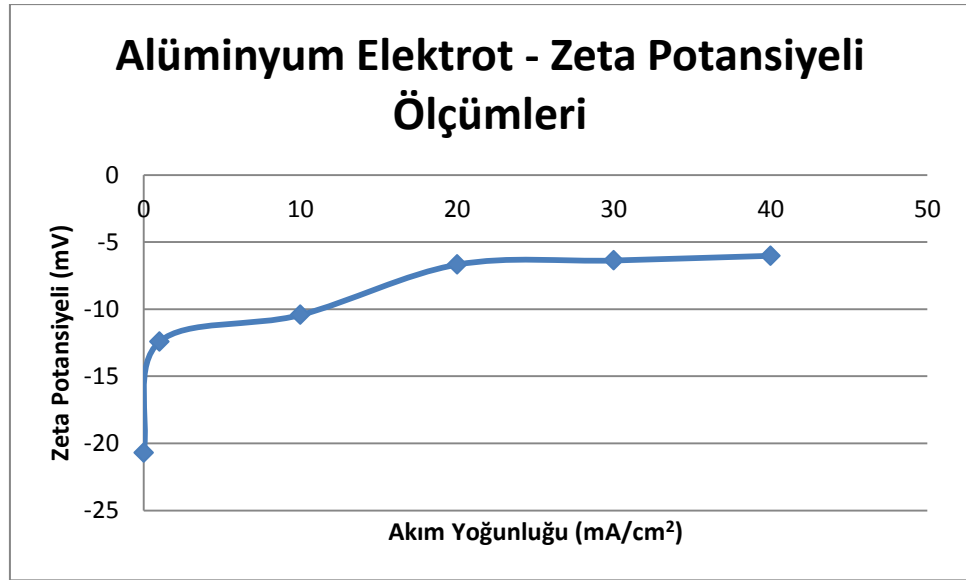
Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmalar

Alüminyum elektrot ile yapılan çalışmada; seramik endüstrisi atıksuyuna 1, 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunlukları ile 2.5 dakika tepkime süresince elektrokoagülasyon uygulanmış ve 1 saat çöktürmenin ardından zeta potansiyelleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5. 22. Al elektrotlarla yapılan çalışmada zeta potansiyeli ölçümleri

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Zeta Potansiyeli (mV)
0	-20,7
1	-12,43
10	-10,43
20	-6,68
30	-6,37
40	-6,02

Çizelge 5.22’de verilen değerler Şekil 5.21’de grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5. 21. Alüminyum elektrot - zeta potansiyeli ölçümleri

5.1.8. pH analiz sonuçları

Ham atıksuyun pH’ı 8,68 olarak ölçülmüş ve elektrokoagülasyon işlemlerinin pH üzerinde büyük bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir. Ham atıksu ve elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılmış atıksular; pH parametresi açısından SKKY alıcı ortam deşarj standartlarına uyum göstermektedir.

5.2. Destek Elektrolit Derişiminin Arıtılabilirliğe Olan Etkisi

Elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtma yapılırken; atıksuyun iletkenliğini arttırarak sistemin daha düşük gerilimlerle aynı akım şiddetine ulaşması için atıksuya destek elektrolit ilave edilebilir. Burada amaç maliyeti düşürmektir.

Seramik endüstrisi atıksularının arıtılmasında destek elektrolit derişiminin arıtılabilirliğe olan etkisini incelemek amacıyla, elektrokoagülasyon düzeneği demir ve alüminyum elektrotlar ile 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 0-8 mM destek elektrolit derişiminde 10 dakika çalıştırılmıştır. Deneylerde destek elektrolit olarak Na₂SO₄ kullanılmıştır. Ham seramik endüstrisi atıksuyunun elektriksel iletkenliği 1568 µS/cm olarak ölçülmüştür.

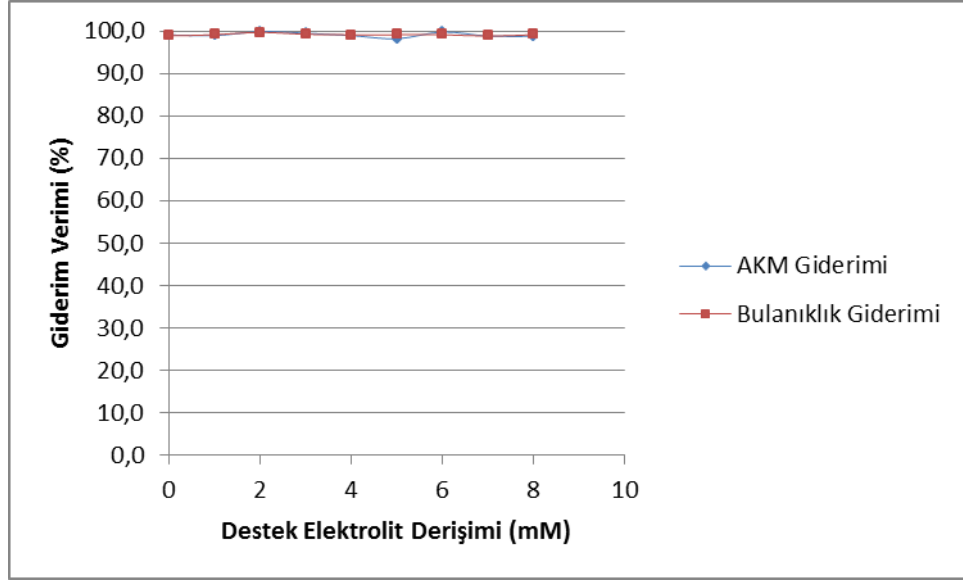
5.2.1. Demir elektrot ile yapılan çalışmalar

Demir elektrotlar ile çalışıldığında destek elektrolit derişimine bağlı olarak bulanıklık ve AKM giderim verimleri Çizelge 5.23'te verilmiştir.

Çizelge 5. 23. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi, giderim verimi ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	AKM Giderimi (%)	Bulanıklık Giderimi (%)
0	99,1	98,9
1	98,9	99,1
2	99,9	99,7
3	99,5	99,2
4	98,9	99,1
5	98,2	99,1
6	99,8	99,1
7	98,8	98,8
8	98,8	99,1

Çizelge 5.23'te verilen bilgiler Şekil 5.22'de grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte giderim veriminin hem AKM hem de bulanıklık parametreleri için %99 mertebesinde olduğu destek elektrolit derişimi ile değişmediği gözlenebilmektedir.



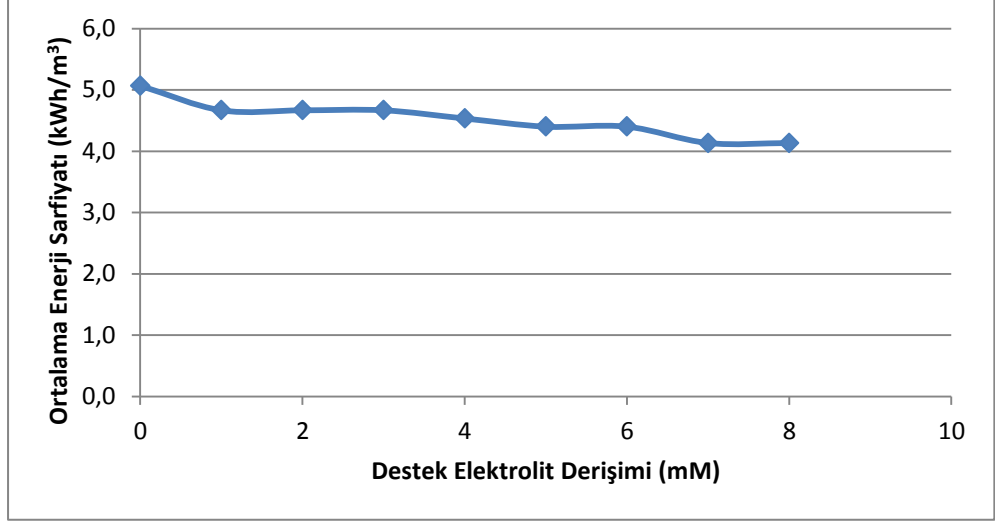
Şekil 5. 22. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi giderim verimi ilişkisi

Çizelge 5.24'te destek elektrolit derişimine bağı olarak enerji sarfiyatlarının değişimi verilmiştir.

Çizelge 5. 24. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	Akım Şiddeti (A)	Ortalama Gerilim (V)	Ortalama Güç (kW)	Zaman (dk)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/500 ml)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/m ³)
0	2	7,6	0,0152	10	0,003	5,1
1	2	7	0,014	10	0,002	4,7
2	2	7	0,014	10	0,002	4,7
3	2	7	0,014	10	0,002	4,7
4	2	6,8	0,0136	10	0,002	4,5
5	2	6,6	0,0132	10	0,002	4,4
6	2	6,6	0,0132	10	0,002	4,4
7	2	6,2	0,0124	10	0,002	4,1
8	2	6,2	0,0124	10	0,002	4,1

Çizelge 5.24'te verilen bilgiler Şekil 5.23'te grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte destek elektrolit derişimine bağı olarak m³ su başına harcanan enerjide kısmi bir düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 23. Fe elektrot destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi

Demir elektrotlar 2 A ile 10 dk boyunca çalıştırıldığında m^3 atık su başına 69,5 krş. elektrot maliyeti oluştuğu daha önce hesaplanmıştı. Akım şiddeti ve tepkime süresi değişmediği için, harcanan elektrot maliyeti bu deney düzeneği için de aynıdır.

Destek elektrolit derişimine bağlı olarak değişen toplam maliyet Çizelge 5.25'te verilmiştir.

Çizelge 5. 25. Fe elektrot; destek elektrolit derişimi toplam maliyet ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/m³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./m³)	Elektrot Maliyeti (krş./m³)	Toplam Maliyet (krş./m³)
0	5,1	18,3	93	69,5	162
1	4,7	18,3	85	69,5	155
2	4,7	18,3	85	69,5	155
3	4,7	18,3	85	69,5	155
4	4,5	18,3	83	69,5	152
5	4,4	18,3	80	69,5	150
6	4,4	18,3	80	69,5	150
7	4,1	18,3	76	69,5	145
8	4,1	18,3	76	69,5	145

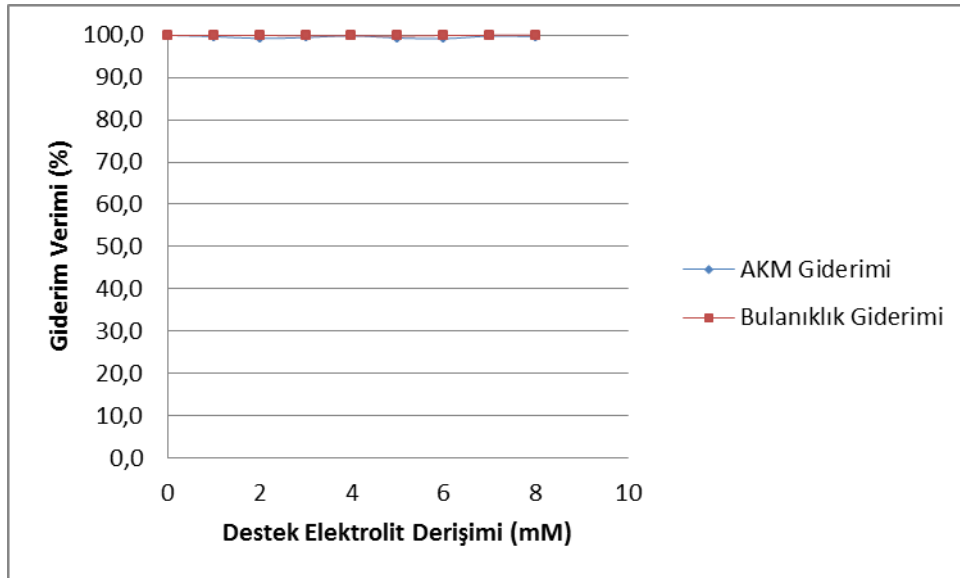
5.2.2. Alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalar

Alüminyum elektrotlar ile çalışıldığında destek elektrolit derişimine bağı olarak bulanıklık ve AKM giderim verimleri Çizelge 5.26'da verilmiştir.

Çizelge 5. 26. Al elektrot; destek elektrolit derişimi, giderim verimi ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	AKM Giderimi (%)	Bulanıklık Giderimi (%)
0	99,9	99,90
1	99,7	99,91
2	99,2	99,96
3	99,4	99,81
4	99,8	99,91
5	99,3	99,76
6	99,2	99,94
7	99,8	99,97
8	99,7	99,97

Çizelge 5.26'da verilen bilgiler Şekil 5.24'te grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte giderim veriminin hem AKM hem de bulanıklık parametreleri için %99 mertebesinde olduğu destek elektrolit derişimi ile değişmediği gözlenebilmektedir.



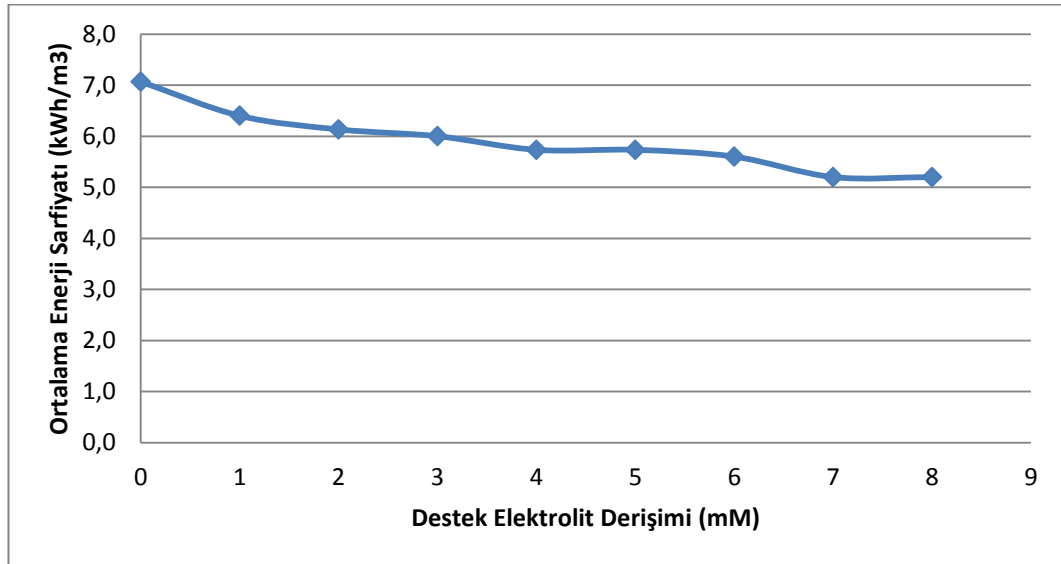
Şekil 5. 24. Al elektrot; destek elektrolit derişimi giderim verimi ilişkisi

Çizelge 5.27’de destek elektrolit derişimine bağlı olarak enerji sarfiyatlarının değişimi verilmiştir.

Çizelge 5. 27. Al elektrot; destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	Akım Şiddeti (A)	Ortalama Gerilim (V)	Ortalama Güç (kW)	Zaman (dk)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/500 ml)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/m ³)
0	2	10,6	0,0212	10	0,004	7,1
1	2	9,6	0,0192	10	0,003	6,4
2	2	9,2	0,0184	10	0,003	6,1
3	2	9	0,018	10	0,003	6,0
4	2	8,6	0,0172	10	0,003	5,7
5	2	8,6	0,0172	10	0,003	5,7
6	2	8,4	0,0168	10	0,003	5,6
7	2	7,8	0,0156	10	0,003	5,2
8	2	7,8	0,0156	10	0,003	5,2

Çizelge 5.27’de verilen bilgiler Şekil 5.25’te grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafikte destek elektrolit derişimine bağlı olarak m³ su başına harcanan enerjide kısmi bir düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 25. Al elektrot destek elektrolit derişimi enerji sarfiyatı ilişkisi

Alüminyum elektrotlar 2 A ile 10 dk boyunca çalıştırıldığında m³ atık su başına 111,9 krş. elektrot maliyeti oluştuğu daha önce hesaplanmıştır. Akım şiddeti

ve tepkime süresi değişmediği için, harcanan elektrot maliyeti bu deney düzeneği için de aynıdır.

Destek elektrolit derişimine bağı olarak değişen toplam maliyet Çizelge 5.28’de verilmiştir.

Çizelge 5. 28. Al elektrot; destek elektrolit derişimi toplam maliyet ilişkisi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	Ortalama Enerji Sarfiyatı (kWh/m ³)	Birim Enerji Fiyatı (krş./kWh)	Enerji Maliyeti (krş./m ³)	Elektrot Maliyeti (krş./m ³)	Toplam Maliyet (krş./m ³)
0	7,1	18,3	129	111,9	241
1	6,4	18,3	117	111,9	229
2	6,1	18,3	112	111,9	224
3	6,0	18,3	110	111,9	222
4	5,7	18,3	105	111,9	217
5	5,7	18,3	105	111,9	217
6	5,6	18,3	102	111,9	214
7	5,2	18,3	95	111,9	207
8	5,2	18,3	95	111,9	207

5.2.3. Destek elektrolit maliyeti

Seramik endüstrisi atıksuyunun arıtılması ile ilgili yapılan çalışmada destek elektrolit olarak Na₂SO₄ kullanılmıştır. Na₂SO₄’ün 1 molünün kütlesi 142,04 g’dır. 1 ton Na₂SO₄ fiyatı 4000 TL’dir [62]. Çizelge 5.29’da destek elektrolit derişimine bağı olarak sisteme eklenen Na₂SO₄’ün maliyet hesapları bulunmaktadır.

Çizelge 5. 29. Destek elektrolit derişimi maliyet ilişkisi

Derişim (mM)	mol/m ³	g/mol	g/m ³	ton/m ³	TL/ton	TL/m ³
0	0	142,04	0	0	4000	0
1	1	142,04	142,04	0,0001	4000	0,6
2	2	142,04	284,08	0,0003	4000	1,1
3	3	142,04	426,12	0,0004	4000	1,7
4	4	142,04	568,16	0,0006	4000	2,3
5	5	142,04	710,20	0,0007	4000	2,8
6	6	142,04	852,24	0,0009	4000	3,4
7	7	142,04	994,28	0,0010	4000	4,0
8	8	142,04	1136,32	0,0011	4000	4,5

Hangi destek elektrolit derişimi ile çalışılacağıının belirlenmesinde en önemli parametre maliyettir. Demir ve alüminyum elektrotlar ile çalışıldığında destek elektrolit derişimine bağılı olarak gözlenen maliyet düşüşünün, destek elektrolit derişimine bağılı olarak gerçekleşen maliyet artışı ile karşılaştırılması gerekmektedir.

Yapılan çalışmalarda;

- Destek elektrolitsiz çalıştırılan sistemin toplam maliyetini referans kabul ederek, her destek elektrolit derişiminde sistemin maliyetinde ne kadar düşüş olduğu hesaplanmıştır.
- Kullanılan destek elektrolitin sisteme getirdiğı ek kimyasal maliyeti hesaplanmıştır.
- Ek kimyasal maliyeti ile toplam maliyet düşüşünün farkı alınarak maliyet farkı hesaplanmıştır.
- Maliyet farkının en küçük değeri verdiği destek elektrolit derişimi, sistemi çalıştırmak için en uygun değer olarak belirlenmiştir.

Demir Elektrotlar ile Çalışıldığında En Uygun Destek Elektrolit Derişiminin Belirlenmesi

Demir elektrotlar ile çalışıldığında en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi amacıyla, belirtilen hesaplama adımları uyarınca Çizelge 5.30 oluşturulmuştur.

Çizelge 5. 30. Fe elektrot; en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	ToplamMaliyet (TL/m ³)	ToplamMaliyet Düşüşü (TL/m ³)	Kimyasal Maliyeti Artışı (TL/m ³)	Maliyet Farkı (TL/m ³)
0	1,62	0,00	0,00	0,00
1	1,55	0,07	0,57	0,50
2	1,55	0,07	1,14	1,06
3	1,55	0,07	1,70	1,63
4	1,52	0,10	2,27	2,18
5	1,50	0,12	2,84	2,72
6	1,50	0,12	3,41	3,29
7	1,45	0,17	3,98	3,81
8	1,45	0,17	4,55	4,37

Yapılan çalışmalar sonucunda demir elektrotlar ile seramik endüstrisi atıksuyu arıtılırken, destek elektrolit kullanmamanın en doğru seçenek olduğu ortaya çıkmıştır. Destek elektrolit derişimi arttıkça arıtma maliyeti artmaktadır.

Alüminyum Elektrotlar ile Çalışıldığında En Uygun Destek Elektrolit Derişiminin Belirlenmesi

Alüminyum elektrotlar ile çalışıldığında en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi amacıyla, belirtilen hesaplama adımları uyarınca Çizelge 5.31 oluşturulmuştur.

Çizelge 5. 31. Al elektrot; en uygun destek elektrolit derişiminin belirlenmesi

Destek Elektrolit Derişimi (mM)	ToplamMaliyet (TL/m ³)	ToplamMaliyet Düşüşü (TL/m ³)	Kimyasal Maliyeti Artışı (TL/m ³)	Maliyet Farkı (TL/m ³)
0	2,41	0,00	0,00	0,00
1	2,29	0,12	0,57	0,45
2	2,24	0,17	1,14	0,97
3	2,22	0,20	1,70	1,51
4	2,17	0,24	2,27	2,03
5	2,17	0,24	2,84	2,60
6	2,14	0,27	3,41	3,14
7	2,07	0,34	3,98	3,64
8	2,07	0,34	4,55	4,20

Yapılan çalışmalar sonucunda alüminyum elektrotlar ile seramik endüstrisi atıksuyu arıtılırken, destek elektrolit kullanmamanın en doğru seçenek olduğu ortaya çıkmıştır. Destek elektrolit derişimi arttıkça arıtma maliyeti artmaktadır.

5.3. Elektrot Tipinin Arıtılabilirliğe Olan Etkisi

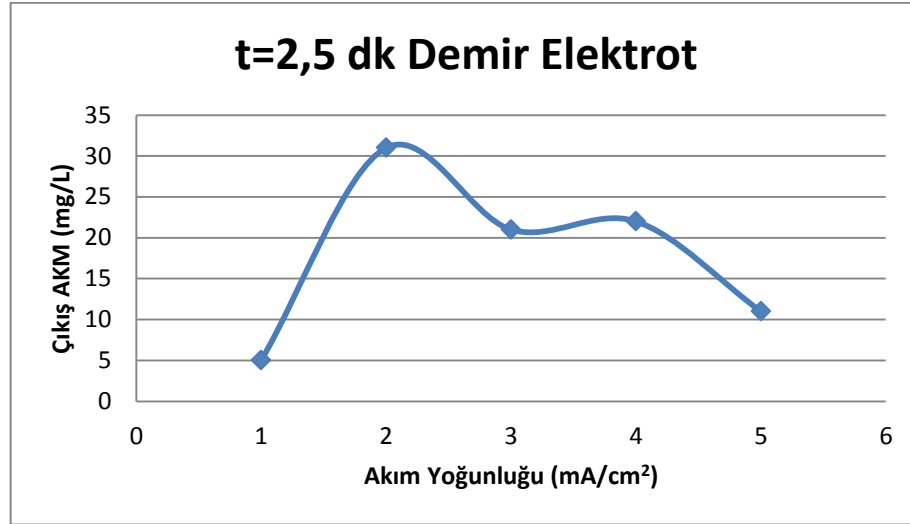
Elektrot tipinin arıtılabilirliğe olan etkisini incelemek amacıyla yapılan deneyler yeniden değerlendirilmiştir. SKKY deşarj standartlarına uymayan tek parametre AKM olduğu için, AKM giderimi üzerinden karşılaştırma yapılması doğru olur. Çalışmada, çalışılan en düşük akım yoğunlukları ve çalışılan en kısa tepkime süreleri de dahil olmak üzere, AKM deşarj standardının sağlandığı belirlenmiştir.

Demir elektrotlar ile 1 , 2 , 3, 4 ve 5 mA/cm² akım yoğunluğunda t=2,5 dk tepkime süresi ile çalışıldığında akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM çıkış konsantrasyonu Çizelge 5.32’de verilmiştir.

Çizelge 5. 32. Fe elektrot, t=2,5 dk; AKM çıkış konsantrasyonları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Çıkış AKM (mg/L)
1	5
2	31
3	21
4	22
5	11

Çizelge 5.32’de verilen bilgiler Şekil 5.26’da grafiğe aktarılmıştır.



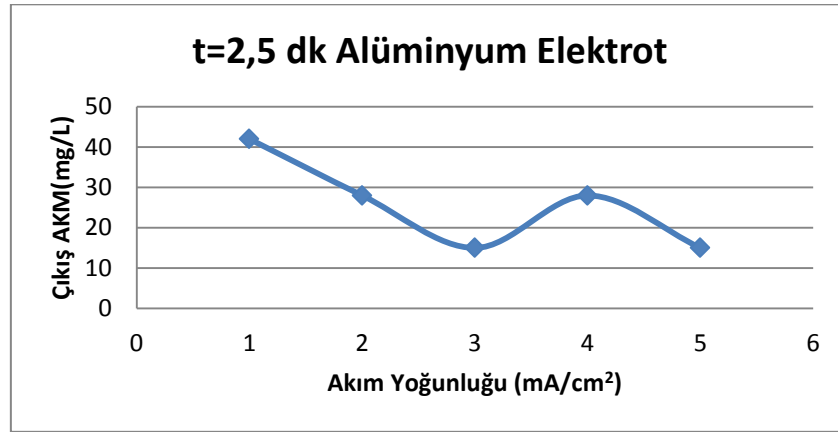
Şekil 5. 26. Fe elektrot, t=2,5 dk; akım yoğunluğu, AKM çıkış derişimi ilişkisi

Alüminyum elektrotlar ile 1 , 2 , 3, 4 ve 5 mA/cm² akım yoğunluğunda t=2,5 dk tepkime süresi ile çalışıldığında akım yoğunluğuna bağlı olarak AKM çıkış konsantrasyonu Çizelge 5.33’te verilmiştir.

Çizelge 5. 33. Al elektrot, t=2,5 dk; AKM çıkış konsantrasyonları

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Çıkış AKM (mg/L)
1	42
2	28
3	15
4	28
5	15

Çizelge 5.33'te verilen bilgiler Şekil 5.27'de grafiğe aktarılmıştır.



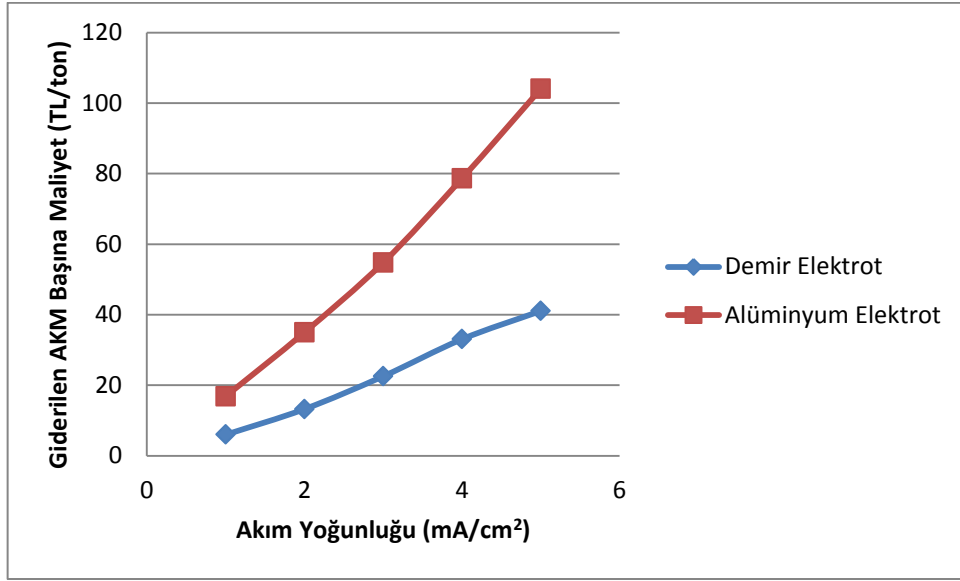
Şekil 5. 27. Al elektrot, t=2,5 dk; akım yoğunluğu, AKM çıkış derişimi ilişkisi

Demir ve alüminyum elektrotlar ile arıtılan atıksuların giderim verimleri karşılaştırıldığında demir elektrotun daha iyi giderim yaptığı grafiklerden anlaşılmaktadır. Ekonomik açıdan hangi elektrot tipinin daha avantajlı olduğunu tespit etmek için söz konusu akım yoğunlukları için giderilen AKM başına maliyetler hesaplanmış ve Çizelge 5.34'te verilmiştir.

Çizelge 5. 34. t=2,5 dk tepkime süresi için giderilen AKM başına maliyetler

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Demir Elektrot Giderilen AKM Başına Maliyet (TL/ton AKM)	Alüminyum Elektrot Giderilen AKM Başına Maliyet (TL/ton AKM)
1	5,95	16,82
2	13,21	34,95
3	22,51	54,73
4	33,03	78,59
5	41,03	103,99

Çizelge 5.34'te verilen bilgiler Şekil 5.28'de grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 5. 28. Giderilen AKM başına maliyet, akım yoğunluğu ilişkisi

Şekil ve çizelgelerden; demir elektrotun alüminyum elektrota göre, hem giderim veriminin daha iyi olduğu hem de söz konusu akım yoğunluklarında daha ekonomik olduğu sonucuna varılabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması konulu çalışmada; Bilecik il sınırlarındaki bir seramik fabrikasından alınan atıksu numunesinin elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması sırasında akım yoğunluğu, destek elektrolit derişimi ve elektrot tipinin etkileri incelenmiştir.

Akım yoğunluğunun arıtılabilirliğe etkisinin incelendiği çalışmada; demir ve alüminyum elektrotlar ile 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mA/cm² akım yoğunluklarında, 2,5, 5 ve 10 dakika tepkime süresince çalışma yapılmıştır. Dene sonuçlarına göre, bütün akım yoğunluklarında SKKY'de verilen alıcı ortama deşarj standardı sağlanmaktadır. Akım yoğunluğunun arttırılması giderim veriminde önemli bir yükselişe sebep olmamaktadır. Bunun nedeni, ham atıksuyun zeta potansiyelinin -20,7 mV olması; yani durağan aralıkta olmamasıdır [63]. Başka bir deyişle, üzerine çalışılan atıksu kolayca çökelebilen bir atıksudur. Bu durumda, ekonomik açıdan uygulanabilir yöntem 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 2,5 dakika tepkime süresince çalışmaktır. 1 mA/cm² akım yoğunluğunda 2,5 dakika elektrokoagülasyon uygulandığında atıksuyun zeta potansiyeli demir ve alüminyum elektrot için sırasıyla -9,94 mV ve -12,43 mV olmaktadır. Yani atıksu daha kolay çökebilir hale gelmektedir.

Ham atıksuda alıcı ortama deşarj standartlarının altında olan kurşun, kadmiyum ve çinko elementleri için 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunluğunda 2,5 dakika süresince elektrokoagülasyon uygulanmış ve giderim veriminin akım yoğunluğu ile ilişkili olarak arttığı tespit edilmiştir. Kadmiyumda % 80, çinkoda %86 ve Kurşunda %99 üzerinde giderim gerçekleştirilmiştir.

Ham atıksuda alıcı ortam deşarj standardının altında olan bir diğer parametre KOİ'dir. KOİ için de 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² akım yoğunluklarında 2,5 dakika süresince elektrokoagülasyon uygulanmıştır. Çok düşük değerlerde bulunan KOİ'nin işlem sonucunda yine alıcı ortam deşarj standartlarının altında olduğu tespit edilmiştir.

Destek elektrolit derişiminin arıtılabilirliğe olan etkisinin incelendiği çalışmada; atıksuya 20 mA/cm² akım yoğunluğu ile 10 dakika tepkime süresi boyunca sistemin elektrolit derişimi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 mM'ye ayarlanarak elektrokoagülasyon uygulanmıştır. Sistemin enerji gereksinimi ilk durumda kısmi

düşüşe uğramış, destek elektrolit derişimi arttıkça düşüş daha da yavaşlamıştır. Bu durumun nedeni olarak atıksuyun ilk iletkenliğinin zaten çok yüksek bir değer olan 1568 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olması gösterilebilir. Toplam maliyet kalemindeki düşüş ile söz konusu destek elektrolit derişimini elde etmek için oluşacak maliyet artışı birbirleri ile karşılaştırılarak en uygun destek elektrolit derişimi belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda sistemi destek elektrolitsiz çalıştırmanın ekonomik olarak en uygun durum olduğu, sistemdeki destek elektrolit derişimi arttıkça arıtım maliyetinin arttığı tespit edilmiştir.

Elektrot tipinin arıtılabilirliğe olan etkisinin incelendiği çalışmada 1, 2, 3, 4 ve 5 mA/cm^2 akım yoğunlukları için demir ve alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmaların AKM giderim miktarı başına maliyetleri karşılaştırılmıştır. Demir elektrotun daha iyi bir alternatif olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmaların bir parçası olarak elektrokoagülasyonun parçacık boyut dağılımına etkisi incelenmiş ve boyut ölçümleri SEM cihazı ile yapılan görüntüleme ile karşılaştırılarak sonuçlar EK-5'te verilmiştir. Sonuçlara göre; ham atıksuda 8 μm mertebesinde olan ortalama parçacık boyutu (d_{50}), elektrokoagülasyon sonucu çöktürmenin ardından, demir elektrot ile yapılan çalışmalarda 4 μm mertebesine, alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalarda ise 5 μm mertebesine inmektedir. EK 5'teki verilere göre parçacık boyut ölçümleri ile SEM görüntülerinin birbirleri ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan tüm çalışmalarda; elektrokoagülasyon yönteminin seramik endüstrisi atıksularının arıtımında mevcut yöntemlere iyi bir alternatif olabileceği tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar laboratuvar ölçekli olup, pilot ölçekli ve tam ölçekli sistemlerde denenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sümer, G., “Seramik Sanayinde Üretim Teknolojisi”, *Madencilik Dergisi*, 15, 3, 37-43, 1976
- [2] Şahin, Ü., Elmaslar, E., Tüfekçi N. ve Bayat, C., “Seramik Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtılabilirliği”, *Ulusal Su Günleri*, Trabzon, 2005.
- [3] Erman, D. O., “Türk Seramik Sanatının Gelişimi: Toprağın Ateşle Dansı” *Acta Turcica*, 4, 3, 18-33, 2012.
- [4] Mutlu, H. S., “Zamanın Çarkında Anadolu'da Seramik”, *Anadolu Sanat*, 18, 2007.
- [5] Agrafiotis, C. ve Tsoutsos T., “Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review”, *Applied Thermal Engineering*, 21, 12, 1231-1249, 2001.
- [6] Saatçioğlu, G., *Türk Seramik Sanayi 1990-2009 Yılları*, Türkiye Seramik Federasyonu Raporu, İstanbul, 2010.
- [7] Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, *Türkiye Seramik Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı*, 2012.
- [8] Çimento, Cam, Seramik ve Toprak İhracatçıları Birliği, *Seramik Sektörü 2013 Yılı Değerlendirmesi*, 2014.
- [9] ODTÜ İşletme Topluluğu, *Yıldız Sektörler Projesi 1- Bizim Topraklarımızdan Seramik (Seramik Sektörü Kitapçığı)*, 2000.
- [10] Mihail, M., “Researches on Removal of Colloidal Matter From Wastewater Produced in Sanitary Porcelain Ware and Ceramic Industry” *Water Research Pergamon Press*, 6, 8, 951-958, 1972.
- [11] Dinçer, A. R., ve Kargı, F., “Seramik Endüstrisi Atıksularının Özellikleri ve Biyolojik Arıtılabilirliği” *Çevre Bilim&Teknoloji*, 1, 1, 24-28, 2000.
- [12] Teo, P.T., Abu Seman, A., Basu, P., ve Sharif, N. M., “Recycling of Malaysia’s electric arc furnace (EAF) slag waste into heavy-duty green ceramic tile”, *Waste Management*, 34, 12, 2697–2708, 2014.
- [13] Zhang, X., Ma, G., Jin, Y., ve Cheng, P., “Preparation of ceramic tiles with black pigments using stainless steel plant dust as a raw material”, *Ceramics*

International, 40, 7, 9693–9700, 2014.

- [14] Aküzüm, T., Çakmak, B., ve Zeki G., “Türkiye’de Su Kaynakları Yönetiminin Değerlendirilmesi” *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1, 3, 67-74, 2010.
- [15] Özcan,E., *Türkiye’de Atıksu Yönetimi*,2014.
<http://www.csb.gov.tr/db/tay/webmenu/webmenu13378.pdf>.
- [16] Ayaz, S., *Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Projesi Sakarya Havzası*, T.C. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, 2013.
- [17] Samsunlu, A., *Çevre Mühendisliği Kimyası*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2013.
- [18] Reynolds T. ve Richards P., *Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler*, Efil Yayınevi, Ankara, 2011.
- [19] Chaturvedi, S. I., “Mercury Removal Using Fe-Fe Electrodes by Electrocoagulation”, *IJMER*, 3, 1, 101-108, 2013.
- [20] Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya E. ve Gönüllü, M. T., “Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması”, *TÜRKAY 2007*, İstanbul, 2007.
- [21] Zhao, J., Li, W., Jiao, X., Yanping, L. ve Guo, X., “Floc growth kinetics in magnesium hydroxide coagulation process”, *Desalination and Water Treatment*, 52, 22-24, 4334-4341, 2014.
- [22] Bazrafshan, E., Ownagh, K. A., ve Mahvi, A. H., “Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminium Electrodes for Flouride Removal from Aqueous Environment”, *E-J. Chem*, 9, 4, 2297-2308, 2012.
- [23] Bakır Ögütveren Ü., Koparal S. A., Albek E., Yavuz Y., Banar M., Albek M., Tezcan Ün Ü., Gerçel Ö., Önder E. ve Bayrakçı Karel F., *Süt ve Süt Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılması*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2007.
- [24] Liu, H., Zhao, X. ve Jiuhui, Q., *Electrocoagulation in Water Treatment, Electrochemistry for The Environment* (Ed: Comninellis, C. ve Chen, G.) , Springer, Newyork, A.B.D., 245-261, 2010.
- [25] Torres-Sánchez, A. L., López-Cervera, S. J., de la Rosa, C., Maldonado-

- Vega, M., Maldonado-Santoyo, M. ve Peralta-Hernández, J. M., “Electrocoagulation Process Coupled with Advance Oxidation Techniques to Treatment of Dairy Industry Wastewater”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9, 6103-6112, 2014.
- [26] Yavuz, Y., “EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater”, *Separation and Purification Technology*, 53, 1, 135-140, 2007.
- [27] Vázquez, A., Rodríguez I. ve Lázaro, I., “Primary potential and current density distribution analysis: A first approach for designing electrocoagulation reactors”, *Chemical Engineering Journal*, 179, 253–261, 2012.
- [28] Akarsu, C., Taner, F. ve Ayol, A., “Sızıntı Suyunun Elektrooksidasyon Prosesi İle Arıtılması”, *ISEM2014*, Adıyaman, 2014.
- [29] Huitle, C. A. M., *Direct and Indirect Electrochemical Oxidation of Organic Pollutants*, Doktora Tezi, University of Ferrera, Chemical Sciences, Ferrera, 2004.
- [30] Khin, M. M., Nayir, S. A., Babuu, J. V., Murugan, R. ve Ramakrishna, R., “A review on nanomaterials for environmental remediation”, *Energy Environ. Sci.*, 5, 8075-8109, 2012.
- [31] Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Belkada, R. ve Miroud, D., “Simultaneous removal of chromium(VI) and fluoride by electrocoagulation–electroflotation: Application of a hybrid Fe-Al anode”, *Chemical Engineering Journal*, 267, 153-162, 2015.
- [32] Lu, J., Li, Y., Yin, M., Ma, X. ve Lin, S., “Removing heavy metal ions with continuous aluminum electrocoagulation: A study on back mixing and utilization rate of electro-generated Al ions”, *Chemical Engineering Journal*, 267, 86-92, 2015.
- [33] Yang, T., Qiao, B., Li, G. C. ve Yang, Q.Y., “Improving performance of dynamic membrane assisted by electrocoagulation for treatment of oily wastewater: Effect of electrolytic conditions”, *Desalination*, 363, 134–143, 2015.
- [34] Gatsios, E., Hahladakis, J. N. ve Gidarakos, E., “Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals”, *Journal of Environmental Management*, 154, 117–127, 2015.

- [35] Dastyar, W., Amani, T. ve Elyasi, S., “Investigation of affecting parameters on treating high-strength compost leachate in a hybrid EGSB and fixed-bed reactor followed by electrocoagulation–flotation process”, *Process Safety and Environmental Protection*, 95, 1–11, 2015.
- [36] Carvalho, H. P., Huang, J., Zhao, M., Liu, G., Dong L. ve Liu, X., “Improvement of Methylene Blue removal by electrocoagulation/banana peel adsorption coupling in a batch system”, *Alexandria Engineering Journal*, 54, 3, 777-786, 2015.
- [37] Ulu, F., Barışçı, S., Koby M. ve Sillanpää, M., “An evaluation on different origins of natural organic matters using various anodes by electrocoagulation”, *Chemosphere*, 125, 108-114, 2015.
- [38] Tak, B., Tak, B., Kim, Y., Park, Y., Yoon, Y. ve Min, G., “Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box–Behnken design (BBD)”, 28, 307-315, 2015.
- [39] Ghanbari, F. ve Moradi, M., “A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 1, 499–506, 2015.
- [40] Prica, M., Adamovic, S., Dalmacija, B., Rajic, L., Trickovic, J., Rapajic, S., ve Becelic-Tomin, M., “The electrocoagulation/flotation study: The removal of heavy metals from the waste fountain solution”, *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 262-273, 2015.
- [41] Palahouane, B., Drouiche, N., Aoudj, S. ve Bensadok, K., “Cost-effective electrocoagulation process for the remediation of fluoride from pretreated photovoltaic wastewater”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 22, 127-131, 2015.
- [42] Barışçı, S., Ulu, F., Sillanpää, M., ve Dimoglo, A., “Evaluation of flurbiprofen removal from aqueous solution by electrosynthesized ferrate(VI) ion and electrocoagulation process”, *Chemical Engineering Journal*, 262, 1212-1225, 2015.
- [43] Esmaeilirad, N., Carlson, K. ve Ozbek, P. O., “Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produced water”, *Journal of Hazardous Materials*, 283, 721–729, 2015.

- [44] Yang, Z., Xu, H., Zeng, G., Luo, Y., Yang, X., Huang, J., Wang, L. ve Song, P., “The behavior of dissolution/passivation and the transformation of passive films during electrocoagulation: Influences of initial pH, Cr(VI) concentration, and alternating pulsed current”, *Electrochimica Acta*, 153, 149-158, 2015.
- [45] Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R. ve Alkasrawi, M., “Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance”, *Chemical Engineering Journal*, 260, 749–756, 2015.
- [46] Kamaraj, R. ve Vasudevan, S., “Evaluation of electrocoagulation process for the removal of strontium and cesium from aqueous solution”, *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 522–530, 2015.
- [47] Tezcan Un, U., Kandemir, A., Erginel, N. ve Ocal, S. E., “Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology”, *Journal of Environmental Management*, 146, 245–250, 2014.
- [48] Zewail, T. ve Yousef, N., “Chromium ions (Cr⁶⁺ & Cr³⁺) removal from synthetic wastewater by electrocoagulation using vertical expanded Fe anode”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 735, 123–128, 2014.
- [49] Kobya, M., Oncel, M., Demirbas, E., Şık, E., Akyol, A. ve Ince, M., “The application of electrocoagulation process for treatment of the red mud dam wastewater from Bayer’s process”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 4, 2211–2220, 2014.
- [50] Hamdan, S. S. ve El-Naas, M. H., “An electrocoagulation column (ECC) for groundwater purification”, *Journal of Water Process Engineering*, 4, 25–30, 2014.
- [51] Millar, G. J., Lin, J., Arshad, A. ve Couperthwaite, S. J., “Evaluation of electrocoagulation for the pre-treatment of coal seam water”, *Journal of Water Process Engineering*, 4, 166–178, 2014.
- [52] Solak, M., Kılıç, M., Yazıcı, H. ve Şencan, A., “Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: Comparison of electrode materials and electrode connection systems”, *Journal of Hazardous Materials*, 172, 1, 245-352, 2009.

- [53] Holt, P., Barton, G., Wark, M. ve Mitchell, C., “A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211, 2-3, 233-248, 2002.
- [54] Corbitt, R. A., *Standard Handbook of Environmental Engineering*, McGraw-Hill, Newyork, A.B.D., 2004.
- [55] Pierce, J. J., Weiner, R. F. ve Vesilind, P. A., *Environmental Pollution and Control*, Butterworth-Heinemann, Woburn, A.B.D., 1997.
- [56] Gaur, R. C., *Basic Environmental Engineering*, New Age International, Yeni Delhi, Hindistan, 2008.
- [57] Ray, B. T., *Environmental Engineering*, PWS Publishing Company, Boston, A.B.D., 1995.
- [58] Sağlam, N., ve Cihangir, N., “Ağır Metallerin Biyolojik Süreçlerle Biyosorpsiyonu Çalışmaları”, *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 11, 157-161, 1995.
- [59] Özer, M. ve Orhan, M., “Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Lazer Kırınım Yöntemiyle Belirlenmesi” *Politeknik Dergisi*, 10, 3, 331-337, 2007.
- [60] EPDK, *01/04/2015 Tarihinden İtibaren Geçerli Olacak Tarife Tabloları*, 2015,
http://www.epdk.gov.tr/templates/epdk_2/html/com_fabrik/images/xls.png.
- [61] Anonim, *Piyasa Fiyatları*, 2015, <http://www.demirhaber.com>.
- [62] Molar Kimyevi Maddeler Paz. Tic., *Sodyum Sülfat Ürün Kodu: t-170560*, 2015, <http://www.hammaddefiyatlari.com/icerik/sodyum-sulfat-2252>.
- [63] Larsson, M., Hill A. ve Duffy, J. “Suspension Stability; Why Particle Size, Zeta Potential and Rheology Important”, *Annual Transactions of The Nordic Rheology Society*, 20, 2012.

EK -1 Akım Yoğunluğu Hesabı

Elektrotlar 3,9 cm'si suya daldırıldığında aktif elektrot alan hesabı şu şekilde olmaktadır:

Her bir elektrotun ön ve arka yüzey alanları:

$$3,8*3,9*2= 29,64 \text{ cm}^2$$

Toplamda 3 anot ve 3 katottan oluştuğu için (anot elektrotlar aktiftir.):

$$3*29,64=88,92 \text{ cm}^2$$

Her bir elektrotun yan yüzey alanı:

$$(3,9*2+3,8)*0,3=3,48 \text{ cm}^2$$

Toplamda 3 anot bulunduğu için:

$$3*3,48=10,44 \text{ cm}^2$$

Toplam aktif alan:

$$10,44+88,92= 99,36 \text{ cm}^2$$

Hesaplamalar sonucunda aktif elektrot alanı 100 cm^2 bulunmuştur. Akım yoğunluğu birim aktif alandan geçen akım olarak tanımlanır. mA/cm^2 cinsinden akım yoğunluğu hesabı, I akım şiddeti amper cinsinden verilmişse:

$$1000*I/100= 10*I$$

olarak hesaplanır.

EK 2- Örnek Enerji Maliyeti Hesabı

Demir elektrot,

$t=10$ dk

$I=0,1$ A

$V= 2V$

$P=I*V=0,1*2/1000=0,0002$ kW

Hesaplanan güç 10 dk (600 sn) boyunca 500 mL suya uygulanmaktadır.

Enerji tüketimi (500 mL başına)= $0,0002*600/3600=0,00003$ kWh/500 mL

Enerji tüketimi (m^3 başına)= $0,00003*2000=0,0667$ kWh/ m^3

Birim enerji fiyatı= $18,2871$ krş./kWh

Enerji maliyeti (500 mL başına)= $0,00003*18,2871=0,00061$ krş./500 mL

Enerji maliyeti (m^3 başına)= $0,0667*18,2871=1,2$ krş./ m^3

EK 3- Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı- Demir Elektrot

$$t=10 \text{ dk}$$

$$I=0,1 \text{ A}$$

$$M_{\text{Fe}}=55,845 \text{ g/mol}$$

$$\text{Faraday Sabiti}=96485 \text{ C/mol}$$

$$\text{Değerlik elektron adedi}= 3$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (500 mL) =

$$m=\frac{I*t*M}{F*z}=0,1*600*55,845/(96485*3)=0,0115758 \text{ g/500 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m^3) =

$$m=2000*0,0115758=23,152 \text{ g/m}^3$$

Demir birim fiyatı=1500 TL/ton

Teorik olarak harcanan demir elektrot maliyeti (500 mL) =

$$0,0115758*1500*10^{-6}*10^2=0,001736\sim=0,002 \text{ krş./500 mL}$$

Teorik olarak harcanan demir elektrot maliyeti (m^3) =

$$0,001736*2000=3,4743 \text{ krş./m}^3$$

EK 4- Örnek Elektrot Maliyeti Hesabı- Alüminyum Elektrot

$$t=10 \text{ dk}$$

$$I=0,1 \text{ A}$$

$$M_{Al}=26,9815 \text{ g/mol}$$

$$\text{Faraday Sabiti}=96485 \text{ C/mol}$$

$$\text{Değerlik elektron adedi}= 3$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (500 mL) =

$$m=\frac{I*t*M}{F*z}=0,1*600*26,9815/(96485*3)=0,00559\sim=0,006 \text{ g/500 mL}$$

Teorik olarak harcanan elektrot kütlesi (m^3) =

$$m=2000*0,00559=11,186 \text{ g/m}^3$$

Alüminyum birim fiyatı=5000 TL/ton

Teorik olarak harcanan alüminyum elektrot maliyeti (500 mL) =

$$0,00559*5000*10^{-6}*10^2=0,002796\sim=0,003 \text{ krş./500 mL}$$

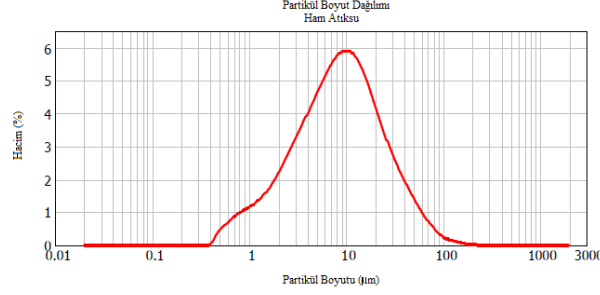
Teorik olarak harcanan alüminyum elektrot maliyeti (m^3) =

$$0,002796*2000=5,6 \text{ krş./m}^3$$

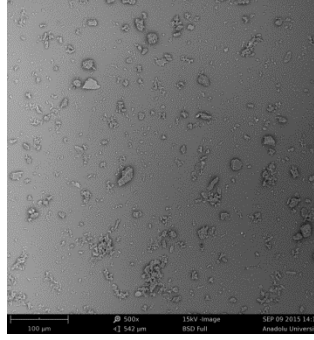
EK 5- Boyut Ölçümleri

Ham Atıksu Boyut Ölçümleri

Ham atıksu ile yapılan boyut ölçümünde elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.1’de, ham atıksu SEM görüntüsü Şekil EK 5.2’de verilmiştir.



Şekil EK 5. 1. Ham atıksu partikül boyut dağılımı



Şekil EK 5. 2. Ham atıksu SEM görüntüsü

Şekil EK 5.1’e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge EK 5. 1. Ham atıksuyun $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

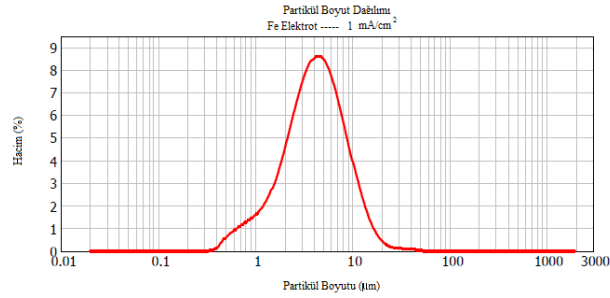
Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,823
$d_{0,5}$	8,537
$d_{0,9}$	31,142

Boyut ölçümleri için demir ve alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmalarda 1, 10, 20, 30 ve 40 mA/cm² olmak üzere 5 farklı akım yoğunluğunda 2,5 dk tepkime süresi ile çalışılmış ve elektrokoagülasyon işleminden sonra sular

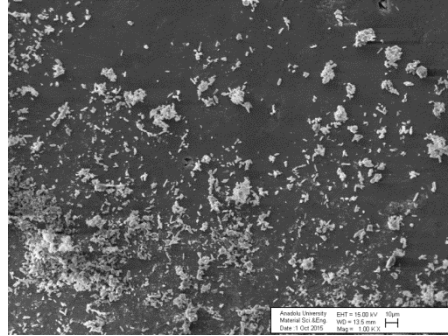
1 saat boyunca çöktürülmüştür. Ölçümlerin sonuçları ayrı başlıklar altında aşağıda verilmiştir.

Demir elektrot ile yapılan çalışmalar

Demir elektrotlar ile 1 mA/cm^2 ($t=2,5 \text{ dk}$) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.3'te, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.4'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 3. Fe elektrot, 1 mA/cm^2 ; partikül boyut dağılımı

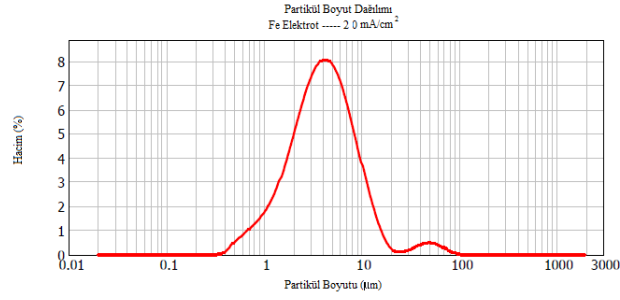


Şekil EK 5. 4. Fe elektrot, 1 mA/cm^2 ; SEM görüntüsü

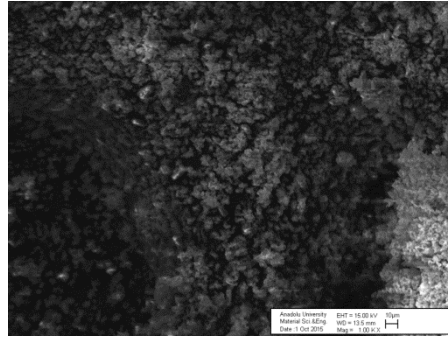
Şekil EK 5.3'e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge EK 5. 2. Fe elektrot, 1 mA/cm^2 ; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,423
$d_{0,5}$	4,123
$d_{0,9}$	9,748



Şekil EK 5. 7. Fe elektrot,20 mA/cm² ; partikül boyut dağılımı



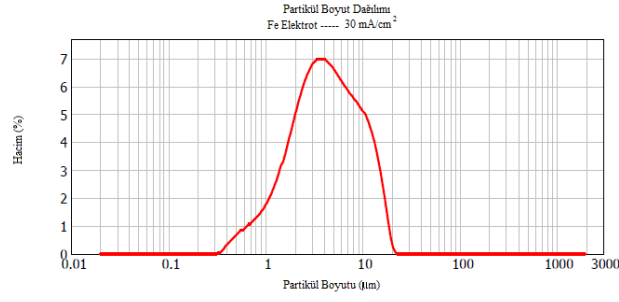
Şekil EK 5. 8. Fe elektrot, 20 mA/cm² ; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.7'ye göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.4'te gösterilmiştir.

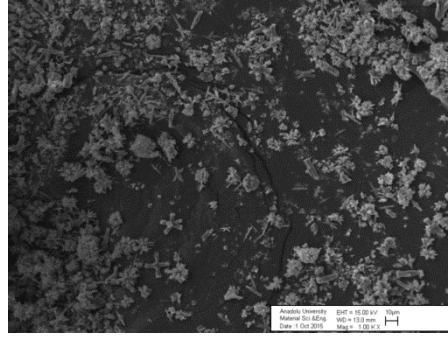
Çizelge EK 5. 4. Fe elektrot, 20 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,386
$d_{0,5}$	4,009
$d_{0,9}$	10,229

Demir elektrotlar ile 30 mA/cm² (t=2,5 dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.9'da, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.10'da verilmiştir.



Şekil EK 5. 9. Fe elektrot,30 mA/cm² ; partikül boyut dağılımı



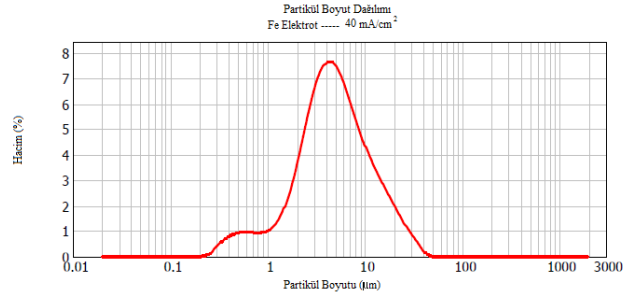
Şekil EK 5. 10. Fe elektrot, 30 mA/cm² ; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.9'a göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.5'te gösterilmiştir.

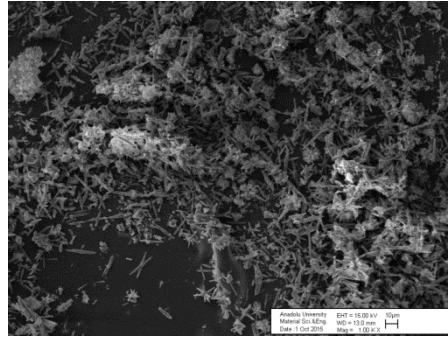
Çizelge EK 5. 5. Fe elektrot, 30 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,334
$d_{0,5}$	4,118
$d_{0,9}$	11,619

Demir elektrotlar ile 40 mA/cm² (t=2,5 dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.11'de, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.12'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 11. Fe elektrot,40 mA/cm²; partikül boyut dağılımı



Şekil EK 5. 12.Fe elektrot, 40 mA/cm²; SEM görüntüsü

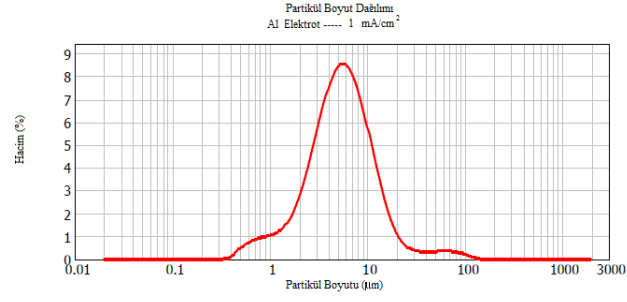
Şekil EK 5.11'e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge EK 5. 6. Fe elektrot, 40 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

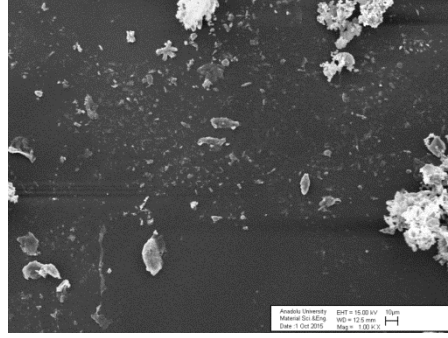
Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,439
$d_{0,5}$	4,639
$d_{0,9}$	14,6

Alüminyum elektrot ile yapılan çalışmalar

Alüminyum elektrotlar ile 1 mA/cm² (t=2,5 dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.13'te, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.14'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 13. Al elektrot, 1 mA/cm² ; partikül boyut dağılımı



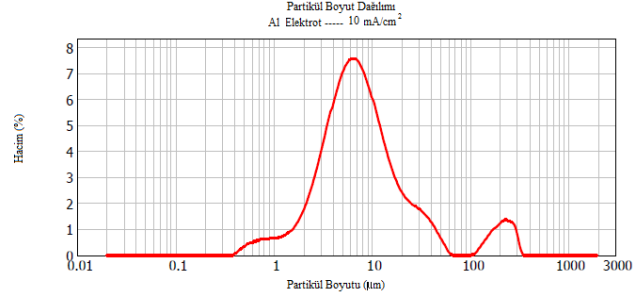
Şekil EK 5. 14. Al elektrot, 1 mA/cm² ; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.13'e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.7'de gösterilmiştir.

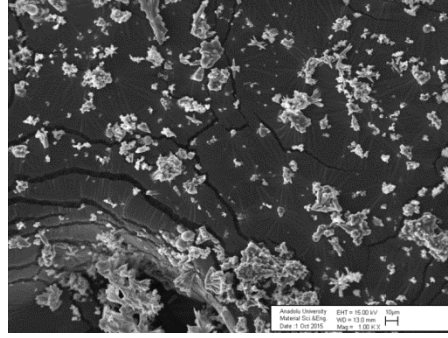
Çizelge EK 5. 7. Al elektrot, 1 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,845
$d_{0,5}$	5,367
$d_{0,9}$	13,395

Alüminyum elektrotlar ile 10 mA/cm² ($t=2,5$ dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.15'te, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.16'da verilmiştir.



Şekil EK 5. 15. Al elektrot,10 mA/cm²; partikül boyut dağılımı



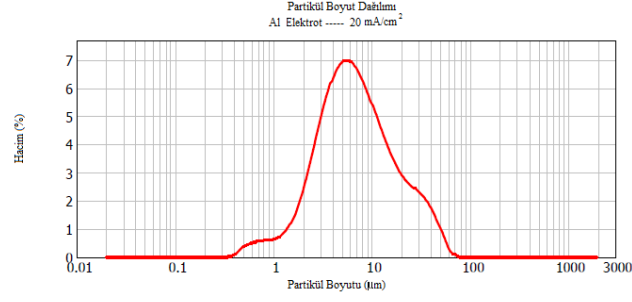
Şekil EK 5. 16. Al elektrot, 10 mA/cm²; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.15'e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.8'de gösterilmiştir.

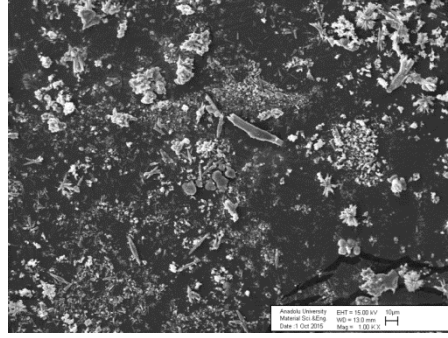
Çizelge EK 5. 8. Al elektrot, 10 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	2,473
$d_{0,5}$	7,159
$d_{0,9}$	32,973

Alüminyum elektrotlar ile 20 mA/cm² ($t=2,5$ dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.17'de, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.18'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 17. Al elektrot,20 mA/cm²; partikül boyut dağılımı



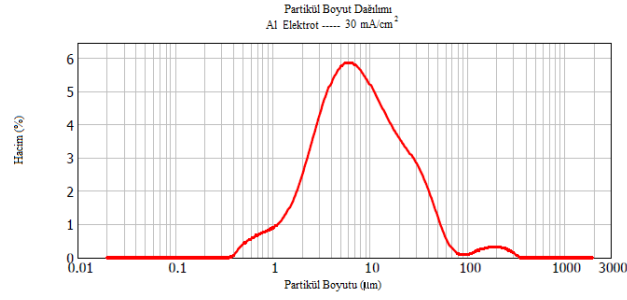
Şekil EK 5. 18.Al elektrot, 20 mA/cm²; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.17'ye göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.9'da gösterilmiştir.

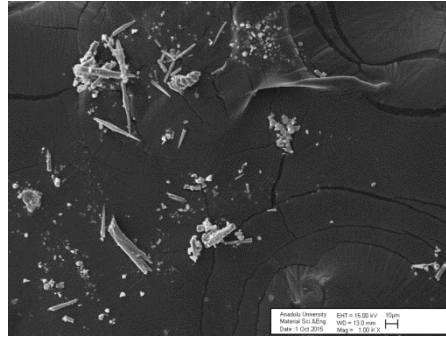
Çizelge EK 5. 9. Al elektrot, 20 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	2,227
$d_{0,5}$	6,505
$d_{0,9}$	24,797

Alüminyum elektrotlar ile 30 mA/cm² ($t=2,5$ dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.19'da, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.20'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 19. Al elektrot,30 mA/cm²; partikül boyut dağılımı



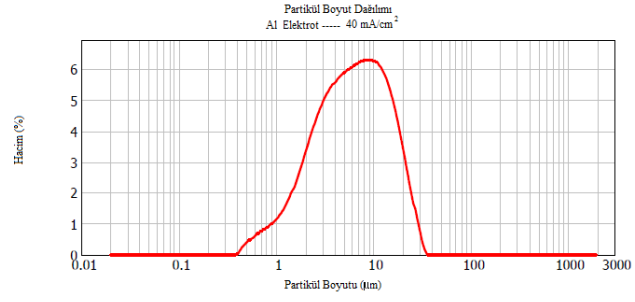
Şekil EK 5. 20.Al elektrot, 30 mA/cm²; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.19'a göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.10'da gösterilmiştir.

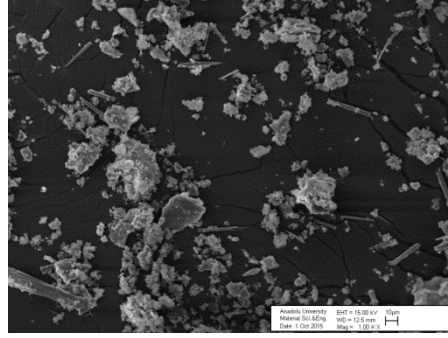
Çizelge EK 5. 10. Al elektrot, 30 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	2,025
$d_{0,5}$	7,35
$d_{0,9}$	30,921

Alüminyum elektrotlar ile 40 mA/cm² ($t=2,5$ dk) akım yoğunluğunda çalışıldığında elde edilen boyut dağılımı Şekil EK 5.21'de, çalışma sonucu elde edilen SEM görüntüsü Şekil EK 5.22'de verilmiştir.



Şekil EK 5. 21. Al elektrot,40 mA/cm²; partikül boyut dağılımı



Şekil EK 5. 22. Al elektrot, 40 mA/cm²; SEM görüntüsü

Şekil EK 5.21'e göre cihaz yazılımı tarafından hesaplanan $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ boyut dağılım uzunluk değerleri Çizelge EK 5.11 'de gösterilmiştir.

Çizelge EK 5. 11. Al elektrot, 40 mA/cm²; $d_{0,1}$, $d_{0,5}$ ve $d_{0,9}$ değerleri

Boyut Dağılım Verisi	Uzunluk(µm)
$d_{0,1}$	1,732
$d_{0,5}$	6,128
$d_{0,9}$	17,132