

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YAĞLI ATIKSULARIN ELEKTRİK ALANI UYGULAMASIYLA ARITIMI

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANDAN ERYILMAZ

HAZİRAN 2016

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAĞLI ATIKSULARIN ELEKTRİK ALANI UYGULAMASIYLA ARITIMI

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Candan ERYILMAZ

DANIŞMAN : Prof. Dr. Ayten GENÇ

ZONGULDAK

Haziran 2016

KABUL:

Candan ERYILMAZ tarafından hazırlanan “Yağlı Atıksuların Elektrik Alanı Uygulamasıyla Arıtımı” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 10/06/2016

Danışman: Prof. Dr. Ayten GENÇ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Şeyda KORKUT

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

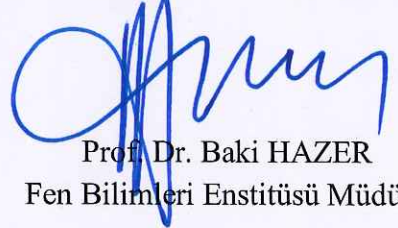
Üye: Yrd. Doç. Dr. Jülide YENER DİBEK

Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

17/06/2016



Prof. Dr. Baki HAZER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Candan ERYILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAĞLI ATIKSULARIN ELEKTRİK ALANI UYGULAMASIYLA ARITIMI

Candan ERYILMAZ

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayten GENÇ

Haziran 2016, 91 sayfa

Bu çalışmada Petrol Ofisi boryağı kullanılarak hazırlanan sentetik atıksuların arıtımı, alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler yatay ve dikey olmak üzere aynı hacimli iki farklı elektrokinetik ünite yapılmıştır ve toplam deney süresi 90 dakika olarak belirlenmiştir. Elektrotlara uygulanan voltaj farkının, elektrot alanının, elektrotların yerleşim düzeninin, debinin ve çalışma modunun yağ giderim verimine etkileri incelenmiştir. Her iki ünite de elektrotlar arasındaki potansiyel farkı arttıkça yağ giderim verimi artış göstermiştir. Elektrotlara 15 V potansiyel farkı uygulandığında yatay ve dikey ünitelerde %95 ve %75 yağ giderim verimleri elde edilmiştir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm mesafede sabit tutularak 4, 6 ve 8 adet alüminyum levha kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde elektrot alanındaki artışa bağlı olarak her iki ünite de arıtım verimleri artmıştır. Ayrıca monopolar olarak bağlanan 8 alüminyum levha elektrotların elektrokinetik ünite de yerleşim düzenleri değiştirilerek yağ giderim veriminin değişimi incelenmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

Yatay ünite de elektrot yerleşim düzeninin arıtım verimine etkisinin olmadığı, dikey ünite de ise en yüksek arıtım veriminin elektrotların ünitenin çıkışına yerleştirildiğinde sağlandığı gözlenmiştir. Ayrıca yatay ve dikey ünite de yağ giderim verimleri, atıksuyun debisine bağlı olarak bazı değişiklikler göstermiştir. Her iki ünite de debinin artması ile yağ giderim verimleri azalmakla birlikte, giderim verimlerinde ki bu azalışların yatay ünite de daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Yatay ve dikey ünite de 8 alüminyum elektrot kullanılarak aynı çalışma şartlarında (15 V) kesikli ve sürekli akışlı deneyler yapılmıştır. Kesikli deneylerde, yatay ve dikey ünitelerde elde edilen KOİ giderim verimleri sırasıyla %97 ve %88'dir. Sürekli akışta ise her iki ünite de %80 KOİ giderim verimi elde edilmiştir ancak, dikey ünite de giderim verimindeki artışların daha yavaş olduğu gözlenmiştir. Her iki ünite de enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Kesikli deneylerde, yatay ve dikey ünitelerdeki spesifik enerji tüketimi 11,77 kW-sa/m³ ve 9,97 kW-sa/m³'tür. Sürekli akışlı deneylerde ise bu değerler 14,64 kW-sa/m³ ve 12,95 kW-sa/m³'tür. Elde edilen sonuçlar yağlı atıksuların kesikli akışlı çalışma modunda elektrokimyasal arıtımında yatay ünite kullanılması durumunda, bulanıklık ve KOİ giderim verimlerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ancak yatay ünite kullanımı ile daha yüksek verimler elde edilirken daha fazla enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Sürekli akışlı çalışma modunda ise, yatay ünite de KOİ giderimi için tüketilen enerji dikey ünite de tüketilen enerjiden yaklaşık %40 daha fazladır. Bu nedenle sürekli akışlı çalışma modunda yapılan deneylerde, her iki ünitenin benzer giderim verimleri sağlamasından dolayı, dikey ünite kullanılmasının daha ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal arıtım, metal kesme atıksuyu, emülsiyeye yağlı atıksu, yağ-su emülsiyonu.

Bilim Kodu: 615.01.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

TREATMENT OF OILY WASTEWATER BY THE APPLICATION OF ELECTRIC FIELD

Candan ERYILMAZ

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Ayten GENÇ

June 2016, 91 pages

In this study, the synthetic wastewater, which was prepared by using Petrol Ofisi boron oil, was treated by electrochemical methods using aluminium electrodes. The experiments were carried out in horizontal and vertical electrokinetic units which have the same volume and total experiment duration was 90 minutes. The effects of the voltage difference applied to the electrodes, electrode area, electrode placements in the electrokinetic units, volumetric flowrate and operation mode on oil removal efficiency have been investigated. Oil removal efficiency was increased as the voltage difference applied to the electrodes increased for both electrokinetic units. The attained oil removal efficiencies were 95% and 75% in horizontal and vertical units, respectively, by the implementation of 15 V voltage difference to the electrodes. The electrochemical experiments were performed by using 4, 6 and 8 aluminium plate electrodes and the distance between two electrodes was kept constant at 1 cm. The removal efficiency increased as the electrode area was increased. Also, 8 aluminium electrodes connected as monopolar, were placed in different location in the electrokinetic units and the effects of electrode locations on oil removal efficiency were investigated.

ABSTRACT (continued)

No effects of electrode placement on removal efficiency were observed in the horizontal unit, on the other hand, the maximum removal efficiency was obtained in the vertical unit when the electrodes were placed at the unit outlet. In addition, oil removal efficiency showed some changes for the horizontal and vertical units depending on wastewater flowrate in. When the wastewater flowrate was increased, oil removal efficiencies decreased in both units, however, these decreases were higher in the horizontal unit in comparison to the vertical unit.

Batch and continuous electrochemical experiments were carried out in both electrokinetic units by using 8 aluminium plate electrodes and under same operating conditions (15V). The COD removals were 97% and 88% in horizontal and vertical units, respectively, in the batch electrochemical experiments. 80% of COD was removed by using both units in the continuous electrochemical experiments but, the removal efficiency was slower in the vertical unit. The operating costs were calculated for both electrokinetic units. The specific energy consumptions were 11,77 kW-h/m³ and 9,97 kW-h/m³ in the horizontal and vertical units, respectively, during the batch operating mode. The corresponding values were found to be 14,64 kW-h/m³ and 12,95 kW-h/m³, respectively, for the continuous operating mode. The results show that the electrochemical treatment of oily wastewater provides higher turbidity and COD removal efficiencies by using the horizontal unit in the batch operating mode. However, higher removal efficiency can be obtained by the use of horizontal unit having higher energy consumption. In order to obtain similar COD removal during the continuous operating mode, the energy consumption in the horizontal unit was 30% higher than the energy consumption in the vertical unit. Therefore, it is concluded that the use of vertical unit is more economical in the continuous operating mode, because, similar removal efficiencies can be attained in both units.

Keywords: Electrochemical treatment, metal cutting wastewater, emulsified oily wastewater, oil in water emulsion.

Science Code: 615.01.01

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen, değerli görüő ve düőünceleriyle bana her konuda yol gösteren saygıdeğer tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayten GENÇ'e en içten teőekkürlerimi sunarım.

Projenin gerçekleşmesi için maddi destek sağlayan BAP'a (Proje No: BAP: 2014-77047330-06) teőekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca bana inanan, yanımda olan ve hiçbir desteği esirgemeyen sevgili aileme,

Çalıőmalarım boyunca benden yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma,

Her zaman yanımda olup en zor anlarımı paylaşan, eőim Semih ERYILMAZ'a őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	3
2.1 METAL KESME SIVILARI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.2 EMÜLSİYE YAĞLI ATIKSULARIN ARITIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	5
2.2.1 Koagülasyon-Flokülasyon ile Arıtım	5
2.2.2 Basınçlı Hava ile Yüzdürme (DAF) ile Arıtım	6
2.2.3 Membran Filtrasyon ile Arıtım.....	7
2.2.4 Santrifüj ile Arıtım.....	8
2.2.5 Adsorpsiyon ile Arıtım	9
2.2.6 Biyolojik Arıtım Yöntemleri	9
2.3 ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLER İLE YAĞLI ATIKSULARIN ARITIMI	10
2.3.1 Elektroflotasyon/Elektrokoagülasyon ile Arıtım.....	10
2.3.2 Elektrokoksidasyon/Elektrofenton ile Arıtım.....	14
2.3.3 Elektrokimyasal Arıtımda Akış Hidroliğinin Etkisi	15
2.3.4 Elektrokimyasal Arıtımda Enerji Kullanımı.....	17

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.3.5 Elektrokimyasal Yöntemler ile Diğer Arıtım Proseslerinin Karşılaştırılması.....	19	
BÖLÜM 3 METAL KESME SIVILARININ ÖZELLİKLERİ VE ATIKSULARININ		
ARITIMI	21	
3.1 METAL KESME SIVILARI.....	21	
3.1.1 Metal Kesme Sıvılarının Özellikleri.....	22	
3.1.2 Kesme Sıvılarının Performansını Etkileyen Parametreler.....	23	
3.1.3 Metal Kesme Sıvılarının Fonksiyonları.....	25	
3.1.4 Metal Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması.....	26	
3.1.5 Metal Kesme Sıvıları İçeren Atıksuların Özellikleri ve Arıtımı	28	
3.2 ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM PROSESLERİ.....	30	
3.2.1 Elektrooksidasyon (EOx) Prosesi.....	31	
3.2.2 Elektroflotasyon (EF) Prosesi.....	32	
3.2.3 Elektrokoagülasyon (EC) Prosesi.....	33	
3.2.4 Elektrokimyasal Proseslerin Uygulama Alanları	36	
3.2.5 Elektrokimyasal Arıtım Verimini Etkileyen Faktörler	36	
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....		39
4.1 SENTETİK ATIKSULARIN HAZIRLANMASI.....	39	
4.2 YAĞLI ATIKSULARIN ELEKTROKİNETİK ARITIMI	42	
4.3 YAĞLI ATIKSULARIN KOAGÜLASYON-FLOKÜLASYON İLE ARITIMI.....	47	
4.4 YAĞLI ATIKSULARIN FİLTRASYON İLE ARITIMI	48	
4.5 YAĞLI ATIKSULARIN SANTRİFÜJ İLE ARITIMI	48	
BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA.....		51
5.1 KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	51	
5.1.1 Metal Kesme Sıvısı İçeren Atıksuların İletkenlik Ölçümleri	51	

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.1.2 Yağ Damlalarının Zeta Potansiyel Ölçümleri	52
5.2 ELEKTROKİNETİK ARITIM DENEYLERİ	53
5.2.1 Elektrotlara Uygulanan Voltaj Farkının Arıtım Verimine Etkisi	53
5.2.2 Elektrot Alanının Arıtım Verimine Etkisi	56
5.2.3 Elektrotların Ünitelerdeki Konumunun Arıtım Verimine Etkisi	59
5.2.3.1 Ortalama Kalış Süresi	63
5.2.4 Debinin Arıtım Verimine Etkisi	65
5.2.5 Optimum Elektrokinetik Arıtım Koşullarının Belirlenmesi	67
5.2.5.1 Optimum Arıtım Koşullarında Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi Analizi.....	70
5.2.5.2 Optimum Arıtım Koşullarının Maliyet Analizi	72
5.3 KOAGÜLASYON-FLOKÜLASYON İLE ARITIM	74
5.3.1 Alum Çözeltisi ile Koagülasyon-Flokülasyon.....	74
5.3.2 Demir (III) Klorür Çözeltisi ile Koagülasyon-Flokülasyon	76
5.3.3 Koagülasyon-Flokülasyon Prosesinin Maliyet Analizi	78
5.4 FİLTRASYON İLE ARITIM	78
5.5 SANTRİFÜJ İLE ARITIM.....	78
5.6 ELEKTROKİMYASAL ARITIM VE DİĞER ARITIM DENEYLERİNDE ELDE EDİLEN GİDERİM VERİMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	79
BÖLÜM 6 SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Metal kesme esnasında kesme sıvılarının kullanımı	22
3.2 Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin parçalanması	31
3.3 Bir elektrokoagülasyon hücresinin şematik diyagramı	34
4.1 Bor yağı ve % 2'lik bor yağı emülsiyonu.	39
4.2 Piknometre.	40
4.3 Zeta potansiyel ölçüm cihazı.	41
4.4 Yatay elektrokinetik ünite ve deney düzeneği.	43
4.5 Dikey elektrokinetik ünite ve deney düzeneği.	43
4.6 Elektrokinetik arıtım uygulamalarında kullanılan alüminyum elektrotlar.	44
4.7 Sentetik atıksuyun hacimsel yağ yüzdesine bağlı olarak bulanıklık ölçümleri.	45
4.8 KOİ analizlerinde kullanılan termoreaktör.	47
4.9 Santrifüj cihazı.	49
5.1 Atıksudaki bor yağ oranının iletkenlik üzerindeki etkisi.	52
5.2 pH değişiminin zeta potansiyel üzerindeki etkisi.	53
5.3 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).	54
5.4 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).	55
5.5 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının akım değişimine etkisi (Dikey Ünite).	55
5.6 Dikey ünite de kesikli akışta, elektrotlara uygulanan voltaj farkına bağlı olarak 90 dakika sonunda atıksuyun rengi ((a) 5 V, (b) 10 V, (c) 15 V).	56
5.7 Elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).	57
5.8 Elektrot alanının akım değişimine etkisi (Yatay Ünite).	58
5.9 Yatay ünite de kesikli akışlı deneylerde atıksuyun rengindeki değişimler ((a) t=0 dak (b) t= 90 dak, 15V, 8 elektrot).	58
5.10 Elektrot alanının akım değişimine etkisi (Dikey Ünite).	59
5.11 Elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).	59

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.12 Kesikli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).	60
5.13 Kesikli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).	61
5.14 Sürekli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).	62
5.15 Sürekli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).	62
5.16 Elektrot yerleşimi girişte olduğunda, çıkış hattındaki suyun iletkenliğinin değişimi (Yatay Ünite).	64
5.17 Debinin arıtım verimine etkisi (Yatay Ünite).	66
5.18 Debinin arıtım verimine etkisi (Dikey Ünite).	66
5.19 Yatay ve dikey ünitelerde, voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi.	67
5.20 Yatay ve dikey ünitelerde, elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi.	68
5.21 Yatay ve dikey ünitelerde, elektrot konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi.	69
5.22 Yatay ve dikey ünitelerde, debinin bulanıklık giderim verimine etkisi.	69
5.23 Yatay ve dikey ünitelerde kesikli akış modunda elde edilen KOİ giderim verimleri.	71
5.24 Yatay ve dikey ünitelerde sürekli akış modunda elde edilen KOİ giderim verimleri.	71
5.25 Optimum alum dozajı.	75
5.26 pH'ın bulanıklık giderim verimine etkisi.	75
5.27 Karıştırma süresinin bulanıklığa etkisi.	76
5.28 Optimum FeCl ₃ dozajı.	77
5.29 pH'ın bulanıklık giderim verimine etkisi.	77
5.30 Açısal hız değişiminin bulanıklık giderimine etkisi.	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Elektrokimyasal yöntemlerle atıksuların arıtımı.....	11
3.1 Metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksularda bulunan kirleticiler.....	30
4.1 Atıksuların hazırlanması ve analizinde kullanılan cihazlar.....	40
4.2 Elektrokinetik arıtım deneylerinde kullanılan cihazlar.....	42
5.1 Optimum uygulama koşullarında yapılan deneylerin enerji tüketim değerleri.....	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

v	: Elektroforetik Hız
u_{EM}	: Elektroforetik Hareketlilik
E	: Elektrik Alan Şiddeti
ζ	: Zeta Potansiyel
μ	: Dinamik Viskozite
ϵ_r	: Ortamın Dielektrik Sabiti
ϵ_0	: Vakumun Elektriksel Geçirgenliği
\bar{t}_c	: Ortalama Kalış Süresi
t	: Zaman
$C(t)$: t Anındaki İzleyici Konsantrasyonu
σ_c^2	: Varyans
V	: Reaktör Hacmi
Q	: Atıksu Debisi
θ	: Hidrolik Kalış Süresi
E	: Enerji Tüketimi
V	: Voltaj Farkı
I	: Akım
E_s	: Arıtılan Toplam Su Hacmine Göre Spesifik Enerji Tüketimi
$E_{s,KOİ}$: 1 kg KOİ Gideriminde Tüketilen Spesifik Enerji
\dot{M}	: İşletme Maliyeti
Cenerji	: Kullanılan Elektrik Enerjisi
Celektrot	: Kullanılan Elektrot Ağırlığı
Ckimyasal	: Kullanılan Kimyasal Miktarı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BOİ₅	: 5 Günlük Biyolojik Oksijen İhtiyacı
DAF	: Çözünmüş Havalı Yüzdürme
EC	: Elektrokoagülasyon
EF	: Elektroflotasyon
EO	: Elektrokoksiasyon
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
NTU	: Nefelometrik Bulanıklık Birimi
MKS	: Metal Kesme Sıvısı
PAC	: Polialüminyum Klorür
PAM	: Poliakrilamid
PFS	: Polidemir Sülfat
ppm	: Milyonda Bir Birim
rpm	: Dakikada Tur Sayısı
TOK	: Toplam Organik Karbon

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Petrokimya tesislerinde, birçok kimyasal maddenin üretiminde, maden işletmelerinde, metalurji işletmelerinde ve gıda endüstrilerinde oluşan atıksularda yağlara rastlanır. Endüstride yer alan metal hazırlama işlemlerinin neredeyse tamamında, yaygın olarak yağ bazlı sıvılar kullanılmaktadır. Bu sıvıların temel kullanım amaçları sürtünmeyi önlemek ve soğutma sağlamaktır. Ancak metal kesme sıvıları kimyasal yapılarında hidrokarbonların yanında yüzey aktif maddeler, basınç ve sıcaklığa karşı dayanımlarını arttırıcı farklı kimyasal bileşenler içermektedir. Bu nedenle yağ içeren atıksular yüksek KOİ değerlerinin yanı sıra sağlığa zararlı kimyasal maddeler de içerdiğinden, bu atıksuların arıtımı önemli bir problemdir. Yağlar atıksularda serbest, emülsiyeye ve dispers olmak üzere farklı formlarda bulunurlar. Damla boyutu 20 µm'den büyük yağ damlaları serbest yağ olarak tanımlanmaktadır ve gravite ile kolaylıkla ayrılmaktadır. Ancak damla boyutu küçüldükçe, emülsiyeye yağlarda olduğu gibi, arıtım zorlaşmaktadır.

Yağlı atıksuların arıtımında fiziksel (filtrasyon, vakumlu evaporasyon, santrifüj, adsorpsiyon), kimyasal (koagülasyon ve flokülasyon, flotasyon, çöktürme), biyolojik arıtım (aerobik/anaerobik aktif çamur) ve elektrokimyasal arıtım (elektrokoagülasyon, elektroflotasyon, vb.) prosesleri kullanılabilir. Basit ekipman kullanımı, basit işletme parametreleri gerektirmesi, iyi renk ve koku giderimi sağlaması, birçok kirleticinin bir arada giderilebilmesi, düşük enerji ihtiyacı ve bakım maliyeti gerektirmesinden dolayı elektrokimyasal arıtım diğer arıtım yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır.

Literatürde atıksulardan askıda katı madde, boyar madde, metal, yağ ve organik bileşiklerin gideriminde elektrokimyasal arıtımın başarıyla uygulandığı birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmaların birçoğunda geliştirilen modeller deneysel sonuçlara bağlı parametreler içermektedir ve atıksuyun özelliklerine göre elektrokimyasal arıtım parametrelerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca akış hidroliği ve reaktör tasarımının elektrokimyasal arıtım verimine etkisi ile ilgili çalışmaların sayısı çok fazla değildir. Bu

çalışmada yatay ve dikey elektrokinetik üniteler kullanılarak yağlı atıksularda arıtım veriminin değişimi incelenmiştir. Ayrıca, elektrotlar ünitelerin farklı bölgelerine yerleştirilerek farklı çalışma modlarında deneyler gerçekleştirilmiş ve elektrokimyasal arıtımda akış hidroliğinin etkileri belirlenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında Petrol Ofisi bor yağı kullanılarak hazırlanan atıksuların karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda farklı konsantrasyonlarda yağ içeren atıksuların pH, iletkenlik, yoğunluk, bulanıklık ve zeta potansiyel değerleri ölçülmüştür. Elektrokimyasal arıtım deneylerinde elektrotlara uygulanan voltaj farkının, elektrot alanının, atıksu debisinin ve çalışma modunun (kesikli ve sürekli) arıtım verimine olan etkileri incelenmiştir. Yağ giderim verimleri, bulanıklık ve KOİ ölçümlerine göre hesaplanmıştır.

Kesikli ve sürekli çalışma modlarında yatay ünite elde edilen bulanıklık ve KOİ giderim verimleri, dikey ünite elde edilen değerlerden daha yüksektir. Kesikli çalışma modunda, dikey ve yatay ünite bulanıklık giderim verimleri %76 ve %96'dır. KOİ giderim verimleri ise %88 ve %97'dir. Sürekli akışlı çalışma modunda ise yatay ünite elde edilen bulanıklık giderim verimi %72 iken, dikey ünite elde edilen verim %55'tir. Her iki ünite elde edilen KOİ giderim verimleri %80 civarındadır. Dikey ünite elde edilen bulanıklık ve KOİ giderim verimleri yatay üniteye göre daha düşük olmakla birlikte, arıtım için gerekli enerji miktarının genellikle dikey üniteye göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında elektrokimyasal arıtım ve koagülasyon/flokülasyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre maliyet analizleri yapılmıştır. Elektrokimyasal arıtımda elektrik enerjisi ve elektrot tüketiminin toplamı şeklinde hesaplanan işletme maliyeti, en yüksek giderimi sağlayan yatay ünite ve kesikli akışlı çalışma modunda 2,94 \$/m³ olarak hesaplanmıştır. Koagülant olarak alum kullanımının demir (III) klorür kullanımına göre daha ekonomik olduğu maliyet analizlerinde belirlenmiş ve alum kullanımında koagülasyon/flokülasyon için işletme maliyeti 1,8 \$/m³ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, elektrokimyasal arıtımın kimyasal koagülasyon-flokülasyon prosesine göre daha pahalı olduğunu göstermektedir. Ancak, elektrokimyasal arıtımda belirleyici parametre elektrik enerjisi ücretidir. Elektrik enerjisindeki fiyat değişimleri doğrudan arıtım fiyatını etkileyebilecektir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Çalışmanın bu bölümünde metal kesme sıvılarının genel özellikleri ve arıtım yöntemleri hakkında bilgi verilecektir. Elektrokimyasal yöntemler ile atıksuların arıtımı ve bu yöntem ile diğer arıtım yöntemlerinin karşılaştırılması yapılacaktır. Elektrokimyasal arıtımda akış tipi ile elektrot yerleşiminin etkisi üzerine daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilecek ve bu arıtımda yapılan ekonomik analizler araştırılacaktır.

2.1 METAL KESME SIVILARI İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Metal kesme sıvıları kullanıldıkça, içeriğindeki kirlilik seviyesi arttığı için kararlılıklarını kaybederler. Metal kesme sıvılarının kararlılığı yağlama, soğutma, korozyonu önleme, pürüzsüz yüzey oluşturma gibi özellikleri etkileyen en önemli parametredir. Kararsız hale gelmiş atık metal kesme sıvıları yenisi ile değiştirilmekte ve bu da hem ekonomik bir kayıp oluşturmakta, hem de çevresel kirliliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle, kesme sıvılarının fonksiyonlarını kaybetmesine neden olan etmenler araştırılmıştır. Bu amaçla, kullanılmamış yarı sentetik kesme sıvısı ile kullanılmış ve atık haline gelmiş kesme sıvılarında tork, basınç ve sıcaklık deneyleri yapılarak, sıvıların kesme basınçlarındaki değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre metal kesme sıvılarının kararsız hale gelme sebebinin, sularda sertliğe neden olan iyonların zamanla birikimi ve metal kesme sıvılarının hidrolik yağ ile kirlenmesi olduğu sonucuna varılmıştır (Greeley and Rajagopalan 2004).

Yağ/su emülsiyonu formundaki atıksuların arıtımı kompleks özelliklerinden dolayı zordur. Emülsiyon kontrol proseslerinin optimizasyonu hakkında bilgi edinmek için, emülsiyon sistemlerinin arayüzeyi ile ilgili özellikleri araştırılmıştır. Yağ içeriği arttıkça, yüzey geriliminin azaldığı bulunmuştur. Sıcaklık ve pH'nın, bulanıklık ve yüzey gerilimi üzerinde önemli etkisi vardır ve yağ damlacıklarının elektroforetik özelliklerinin bulanıklık ile doğrudan bağlantılı olduğu görülmüştür. Ayrıca, inorganik tuzların ve yüzey katkı

maddelerinin, dispers sistemlerin kararlılık kontrolünde oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir (Shin and Kim 2001).

Metal kesme sıvısı olarak kullanılmak amacıyla tasarlanan yağ-su emülsiyonlarının kremleşme kararlılığı ve ıslanma davranışı incelenmiştir. Emülgatör konsantrasyonu ve türünün, yüzey ve arayüz gerilimi, kontak açısı, damlacık boyut dağılımı, elektroforetik hareket, kremleşme kararlılığı ve ıslanma davranışı gibi emülsiyon özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Hazırlanan emülsiyonlar ağırlıkça %3 oranında yağ içermektedir ve üç farklı emülgatör kullanılarak hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; emülgatör konsantrasyonu ölçülen parametreler üzerinde anahtar bir rol oynamaktadır. Farklı emülgatörler, farklı davranışlar gösterdiği için kesme sıvısı olarak kullanılacak yağ-su emülsiyonlarının formülizasyonunda genel bir kural olmadığı görülmüştür. Bu nedemle yağ damlacıkları ve katı yüzeyleri arasındaki etkileşimin anlaşılabilmesi için, emülsiyonun karakterizasyon çalışmaları önem taşımaktadır (Cambiella et al. 2007).

Kesme sıvılarının ekolojik ve makinede işlenebilme parametrelerine etkisi üzerine analizler yapılmıştır. Kesme sıvılarının kalite parametrelerinin değerlendirilmesi, ekolojik normları da içeren, imalat yönteminin verim değişkenlerine bağlıdır. Kolay kesme için, döküm parçalarda referans çelik C45E4 ve alüminyum alaşım AlMgSiPb içinde yapılan işlenebilirlik test sonuçları, çevreye duyarlı yeni kesme sıvıları kullanılarak uygun işlenebilirlik parametrelerini sağlamanın mümkün olduğunu göstermiştir. Kesme parametreleri teknolojik veri tabanından, belirli işlenmiş malzeme kombinasyonlarına göre seçilmiştir. Bu yaklaşım, var olan ürünlerin performansını ölçmek, piyasadaki ürünleri karşılaştırmak ve yeni geliştirilen kesmeye yardımcı katkı maddelerini araştırmak için kullanılmıştır (Sokovic and Mijanovic 2001).

Metal kesme emülsiyonlarının kararlılığı, yağlama ve pas önleyici özelliğini etkileyen önemli bir parametredir. Kararlılığın kaybı ile akışkan yenisi ile değiştirilmekte ve bu da hem ekonomik bir kayıp oluşturmakta hem de çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle, metal kesme sıvıları ile hazırlanan emülsiyonların kararlılığının hızlı değerlendirilmesi için turbidimetrik metot kullanılan bir çalışma yapılmıştır. A ve B olarak adlandırılan iki farklı yarı sentetik ve bir adet de çözünebilir (C) metal kesme sıvısı kullanılarak, saf su ile hazırlanan emülsiyonlara, farklı oranlarda kalsiyum iyonu eklenmiş ve spektrofotometrede, farklı dalga boylarında ölçümler yapılmıştır. Emülsiyon A ve C'de kalsiyum konsantrasyonu arttıkça, dalga boyu elemanında zamanla bir azalma gözlemlenmiştir. Yani, dalga boyu

elemanındaki azalma, partikül boyutunun arttığını ve emülsiyonun kararlılığını kaybettiğini gösterir. Emülsiyon B ise, eklenen kalsiyum konsantrasyonlarına karşı çok büyük bir tepki göstermemiştir ve 400 mg/L kalsiyum eklenmesi durumunda bile değişiklik göstermediği için destabilize olmamıştır. Aynı emülsiyonların kararlılık testleri standart metotlara göre yapılarak karşılaştırıldığında hemen hemen aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Standart metotların daha uzun sürede cevap verdiği düşünüldüğünde turbidimetrik metodun, emülsiyonların kararlılığının belirlenmesinde güvenilir ve hızlı bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Deluhery and Rajagopalan 2005).

2.2 EMÜLSİYE YAĞLI ATIKSULARIN ARITIMINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Emülsiyeye yağlı atıksuların arıtımı endüstride giderek artan pahalı bir sorun haline gelmektedir ve bu atıksuların arıtımı için çeşitli arıtım yöntemleri geliştirilmektedir. Bu bölümde, emülsiyeye yağlı atıksuların arıtımında yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.2.1 Koagülasyon-Flokülasyon ile Arıtım

Kesme sıvılarının koagülasyon ve çözülmüş havalı yüzdürme (DAF) proseslerinin kombinasyonu ile arıtımıyla ilgili çalışmada emülsiyonların hazırlanmasında iki farklı kesme yağı kullanılmıştır. CaCl_2 , FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ile iki yağın da koagülasyonu yapılarak kararsızlığı sağlanmıştır. Çalışmada yağ giderim verimi, bulanıklık ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ölçümleri ile belirlenmiştir. Her iki yağ için de en iyi giderimi sağladığı ve daha ucuz olduğu için CaCl_2 öncelikli kullanılabilir koagülant olarak seçilmiştir. Çalışmada hazırlanan emülsiyonların yağ yüzdesi %6 olarak belirlenmiştir. Koagülasyonda bulanıklık giderim verimi %99 olarak bulunmuştur ancak bu değer yine de 5 NTU deşarj standardından çok yüksektir. Bu nedenle, koagülasyon sonrasında emülsiyonlara DAF prosesi uygulanmıştır. DAF prosesinde doygunluk basıncının, oluşan baloncukların büyüklüğüne etkisi incelenmiş ve aralarında ters orantılı bir ilişki olduğu bulunmuştur. Baloncukların 50 μm boyutunda olduğu 6,5 bar doygunluk basıncı olarak belirlenmiştir. Koagülasyon ve DAF prosesinin kombinasyonu sonucunda, bulanıklık değeri 5,6 NTU'ya kadar düşürülerek deşarj standartlarını sağlamıştır. Ancak, KOİ değeri, emülsiyondaki bazı katkı maddelerinin varlığı sebebiyle ancak %29 oranında azaltılabildiği için ileri bir arıtım gerektirmektedir (Bensadok et al. 2007).

Yağlı atıksuların arıtımında bir adsorban ve koagülant yardımcısı olan doğal diatomit ile kombine olarak sentetik polimerlerin (polialüminyum klorür (PAC), polidemir sülfat (PFS) ve poliakrilamid (PAM)) kullanımının uygunluğu araştırılmıştır. Geliştirilen koagülasyon flokülasyon prosesinde kullanılan diatomit ile kombine olarak kullanılan sentetik polimerlerin arıtım verimine etkilerinin karşılaştırması yapılmıştır. KOİ ve bulanıklık gideriminde koagülant dozajı, başlangıç pH'ı ve çökme zamanı parametreleri hem PAC-diatomit hem de sadece PAC kullanıldığı durumlar için incelenmiştir. PAC-diatomit ile yapılan koagülasyon flokülasyon sonuçları PFS ve PAM ile yapılanlara göre, KOİ, bulanıklık giderimi, flok çökme özellikleri ve işletme maliyeti düşünüldüğünde daha iyidir. PAC-diatomit sistemi ile yapılan koagülasyon ve flokülasyonda pH 7-10 aralığında, 20 dakika arıtım süresinde, 50 mg/L optimum PAC ve 1250 mg/L optimum diatomit dozajlarında %70'den fazla KOİ giderimi ve %90 oranında bulanıklık giderimi sağlanmıştır. Eklenen diatomit PAC dozajını %85 oranında koruyarak KOİ giderim verimini %50 arttırmıştır. Sonuç olarak, PAC-diatomit ile kombine olarak geliştirilen koagülasyon ve flokülasyon, yağlı atıksuların arıtımında ekonomik bir alternatif olarak sunulabilir (Zhao et al. 2014).

2.2.2 Basınçlı Hava ile Yüzdürme (DAF) ile Arıtım

Biyodizel atıksularının basınçlı havalı yüzdürme (DAF) ile arıtımında, arıtım verimini arttırmak amacıyla asitleme ve koagülasyon prosesleri kullanılmıştır. İlk olarak, biyodizel atıksularının asitleme ile arıtımı yapılmış ve yağ ve gres ile KOİ giderim verimleri belirlenmiştir. Bu amaçla, atıksuya saf hidroklorik asit ve saf sülfürik asit eklenerek pH ayarlamaları yapılmıştır. pH ayarlamasından sonra bir gün bekletilen atıksuyun analizleri yapılmış ve %50 KOİ giderimi sağlanırken, %80'den fazla yağ ve gres giderimi elde edilmiştir. İkinci olarak, atıksuya 1 g/L konsantrasyonlarda alum, polialüminyum klorür ve demir klorür koagülantları eklenmiş ve asitleme yapılmadan giderim verimleri incelenmiştir. Koagülasyon sonuçlarına göre %90 oranında yağ ve gres ve %30 oranında KOİ giderimi sağlanmıştır. Üçüncü olarak, sadece DAF ve asitleme ile DAF prosesleri denenmiş ve bu proseslerin yağ ve gres gideriminde etkili olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, biyodizel atıksularının arıtımında asitleme ve koagülasyon ile birlikte DAF prosesi kullanılmış ve %85-95 oranında yağ ve gres giderim verimi elde edilmiştir. Asitleme ve koagülasyon ile DAF prosesinin, diğer proseslere göre %10 oranında daha etkili bir yöntem olduğu belirlenmiştir (Rattanapan et al. 2011).

Toz aktif karbonun pilot ölçekli DAF ünitesinin performansına olan etkisi araştırılmıştır. Farklı kirletici konsantrasyonlarına sahip atıksu arıtılarak farklı işletim parametrelerinin kirleticilerin giderim verimine etkisi BOİ ve KOİ ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Arıtımda koni biçiminde tabana sahip dairesel pilot ölçekli DAF ünitesi kullanılmış ve debi, geri dönüş oranı, doygunluk basıncı ve eklenen toz aktif karbon konsantrasyonunu içeren işletme parametreleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre DAF ünitesindeki çıkış kirletici konsantrasyonu atıksu debisinin artmasıyla artmaktadır ve doygunluk basıncının artmasıyla azalmaktadır. Eklenen toz aktif karbon konsantrasyonunun artması ile çıkış suyundaki KOİ ve BOİ değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Toz aktif karbon dozajının 50-150 mg/L aralığında olduğu durumda BOİ giderim verimleri %27-70'den %76-94'e kadar artış göstermiştir. Aynı durumda KOİ giderim verimleri ise %16-64'ten %72-92,5 değerlerine kadar artmıştır. Elde edilen giderim verimleri, DAF prosesinin performansının arttığını göstermektedir (Hami et al. 2007).

2.2.3 Membran Filtrasyon ile Arıtım

Metal kesme sıvıları içeren atık suyun ultrafiltrasyonunda işletme parametrelerinin etkisi değerlendirilerek, filtrasyon için optimum koşullar hesaplanmıştır. Yapılacak olan deney sayılarını azaltmak amacıyla bir deneysel tasarım metodu (Taguchi) uygulanmıştır. Farklı filtrasyon seviyelerinde (düşük, orta ve yüksek) pH, yağ konsantrasyonu, sıcaklık, tuz (NaCl, CaCl₂), besleme hızı ve basınç parametreleri çalışılmıştır. Deneylede çözünebilir kesme yağı ve ultrafiltrasyon membran (C100F) kullanılmıştır. Filtrasyon, toplam geri dönüşüm koşullarında yapılmıştır. Deney süresince besleme ve süzöntü örnekleri alınarak yağ tutma, zeta potansiyel ve yağ damlacığı boyutu ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, pH'ın artmasıyla akının da arttığını göstermiştir. En yüksek akı alkali pH'larda oluşurken, en yüksek yağ tutma asidik pH'larda gözlenmiştir. Ayrıca, zeta potansiyelin, pH ve CaCl₂ değişimlerinden çok etkilendiği görülmüştür. En yüksek zeta potansiyel değeri, en düşük süzöntü akısında meydana gelmiştir. Damlacık boyut ölçümlerine göre, daha yüksek akılarda genellikle daha büyük damlacıklar oluşmuştur. Sonuç olarak, alkali pH, yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve düşük miktarda CaCl₂ ile en iyi filtrasyon koşulları sağlanmaktadır (Hesampour et al. 2008).

Yağlı atıksuların arıtımında membran teknolojisinin kullanıldığı bir çalışmada atıksu arıtımında seramik ve polimerik membran modüllerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Atıksu, biri seramik (Al₂O₃/ZrO₂) diğeri ise polimerik (PVC) olan membran modülleri ile donatılmış,

laboratuvar ölçekli iki arıtım ünitesinden geçirilerek filtre edilmiştir. Uygulamalarda kullanılan fiziko-kimyasal analizler pH, iletkenlik, bulanıklık, partikül büyüklüğü ve zeta potansiyel, KOİ ve lipofilik bileşenlerin ölçümü ile gerçekleştirilmiştir. Arıtım verimleri karşılaştırıldığında seramik membranların polimerik membranlara göre daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Muric et al. 2014).

2.2.4 Santrifüj ile Arıtım

Mekanik işleme proseslerinde kullanılan yağ/su emülsiyonlarının arıtımı için yapılan çalışmada laboratuvar tipi ve pilot ölçekli santrifüj ile arıtım yöntemi incelenmiştir. Mekanik işlemede kullanılan ticari bir ürün ile hazırlanan yağ/su emülsiyonu, hacimce %1 oranında yağ içermektedir. Emülsiyonun kararsızlığını kolaylaştırmak ve santrifüj uygulamasını geliştirmek için, deneylerde koagülant olarak $CaCl_2$ kullanılmıştır. Laboratuvar deney sonuçları, emülsiyonun bulanıklık ve zeta potansiyel ölçümlerine göre yorumlanmıştır. Koagülantın damlacık boyut dağılımı ve bulanıklık giderimine etkisini belirlemek için emülsiyonlara farklı konsantrasyonlarda $CaCl_2$ eklenmiştir. Koagülant konsantrasyonu arttıkça bulanıklık değerinin azaldığı ve kalsiyum katyonlarının negatif yüklü yağ damlacıklarını nötralize ederek bir araya getirmesiyle, damlacık boyut dağılımında değişiklik sağladığı görülmüştür. Deneyler sonucunda kritik $CaCl_2$ konsantrasyonu 0,025 M olarak bulunmuştur. Bu konsantrasyonun üzerindeki değerler damlacık boyut dağılımında değişim sağlamamıştır ancak sulu fazın yağ içeriği yüksek oranda azalmıştır. Ayrıca, farklı dönüş hızları ve farklı deney süreleri için deneyler yapılmış ve elde edilen verilerle yağlı atığın arıtımında bir sonraki adımın seçilmesinde, sulu fazın parçacık boyut dağılımını belirleyen bir model oluşturulmuştur. Pilot ölçekli santrifüj ile yapılan arıtımda iki farklı $CaCl_2$ konsantrasyonunda, farklı debilerde deneyler yapılmıştır. Düşük debilerde, daha uzun kalış süresine bağlı olarak, daha yüksek yağ ayırımı ihtimali olduğu görülmüştür. Yapılan kesikli ve sürekli akışlı santrifüj deneylerinde %92-96 oranında yağ giderim verimi sağlanmıştır (Cambiella et al. 2006).

Atıksularda standart değerlerin üzerinde bulunan yağ içeriği, atıksulardan elektriksel olarak tuz gideriminde problem oluşturur. Bu problemin çözümü için atıksulardan yağ gideriminde santrifüj uygulaması yapılmıştır. Dönüş hızı, giriş debisi, su sıcaklığı, atıksuyun yağ içeriği ve ham yağın yoğunluğu parametrelerinin, yağ ayırma performansına etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, giriş debisi ve yağ yoğunluğu azaldıkça ve yağ konsantrasyonu arttıkça, yağ

giderim veriminin arttığını göstermiştir. 50-90 °C sıcaklık aralığında yağ giderim verimi sabit kalmıştır ancak dönüş hızı arttırıldığında yağ gideriminin ilk başta arttığı ve daha sonra azalma gösterdiği belirlenmiştir. Yağ konsantrasyonu 4000-60000 mg/L aralığında olan atıksularda santrifüj uygulaması ile 200 mg/L'den daha düşük yağ konsantrasyonu değerlerine ulaşılabilir (Hao et al. 2013).

2.2.5 Adsorpsiyon ile Arıtım

Yağlı atıksuların arıtımında aktif karbon adsorpsiyonunun uygulandığı bir çalışmada yüksek giderim sağlamak için reaktör olarak geleneksel hidrosiklon ile flotasyonun birleşimi olan bir kolon tasarlanmıştır. Atıksuyun arıtımında yağ konsantrasyonunun, pH değerinin, aktif karbon partikül boyut dağılımının ve adsorpsiyon süresinin etkileri incelenmiştir. Deneyler laboratuvar ölçekli (1 m³/gün), pilot ölçekli (30 m³/gün) ve tam boyutlu (2000 m³/gün) adsorpsiyon kolonlarında yapılmıştır. Tam boyutlu kolonlarda yapılan deneylerde %97 oranında yağ giderimi sağlanmıştır ve çıkış suyu 23,39 mg/L yağ konsantrasyonuna sahiptir (Li et al. 2015).

Yağlı atıksuların arıtımında adsorban olarak immobilize keten tohumu reçine küreleri kullanılarak adsorpsiyonun verim değerlendirilmesi yapılmıştır. Oda sıcaklığında, kürelerin partikül yarıçapının 2 mm ve pH'ın 7,5 olduğu durumda, 30 mg/g keten tohumu reçine küresi ile, gram küre başına 0,55 g yağ giderimi yapılabilmektedir. Keten tohumu reçine kürelerinin tekrar kullanılabilir olması sebebiyle proses diğer metotlardan daha düşük işletme maliyetine sahiptir. İmmobilize keten tohumu reçine küreleri ile adsorpsiyon metodu, yağlı atıksuların arıtımında aktif karbon ile birlikte uygulanabilir, çevre dostu alternatif bir teknolojidir (Long et al. 2012).

2.2.6 Biyolojik Arıtım Yöntemleri

Cheng et al. (2005) metal kesme sızmaları içeren atıksuların arıtımı için yaptıkları bir çalışmada, aerobik ve anaerobik aktif çamur prosesleri kullanarak, KOİ giderim verimlerini karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, aerobik arıtımda %88 oranında KOİ giderimi sağlanırken, anaerobik arıtımda ise %64 giderim sağlanabilmiştir. Bu nedenle çalışmada metal kesme sızmaları içeren atıksuların biyolojik arıtımında, aerobik arıtım yöntemleri uygulamalarının daha yüksek verimler sağlayabileceği ifade edilmiştir.

Metal işleme atıksularının arıtımında suya daldırılmış anaerobik membran biyoreaktörün (SAMBR) kullanıldığı bir çalışmada, fiziksel-kimyasal mekanizmaların ve biyolojik bozunmanın arıtıma etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, seri bağlı iki adet SAMBR kullanılmış, birinci reaktörden çıkan süzüntü, ikinci reaktöre beslenmiştir. Hem kesikli, hem de sürekli biyoreaktörlerde yapılan testler, metal işleme sıvısının düşük biyolojik bozunabilirlikte olduğunu ancak biyolojik olarak yüksek yapışma özelliği gösterdiğini ortaya koymuştur. Metal işleme sıvılarının anaerobik olarak çürütülmesinde en önemli problem hidrolitik/heteroasetojenik biyokütlenin inhibisyonudur. Bu durum da, metal işleme sıvısının bozunabilmesi için spesifik mikroorganizmaların ortamda artışını gerektirir. Uzun süreli işletim sırasında mikroorganizmaların uyum sağlayamaması durumunda, metal işleme sıvılarının biyolojik olarak yüksek yapışma özelliği, atıksulardan giderimi için potansiyel bir metot olarak kullanılabilir (Teli et al. 2015).

2.3 ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLER İLE YAĞLI ATIKSULARIN ARITIMI

Endüstriyel atıksuların kirletici parametreleri endüstri çeşidine göre değişiklik gösterdiğinden dolayı seçilecek olan arıtım yöntemleri de birbirlerinden farklıdır. Literatürde, elektrokimyasal yöntemler ile atıksuların arıtımının farklı endüstrilerde başarılı bir şekilde uygulandığı görülmektedir. Çizelgede 2.1’de farklı endüstriyel kaynaklar ile kirlenmiş atıksuların elektrokimyasal yöntemler ile arıtıldığı çalışmalar gösterilmiştir.

2.3.1 Elektroflotasyon/Elektrokoagülasyon ile Arıtım

Bir otomotiv endüstrisinden alınan atık metal kesme sıvılarının arıtımında elektrokoagülasyon yöntemi denenmiştir. Çalışmada, elektrokoagülasyon için Al ve Fe elektrotlar kullanılarak, arıtımda KOİ, toplam organik karbon (TOK) ve bulanıklık giderim değerleri ölçülmüştür. Elektrokoagülasyonda başlangıç pH’ı, akım yoğunluğu ve arıtım süresi parametrelerinin arıtım verimine etkisi incelenmiştir. Atıksuyun başlangıç pH’ı 3 – 8 arasında değiştirilmiş ve her iki elektrot ile elektrokoagülasyon deneyleri yapılmıştır. pH değişimleri her iki elektrotta da, TOK ve KOİ giderimlerini etkilemiştir. Al elektrot için en iyi giderimi veren pH 5 olarak bulunurken, Fe elektrot için optimum pH değeri 7’dir. Akım yoğunluğu 60-100 A/m² arasında değiştirilerek, akımın arıtım verimine etkisi incelenmiş ve her iki elektrot için de akım yoğunluğu arttıkça KOİ ve TOK giderim verimi artmıştır. Ancak 60 A/m²’den sonra verim çok düşük miktarda artış gösterdiği için optimum akım yoğunluğu her iki elektrot için de 60

A/m² olarak seçilmiştir. Arıtım süresi deneylerinde de, süre arttıkça KOİ ve TOK giderim verimi artmıştır. Ancak 25. dakikadan sonra giderim neredeyse sabit olduğu için süre 25 dk. olarak belirlenmiştir. Her iki elektrot için de bulanıklık giderimi %99'un üzerindedir. Elektrotlar için yapılan maliyet analizi sonuçlarına göre Fe elektrot kullanmanın, Al elektrotla göre yaklaşık %65 oranında daha ekonomik olduğu hesaplanmıştır (Koby et al. 2008b).

Çizelge 2.1 Elektrokimyasal yöntemlerle atıksuların arıtımı.

SİSTEM	ATIKSU KAYNAĞI	KOİ GİDERİMİ (%)	BULANIKLIK GİDERİMİ (%)	REFERANS
EC	MKS	93	99	(Koby et al. 2008b)
EF	Yağ-Su Emülsiyonu	99	99	(Mostefa and Tir 2004)
EC	MKS	92	99	(Bensadok et al. 2008)
Elektrofenton	Sintine Suyu	71		(Ulucan and Kurt 2015)
EC	Yağ-Su Emülsiyonu		99,2	(Yang 2007)
EO	Petrol Rafinerisi	85		(Ibrahim et al. 2014)
EF/EO	Biyodizel Üretimi	97,9	92	(Romero et al. 2013)
EC	Süt Endüstrisi	92	99	(Aitbara et al. 2016)
EC	Tekstil Endüstrisi	90		(Ardhan et al. 2015)
EF	Petrol Endüstrisi		99	(Cerqueira et al. 2014)
EC	Gemi Atıkları	77		(Bilgili et al. 2016)
EC	Yağlı Atıksu	99,1		(Safari et al. 2016)
EO	Tekstil Endüstrisi	90,78		(Bhatnagar et al. 2014)
EC	Zeytinyağı Endüstrisi	58,7		(Coskun et al. 2012)

Yağlı atıksuların arıtımında elektroflotasyon (EF) ve flokülasyon çalışma şartlarının optimizasyonu için yapılan çalışmada KOİ, bulanıklık ve iletkenliğin ölçümünü esas alan deneysel bir dizayn uygulanmıştır. Çalışmalar sırasında üç farklı flokülant kullanılmıştır. Flokülant eklemesi, yağ damlacıklarının bir araya gelmesi ve flok oluşumunun sağlanması için gereklidir. Deneysel sonuçlar, bulanıklık ve KOİ değerlerinin azalması için, pH ve yağ konsantrasyonunun kontrolünün gerekli olduğunu göstermiştir. Optimizasyon prosesi, kimyasal parametrelere ve prosese bağlı olarak çok fazla sayıda deney yapmayı gerektirir. İşletme parametreleri için, prosesin daha iyi bir şekilde düzenlenmesi amacıyla 5 tane deney yapılması yeterli olur. Optimum koşullarda, ağırlıkça %4 oranında yağ içeren emülsiyonun EF ile arıtım verimi %99'a ulaşmıştır (Mostefa and Tir 2004).

Yüksek KOİ ve bulanıklık değerine sahip, çok kararlı kesme sıvılarının arıtımında alüminyum elektrotlar ile elektrokoagülasyon uygulanabilir bir prosestir. EC prosesi, işletim koşullarından bağımsız olarak iki fazda gerçekleşir: giderim veriminin zamanla arttığı reaktif faz ve anot çözünmesi için daha fazla enerji harcamasının gereksiz olduğu sabit faz. Yağ konsantrasyonu ne kadar yüksek ise, reaktif faz o kadar uzun olur ve reaktif faz yüksek akım yoğunluğu uygulanarak kısaltılabilir. Optimum başlangıç pH'ı 6-7 olarak bulunurken, elde edilen KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %92 ve %99'dur. Bu yüksek giderim verimlerine rağmen, bulanıklık ve KOİ değerleri standart deşarj değerlerinden yüksektir. Bu sebeple, EC prosesi membran gibi arıtım yöntemleri için uygun bir ön arıtım prosesi olabilir (Bensadok et al. 2008).

Ulucan and Kurt (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, sintine suyu arıtımında elektrokimyasal prosesler kullanılmıştır. Sintine suyu, deniz suyu ile karıştırılarak klorür içeriği ve iletkenliği arttırılmış ve böylece elektrokimyasal arıtımda avantaj sağlanmıştır. Arıtımda demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak pH, zaman, sıcaklık ve akım yoğunluğuna bağlı elektrokoagülasyon/elektroflotasyon deneyleri yapılmıştır. Alüminyum ve demir elektrotlar karşılaştırıldığında, alüminyum elektrot 10 dakikalık kısa bir sürede daha yüksek verim sağlamıştır. Alüminyum elektrottan elde edilen KOİ ve yağ giderim verimi sırasıyla %64,8 ve %57 iken, demir elektrot için bu değerler %36,2 ve %12,5'tir. Ayrıca arıtımda elektrofenton prosesi de kullanılarak EC prosesi ile karşılaştırılmış ve daha yüksek giderim verimi sağlanmıştır. Elektrofentonda KOİ giderim verimi %71 ve yağ giderim verimi %69 olarak bulunmuştur. Elektrofenton prosesinden elde edilen sonuçlar deşarj standartlarına uymaktadır. Proseslerin ekonomik analizine bakıldığında, EC'de elektrik tüketimleri

alüminyum elektrot kullanıldığında 0,54 \$/m³, demir elektrot kullanıldığında 0,53 \$/m³ ve elektrofenton prosesinde 0,51 \$/m³ olarak hesaplanmıştır.

Yağ-su emülsiyon yapısının bozulması için elektrokimyasal koagülasyon üzerine yapılan bir çalışmada sentetik yağlı su hazırlamak için motor yağları ve endüstriyel yüzey katkı maddeleri kullanılmıştır. Kararlı duruma gelmiş emülsiyonun bulanıklığının, yağ konsantrasyonu ile doğru oranda olduğu saptanmıştır. İyonik iletkenliği sağlamak ve demir elektrottaki pasifizasyonları önlemek için, EC prosesinden önce emülsiyonlara 100 mg/L NaCl çözeltisinden az miktarda eklenmiştir. Fe⁺² iyonları Fe⁺³ iyonlarına oksitlenerek emülsiyonu kararsızlaştırmıştır. Toplanan yağ damlacıkları yüksek oranda dağılmış ve reaktif Fe(OH)₃ koagülantına adsorbe olmuştur. Deney sırasında oluşan yüksek yağ içeriğine sahip çamur yüzeyde birikmiş ve buradan sıyrılmıştır. Bu karmaşık mekanizma 4 dakikada tamamlanmıştır. Bu sürede 165,8 mg/L Fe⁺³ iyonu oluşmuş ve arıtım sonucu bulanıklık 1800 FAU'dan 60 FAU'ya düşmüştür. Deney, sürekli sistemde 2 A akım ve 320 mL/dak debide çalıştırıldığında bulanıklık 14 FAU'nun altına düşmüştür (Yang 2007).

Sintine suyu arıtımı ve yağ/su emülsiyonlarının bozunması için yapılan çalışmada kesikli elektrokimyasal reaktörde platin/demir (Pt/Ir) elektrotlar kullanılarak arıtım deneyleri yapılmıştır. Çalışmada sintine suyu kompozisyonu, deniz suyu/tatlı su kompozisyonu, akım yoğunluğu, reaksiyon sıcaklığı parametrelerinin KOİ, yağ/gres ve bulanıklık giderimine etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar yanıt yüzey yönteminde kullanılarak, maksimum giderim verimi sağlayan minimum akım yoğunluğu ve enerji tüketimi miktarları bulunmuştur. 240 dakikalık Pt/Ir elektrotlar ile yapılan deneylerde elde edilen KOİ, yağ/gres ve bulanıklık giderim verimleri aralıkları sırasıyla %73,5-99,9, %86,5-96,8 ve %67,2-97,9'dur. Ortalama enerji tüketimi ise 13,9-50,9 kWsa/kg_{KOİ} olarak bulunmuştur. Yanıt yüzey yönteminden elde edilen optimum koşullar %100 sintine suyu kompozisyonu (KOİ₀=3080 mg/L), %50/50 deniz suyu/tatlı su kompozisyonu, 12,8 mA/cm² akım yoğunluğu ve 32 °C reaksiyon sıcaklığı olarak belirlenmiştir (Korbahti and Artut 2010).

Yağlı atıksulardan dizel ve KOİ gideriminin incelendiği bir çalışmada arıtım yöntemi olarak elektrokoagülasyon kullanılmıştır. Deneyler alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon verimini belirlemek amacıyla pH (3-11), zaman (10-60 dak.), voltaj (4,5-10,5 V), yardımcı elektrolit (NaCl konsantrasyonu), elektrot malzemesi ve başlangıç dizel konsantrasyonu (3500-11000 mg/L) parametreleri incelenmiştir. Bununla

birlikte, enerji tüketimi ve oluşan çamur miktarı da belirlenmiştir. En yüksek giderim veriminin (%99,1 KOİ giderimi ve %98,8 dizel giderimi) elde edildiği işletim koşulları: pH 7, 40 dakikalık deney süresi, 10,5 V voltaj farkı, 0,5 g/L NaCl konsantrasyonu ve 3500 mg/L dizel konsantrasyonudur. Proseste tüketilen enerji 6,47 kWsa/m³ ve çamur üretimi 1995 mg/L olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, elektrokoagülasyon prosesinin aşırı derecede kirlenmiş petrol rafinerisi atıksularının arıtımı için uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir (Safari et al. 2016).

EC prosesinin performansını flotasyon ile arttırmak amacıyla, gaz kabarcıkları elektrokimyasal olarak üretilmiştir. Bu amaçla, mikron boyutundaki gaz kabarcıklarını (<5 mA/cm²) üretmek için EC prosesinde, farklı akım yoğunluklarında deneyler yapılmıştır. Sonuçta, akım yoğunluğu ve pH'ın, prosesi önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Daha yüksek akım yoğunluklarında, daha çok küçük boyutlu gaz kabarcığı oluşumu gözlenmiştir. Ancak, çok yüksek akım yoğunlukları, gaz kabarcıklarının boyutunun artmasına neden olmuştur. Gaz kabarcıklarının oluşumunda pH'ın da önemli bir etkisi vardır. Nötr pH'da küçük boyutlu gaz kabarcıkları oldukça fazla sayıda üretilebilmiştir. Elektrot malzemesi de EC/EF prosesini etkileyen önemli bir parametredir. Paslanmaz çelik elektrot, titanyum elektrottan daha iyi sonuçlar vermiştir. Elektrotun yüzey pürüzlülüğü de gaz kabarcıklarının oluşumunu etkileyen önemli bir parametredir (Jimenez et al. 2010).

2.3.2 Elektrooksidasyon/Elektrofenton ile Arıtım

Petrol rafinerisinden kaynaklı atıksuların arıtımında, yeni bir arıtım teknolojisi olan elektrooksidasyon (EO) prosesi kullanılmıştır. Boru şeklinde tasarlanan elektrokimyasal reaktör, paslanmaz çelik katot ve %60 oranında delinmiş rutenyum oksit kaplı titanyum anot içermektedir. Elektrokimyasal reaktörde yapılan 24 dakikalık deneylerde, 30 mA/cm² akım yoğunluğu, 4 g/L elektrolit konsantrasyonu, 120 L/sa debi ve pH'ın 8 olduğu optimum deney koşullarında, toplam petrol hidrokarbonları giderilmiş ve %85 oranında KOİ giderimi sağlanmıştır. Bu sonuçlar, petrol rafinerisi atıksularının geri dönüşümü ve yeniden kullanımı için alternatif bir metot olan elektrokimyasal teknolojinin uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu teknoloji aynı zamanda arıtım için gerekli süreyi, tüketilen suyun hacmini ve deşarj edilen atıksuyun miktarını azaltmaktadır (Ibrahim et al. 2014).

Biyodizel üretiminden kaynaklı atıksuların elektroflotasyon (EF) ve elektrooksidasyon (EO) proseslerinin birlikte kullanımı ile arıtımında kesikli akışlı reaktör kullanılarak optimum deney koşulları belirlenmiştir. Akım yoğunluğu, iletkenlik ve deney süresi gibi parametreler çalışılmış ve optimize edilmiştir. Deneyler, alüminyum elektrotlarla ve 80 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, 60 dak. deney süresinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, ön arıtım olarak EF'nin kullanılmasının bulanıklığı, toplam katıları, yağ ve gresi, KOİ ve metanolü sırasıyla %92, %98, %100, %57 ve %23 oranlarında azalttığını göstermiştir. Ön arıttan sonra çıkış suyu, Ti/RuO₂ anot malzemesinin kullanıldığı EO ünitesine gönderilmiştir. Uygulanan akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin verime etkisi değerlendirilerek optimize edilmiştir. EO deneyleri 40 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, 240 dakika deney süresinde yapılmıştır. Deneylerde %68 metanol ve %95 KOİ giderimleri elde edilmiştir (Romero et al. 2013).

Tekstil endüstrisinden kaynaklı atıksularda bulunan organik maddelerin elektrokimyasal oksidasyonu ile KOİ ve renk giderimi grafit elektrotlar kullanılarak, minimum enerji kullanımı durumunda gerçekleştirilmiştir. Arıtımda dört farklı parametre çalışılmış ve bu parametrelerin arıtımdaki rollerinin değerlendirilmesinde Box-Behnken tasarımı kullanılmıştır. pH (4-10), akım yoğunluğu ($27,78-138,89 \text{ A/m}^2$), NaCl konsantrasyonu (0-2 g/L) ve elektroliz süresi (10-130 dak) parametrelerinin KOİ, renk giderimi ve enerji tüketim verimlerine etkileri incelenmiştir. Optimum arıtım koşullarında maksimum KOİ ve renk giderimi ve özgül enerji tüketimi sırasıyla %90,78, %96,27 ve 23,58 kWsa/kg_{KOİ} olarak hesaplanmıştır. Arıtılan suyun KOİ değeri istenen limitlere uymaktadır (Bhatnagar et al. 2014).

2.3.3 Elektrokimyasal Arıtımda Akış Hidroliğinin Etkisi

Yapılan bir çalışmada (Ardhan et al. 2015) bir kesikli akışlı elektrokoagülatör, tekstil boyarmaddesi ile hazırlanan atıksudan, boya giderimi için geliştirilmiştir. Kesikli akışlı reaktörden elde edilen veriler ile, KOİ ve renk giderimi için, aynı performansa sahip bir sürekli akışlı reaktör tasarlanmıştır. 1,8 L hacmindeki kesikli reaktörde, 30 A/m^2 akım yoğunluğunda, $0,10 \text{ m}^2$ elektrot alanında ve 7 dakika elektrokoagülasyon süresinde KOİ giderim verimi %90 ve renk giderim verimi %95'tir. İki adet boşluklu demir tüplerin eş-merkezli şekilde birleştirilmesiyle oluşturulan sürekli akışlı reaktör 1,5 L hacme ve $0,15 \text{ m}^2$ elektrot alanına sahiptir. Kesikli reaktörde uygulanan optimum akım yoğunluğu ve elektrik

yükü sürekli reaktöre de uygulandığında, her iki reaktörde de aynı oranda KOİ ve boya giderim verimleri elde edilmiştir.

Elektroflokülasyon (EF) prosesinin genel kullanımında doğru akım kullanılması, katotta geçirimsiz oksit tabakanın oluşumuna ve bu nedenle prosesin veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Alternatif akım kullanımı ile geçirimsiz oksit tabaka oluşumunun azalacağı önerilmektedir. Alternatif akım ile doğru akımın, petrol endüstrisinden kaynaklı yağ-su emülsiyonlarından, renk ve bulanıklık giderimi gibi işletme parametrelerine olan etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Cerqueira et al. 2014) alüminyum elektrotlar kullanılarak, kesikli akışlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Başlangıç pH'nın 9, deney süresinin 3 dakika ve akım yoğunluğunun 3 A olduğu koşullarda %95 yağ-gres giderimi, %97 renk ve %99 bulanıklık giderimleri sağlanmıştır. Ayrıca, alternatif akım kullanıldığında elektrot tüketimi 0,12 g iken, doğru akım kullanıldığında 0,18 g elektrot tüketimi olduğu görülmüştür. Aynı koşullarda yapılan sürekli akışlı deneylerde, 60 dakikalık sürede, alternatif akımda elektrot tüketimi 1,6 g, doğru akımda ise 3,4 g elde edilmiştir.

Yakıt tankları ve gemi atıklarından kaynaklı yağlı atıksuların arıtımında kesikli ve sürekli akışlı EC prosesi uygulanmıştır. Kesikli akışta, 50 A/m² akım yoğunluğu ve 20 dakika kalış süresinde %55 AKM, %75 yağ-gres ve %60 KOİ giderim verimleri elde edilmiştir. Ayrıca, en iyi giderim verimleri, numunenin kendi pH'ı olan 6-8 pH aralığında sağlanmıştır. Aynı akım yoğunluğu ve kalış süresinde, sürekli akışta yapılan deneylerde yaklaşık %80 oranında AKM giderimi ve %90'ın üzerinde yağ-gres giderimi ve %77 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bu giderim verimleri, tüm parametreler için deşarj limitlerini sağlamaktadır. Sürekli akışlı EC prosesinde, toplam işletme maliyeti 1,4 \$/m³ olarak hesaplanmıştır. Çalışmada, EC ile arıtımın, herhangi bir kimyasal gerektirmemesi, kolay kontrol edilebilir olması, az yer kaplaması, kısa sürede yüksek arıtım verimi sağlaması nedeniyle yağlı atıksuların arıtımında alternatif bir arıtım yöntemi olarak düşünülebileceği ifade edilmektedir (Bilgili et al. 2016).

Petrol rafinerisinden alınan yağlı atıksuyun EC prosesi ile arıtıldığı bir çalışmada, atıksudan KOİ, sülfür ve yağ giderimi incelenmiştir. Demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak, kesikli ve sürekli akışlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Kesikli akışlı reaktörde sıcaklığın ve elektrot malzemesinin arıtım verimine etkisini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler, sıcaklığın artmasıyla KOİ gideriminin daha kısa sürede gerçekleştiğini göstermiştir. Ancak her durumda KOİ, atıksuda çözünmüş organik maddelerin

varlığı sebebiyle 100 mg/L'nin altına düşmemiştir. Alüminyum ve demir elektrotlar kullanıldığında ise her iki elektrot da KOİ giderimi sağlamış fakat alüminyum elektrot ile sülfür giderimi yapılamamıştır. KOİ ve yağ, birinci derece kinetik reaksiyon ile giderilirken, sülfür giderimi değişken dereceli reaksiyon ile gerçekleşmiştir. Bu üç parametre arasında, KOİ giderim hızının en yavaş olduğu görülmüştür. Sürekli akışlı reaktörde KOİ giderimine bağlı olarak dispersiyon deneyleri yapılmıştır. Dispersiyonun KOİ giderimini %14 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. EC prosesinde akım yoğunluğunun artması, arıtım verimini arttırmıştır. Ancak akım yoğunluğu 90 A/m²'den 450 A/m²'ye çıkarıldığında, reaktörde kalış süresi 2,5 kat azalmasına rağmen, enerji tüketiminde 10 kat artış olduğu görülmüştür (Martinez-Delgadillo et al. 2010).

Yağlı atıksuların EC ile arıtımında yatay ve dikey elektrot kullanımının yağ giderim verimine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde yatay olarak yerleştirilen elektrotların yağ giderim veriminin, dikey elektrotlara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, yatay elektrotların olduğu üniteye daha iyi karışım verimi sağlandığı için daha fazla H₂ baloncuğu oluşmakta ve böylece daha yüksek miktarda yağ yüzeye çıkmaktadır. Eş zamanlı olarak yapılan EC ve EF deney sonuçları yağ giderim veriminin akım yoğunluğuna, sıcaklığa, NaCl konsantrasyonuna ve pH'a bağlı olduğunu göstermiştir. Akım yoğunluğu arttıkça, yağ giderim verimi de artmıştır. Sıcaklık ve tuz konsantrasyonunun azaltılması yağ giderim verimini arttırmıştır. Ancak tuz konsantrasyonundaki azalış yağ giderim veriminde artış sağlarken, sistem voltajında da artış sağladığı için, enerji tüketiminde de önemli oranda bir artışa neden olmuştur. pH 5-8 arasında iken yağ giderim veriminin sabit kaldığı ancak, pH 9'da yağ gideriminin sağlandığı görülmüştür. EC Deneylerinde yağ giderimi 10. dakikadan sonra gözlenmiştir (Fouad et al. 2009).

2.3.4 Elektrokimyasal Arıtımda Enerji Kullanımı

Bir atıksu arıtım tesisinin aktif çamur prosesi çıkışından alınan, ikincil olarak arıtılmış atıksu numuneleri elektrokimyasal yöntem ile arıtılmıştır. Akım yoğunluğunun, arıtım süresinin, elektrolit konsantrasyonunun ve pH'ın KOİ giderim verimine etkileri incelenmiştir. Deneyler 2 litrelik cam bir hazne içerisinde gerçekleştirilmiş ve uygulamalarda 125 cm² yüzey alanına sahip ve birbirlerinden uzaklıkları 2 cm olan iki adet alüminyum elektrot kullanılmıştır. Çalışılan parametrelerdeki artışların, KOİ giderim veriminde de artışa neden olduğu gözlenmiştir. Optimum arıtım koşulları akım yoğunluğunun 7,52 mA/cm², arıtım süresinin 40

dakika, destekleyici elektrolit olan NaCl konsantrasyonunun 0,5 g/L ve pH'ın 7 olduğu durumda elde edilmiştir. Optimum arıtım koşullarında elde edilen KOİ giderim verimi %86 olarak belirlenmiştir. Bu arıtım koşullarında maksimum elektrot tüketimi $10,51 \cdot 10^{-2}$ ve maksimum enerji tüketimi $45,12 \text{ kWsa/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Prosesin işletme maliyeti $4,87 \text{ \$/m}^3$ 'tür (Chopra and Sharma 2015).

Boya endüstrisi atıksularının arıtım çalışması için sentetik olarak hazırlanan atıksu numuneleri elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılarak, elde edilen renk giderim verimi ve enerji tüketimi değerleri incelenmiştir. Elektrokoagülasyon deneylerinde başlangıç pH'ı (2, 5,5 ve 9), başlangıç boya konsantrasyonu (20, 60 ve 100 mg/L), uygulanan voltaj değeri (10, 20 ve 30 V) ve başlangıç elektrolit konsantrasyonu (0, 0.5, 5, 10, 15, 25, 35 ve 50 dak.) olmak üzere beş farklı parametre çalışılmıştır. Deneyler kesikli akışlı reaktörde gerçekleştirilmiştir. Optimum deney koşullarını sağlayan başlangıç boya konsantrasyonu 20 ppm olarak bulunmuştur. Diğer dört parametre boya giderim verimine göre iki gruba ayrılmaktadır. %95'den daha az oranda boya gideriminin sağlandığı ilk grupta optimum deney koşullarında elde edilen başlangıç pH değeri 9, başlangıç elektrolit konsantrasyonu 0,7-1,1 g/L, uygulanan voltaj 10 V ve arıtım süresi 1 dakikadır. Bu koşullarda sistemin enerji tüketimi 0,1 Wsa'ten daha azdır. %95'den daha fazla boya gideriminin olduğu ikinci grup için optimum deney koşullarında başlangıç elektrolit konsantrasyonu 1,1-2 g/L, uygulanan voltaj değeri 10-15,2 V, arıtım süresi 49,4-50 dak. ve pH 6,8 olarak bulunmuştur. İkinci durumda hesaplanan enerji tüketimi 12,2-134,7 Wsa aralığındadır (Maleki et al. 2014).

Zeytinyağı fabrikası atıksularının ön arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin kullanıldığı bir çalışmada alüminyum ve demir elektrotlar ile arıtım yapılmıştır. Farklı arıtım süreleri ve 0,5, 1 ve 2 A'lik akım değerlerinin uygulandığı deneylerde elde edilen KOİ giderim verimi incelenmiştir. Optimum arıtım süresi 45 dakika ve optimum akım değeri 1 A olarak bulunmuştur. Alüminyum elektrot ile en iyi arıtım koşullarında sağlanan KOİ giderim verimi %58,7'dir. Optimum deney koşulları için enerji tüketim değeri de hesaplanmış ve arıtım maliyeti yaklaşık $0,13 \text{ €/kg}_{\text{KOI}}$ ve $4,41 \text{ €/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre elektrokoagülasyon prosesinin zeytinyağı fabrikası atıksuları için etkili ve ucuz bir yöntem olduğu ifade edilmiştir (Coskun et al. 2012).

Endüstriyel atıksularda organik bileşikler önemli kirleticilerdir. Geleneksel atıksu arıtma prosesleri toksik ya da biyolojik olarak bozunmayan organik kirleticilerin giderimi için

yetersiz kalmaktadır. Atıksulardan yağ gideriminde elektrokimyasal yöntemlerin araştırıldığı bir çalışmada (Chachou et al. 2015) kararlı yağ/su emülsiyonlarının mineralizasyonu ve bozunmasında elektrofenton (EF) prosesi uygulanmıştır. Katot malzemesi, elektrolit çeşidi ve dozajı, başlangıç demir iyonu konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve arıtım süresi gibi işletme parametrelerinin KOİ giderim verimine etkileri incelenmiştir. En iyi giderim verimi, katot malzemesinin grafit olduğu, 180 dakikalık arıtım süresi ve 0,05 M elektrolit (Na₂SO₄) kullanımında elde edilmiştir. Bu koşullarda KOİ giderim verimi %93,6 ve enerji tüketimi 19 kWsa/m³ ve 24,039 kWsa/kg_{KOI} olarak hesaplanmıştır.

2.3.5 Elektrokimyasal Yöntemler ile Diğer Arıtım Proseslerinin Karşılaştırılması

Bir çalışmada (Muszynski et al. 2007) metal kesme endüstrisinden alınan atıksu numunesi biyolojik ve elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile arıtılarak, toksisite değerlendirmesi yapılmıştır. Kullanılan atıksu % 1,5 oranında metal kesme yağı içermektedir. Metal kesme sıvısı ile kirlenmiş ve arıtılmamış atıksu ile, biyolojik ve elektrokimyasal olarak arıtılmış atıksuyun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ₅) ve toplam organik karbon (TOK) değerleri ölçülmüştür. Toksikite deneyleri için beş farklı canlı türü kullanılarak, atıksu numunelerindeki maruziyet sonuçları incelenmiştir. Deneyler sonucunda elektrokimyasal yöntem ile biyolojik yöntemin arıtım performanslarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Canlılar üzerinde yapılan toksisite deneylerinde ise, her iki arıtımda da toksisitenin %99'a varan oranlarda azaltıldığı saptanmıştır. Ancak her iki arıtımdan sonra da atıksu, toksisite değerlendirmesine göre "toksik" sınıfına girmektedir. Bu çalışmada, atıksuyun sadece fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesinin arıtım performansı için yeterli olmadığı, atıksuyun toksik özelliklerinin de incelenmesinin önemli ve gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Süt endüstrisinden alınan atıksuyun arıtımının yapıldığı bir çalışmada (Aitbara et al. 2016) ise laboratuvar ölçekli, sürekli akışlı elektrokoagülasyon tankı kullanılmıştır. Atıksu yüksek BOİ₅ ve KOİ'ye sahiptir. Elektrokoagülasyonda elektrotlar arası ortalama kalış süresinin, giderim verimini etkileyen önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir. İşletim parametrelerinden debi, akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri ve sıcaklığın arıtıma etkileri incelenmiştir. Optimum koşullarda bulanıklık giderim verimi %99'a yakın ve KOİ giderim verimi de %92'dir. BOİ₅ ve yağ giderimi %97 ve fosfor giderimi %70'tir. Gerekli işletme koşulları için enerji tüketimi 2-3,5 kWsa/m³ aralığında hesaplanmıştır.

Diğer bir çalışmada (Canizares et al. 2008) ise yağ-su emülsiyonlarının arıtımında hidrolize alüminyum tuzları kullanılarak kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerin çalışma verimleri karşılaştırılmıştır. Proseslerin veriminin doğrudan dozajlamaya bağlı olmadığı, ancak alüminyumun toplam konsantrasyonu ve pH'a bağlı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu parametrelerin, kimyasal ve elektrokimyasal proseslerde değişim gösterdiği ifade edilmiştir. Elektrokimyasal arıtımda son ürün olarak alüminyum hidroksit oluşması nedeniyle deney süresince pH artış gösterirken; konvansiyonel sistemde, eklenen alüminyum tuzlarının ($AlCl_3$ ya da $Al_2(SO_4)_3$) asidik özelliklerinden dolayı pH azalmaktadır. Yağ emülsiyonun kararsızlığının sadece pH 5-9 aralığında gerçekleştiği ve gerekli alüminyum miktarının yağ konsantrasyonu ile doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Aynı alüminyum konsantrasyonu için, kimyasal ve elektrokimyasal prosesler arasındaki küçük farklılıkların, her iki prosesdeki pH değişimleri ile açıklanabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, atıksuyun başlangıç pH'ının arıtımda giderim verimine önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, klorür içeren elektrolitlerin, sülfat iyonları içerenlere göre daha iyi KOİ giderimi verimi sağladığı belirlenmiştir.

BÖLÜM 3

METAL KESME SIVILARININ ÖZELLİKLERİ VE ATIKSULARININ ARITIMI

Çalışmanın bu bölümünde metal kesme sıvılarının genel özellikleri, fonksiyonu ve sınıflandırılması hakkında bilgi verilmiş ve metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksuların arıtım yöntemleri anlatılmıştır.

3.1 METAL KESME SIVILARI

Metal işleme operasyonları; talaş kaldırma ve taşlama, kaplama ve ısıtma işlemleri, sıvama, ekstrüzyon, kalıplama, dövme ve haddeleme gibi prosesleri içerir. Metal kesme sıvıları, bu metal işleme operasyonlarının optimizasyonu için kullanılmaktadır. Bu operasyonlarda ulaşılmak istenen verimin maksimum düzeyde olması için, kullanılacak metal kesme sıvıları birbirlerinden farklı özelliklere sahip olmalıdır. Fakat bu sıvıların çalışacağı koşullar için bazı genellemeler yapılabilir (Dolapçı 2010). Metal işleme proseslerinde iş parçaları arasında oluşan kuvvet, basınç, gerilme ve sıcaklık gibi etkenler, belirli bir çalışma süresi sonunda; başta aşınma olmak üzere aletlerde bozulmalara, ağız kısmında kırılmalara, çalışılan yüzeyler arasında büyük bir sürtünme ve sıcaklık oluşmasına yol açmaktadır. İşlem sırasında metal kesme sıvısı kullanılması durumunda, bu sıvı içerisindeki katkı maddeleri metal yüzeyiyle reaksiyona girerek yağlayıcı bir film tabakası oluşturur ve böylece yüzeyler arasındaki sürtünme ve aşınmayı önlerler. Böylece iş parçalarının aşınması minimumda tutularak kullanılan aletlerin ömrü arttırılır ve düzgün, pürüzsüz bir yüzey oluşumu sağlanır. Oluşan bu film tabakası sayesinde sürtünmenin azalması ile enerji korunumu da sağlanır ve takım aşınmasını minimumda tutar. Dolayısıyla takımın ömrünü arttırır ve düzgün, pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini sağlar. Ayrıca, kesme yüzeyi soğutulursa ve yağlanırsa, talaş işleme hızı önemli derecede artabilir. Metal kesme sıvıları, metal şekillendirme ve kesme işlemleri esnasında yağlayıcılık ve soğutuculuk görevi görerek üretimin kalitesini ve üretkenliğini arttırır. Bu nedenle, metal işleme operasyonlarının büyük bir kısmı metal kesme sıvıları kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Aşkın 2011).

3.1.1 Metal Kesme Sıvılarının Özellikleri

Kesme bölgesine doğrudan uygulanan metal kesme sıvıları, kesme hızını iki-üç kat arttırdığı için bu sıvılar endüstride uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal işleme sanayinde kesme sıvıları; soğutma, yağlama ve temizleme gibi olumlu etkileri nedeniyle kullanılmaktadır (Şekil 3.1). Bir metal kesme sıvısının kaliteli bir kesme işlemini yerine getirebilmesi için istenilen kesme hızı, yüksek yüzey kalitesini bozmadan sağlanabilmelidir. Kesme sıvıları sürtünmeyi en az seviyeye indirerek sıcaklık artışını önlemeli, iş parçası ve takım ömrünü uzatmalı ve yüksek basınç altında yağlayıcılık sağlayarak yüzeyler arasında metal yapışmasını önlemelidir. Metal kesme sıvıları aynı zamanda iş parçası ya da takım üzerinde korozyon etki yapmamalı, dumansız ve kokusuz olmalı ve kolay alev almamalıdır. İnsan sağlığına zararlı olmamalı ve depolanabilmesi için uzun ömürlü olmalıdır. Maliyet açısından ise ucuz olmalıdır (Dolapçı 2010). Özetle, iyi bir metal kesme sıvısı kullanımı, iş parçasının istenen yüzey kalitelerinde üretilmesine, kesici uç aşınmasının minimize edilmesine, üretimin hızlanmasına ve bunların sonucunda da üretim maliyetlerinin düşmesine yardımcı olur.



Şekil 3.1 Metal kesme esnasında kesme sıvılarının kullanımı (Aşkın 2011).

3.1.2 Kesme Sıvılarının Performansını Etkileyen Parametreler

pH değeri, yoğunluk, viskozite, şeffaflık, parlama ve yanma noktası, damla boyutu, konsantrasyon ve korozyon kesme sıvılarının performansını etkileyen en önemli parametrelerdir. *pH Değeri:* Metal kesme sıvıları için optimum pH değeri 8,5-10 aralığındadır. Bu aralıktaki pH değerine sahip metal kesme sıvısı korozyonu önlemede, iyi bir temizleme sağlamada, insan cildine olan zararı minimuma indirmede ve bozunmayı geciktirmede daha etkilidir. Metal kesme sıvılarında pH'ın 8,5'in altına düşmesi durumunda kesme sıvısının verimi azalır, metal yüzeylerinde paslanma görülebilir ve biyolojik aktiviteler başlayabilir. pH'ın 10'dan yüksek olduğu durumlarda ise kesme sıvıları insan cildine zarar verebilir ve ayrıca metalin korozyonu artar.

Damla Boyutu: Emülsiyondaki damlaların boyutu çözeltinin görünümünü belirler ve bir emülsiyonun stabilitesi damla büyüklüğüne bağlıdır. Damla boyutları 1 µm veya daha büyükse emülsiyon beyaz renklidir. 0,05-0,1 µm arasında damla boyutuna sahip emülsiyonlar yarı saydam ve 0,05 µm'den küçük olan emülsiyonlar ise saydamdır. Dispers fazın daha küçük partikülleri daha stabil emülsiyon sağlar. Damla büyüklüğü ve dağılımı analizi bir emülsiyonun kararlılığının saptanmasında büyük önem taşır. Damla büyüklüğü, emülsiyondaki yüzey aktif madde cinsi ve yüzey aktif madde konsantrasyonuna bağlı olarak değişir.

Kesme Sıvısı Konsantrasyonu: Emülsiyonların kullanım alanlarına göre ideal kullanım konsantrasyonları vardır ve maksimum performans bu aralıklarda elde edilir. Bu aralıkların dışına çıkıldığı zaman bazı problemler çıkar. Bu nedenle konsantrasyonun günlük olarak kontrol edilmesi gerekir. Konsantrasyon kontrolü refraktometre ile yapılır. Konsantrasyonun yüksek olması parça yüzeyinde yapışkan çökelekler ve kesme bölgesinde duman oluşmasına ve operatörün ellerinde tahriş olmasına neden olabilir. Konsantrasyon düşük olduğunda ise parçada ve tezgahta paslanma problemleri görülebilir, yağlayıcılık özelliği azalacağı için iş parçası yüzey kalitesinde problemler çıkabilir ve emülsiyonun bakteri üremesine karşı direnci azalır (Karahana 2010).

Yoğunluk: Kesme sıvılarının yoğunluğunun suyun yoğunluğuna yakın olması, yağ-su emülsiyonlarının kararlılığı açısından önemlidir. Karışımın yoğunluğunun bu değerden farklı

olması durumunda faz ayrımları oluşabilir ve bu sebeple heterojen karışımlar meydana gelebilir. Bu durum kesme sıvılarında istenmeyen bir özelliktir.

Viskozite: Metal kesme sıvılarında kullanılan en önemli özelliklerden biri viskozitedir. Viskozite, kesme sıvısının yağlayıcılık değeri hakkında bilgi verir. Yüksek viskoziteye sahip kesme sıvıları daha kalın bir yağ filmi oluşturdukları için iş parçası ve takım arasındaki temas yüzeyi daha az olur ve dolayısıyla daha düşük sürtünme meydana gelir. Ayrıca, yüksek viskoziteye sahip sıvılar uygun partiküler dağılıma özelliği gösterir ve düşük buharlaşma değerine sahiptirler. Fakat kullanımdan sonra iş parçası ve takım üzerinde artık oluştururlar ve bu da yağ kayıplarına neden olur. Kalın yağ filmleri kalite kontrol açısından da istenmediği için metal kesme sıvılarının yüksek viskoziteye sahip olması tercih edilmeyen bir durumdur. Modern üretim prosesleri kesme sıvılarının düşük viskoziteli olmasını öngörür (Silva et al. 2016). Düşük viskoziteye sahip kesme sıvıları ısıyı daha iyi iletirler ve soğutma kapasiteleri daha yüksektir. Fakat, düşük viskoziteli sıvıların da buharlaşma ve alevlenme noktaları düşüktür ve havada parçacıklar halinde yayılmaları daha kolaydır.

Korozyon: Metal işleme operasyonlarında koruyucu tabakanın uzaklaştırılması ile yeni kesilmiş demir içeren metallerde pas oluşumu gözlenebilir. Pas oluşumu, iş parçasında istenilen yüzey kalitesinden uzaklaşmasına ve takımın ömrünün kısılmasına neden olur. Bu nedenle kesme sıvıları korozyon koruması sağlamalıdır. Günümüzde kesme sıvıları, korozyona engel olan katkı maddeleri içermektedir.

Parlama ve Yanma Noktası: Parlama noktası; bir sıvının, devamlı şekilde yanmadan önce, sıvı buharının alev almaya başladığı minimum sıcaklık derecesidir. Yanma noktası ise sıvı buharının bir aleve dokunarak yanması ve en az 5 saniye yanabilmesi için gerekli en düşük sıcaklık derecesi olarak tanımlanır. Metal kesme sıvılarında parlama ve yanabilirlik değerleri, işçi güvenliği, üretim esnasındaki risklerin tespit edilmesi ve bu sıvıların taşınma yöntemlerinin belirlenmesi açısından önemlidir.

Şeffaflık: Kesici takım ve iş parçasının net olarak gözlemlenmesi gereken bazı operasyonlarda kesme sıvılarının berrak ve şeffaf olması istenebilir (Bakırcı 2014).

3.1.3 Metal Kesme Sıvılarının Fonksiyonları

İdeal bir kesme sıvısı yağlama, soğutma ve kaynağı önleme olmak üzere üç ayrı fakat birbiriyle ilişkili fonksiyonları yerine getirmek zorundadır.

Yağlama Fonksiyonu: Kesme sıvılarının ilk görev takımı iş parçasını ve talaşı yağlamasıdır. Kesme sıvılarının yağlayıcı özelliği ile ısı oluşumu engellenir ya da en aza indirgenir. Yağlama özelliği iyi olan kesme sıvıları sayesinde talaş ile takım arasında ince bir film tabakası oluşturularak metal-metal teması önlenir. Ayrıca yağlama özelliği, takımla talaş arasındaki sürtünme kuvvetlerini düşürerek sürtünmeden kaynaklı ısıyı minimize eder ve metal yüzeyinin kalitesini iyileştirir. Kesme sıvısının yağlayıcılık verimi sıcaklık, aşırı basınç, nem, hava, su, oksijen gibi parametrelerden etkilenir (Şık 2009).

Soğutma Fonksiyonu: Isı daima sıcak bir maddeden daha soğuk bir maddeye akar. Bu nedenle, iş parçası, kesici takım ve talaş arasında sürtünme ile meydana gelen ısı, soğutucu özellikteki kesme sıvısı ile absorbe edilmeye çalışılır. İşlem sırasında sıvının kendisi ısınır ve devamlı olarak bir diğer sıvı ile değiştirilemediği için soğutma kabiliyetini kaybeder (Kobya et al. 2008a). Bu nedenle, metal kesme sıvılarının soğutmayı etkili bir şekilde sağlayabilmesi için işlem yapılan bölgeye düşük basınçta ve yüksek akış hızında uygulanması gerekmektedir. Metal kesme sıvısının soğutma verimi ıslanan yüzeyin alanına, sıvının viskozitesine, kimyasal özelliklerine ve fiziksel özelliklerine bağlıdır.

Kaynağı Önleme Fonksiyonu: Kesme sıvılarının yağlama ve soğutma özelliğine rağmen iş parçası, kesici takım ve talaş üzerinde az da olsa bazı bölgelerde metal ile metalin teması mevcuttur. Bu sınırlı bölgelerde açığa çıkan ısı küçük metal parçalarının iş parçası veya kesici takıma kaynamasına imkan verebilecek yüksekliktedir. Bu kaynama sürtünmenin artmasına ve kesici takımın geometrisinin değişmesine neden olur. Bu olayı önlemek için kesme sıvılarına sülfür, klorür gibi diğer kimyasal bileşikler ilave edilerek metal yüzeylerinde sabunumsu metalik bir film tabakası oluşturulur ve metal partiküllerinin kaynak olması engellenir (Karahan 2010).

3.1.4 Metal Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması

Kesme sıvıları kullanım alanlarına bağılı olarak, istenilen performansları sağlayabilmek için farklı şekillerde formüle edilirler. Bu ürünlerin kullanım alanı çok geniştir ve çalışma koşuluna bağılı olarak bazen yağlayıcılık ön plandadır, bazen soğutuculuk daha önemlidir ve ince talaş oluşan işlemlerde de kaynağı önleme özelliğı daha önemlidir. Bu nedenle, çalışma alanına göre kullanılan metal kesme sıvıları dört gruba ayrılır (Çiftçi 2007).

a) Katıksız (Saf) Kesme Sıvıları

Saf kesme yağları, yağlayıcılık ihtiyacının soğutuculuk ihtiyacından daha fazla olduğu uygulama alanlarında kullanılır. Yağlayıcılık özelliğinin yüksek olması özellikle düşük hızda, yüksek yüzey kalitesi gerektiren işlemler için uygundur. Saf kesme yağları petrol, hayvan, deniz veya bitkisel kaynaklı yağların biri veya birkaçının birleşimi ile oluşurlar. Bu yağlar su içermezler ama işlenmesi zor malzemelere yapılan uygulamalar için spesifik özelliklerini geliştiren katkı maddeleri içerebilirler. Örneğın ıslatma ajanı olarak %20'nin üzerinde hayvansal yağ asidi, aşırı basınç ajanı olarak sülfür, klorin ya da fosforlu bileşikler kullanılabilir.

Saf kesme yağlarının maliyetleri yüksek olmasına rağmen, kesme takımı ömrünün uzamasını sağladıkları için tercih edilirler. Sistem ve denetim teknolojisi maliyetlerinde azalma sağlarlar. Diğer kesme sıvısı türleriyle karşılaştırıldıklarında daha az bakım maliyeti gerektirirler ve uzun seneler boyunca tekrar tekrar kullanılabilirler. Bu nedenle çevreye olan zararlı etkileri daha düşüktür. Bu avantajlarının yanında, yüksek alevlenme riski, soğutma performanslarının düşük olması, yağ buharı emisyonları, yeniden dolum için yüksek maliyette olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

b) Emülsiyon (Bor Yağları) Tipi Kesme Sıvıları

Emülsiyon, yağın yüzey aktif madde ve diğer katkı maddeleriyle birlikte suda karıştırılması ve yağ taneciklerinin su içerisinde askıda kalmasıyla oluşan bir karışımdır. Emülsiyon tipi kesme sıvıları %60'dan fazla mineral yağ içerirler. Hayvansal ve bitkisel kaynaklı yağların ya da esterlerin ilavesi emülsiyonların yağlayıcılığını artırır. Sülfürlü, klorlu ve fosforlu bileşiklerin ilavesi ise emülsiyona daha yüksek yağlayıcılık ve aşırı basınç özellikleri verir.

Emülsiyon tipi metal kesme sıvılarında su, metal kesme esnasında soğutmayı sağlarken yağ da yağlama fonksiyonunu yerine getirir. Pas oluşumuna karşı koruma için yüzeyler üzerinde yağ filmi oluştururlar. Farklı operasyonlardaki uygulanabilirlikleri yüksektir ve fiyatları saf kesme sıvılarına göre daha uygundur. Ancak, suyun varlığı bu yağlarda pas kontrolü, bakteri üremesi, küf, kaçak sorunu ve buharlaşma kayıpları gibi problemlere sebep olur. Bu sebeple bu kesme sıvıları, korozyona ve mikrobiyal üremelere karşı koruma amaçlı katkıları içerirler. Emülsiyon tipi kesme sıvılarının kullanımı esnasında yapılan bakım harcamaları oldukça yüksektir. Sert suyla karıştırıldıklarında iş ve makine parçaları ile filtre üzerinde kalıntı bırakırlar. Yüksek oranda yağ içerdikleri için iş parçasından temizlenmeleri zordur. Bu dezavantajları sebebiyle bazı operasyonlarda bu sıvıların yerini sentetik ve yarı sentetik kesme sıvıları almıştır (Dolapcı 2010).

c) Yarı Sentetik Kesme Sıvıları

Yarı sentetik kesme sıvıları, kararlı bir mikro emülsiyon sistemi oluşturmak amacıyla, yağ bazlı katkıların su içinde emülsiyonla edilmesiyile meydana gelirler. Bu tip sıvılar emülsiyonlara göre daha az mineral yağ içerirler. Kullanım amaçlarına göre formülasyonlarına aşırı basınç katkıları, pas önleyici ve bakteri üremesini önleyici katkıları ilave edilir. Emülsiyonların yağlayıcılık özellikleri ile sentetik ürünlerin soğutuculuk özelliklerini taşıdıkları için en çok kullanılan metal kesme sıvısı türüdür (Kobya et al. 2008a).

Emülsiyon tipi kesme sıvılarına göre bakımları daha kolaydır. Bu sıvılar ağır operasyonlar için iyi yağlayıcılık özelliği gösterirler. Ayrıca, soğutma ve ıslatma kabiliyetleri daha iyidir ve bu nedenle daha yüksek hızlarda çalışabilirler. Viskozitelerinin düşük olması sebebiyle daha iyi çökelme ve temizleme özelliğine sahiptirler. Küfe ve bakteriye karşı daha iyi dayanım sağlarlar. Yağ içeriği saf kesme sıvıları ve emülsiyon tipi kesme sıvılarına göre daha azdır. Bu sebeple daha az duman ve yağ spreyi oluştururlar. Bu olumlu özelliklerinin yanında bazı dezavantajları da vardır. Suyun sertliği bu sıvıların kararlılığını önemli ölçüde etkiler ve bazı durumlarda sert su tortulanmaya sebep olur. İçlerinde temizlik katkıları bulunması nedeniyle kolay köpüklenirler. Atıklarının işlenmesi masraflıdır (Dolapcı 2010).

d) Sentetik Kesme Sıvıları

Sentetik kesme sıvıları su bazlı olup mineral yağ içermezler. Sentetik kesme sıvıları, sert suda daha kararlı oldukları için daha iyi soğutma ve mikrobiyal bozunmalara karşı yüksek dayanım sağlamaktadırlar. Bu nedenle soğutuculuğun yağlayıcılığa göre daha fazla gerek duyulduğu, yüksek ısı ve yüksek hızlı uygulamalarda tercih edilirler. Bu tip sıvılar suyla seyreltildiklerinde yarı şeffaf ve şeffaf solüsyonlar oluştururlar. Bu ürünler uygulama alanına göre yağlayıcılığı arttırıcı, pas ve korozyon önleyici katkıları içerirler (Karahan 2010).

Sentetik kesme sıvılarının çok iyi soğutma özellikleri vardır. Parlama, duman oluşturmazlar ve zehirsizdirler. Korozyona karşı iyi koruma sağlarlar. İş parçasından ve talaştan ayrılmaları kolaydır. Temiz oldukları için bakımları kolaydır ve servis ömürleri uzundur. Diğer taraftan bu sıvıların aşırı çalkalanması köpüklenmelerine ve sprey halinde havada yayılmalarına neden olur. Havada sprey oluşturmaları nedeniyle sağlık sorunlarına yol açabilirler. Uygulama alanına göre bu sıvılara eklenen katkıların kaçak yağlara olan hassasiyetini, köpüklenmeyi ve özellikle sert su kullanıldığı durumlarda makine üzerindeki yapışkan sıvı artıklarını arttırır (Dolapçı 2010).

3.1.5 Metal Kesme Sıvıları İçeren Atıksuların Özellikleri ve Arıtımı

Metal kesme atıksularının içeriği, kullanılacağı malzeme, yöntem ve sıvının kullanma süresine göre değişmektedir. Metal kesme sıvılarının kullanma süresini uzatabilmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri eklenmekte ve bu katkıları da kesme sıvısının özelliklerini değiştirmektedir (Bakırcı 2014). Kullanım ömrünü tamamlamış metal kesme sıvıları tehlikeli kimyasallar grubuna girdiği için bu sıvıların arıtımı önemli bir problemdir (Fouad 2013). Ayrıca, metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksular belirli miktarda toksisiteye sahiptirler ve toprağa olan yüksek girişim kapasitelerinden dolayı yer altı suları için çok ciddi bir tehdit oluştururlar (Aşkın 2011). İşletmeler genelde atıksularını lisanslı atık yakma tesislerine vererek bu problemi çözmektedirler (Çiftçi 2007).

Metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksuların ortaya çıkması ile ilgili kısıtlayıcı deşarj düzenlemelerinin giderek artması tüm dünyada üretim işlemlerine etki etmektedir. Bu atıksular için istenen deşarj düzenlemeleri ülkelere ve bölgelere göre değişmektedir ancak sonuçta birtakım kirleticiler ortaya çıkmaktadır. Bu atıksularda kirliliğin esas kaynağını ise

organik kirletici maddeler oluşturmaktadır. Metal kesme sıvısı atıksuları; fosfat atıkları, temizleme sıvıları, yağ ve gres ve çeşitli kimyasallar içerir. Ayrıca bu atıksularda serbest yağlar, kararlı yağ-su emülsiyonları, suda çözünür organik bileşikler, çözünmüş ve çözünmemiş metaller, nitrat, sülfat, klorürler, süspanse ve çökebilen maddeler de bulunmaktadır. Metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksularda bulunan kirleticiler Çizelge 3.1’de verilmiştir (Koby et al. 2008a).

Atıksu arıtım yönteminin seçimi, arıtılacak olan suyun karakteristik özelliklerine bağlıdır. Yağ/su emülsiyonlarının arıtım yöntemi seçiminde de göz önünde bulundurulması gereken ilk faktör, atıksudaki yağ damlacıklarının büyüklüğüdür (Eryılmaz ve Genç 2015). Metal kesme sıvıları kesme işlemlerinde belirli bir süre kullanıldıktan sonra değiştirilirler. Atık haline gelen metal kesme sıvıları bir tankta toplanır ve bu sebeple bu atıksuların içerdiği kirleticilerin konsantrasyonları tahmin edilemez. Yüksek katı madde içerdikleri için bu atıksuların depolanmadan önce filtrelenmesi gerekir. Bir kısım askıda katı maddeler bu depolama tanklarında çöker ve belirli aralıklarla bu tankların temizlenmesi gerekir. Bu atıksuların arıtımında genellikle çöktürme flotasyon yöntemi ile ayrılması amaçlanmıştır. Bu nedenle kimyasal olarak emülsiyonun bozunma verimini iyileştirmek için, oluşan katıların çökmesine müsaade edilmez. Metal kesme atıksularının arıtımı için ilgili deşarj standartlarını sağlamasına yönelik olarak birincil, ikincil ve üçüncül adımlardan oluşan arıtım prosesleri gereklidir. Birincil arıtım basamağı akış hızı kontrolü, atıksuların dengelenmesi, yüzen yağlar ve çökelebilen katıların katı/sıvı ayırım işlemlerini içerir. İkincil arıtım ise termal evaporasyon, distilasyon, membran filtrasyon, mikrofiltrasyon ve kimyasal arıtma adımlarını kapsar. Üçüncül arıtım basamağı ters osmoz ve nanofiltrasyon, karbon adsorpsiyonu, biyolojik arıtma, metallerin çöktürülmesi, kimyasal oksidasyon ve elektrokimyasal oksidasyon adımlarını içerir. Metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksuların arıtımı ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar Bölüm 2’de detaylı olarak anlatılmıştır.

Çizelge 3.1 Metal kesme sıvıları ile kirlenmiş atıksularda bulunan kirleticiler (Koby et al. 2008a).

Hidrokarbonlu Bileşikler	Süspanse ve Çökelebilen Katılar	Metaller	Çözünmüş Tuzlar	Çözünmüş Organik Maddeler
<ul style="list-style-type: none"> - Petrol yağları - Bitkisel yağlar - Hayvansal yağlar - Mumlar ve kaydırıcılar - Yağ asit sabunları - Klorlu ester ve parafinler 	<ul style="list-style-type: none"> - Grafit partikülleri - Mantar ve bakteri gibi mikrobiyal kirleticiler - Yer temizliğinden oluşan katı atıklar 	<ul style="list-style-type: none"> - Demir - Alüminyum - Bakır - Krom - Çinko - Magnezyum - Molibden - Kurşun - Nikel - Arsenik - Selenyum 	<ul style="list-style-type: none"> - Sodyum ve potasyum tuzları 	<ul style="list-style-type: none"> - Aminler ve amidler - Ester ve glikoller - Yüzey aktif maddeler ve deterjanlar - Serbest yağ asitleri - Sodyum ve potasyumdan oluşan yağ asidi sabunları - Yağ alkolleri - Biyositler - Fosfat esterleri - EDTA, NTA ve sitrik asit gibi şelat yapıcı bileşikler

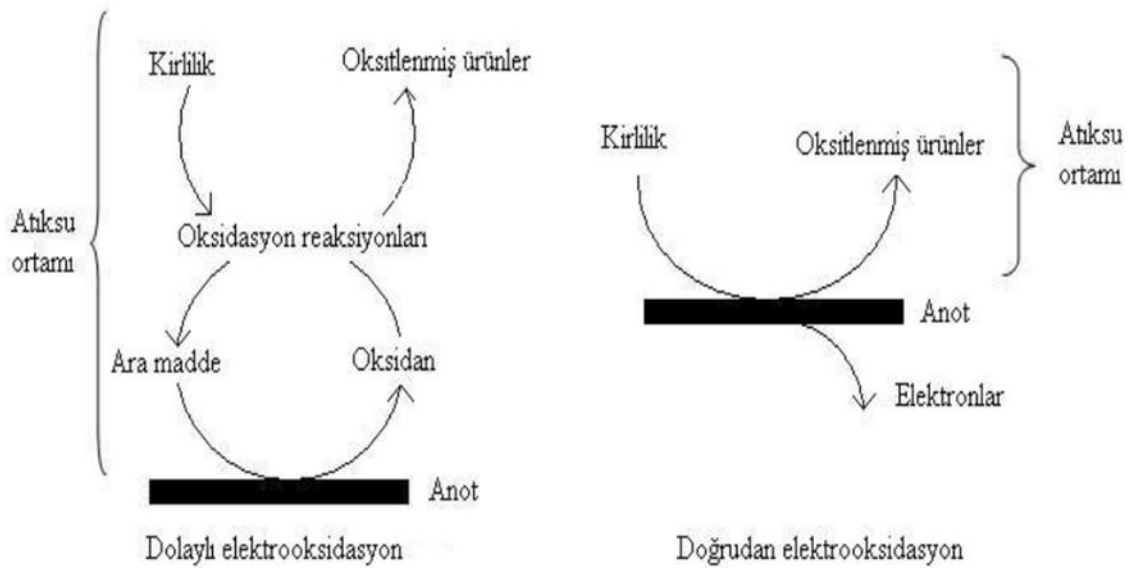
3.2 ELEKTROKİMYASAL ATIKSU ARITIM PROSELERİ

Elektrokimyasal yöntemlerin temelinde koagülasyon, adsorpsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon prosesleri yer alır. Elektrokimyasal arıtım çok yönlü ve çevreye uyumlu bir proses olmasından dolayı son yıllarda atıksu arıtımında oldukça dikkat çekmektedir. Elektrokimyasal arıtım üç farklı yöntemden oluşmaktadır: elektrooksidasyon, elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon (Chen 2004). Bu yöntemler tek tek çalışabildikleri gibi, bazı sistemlerde birkaç elektrokimyasal proses aynı anda, kombine şekilde kullanılabilir. Örneğin elektrokoagülasyon prosesi esnasında doğal olarak oluşan gaz çıkışı ile kısmen bir elektroflotasyon da gerçekleşmektedir. Böylece elektrokimyasal arıtım yöntemleri, kısa sürede etkin bir arıtım veriminin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Elektrokimyasal yöntemler, arıtımın yanı sıra metal geri kazanımında da son yıllarda kullanılmaya başlamıştır (Bakırcı 2014).

3.2.1 Elektrokoksidasyon (EOx) Prosesi

Elektrokoksidasyon prosesi, çözünmeyen bir anot malzemesi kullanılarak organik maddelerin elektrokimyasal olarak doğrudan veya dolaylı olarak oksitlenmesi esasına dayanmaktadır. Elektriksel alanda gerçekleştirilen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları yardımıyla birçok kirletici türü oksidasyona maruz kalırken biyolojik olarak parçalanabilme özelliği düşük olan kirleticiler, biyolojik olarak parçalanabilir organik türlere veya CO₂ ve H₂O gibi nihai ürünlere dönüştürülmektedir (Köksal 2015).

Elektrokoksidasyon prosesinde aktif rolü oynayan elektrot anottur. Bu sebeple, bu proseste etkili olan parametrelerin başında anodun katalitik aktivitesi gelmektedir. Ayrıca akım, sıcaklık, pH ve organik bileşikler ile diğer oksidantların difüzyon hızı da önem taşımaktadır. Elektrokoksidasyonda en iyi sonucu metal oksit anotlar vermektedir. RuO₂, Co₃O₄ ve MnO₂, titanyum bazı üzerine tatbiki ile oluşturulan anot malzemesi, diğer anotlara göre daha iyi katalitik aktivite göstermektedir. Bununla birlikte, kurşun ve grafit anotlarında elektrokoksidasyon prosesindeki verimleri yüksektir. Elektrotların bulunduğu ortam çok önemlidir ve iki tip oksidasyon söz konusudur. Bunlar anodik (direkt) ve dolaylı (indirekt) oksidasyondur (Akbaş 2014). Şekil 3.2'de anodik ve dolaylı oksidasyon proseslerinin ilerleyişi verilmiştir



Şekil 3.2 Elektrokoksidasyon prosesinde kirleticilerin parçalanması (Köksal 2015).

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, anodik oksidasyon sistemde kullanılan elektrotların (anot-katot) yüzeyinde gerçekleşmektedir. Organik yapılı kirleticilerin anodik oksidasyonu, doğrudan elektrotlarda yükseltgenme reaksiyonları ile gerçekleşmektedir. Anodik oksidasyonda atıksuya kimyasal ilavesi veya katotlara O₂ ilavesi yapılmamaktadır (Akbaş 2014). Dolaylı oksidasyonda bazı kimyasal maddelerin sisteme ilave edilmesi halinde suda elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde oksitleyici ajanlar (Cl₂, ClO₂, O₃, O[•], OH[•], ClOH[•], H₂O₂, O₂, H₂, CO₂ gibi) oluşmaktadır. O[•], OH[•] ve ClOH[•] yüksek oksitleyici özelliğe sahip radikaller olup, çok kısa ömürlüdürler. Bu radikaller tekrar Cl₂, ClO₂, O₃, H₂O₂ ve O₂ gibi oksitleyici türlere dönüşürler veya doğrudan organik türleri oksitlerler (Dedeli 2008).

3.2.2 Elektroflotasyon (EF) Prosesi

Atıksu arıtımında kullanılan bir diğer elektrokimyasal proses elektroflotasyondur. Elektroflotasyon, elektrolitik şartlara göre reaktör içinde üretilen hidrojen ve oksijen gibi gaz kabarcıkları tarafından kolloidal partiküllerin adsorplanması ve su yüzeyine doğru hareket ederek toplanması işlemidir. Bu gazların oluşum reaksiyonları aşağıda verilmiştir:



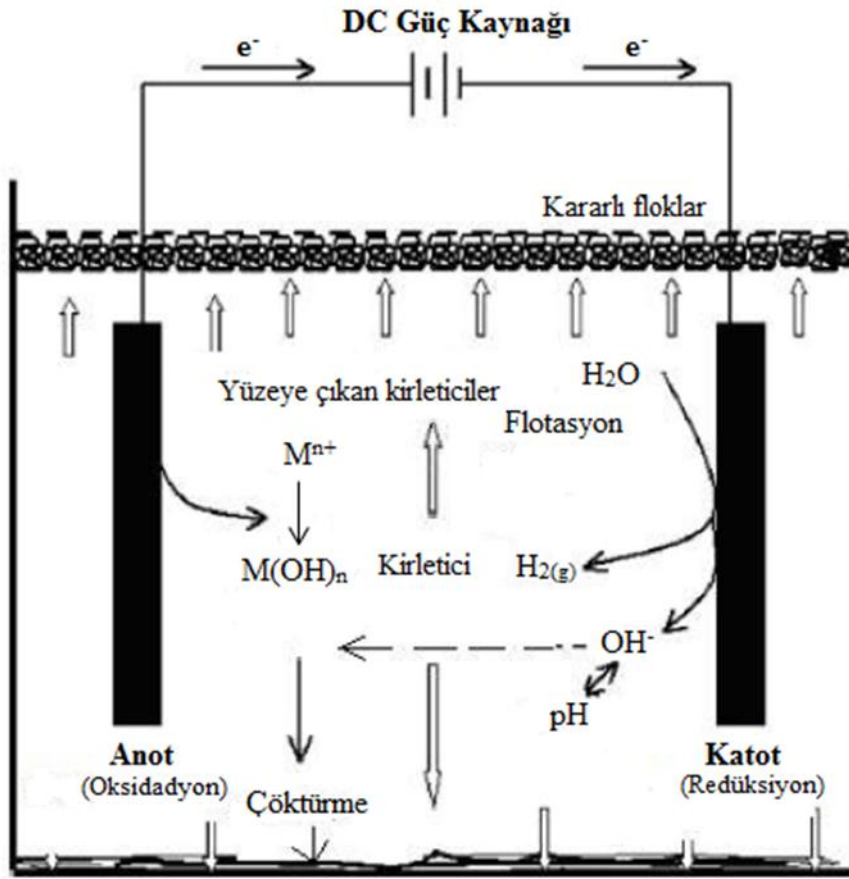
EF prosesinde gaz kabarcıkları prosesin temelini oluşturmaktadır. Oluşan gaz kabarcıklarının boyutları çok küçüktür ve bu nedenle kabarcıklar oldukça yüksek dispersiyona sahiptirler. Kabarcıkların sayısı elektrot yüzey alanına bağlı olarak 10-20 milyon/cm² arasında değişmektedir (Yiğit 2008). Kullanılan elektrotun malzemesi, yüzey alanı, akım yoğunluğu ve reaktör tipi bu proseste verimi önemli derecede etkiler. Gaz kabarcıkları ile yüzeye toplanan yumaklar, köpük sıyırıcılar yardımıyla sudan ayrılır.

Atıksulardan elektroflotasyon yöntemiyle yağ ve emülsiyonlar gibi düşük yoğunluklu maddelerin yanı sıra askıda katı madde giderimi de sağlanabilmektedir. Özellikle bazı tesislerde problem oluşturan KOİ’nin bir kısmı bu yöntemle giderilebilmektedir. Bu avantajlarından dolayı elektroflotasyon yöntemi metal kaplama, tekstil, boya ve kimya sanayi atıksularının arıtımında kullanılmaktadır (Akbaş 2014).

3.2.3 Elektrokoagülasyon (EC) Prosesi

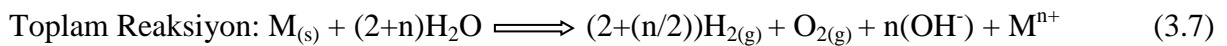
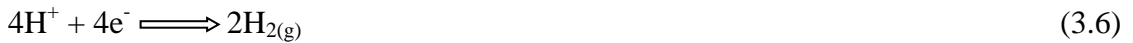
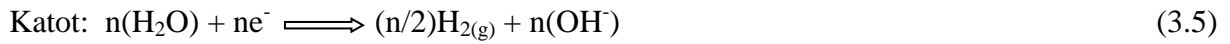
Elektrokoagülasyon, çözünebilen ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip metal (alüminyum ve demir gibi) elektrotların kullanıldığı elektrokimyasal atıksu arıtım sürecidir (Gengeç 2012). Basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içerisine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır (Şekil 3.3). Anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır ve dışarıdan güç uygulandığında katotta indirgenme olurken anotta yükseltgenme reaksiyonu gerçekleşir (Camcı 2008). Elektrokoagülasyon kolloidlerin, süspansiyonların ve emülsiyonların elektriksel yüklerden etkilenmesi prensibine dayanmaktadır. Proseste elektrolitik reaksiyonlar sonucu anodun çözünmesi ile metal iyonları açığa çıkmakta ve bu metal iyonlarının oluşturduğu metal hidroksit floklarının koagülasyon, adsorbsiyon, çöktürme ve flotasyon mekanizmaları ile kirletici giderimi sağlanmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde pıhtılaşma ve çökme mekanizmaları, sisteme herhangi bir kimyasal madde ilave etmeden, elektrokimyasal reaktördeki elektrotlar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir (Köksal 2015). Elektrokoagülasyon işlemi esnasında, elektrotlarda oluşan elektrokimyasal işlemler sonucu suda küçük gaz kabarcıkları gözlenir. Bu nedenle elektrot malzemesine bağlı olarak elektrokoagülasyon esnasında bazı kirleticilerin arıtımında, elektroflotasyon prosesi de etkili olabilmektedir (Bakırcı 2014).

Elektrokoagülasyon ile arıtımda verim, temelde atıksuyun kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki kolloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal maddelerin çeşitleri ve konsantrasyonu gibi parametreler de proses üzerine etki etmektedir. Alüminyum ve demir, elektrokoagülasyonda en yaygın kullanılan elektrot malzemeleridir (Şanlı 2006). Alüminyum ve demir elektrotların kullanımında, anot ve katotlarda oluşan hidroliz reaksiyonları sonucu alüminyum veya demir hidroksit flokları oluşur. Bu floklar hızla çökerek veya flotasyonla yüzeyde toplanarak atıksulardaki kirleticilerin giderimini sağlarlar (Dedeli 2008).



Şekil 3.3 Bir elektrokoagülasyon hücresinin şematik diyagramı (Camcı 2008).

Bir elektrokoagülasyon prosesinde anot ve katotta meydana gelen reaksiyonlar aşağıda gösterilmiştir:



Burada “M” metal iyonunu ifade etmektedir. Elektrokoagülasyon esnasında meydana gelen çöktürmeler genellikle çok fazla metal hidroksit oluşumu sonucu oluşmaktadır. Bu hidroksitler

çözünen elektrot malzemesinden kaynaklanmaktadır. Eğer alüminyum elektrotlar kullanılıyor ise oluşan çökeltiler çöp sahalarına boşaltılmaktadır. Bu nedenle proseste demir elektrotlar daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü çöp deponi alanlarında ağır metal kirliliği ortaya çıkabilir. Elektrokoagülasyonda demir elektrot kullanması halinde atıksuyun rengi alüminyum elektrot kullanılan sistemdeki kadar şeffaf olmamaktadır. Çok az miktarda da olsa, çözünmüş demir iyonları suda renk oluşumuna neden olmaktadır (Şensoy 2008).

Elektrokoagülasyon ile arıtımın avantajları (Mollah et al. 2001):

- Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
- Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
- Proses sonunda oluşan çamur metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla kararlı hale getirilebilir ve susuzlaştırılabilir. Oluşan çamur miktarı azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğilimi gösterirler ve daha az su içermektedirler. Bu floklar asidik ortama dirençli ve kararlıdır. Bu nedenle filtrasyon ile daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içerir.
- Elektrokoagülasyon prosesinde en küçük koloidal partiküller giderilebilir. Çünkü proseste uygulanan elektrik alan bu partiküllerin daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
- Elektroliz sırasında oluşan gaz kabarcıkları flok oluşmasını kolaylaştırabilmektedir.

Elektrokoagülasyon prosesinin dezavantajları ise:

- Çözünen elektrotların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Elektrik kullanımı pahalı olabilir.

- Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir.
- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.
- Bazı durumlarda jelatinli hidroksit çözünme eğilimi gösterebilir.

3.2.4 Elektrokimyasal Proseslerin Uygulama Alanları

Elektrokimyasal prosesler, kağıt ve kağıt hamuru endüstrisi ile boya, tekstil ve gıda endüstrilerinde, maden ocağı atıksularının, petrokimya endüstrisi atıksularının, restoran atıksularının, içme ve kullanma sularının, yağ ve gres içeren atıksuların ve sızıntı sularının arıtımında kullanılmaktadır. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile yağ ve gres giderimi, organik madde ve askıda katı madde giderimi, sertlik ve ağır metal giderimi, bulanıklık ve renk giderimi, biyolojik oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, fosfat ve azot giderimi, kompleks organiklerin giderimi, klor ve bakteri giderimi gibi birçok kirleticinin atıksudan giderimi yapılabilmektedir. Bunların dışında elektrokimyasal prosesler ters osmoz gibi membran teknolojilerinin ön arıtımında ve atıksu çamurlarının susuzlaştırılmasında kullanılmaktadır (Camcı 2008).

3.2.5 Elektrokimyasal Arıtım Verimini Etkileyen Faktörler

Elektrokimyasal arıtım verimi büyük oranda sulu ortamın kimyasal özelliklerine, özellikle de iletkenliğine bağlıdır. Elektrokimyasal arıtım proseslerinin optimizasyonunda elektrot malzemesi, elektrotların yerleşimi, akım yoğunluğu, pH değeri, elektrolit ilavesi, sıcaklık ve arıtım süresi göz önünde bulundurulması gereken en önemli parametrelerdir (Chen 2004).

Elektrot Malzemesi: Bir elektrokimyasal proseste verime etki eden en önemli parametrelerden biri elektrot malzemesidir. Kullanılacak elektrotlar mali açıdan uygun, kolay bulunabilir ve yüksek giderim verimi sağlayan malzemelerden seçilmelidir (Taştaban 2013). Elektrot malzemesi arıtım türünü belirlediği gibi kirletici giderim verimini de doğrudan etkilemektedir. Farklı prosesler için elektrotlarda farklı oluşumlar gerçekleşir. Örneğin, elektrokoagülasyon yönteminde kullanılan elektrotlar elektriksel olarak çözünerek koagülant oluştururlar. Elektrooksidasyon prosesinde ise OH⁻ radikalleri oluşturulur ancak elektrotlarda herhangi bir çözünme olmaz.

Elektrot Yerleşimi: Elektrotlar arası mesafenin belirli oranda arttırılması arıtım verimini arttırırken, mesafenin daha da fazla arttırılması üretilen iyonların hareketini yavaşlatmakta ve yumak oluşumunda azalma görülmektedir. Literatürde genellikle elektrotlar arası mesafenin 0,4-1 cm arasında seçildiği görülmektedir (Lai and Lin 2004; Shen et al. 2003). Monopolar ya da bipolar elektrotlar kullanılarak, bu elektrotların reaktör içerisinde seri ya da paralel bağlanmaları da giderim veriminde önemli oranda farklılıklara yol açmaktadır (Taştaban 2013).

Akım Yoğunluğu: Su ve atıksuda bulunan kirleticilerin giderimi uygulanan akım yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Gerekenden fazla akım yoğunluğu uygulaması maliyeti arttıracak gibi, elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğuna bağlı olarak çamur oluşumunu da arttıracaktır. Bunun yanında akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte ortama verilen metal iyonlarının akısı artacağından arıtım süresi daha kısa olacaktır. Bu nedenle elektrokimyasal proseslerde akım yoğunluğunun optimizasyonu önemlidir.

pH: Elektrokimyasal arıtım uygulamalarında pH değeri, ortamda oluşan elektrolitik reaksiyonları doğrudan etkilediği için büyük öneme sahiptir. Elektrokoagülasyonda çok düşük ve çok yüksek pH değerleri, metal hidroksitlerin çözünürlüklerini etkilediğinden ortamdaki koagülant konsantrasyonunun değişimine neden olabilmektedir. Elektrooksidasyon prosesinde pH değeri elektrotların yüzeyinde oluşan hidroksil radikallerinin oluşumunu etkilemektedir. Bunun yanında prosesler sonucunda ortam pH'nın değişimi de söz konusudur (Bakırcı 2014). Elektrokoagülasyon uygulamalarında çözeltinin başlangıç pH'ı düşük olduğu zaman çıkış suyu pH değerinde bir artış, çözeltinin pH'ı yüksek olduğunda pH'da bir düşüş meydana gelebilmektedir. Bu sonuçlar elektrokoagülasyon prosesinin özellikle alkali ortamda bir miktar tampon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Chen 2004).

Elektrolit İlavesi: Elektrokimyasal arıtım prosesinin verimini arttırmak ve atıksuyun iletkenliğini istenilen seviyeye getirmek amacıyla sodyum nitrat, sodyum sülfat gibi inert tuzlar, sodyum klorür ve potasyum bromür gibi halojenli tuzlar kullanılmaktadır. Yüksek iletkenlik, yüksek çözünürlük, düşük klorür maliyeti ve aktif klorun güçlü oksitleme özellikleri nedeniyle destekleyici elektrolit ve elektrokimyasal prosesler için klorür reaktanının bir kaynağı olarak genellikle sodyum klorür kullanılmaktadır. Sodyum klorür elektrik yüküne katkı sağlar ve diğer anyonik türlerin (karbonat ve sülfat) olumsuz etkilerini önemli derecede azaltır (Akbaş 2014). Karbonat ve sülfat iyonları elektrot yüzeyinde izole bir

tabaka oluşturarak Ca^{2+} veya Mg^{2+} iyonlarının çökmesine neden olmaktadır. Oluşan bu tabaka elektrotlar arası potansiyeli arttırmakta ve akım verimini azaltmaktadır. Elektrokimyasal prosesin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için ortamda bulunan anyonların %20'sinin klorür iyonu olması önerilmektedir (Chen 2004).

Sıcaklık: Elektrokimyasal arıtım proseslerinde sıcaklığın artması reaksiyon hızını arttıracığından, arıtım verimini de arttırmaktadır. Ancak, sıcaklığın gerekenden fazla artış göstermesi arıtım verimini olumsuz etkilemektedir (Akbaş 2014). Örneğin, elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotlar kullanıldığında akım veriminin 60°C'ye kadar maksimum değerde olduğu görülmüştür. Daha sonrasında sıcaklık arttıkça akım verimi azalmış ve giderim veriminde de azalma gözlenmiştir.

Arıtım Süresi: Atıksuyun karakteristiğine bağlı olarak arıtım süresi değişiklik gösterebilir. Bu nedenle elektrokimyasal arıtım uygulamalarında arıtım süresinin optimizasyonu önemlidir. Gerekenden az arıtım süresi arıtım veriminin düşük olmasına, uzun süreli arıtmalar ise arıtım maliyetinin, çamur ve köpük oluşumunun artmasına neden olabilmektedir (Bakırcı 2014).

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde metal kesme sıvısı kullanılarak hazırlanan sentetik atıksuların hazırlanması ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan kimyasal malzemeler ve cihazlar ile yöntemler hakkında bilgi sunulmuştur. Ayrıca elde edilen yağlı atıksuların arıtımında uygulanan elektrokinetik yöntemlerde, koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon ve santrifüj ile arıtım yöntemlerinde uygulanan ortam şartları ve parametreler anlatılmıştır.

4.1 SENTETİK ATIKSULARIN HAZIRLANMASI

Metal kesme sıvısı içeren sentetik atıksuların hazırlanmasında kesme sıvısı olarak Petrol Ofisi Bor Yağı kullanılmıştır. Kullanılan bor yağının kimyasal içeriği parafinik baz yağ ve hidrokarbon karışımından oluşmaktadır ve suda çözünmez. Bor yağı sarı renktedir ve su ile karıştığında süt beyazı rengine dönüşmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Bor yağı ve % 2'lik bor yağı emülsiyonu.

Metal endüstrilerinde oluşan atıksularda metal kesme sıvıları genellikle % 10'dan daha düşük oranlarda bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada gerçekleştirilen arıtım deneyleri için

hazırlanan sentetik atıksu numunelerinde hacimsel olarak % 2 oranında metal kesme sıvısı kullanılmıştır. Sentetik atıksu numunelerinin hazırlanmasında ve fiziksel özelliklerinin analizinde kullanılan cihazlar Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Sentetik atıksular, musluk suyuna istenilen hacimde bor yağı eklendikten sonra mekanik karıştırıcı ile 2000 rpm hızda, 30 dakika boyunca karıştırılarak elde edilmiştir. Hacimsel olarak % 2 oranında bor yağı içeren sentetik atıksuların bulanıklık değerleri 10500-13500 NTU arasında; pH değerleri 7-8,5 arasında; KOİ değerleri 50000-60000 mg/L ve iletkenlik değerleri ise 350-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişim göstermektedir. Şekil 4.2’de görülen piknometre ile sentetik atıksu numunelerinin yoğunlukları ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümlerinde piknometrenin darası alındıktan sonra örnek ile doldurulur ve tartılır. Elde edilen ağırlık değeri piknometrenin hacmine bölünerek sıvının yoğunluğu bulunur. Ölçümler sonucunda sentetik atıksuların yoğunluk değeri $0,983 \text{ g}/\text{cm}^3$ olarak bulunmuştur ve bu değer, oda sıcaklığındaki suyun yoğunluğu olan $0,997 \text{ g}/\text{cm}^3$ değerine yakın olması yağ/su emülsiyonlarının stabilitesinde önemlidir. Karışımın yoğunluğunun suyun yoğunluğundan farklı olması durumunda, faz ayrımları nedeniyle heterojen karışımlar oluşabilir.

Çizelge 4.1 Atıksuların hazırlanması ve analizinde kullanılan cihazlar.

Cihaz Adı	Marka-Model No
Mekanik Karıştırıcı	Heidolph R2R 2020
pH metre	WTW inoLab pH 7110
İletkenlik Ölçer	Thermo Scientific ORION
Türbidimetre	AL450T-IR
Yoğunluk	Piknometre
Zeta Potansiyel Ölçüm Sistemi	Malvern Zeta-Meter System 4.0



Şekil 4.2 Piknometre.



Şekil 4.3 Zeta potansiyel ölçüm cihazı.

Bor yağı damlalarının su içindeki yüzey yükü ölçümleri Zeta-Meter System 4.0 (Şekil 4.2) ile yapılmıştır. Bu sistemde yüzey yükü, damlanın elektroforetik hareketlilik ölçümleri yapılarak elde edilmektedir.

Yağ damlalarının zeta potansiyellerinin ölçümü için, saf su kullanılarak hazırlanan seyreltik yağ-su emülsiyonu elektroforez hücresine yerleştirildikten sonra, sistemde ölçülen özgül iletkenliğe bağlı olarak elektrotlara uygun voltaj verilmektedir. Uygulanan elektrik alanı şiddetinde, yağ damlaları yüzey yüklerinin pozitif veya negatif olmalarına bağlı olarak, anot veya katot elektrota doğru hareket ederler. Seçilen bir yağ damlasının belirli bir mesafeyi gidiş süresi, damlanın gidiş yönüne göre, farenin sol ya da sağ tuşu basılı tutularak kaydedilir. Böylelikle seçilen damlanın uygulanan elektrik alanındaki hızı ölçülerek elektroforetik hareketliliği hesaplanabilmektedir.

Elektroforez, bir sıvı içerisindeki kolloidin elektrik alanı uygulaması ile yüzey yüküne bağlı olarak yer değiştirmesidir. Elektroforetik hız ile elektrik alanı arasında doğrusal bir bağlantı bulunmaktadır:

$$v = u_{EM} * E \quad (4.1)$$

Burada v , u_{EM} , ve E sırası ile elektroforetik hızı (m/s), elektroforetik hareketliliği ($m^2/(V \cdot s)$) ve elektrik alan şiddetini (V/m) ifade etmektedir. Dispers bir sistemde kolloidlerin zeta potansiyelleri (ζ) elektroforetik hareketlilik değerlerine bağlı olarak Helmholtz-Smoluchowski denklemi kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$\zeta = \frac{\mu}{\epsilon_r \epsilon_0} \mu_{EM} \quad (4.2)$$

Burada μ sıvının dinamik viskozitesini (Pa.s), ϵ_0 vakumun elektriksel geçirgenliğini ($C^2 N^{-1} m^{-2}$), ve ϵ_r ortamın dielektrik sabitini ifade etmektedir. Yağ damlalarının zeta potansiyelleri aynı şartlar altında 5 kere yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

4.2 YAĞLI ATIKSULARIN ELEKTROKİNETİK ARITIMI

Bu çalışmada kullanılan elektrokinetik arıtım deney düzeneği bir peristaltik pompa (iki kafalı), bir DC güç kaynağı, bir elektrokinetik ünite ve elektrotlardan oluşmaktadır. Kullanılan cihazların modelleri hakkındaki bilgi Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Deneyler iki farklı elektrokinetik ünite kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki ünite de pleksiglastan yapılmıştır ve ünitelerin her ikisinin de toplam hacmi 6 L’dir. Yatay ünite (Şekil 4.4) ve dikey ünite (Şekil 4.5) olarak adlandırılan elektrokinetik ünitelerin boyutları ise sırası ile 35x9,5x17 cm ve 17x35x9,5 cm’dir.

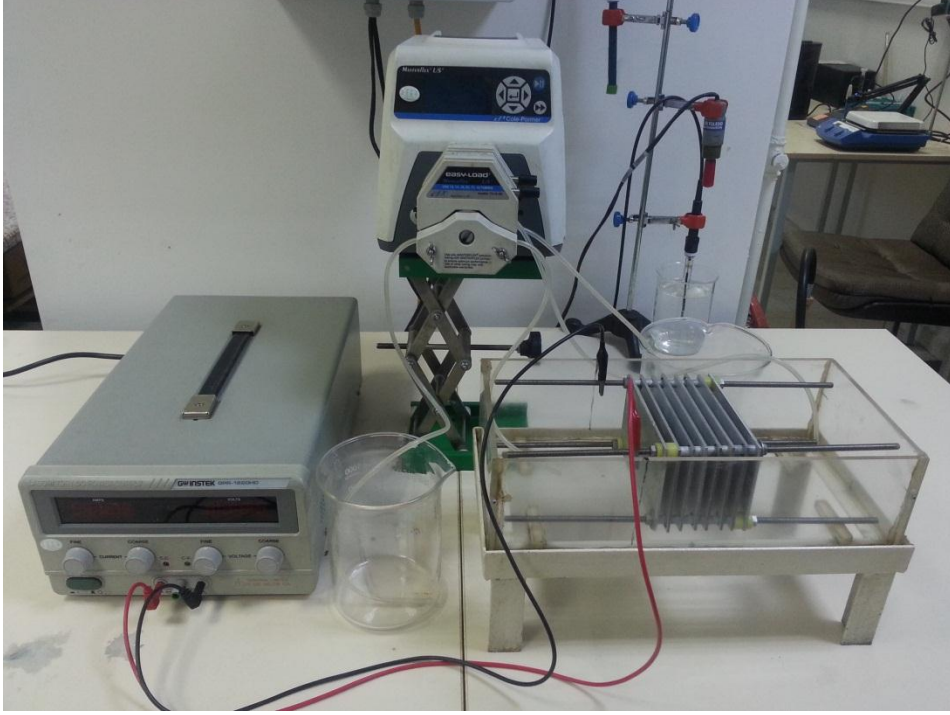
Çizelge 4.2 Elektrokinetik arıtım deneylerinde kullanılan cihazlar.

Cihaz Adı	Marka-Model No
DC Güç Kaynağı	GWINSTEK
Peristaltik Pompa	Masterflex Cole Parmer L/S
Türbidimetre	AL450T-IR
KOI Cihazı	WTW CR 3200

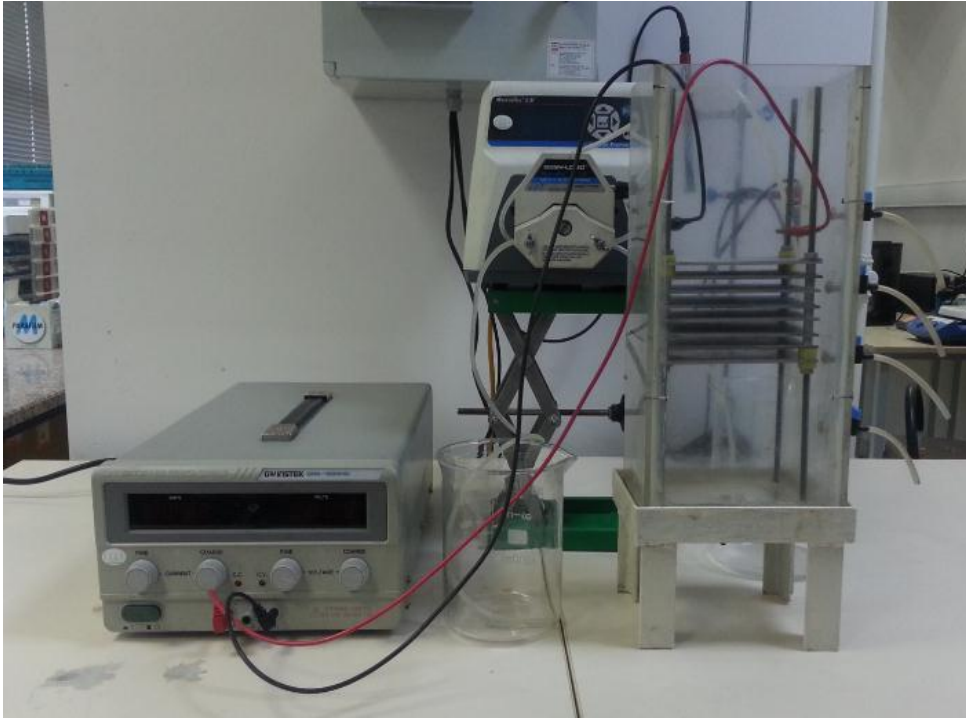
Yatay ve dikey üniteler ile yapılan elektrokinetik arıtım deneyleri alüminyum malzemeden yapılmış levha elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki ünite de elektrotlar akışa dik olacak şekilde yerleştirilmiştir ve arıtım esnasında elektrotlar tamamen suya batmış durumdadır. Alüminyum levha elektrotların uzunluğu 13,5 cm, genişliği 8,5 cm ve kalınlığı ise 0,3 cm’dir. Elektrotlar arası mesafe 1 cm olarak ayarlanmıştır. Ünitelerde kullanılan 4 anot ve 4 katottan oluşan alüminyum levha elektrotların yerleşimi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Alüminyum levha elektrotların yüzey pasifizasyonlarını önlemek için deney bitiminde kullanılan elektrotların yüzeyleri zımpara makinesi ile 5 sn süreyle zımparalandıktan sonra

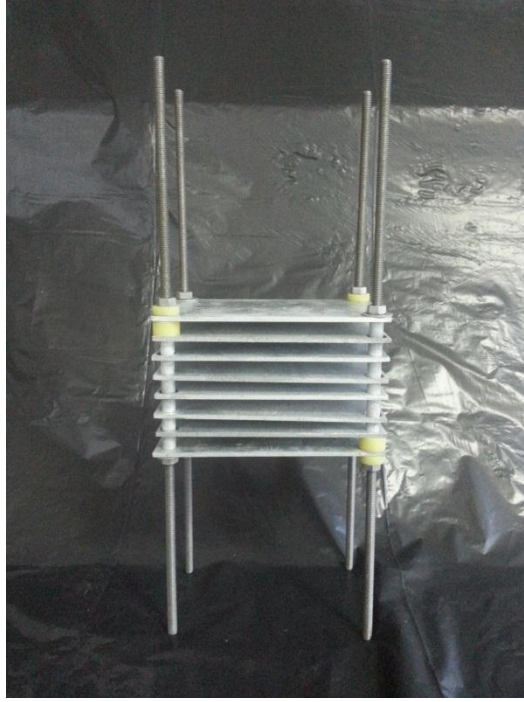
elektrotlar bir gün boyunca seyreltik asetik asit içerisinde bekletilmiştir. Zamanla aşınan ve kullanılamaz duruma gelen elektrotlar yenileri ile değiştirilerek deneylere devam edilmiştir.



şekil 4.4 Yatay elektrokinetik ünite ve deney düzeneği.



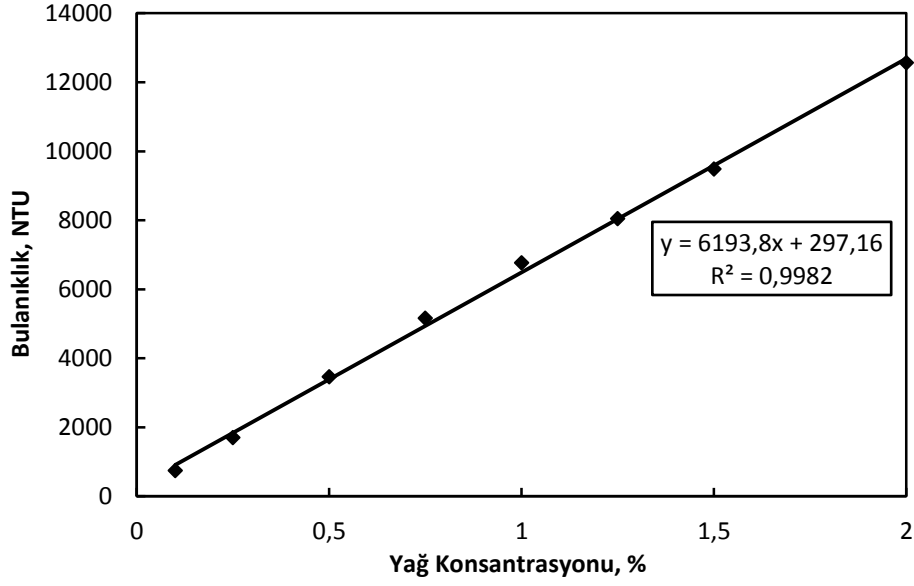
şekil 4.5 Dikey elektrokinetik ünite ve deney düzeneği.



Şekil 4.6 Elektrokinetik arıtım uygulamalarında kullanılan alüminyum elektrotlar.

Elektrokinetik arıtım deneylerinde yağ giderimi Aqualytic AL450T-IR cihazı ile yapılan bulanıklık ölçümleri ile yapılmıştır. Bor yağı kullanılarak hazırlanan sentetik atıksuların bulanıklık değerleri yağ yüzdelere bağlı olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Görülmektedir ki yağ yüzdesi ile bulanıklık değerleri arasındaki korelasyon katsayısı 1’e çok yakındır (0.99).

Elektrokinetik arıtım deneylerinde, her deney öncesi hazırlanan sentetik atıksuyun bulanıklığı ölçülmüştür ve bu değer başlangıç bulanıklık değeri olarak kabul edilmiştir. Deneyler esnasında ise elektrokinetik ünitelerin çıkışlarından ve en alt noktalarından numuneler alınarak bulanıklık ölçümleri yapılmıştır. Yatay üniteden alınan her numune VITLAB mikropipet ile alınmıştır ve numune hacimleri 10 ml olarak ayarlanmıştır. Dikey üniteden numune alımında ise, ünitenin en alt noktasında bulunan musluk kullanılmıştır. Deney başladıktan sonra 20. dakikaya kadar 2 ya da 3 dakika aralıklarla emülsiyondan alınan numunelerin bulanıklık değerleri ölçülmüş, 20. dakikadan itibaren ise 5 dakikada bir numune alınarak bulanıklık ölçümü yapılmıştır. Alınan numuneler musluk suyu ile 20 kat seyreltildikten sonra bulanıklıkları ölçülmüştür. Her numunenin bulanıklığı üç kere ölçülerek, ölçümlerin aritmetik ortalaması hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 Sentetik atıksuyun hacimsel yağ yüzdesine bağlı olarak bulanıklık ölçümleri.

Bu çalışmada elektrokinetik arıtımda elektrotlara uygulanan voltajın, elektrot alanının, elektrot yerleşim düzeninin, akış hidroliğinin ve debinin yağ giderim verimine olan etkisi kesikli ve sürekli çalışma şartlarında deneyler yapılarak incelenmiştir.

a) Voltaj ve akım: Elektrokinetik arıtım deneylerinde voltaj ve akım uygulamaları GWINSTEK DC güç kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu güç kaynağı 18 V voltaj farkı ve 10 A akım sağlayabilmektedir. Deneyler boyunca 5, 10 ve 15 V voltaj farkları uygulanarak voltaj değeri sabit tutulmuş ve zamanla akım değerlerindeki değişim kaydedilmiştir. Akım ise genellikle 1-6 A aralığında değişmiştir ancak bazı deneylerde 1 A'ın altında kaldığı da gözlemlenmiştir. Akım değerleri deneyin ilk iki dakikasında 10 saniyede bir, 2 ve 3 dakika arasında 15 saniyede bir, 3 ve 4 dakika arasında 30 saniyede bir, 4 ve 10 dakika arasında ise dakikada bir kaydedilmiştir. 10 dakikadan sonra iki dakikada bir okunan akım değerleri, 20 dakikadan sonra 5 dakikada bir kaydedilmiştir.

b) Elektrot Alanı ve Elektrot Yerleşim Düzeni: Deneylerde kullanılan alüminyum elektrotlar dört adet ince alüminyum çubuk ile birbirine bağlanmıştır. Bu çubuklara vida ile sabitlenen elektrotları istenilen sayıda ayarlamak mümkündür. Uygulamalar 4, 6 ve 8 adet elektrot kullanılarak yapılmıştır. Bunun yanında, elektrotların ünitelerdeki konumu da değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Elektrotların ünitelerdeki konumu, suyun girişinin olduğu 'Giriş' kısmı, ünitenin 'Orta' bölgesi ve analiz için numunelerin alındığı 'Çıkış' kısmı şeklinde ayarlanmıştır. Elektrot alanının arıtım verimine etkisinin belirlenmesi haricindeki

çalışmalarda 8 elektrot kullanılmıştır. Elektrotların yerleşiminin arıtım verimine etkisinin incelenmesi haricindeki çalışmalarda ise elektrotlar ünitenin orta bölgesine yerleştirilmiştir.

c) *Akış Hidroliği*: Elektrokinetik arıtım deneyleri aynı şartlar altında, yatay ve dikey üniteler kullanılarak tekrarlanmıştır. İki ünite de aynı koşullarda kesikli akışlı sistem ve sürekli akışlı sistem deneyleri yapılmıştır ve her iki sistemin verimleri karşılaştırılmıştır. Kesikli akışlı sistemde, çıkış suyu tekrar yatay ve dikey ünitelerin girişine beslenerek toplamda her bir deneyde 6 L atıksu arıtılmıştır. Sürekli akışlı sistemde ise yatay ve dikey ünitelerdeki atıksuyun giriş ve çıkış debileri 90 mL/dak değerinde sabit tutulmuştur. Kesikli ve sürekli akış deneylerinde toplam süre 90 dakikadır. Bu nedenle sürekli akışlı sistemde arıtılan suyun toplam hacmi 8,1 L'dir.

d) *Debi*: Uygulamalar Masterflex Cole Parmer L/S peristaltik pompa ile gerçekleştirilmiştir. İki farklı delik kalınlığına sahip hortum ile farklı debi birimlerinde çalışılabilmektedir. Çalışmada ince hortum kullanılarak, mL/dak birimi uygulanmıştır. Cihaz ince hortum ile en çok 140 mL/dak debisinde akış sağlayabilmektedir. Çalışılan atıksu debileri 42, 90 ve 140 mL/dak'dır. Debinin yağ giderim verimine etkisinin araştırılması haricindeki deneylerde debi 90 mL/dak olarak sabit tutulmuştur.

e) *KOİ*: Elektrokinetik arıtım deneylerinde bulanıklık ölçümlerine bağlı olarak belirlenen en iyi yağ giderim verimlerinin elde edildiği ortam şartlarında deneyler tekrarlanarak, kimyasal oksijen giderimi (KOİ) de incelenmiştir. KOİ analizleri için yapılan deneylerde, deneyin başlangıcından itibaren, belirli zaman aralıklarında, elektrokinetik ünitenin çıkışından numuneler alınmıştır. Her deney için alınan numune sayısı 8'dir. Analizin güvenilirliği açısından her numune için üç ölçüm yapılmış ve bulunan değerlerin ortalaması alınarak KOİ değeri hesaplanmıştır. KOİ analizleri ASTM standartlarında belirtilen (AWWA 1998) 5220-C kapalı sistem (reflux), titrimetrik metot yöntemine göre yapılmıştır. Bu yöntem, numuneye sülfürik asit ve kuvvetli bir oksitleyici olan potasyum dikromat ($K_2Cr_2O_7$) eklenerek, 2 saatlik bir ısıtma sonunda, kalan oksitleyicinin demir amonyum sülfat (DAS) çözeltisi ile titrimetrik yoldan saptanması esasına dayanır. KOİ analizlerinde kullanılan termoreaktör Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 KOİ analizlerinde kullanılan termoreaktör.

4.3 YAĞLI ATIKSULARIN KOAGÜLASYON-FLOKÜLASYON İLE ARITIMI

Bor yağı kullanılarak hazırlanan sentetik atıksuların koagülasyon-flokülasyon ile arıtımında, en iyi yağ gideriminin sağlandığı optimum koagülant miktarı, pH ve karıştırma süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler, hacimce % 2 oranında bor yağı içeren 300 mL atıksu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 500 mL'lik erlenler ile yapılan deneyler için GFL 3005 marka çalkalayıcı kullanılmıştır ve her deneyde 5000 rpm karıştırma hızında 1 dakika hızlı karıştırma yapıldıktan sonra, 100 rpm karıştırma hızında 45 dakika boyunca yavaş karıştırma yapılmıştır. Deneyler aynı şartlar altında dört kez yapılarak, yağ giderim verimi bu deneylerde elde edilen giderim değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Optimum koagülant miktarı: Alum ve demir (III) klorür (FeCl_3) kimyasalları koagülant olarak kullanılmıştır. Alum ile yapılan deneylerde 50 g/L'lik alum çözeltisi hazırlanmıştır. Atıksuya alum eklemesi 2 mL ile 10 mL arasında değişen hacimlerde yapılmıştır. FeCl_3 kullanımında ise 100 g/L'lik FeCl_3 çözeltisi hazırlanmıştır ve 5 mL ile 50 mL arasında değişen hacimlerde eklemeler yapılmıştır.

Optimum pH: Alum eklemelerinde pH 4 ve 8 aralığında değiştirilerek optimum pH değerine ulaşılmıştır. FeCl_3 ile yapılan deneylerde ise en iyi giderim verimini sağlayan pH değerini bulabilmek için pH'nın 4-11 aralığında değiştirilmesi gerekmiştir.

Optimum karıştırma süresi: Her iki koagülant için de bulunan optimum dozaj ve pH ayarlamaları yapılarak, optimum karıştırma süresini bulmak amacıyla farklı sürelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, arıtmadan sonra bor yağının su yüzeyinde toplandığı gözlemlenmiş ve bu nedenle karıştırma süresi boyunca alınan numuneler emülsiyon hareket halinde iken, erlenin en alt noktasından alınmıştır. Böylece zamana bağlı bulanıklık değerleri elde edilerek, optimum karıştırma süreleri saptanmıştır.

4.4 YAĞLI ATIKSULARIN FİLTRASYON İLE ARITIMI

Hacimce % 2 bor yağı içeren 300 mL hacmindeki atıksu, gözenek boyutu 8.0 µm olan selüloz nitrat filtre kullanılarak, vakum filtrasyon düzeneğinde süzülmüştür. Filtrasyon sonucunda oluşan süzüntünün beyaz renkte olduğu ve üst kısmında köpük oluştuğu gözlenmiştir. Süzüntünün bulanıklık sonuçları, atıksuyun bulanıklık değerleri ile karşılaştırıldığında bulanıklık değerlerinin yaklaşık üç kat arttığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre bor yağı içeren atıksuların arıtımında, filtre ortamı gözenekliğinin 8.0 µm'den küçük olması gerektiği ve ultrafiltrasyon membran kullanımının yağ giderim veriminde olumlu sonuçlar verebileceğine karar verilmiştir.

4.5 YAĞLI ATIKSULARIN SANTRİFÜJ İLE ARITIMI

% 2 bor yağı içeren sentetik atıksu numuneleri, koagülasyon - flokülasyon deneylerinde bulunan optimum alum dozajlaması yapılarak, farklı dönüş hızlarında santrifüj yöntemi ile arıtılmıştır. Deneylerde Nüve NF800 (Şekil 4.9) santrifüj cihazı kullanılmıştır ve deneyler 1000, 3000 ve 4000 rpm dönüş hızlarında gerçekleştirilmiştir. 50 mL hacmindeki atıksular 15 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Deneylerde her dönüş hızı için üç adet santrifüj tüpü kullanılarak bulanıklık değerleri okunmuştur. Yağ giderim verimleri üç okuma değerinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.9 Santrifüj cihazı.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

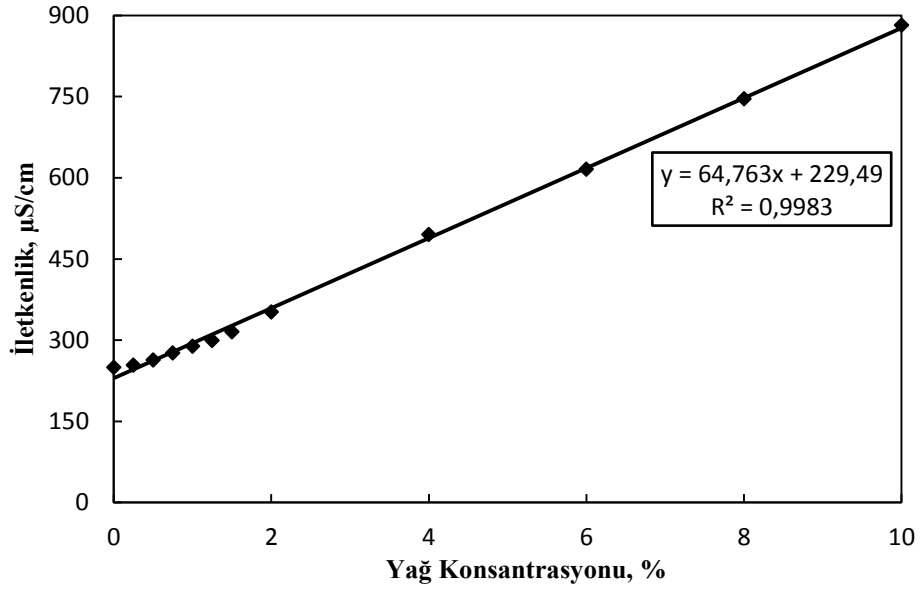
Metal kesme sıvısı (bor yağı) kullanılarak hazırlanan sentetik atıksuların karakterizasyonu pH, yoğunluk, iletkenlik ve zeta potansiyel ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sentetik atıksuların arıtımında koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon, santrifüj ve elektrokinetik yöntemler (elektrokoagülasyon-elektroflotasyon) uygulanmış ve her bir yöntem için yağ giderim verimleri deneyler yapılarak belirlenmiştir. Çalışmada, elektrokinetik arıtım deneylerinde her bir tasarım parametresinin yağ giderim verimine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu nedenle voltaj farkı, elektrot alanı, çalışma modu (kesikli ve sürekli akış), elektrokinetik ünite tasarımı (dikey ve yatay) ve debinin bulanıklık ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderim verimlerine etkileri deneysel çalışmalar ile araştırılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

5.1 KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Petrol Ofisi bor yağı kullanılarak hazırlanan atıksu numunelerinin karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, farklı konsantrasyonlarda metal kesme sıvısı içeren atıksuların iletkenlik ve bulanıklık değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, farklı pH değerlerinde atıksu numunelerinin zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5.1.1 Metal Kesme Sıvısı İçeren Atıksuların İletkenlik Ölçümleri

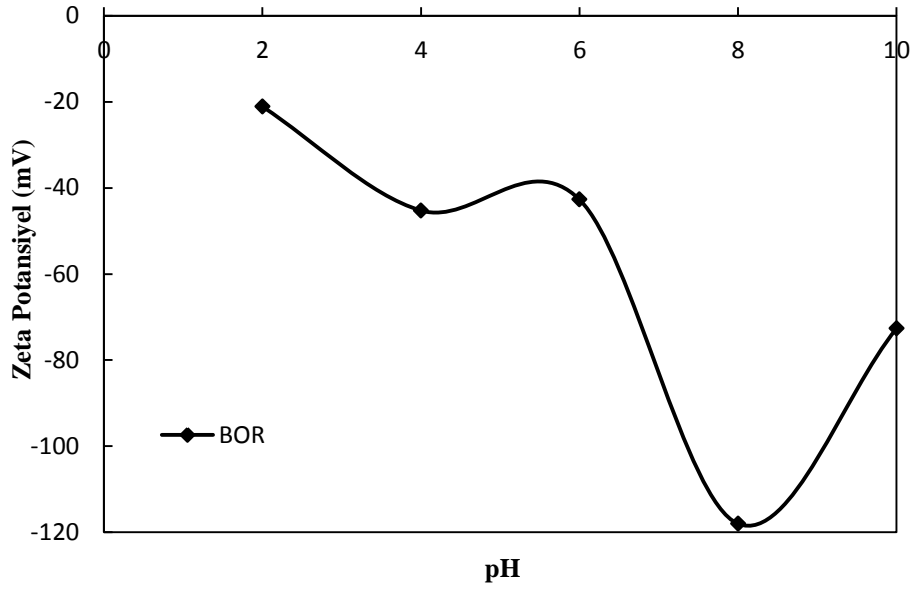
Hacimce %10 oranında bor yağı içeren sentetik atıksu numunesi seyreltilerek farklı yağ konsantrasyonlarında atıksular hazırlanmış ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.1'de sunulmuştur. Yağ konsantrasyonu arttıkça iletkenliğin doğrusal olarak artış gösterdiği görülmektedir ve oldukça yüksek bir korelasyon katsayısı ($R^2=0.9983$) elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Atıksudaki bor yağ oranının iletkenlik üzerindeki etkisi.

5.1.2 Yağ Damlalarının Zeta Potansiyel Ölçümleri

% 0,25 oranında bor yağı içeren ve farklı pH değerlerine sahip atıksu numunelerinde bulunan yağ damlalarının zeta potansiyelleri ölçülmüş ve sonuçlar Şekil 5.2’de sunulmuştur. Atıksuların pH değerleri sodyum hidroksit ve hidroklorik asit kullanılarak ayarlanmıştır. Emülsiyondaki yağ damlalarının yüzey yükleri arttıkça damlaların birbirlerini itme kuvveti artacağından emülsiyonun kararlılığı artmaktadır. Damlaların zeta potansiyelleri azaldığında ise emülsiyonun kararlılığı azalacak ve faz ayrımı daha kolay gözlenebilecektir (McClements 2007). Metal kesme sıvıları kimyasal yapılarına göre farklılık göstermektedir ancak yağ damlaları suda genellikle pH 2,5’tan yüksek değerler için negatif yüzey yüküne, düşük değerler için ise pozitif yüzey yüküne sahip olmaktadır. Knecht et al. (2010) damlaların pH’a bağlı yüzey yükündeki bu değişimlere ortamdaki hidroksit (OH⁻) veya hidronyum (H₃O⁺) iyonlarının değişen konsantrasyonlarının neden olduğunu ifade etmektedir. Elde edilen zeta potansiyel ölçüm sonuçlarına göre bor yağı damlaları pH 2-10 aralığında negatiftir. Bor yağı su ile karıştırıldığında ortam pH’ı 8’dir. En yüksek zeta potansiyel değeri pH 8’de ölçülmüştür. Özellikle asidik ortamlarda zeta potansiyel değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle düşük pH’larda faz ayrımlarının oluştuğu ve atıksuyun heterojen bir görünümde olduğu gözlenmiştir.



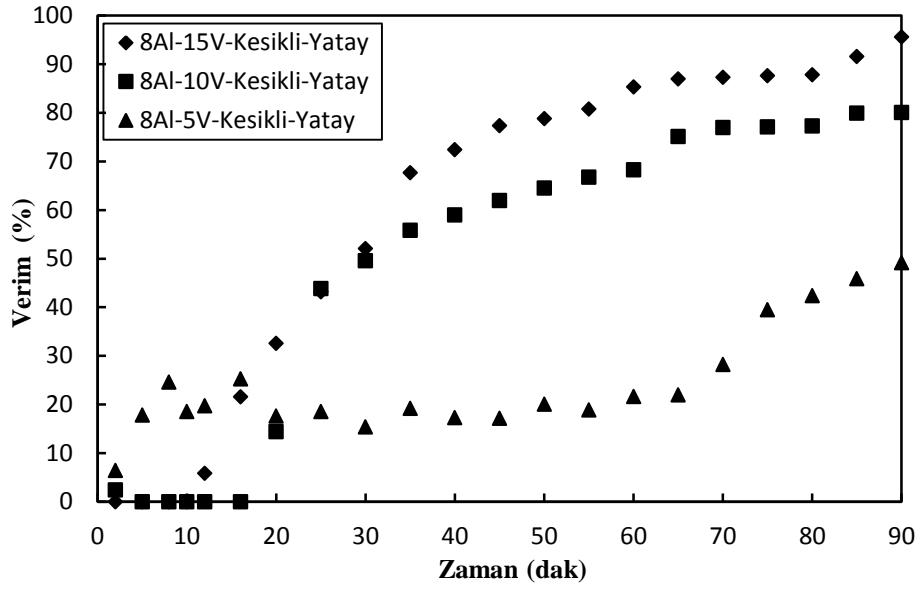
Şekil 5.2 pH değişiminin zeta potansiyel üzerindeki etkisi.

5.2 ELEKTROKİNETİK ARITIM DENEYLERİ

Elektrokinetik arıtım deneyleri yatay ve dikey elektrokinetik üniteler kullanılarak yapılmıştır. Her iki ünite hakkında detaylı bilgi Bölüm 4 Materyal Metot'ta sunulmuştur. Her iki üniteye yapılan deneyler, parametrelerin karşılaştırılabilmesi için aynı çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 Elektrotlara Uygulanan Voltaj Farkının Arıtım Verimine Etkisi

Deneylerde çalışılan voltaj farkları 5, 10 ve 15 voltur. Her elektrot için elektrotlar arası mesafe sabittir (1 cm) ve deneylerde 8 adet alüminyum elektrot kullanılmıştır. Kesikli akışta yapılan uygulamalarda debi 90 mL/dak olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.3'de yatay üniteye, farklı voltaj uygulamaları ile gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmaktadır.

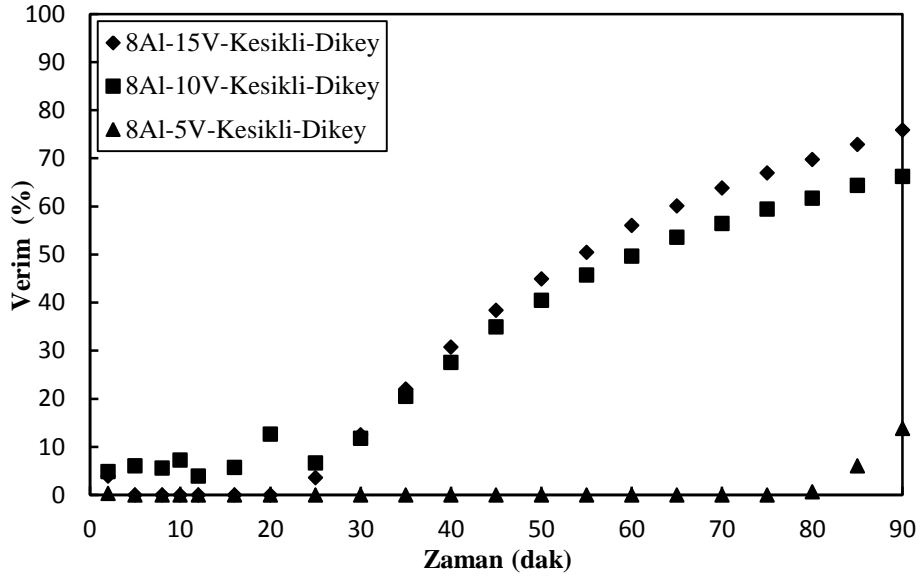


Şekil 5.3 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).

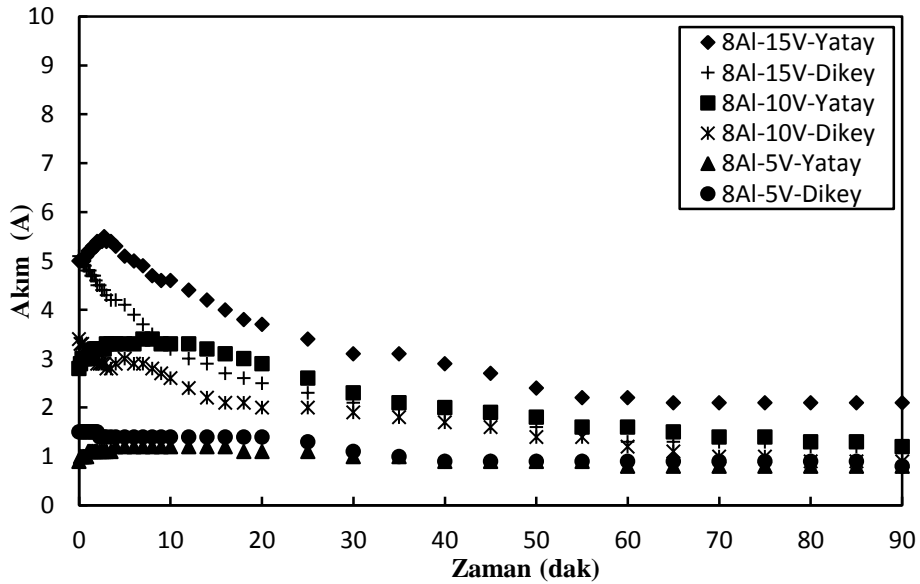
Burada 5, 10 ve 15 V'luk voltaj farkları elektrotlara uygulandığında 90 dakika sonucunda ulaşılan bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %49, %80 ve %95'tir. Bu sonuçlara göre 5 V'luk voltaj farkı uygulamanın, hazırlanan sentetik atıksuyun arıtımında yetersiz olduğu görülmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde 10 ve 15 V'luk voltaj farklarında arıtımın ilk 20 dakikasında bulanıklığın arttığı ve dolayısıyla giderimin olmadığı görülmektedir. Bulanıklıktaki bu artışa başlangıçta ortama verilen metal iyonlarının neden olduğu düşünülmektedir. 20. dakikadan sonra bulanıklık giderim verimleri giderek artış göstermiştir. Elektrotlara uygulanan voltaj farkı 5 V'tan 10 V'a çıkarıldığında bulanıklık giderim verimi %63 oranında artış gösterirken, voltaj farkını 10 V'tan 15 V'a çıkarmak bulanıklık giderimini %19 oranında arttırmıştır. Sonuç olarak elektrotlara uygulanan voltaj farkının artması bulanıklık giderim verimini arttırmıştır ancak bu artış doğrusal değildir. Kimyasal ve mekanik parlatmadan kaynaklı oluşan atıksuların elektrokoagülasyonla arıtıldığı bir çalışmada çeşitli voltaj farkları uygulanarak KOİ ve bulanıklık giderim verimleri belirlenmiştir. Sonuçlara göre, voltaj farkı arttıkça bulanıklık ve KOİ giderim verimlerinde daha kısa sürede artış gözlenmiştir (Chou et al. 2009).

Yatay ünite de yapılan voltaj farkı uygulamaları aynı şekilde dikey ünite de gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4'de sunulan bulanıklık giderim verimi-zaman grafiğine göre dikey ve yatay ünitenin voltaj artışına gösterdiği tepki benzerlik göstermektedir. Ancak dikey ünitenin akım değerlerindeki düşüş daha fazladır (Şekil 5.5). Elektrotlara uygulanan voltaj sabit tutulduğunda dikey ünitenden geçen akım değerlerinin daha düşük olduğu

gözlenmektedir. Dikey üniteadaki ortam direnci daha yüksektir ve bu nedenle, “Ohm Kanunu”na göre elde edilen bulanıklık giderim verimleri, yatay üniteye göre oldukça düşüktür.



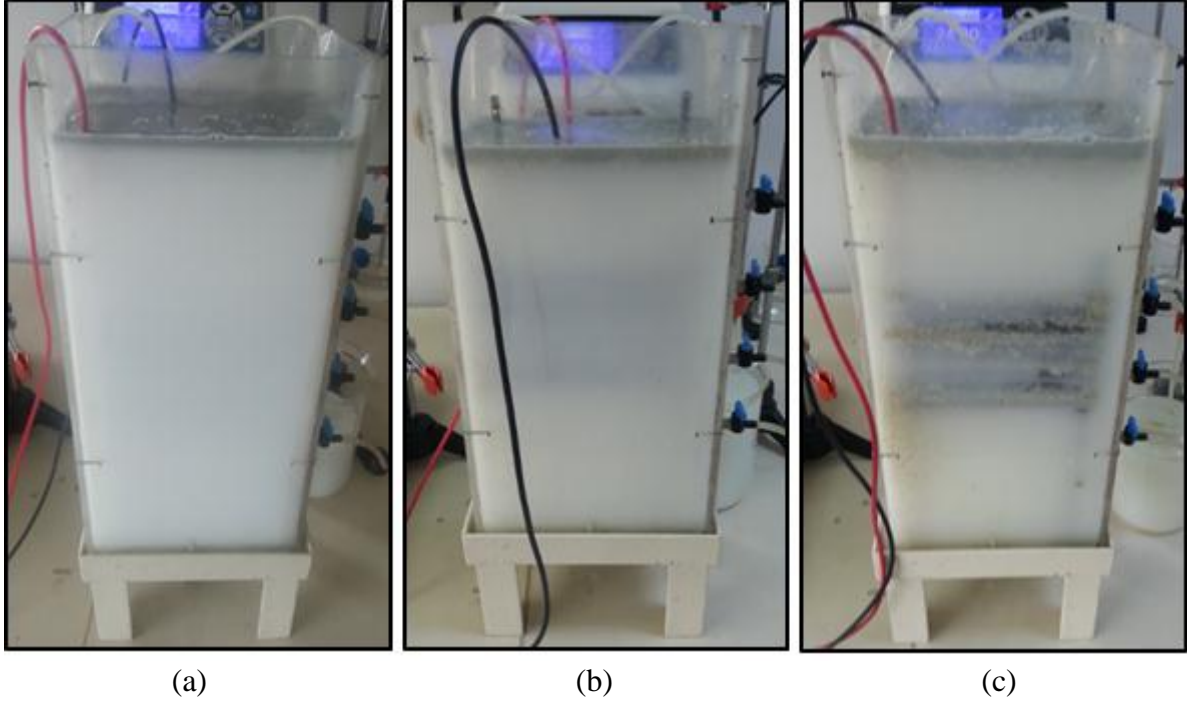
Şekil 5.4 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).



Şekil 5.5 Elektrotlara uygulanan voltaj farkının akım değişimine etkisi (Dikey Ünite).

Şekil 5.4’de, 5 V’luk voltaj uygulaması ile atıksuyun arıtımının ancak 80. dakikada başladığı ve dikey üniteye bu voltaj farkının arıtım için yeterli olmadığı gözlenmektedir. Ayrıca, 10 ve 15 V voltaj farklarından elde edilen giderim verimleri birbirine oldukça yakındır. Elektrotlar arası voltaj farkını arttırmak bulanıklık giderim verimini arttırsa da bu artışın doğrusal

olmadığı görülmektedir. 15 V voltaj farkında, dikey ünite elde edilen bulanıklık giderim verimi %75'tir. Dikey ünite çalışılan farklı voltaj değerlerinde, 90 dakikalık arıtım sonrasında elde edilen görüntüler Şekil 5.6'da görülmektedir.

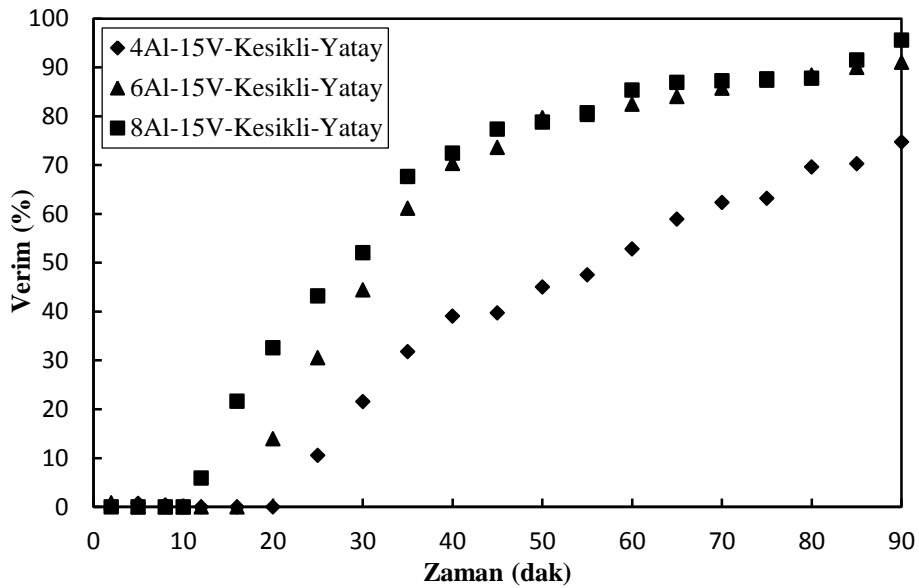


Şekil 5.6 Dikey ünite kesikli akışta, elektrotlara uygulanan voltaj farkına bağlı olarak 90 dakika sonunda atıksuyun rengi ((a) 5 V, (b) 10 V, (c) 15 V).

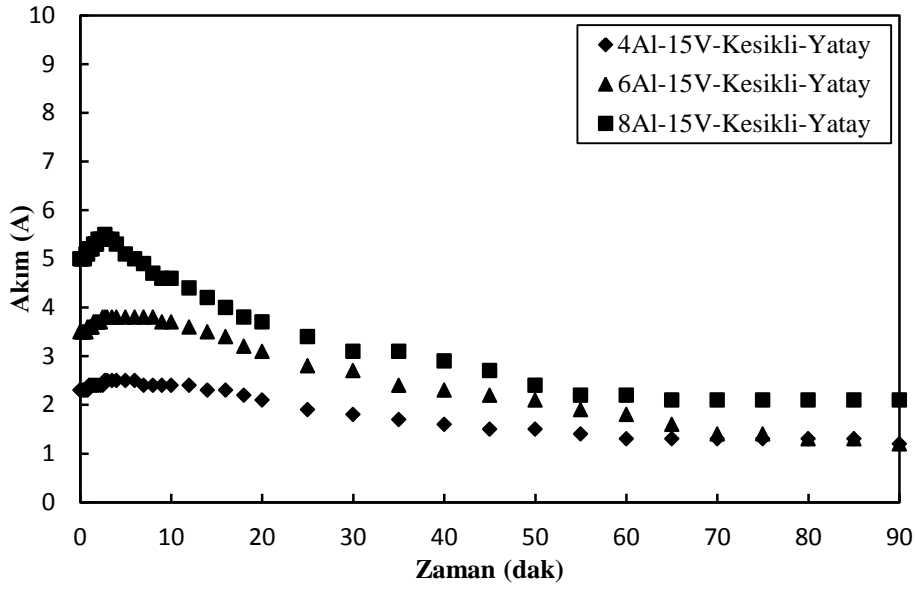
5.2.2 Elektrot Alanının Arıtım Verimine Etkisi

Elektrokinetik arıtım deneylerinde elektrot alanının arıtım verimine etkisini incelemek amacı ile 4, 6 ve 8 elektrot kullanılarak kesikli akışlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elektrot alanının artması ile ortama verilen alüminyum iyonlarında Faraday kanununa göre artış beklendiği için (Sangal et al. 2013) yağ giderim verimlerinde de artış beklenmektedir. Ayrıca, Thirugnanasambandham et al. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada elektrot alanının artması ile su moleküllerinin elektronlarla daha etkili bir temas sağlaması nedeniyle hidrojen iyonu oluşumunda artış olduğundan KOİ giderimlerinde artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Alüminyum elektrotların kullanıldığı deneyler sırasında elektrotlara uygulanan voltaj farkı 15 V, debi ise 90 mL/dak'dır. Deneyler ilk olarak yatay ünite gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7'de yatay ünite gerçekleştirilen deneylerin bulanıklık giderim verimlerinin zamana göre değişimleri sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde her üç elektrot sayısında da 20. dakikadan itibaren bulanıklık giderim veriminin artmaya başladığı görülmektedir. Ancak, 90. dakikada 4

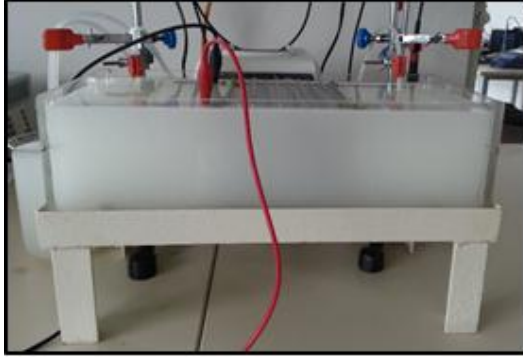
adet elektrot bulunan deneyde %70, 6 adet elektrot bulunan deneyde %90 oranında giderim verimi elde edilirken, 8 elektrotun bulunduğu deneyde %95 oranında bulanıklık giderimi sağlanmıştır. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, elektrot alanının artması ile ortamdan geçen akım artmakta ve dolayısıyla bulanıklık giderim verimi de daha hızlı artış göstermektedir. Atıksuyun yağ içeriği başlangıçta en yüksek değere sahip olduğu için iletkenlik değeri yüksektir ve dolayısıyla deneyin başlangıcında akım değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Zamanla yağ giderimine bağlı olarak iletkenlik değeri azaldığı için akım değerlerinin de zamanla azaldığı ve bir süre sonra sabitlendiği gözlenmektedir. Akım değerlerinin zamanla azalmasından dolayı arıtım verimi bir süre sonra sabit kalmaktadır. Benzer bir çalışmada (Bakırcı 2014) elektrot alanının arıtıma etkisi incelenmiş ve elektrot sayısı arttıkça bulanıklığın daha hızlı azalma gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Yatay üniteye atıksuyun arıtım öncesinde ve 90 dakikalık arıtım sonrasında elde edilen görüntüsü Şekil 5.9’da sunulmuştur.



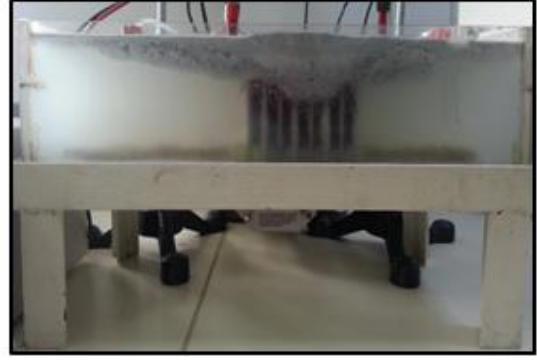
Şekil 5.7 Elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).



Şekil 5.8 Elektrot alanının akım değişimine etkisi (Yatay Ünite).



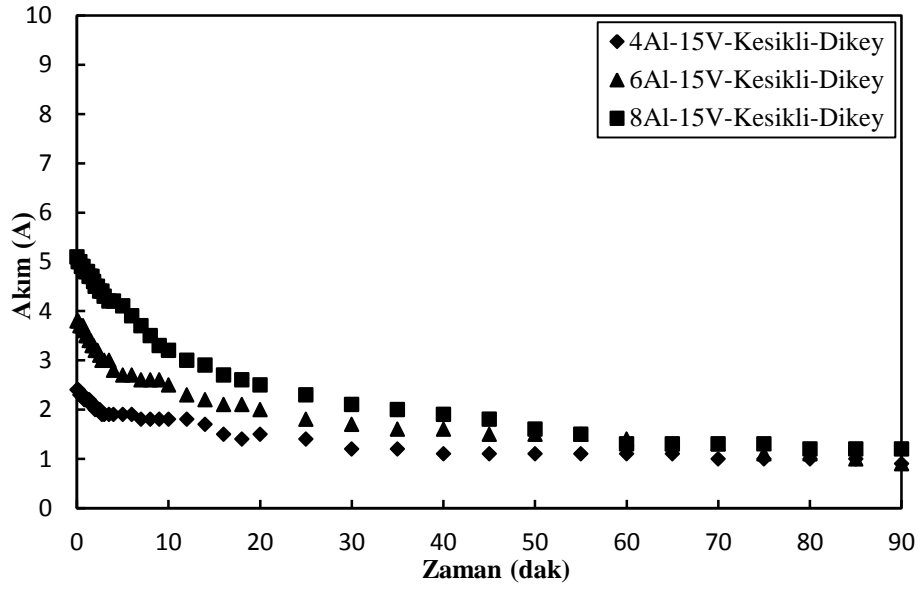
(a)



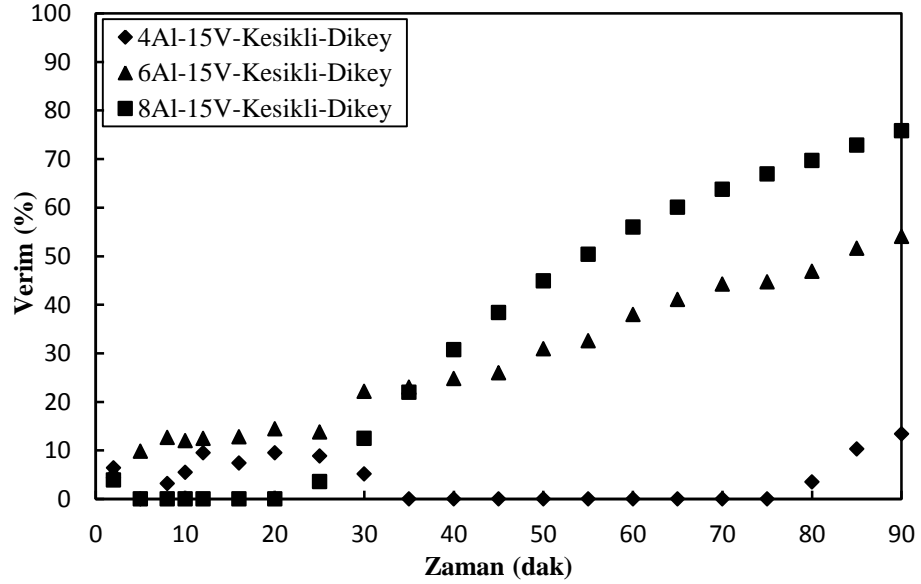
(b)

Şekil 5.9 Yatay üniteye kesikli akışlı deneylerde atıksuyun rengindeki değişimler ((a) $t=0$ dak (b) $t=90$ dak, 15V, 8 elektrot).

Elektrot alanının yatay ve dikey ünitelerdeki arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla yatay üniteye yapılan deneyler, dikey üniteye de tekrarlanmıştır. Dikey üniteye yapılan kesikli akışlı deneylerde her üç elektrot sayısında da akım değeri zamanla azalmakta ve 90. dakikada aynı değere gelmektedir (Şekil 5.10). Elektrot direncinin artması sebebiyle, ortamdan geçen akım zamanla çok azalmış ve dikey üniteye elde edilen en yüksek bulanıklık giderim verimi 8 elektrot kullanılarak elde edilmiştir. Yatay üniteye olduğu gibi dikey üniteye de elektrot alanının artması bulanıklık giderim verimini daha kısa sürede arttırmıştır. Şekil 5.11'de görüldüğü üzere dikey üniteye 4 elektrot kullanımı ile kesikli akışta arıtım yapılamamıştır. 90. dakikanın sonunda 6 elektrot kullanıldığında bulanıklık giderim verimi %54 iken 8 elektrot kullanıldığında bu değer %75 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla dikey üniteye yapılan 90 dakikalık deneylerde elde edilen maksimum arıtım verimi %75'tir.



Şekil 5.10 Elektrot alanının akım değişimine etkisi (Dikey Ünite).



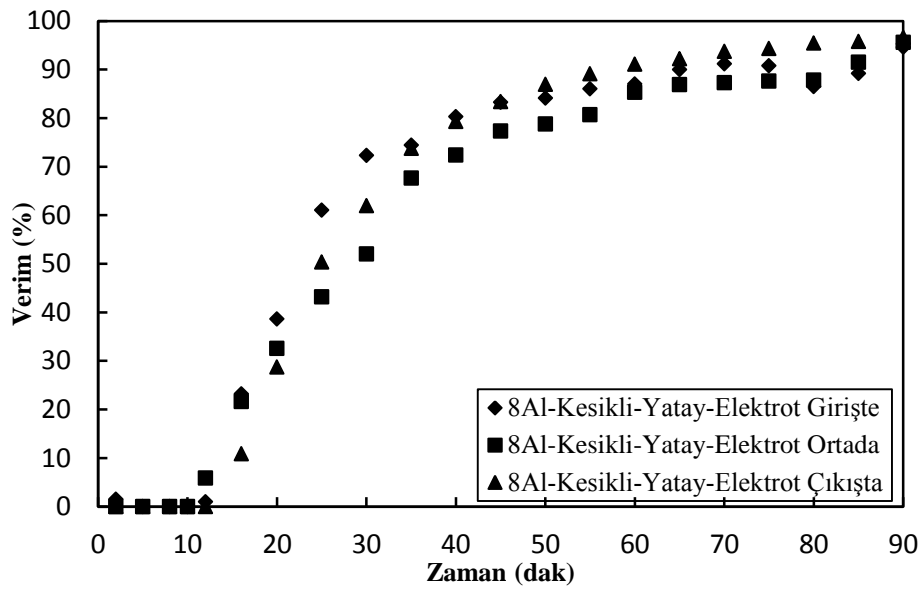
Şekil 5.11 Elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).

5.2.3 Elektrotların Ünitelerdeki Konumunun Arıtım Verimine Etkisi

Elektrotların yatay ve dikey ünitelerdeki konumlarının arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla kesikli ve sürekli elektrokinetik arıtım deneyleri gerçekleştirilmiştir.

a) Kesikli Akışlı Elektrokinetik Deneyler

Elektrotların yatay üniteadaki konumunun arıtım verimine etkisini belirleyebilmek için elektrotlar yatay üniteye atıksuyun üniteye girdiği “Giriş” kısmına, atıksuyun çıkışının olduğu “Çıkış” kısmına ve elektrokinetik ünitenin “Orta” kısmına yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. “Giriş”, “Orta” ve “Çıkış” olarak isimlendirilen elektrot yerleşimlerinde ilk elektrotun girişe olan mesafesi sırası ile 4 cm, 12 cm ve 21 cm’dir. Uygulamalarda 8 adet alüminyum elektrot kullanılmış ve debi 90 mL/dak olarak ayarlanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.12’de sunulmaktadır.

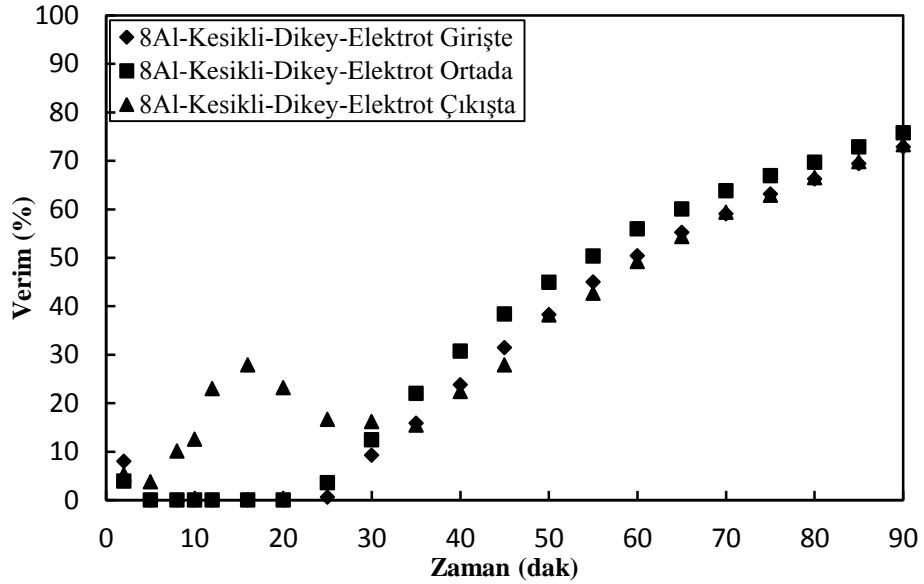


Şekil 5.12 Kesikli akış çalışma modunda, elektrotların ünitedeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).

Şekil 5.12 incelendiğinde, yatay üniteye kesikli akışlı deneylerde, ünitenin içerisinde elektrot yerinin değiştirilmesinin bulanıklık giderim verimini etkilemediği görülmektedir. Ayrıca deneylerde elektrot konumlarının değiştirilmesine rağmen ünitelerden geçen akım değerlerinin sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Bulanıklık giderim verimleri deneyin 15 ve 40. dakikaları arasında hızlı bir artış göstermiş, 40. dakikadan sonra arıtım verimi yavaş bir şekilde artmış ve 70. dakikadan sonra neredeyse sabit kalmıştır. Elektrotların her üç konumunda da 90.dakikada elde edilen bulanıklık giderim verimleri ortalama olarak %95’tir.

Ünitelerdeki elektrot konumlarının arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla dikey üniteye de deneyler yapılmıştır. Yatay üniteye olduğu gibi dikey üniteye de elektrotlar atıksuyun üniteye girdiği “Giriş” kısmına, atıksuyun ünitelerden çıktığı “Çıkış” kısmına ve dikey ünitenin

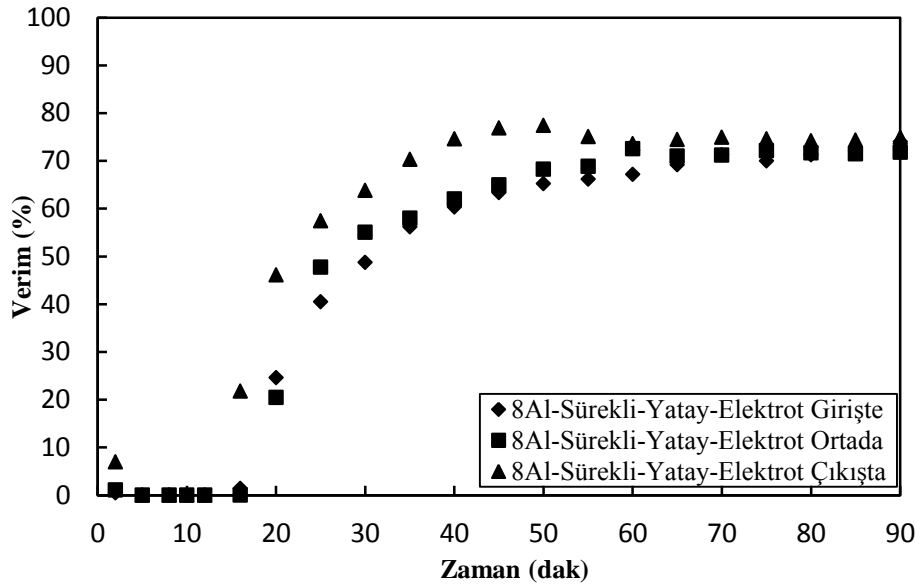
“Orta” bölümüne yerleştirilmiştir. Dikey ünite de elde edilen bulanıklık giderim verimlerinin zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 5.13’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre 90. Dakikada tüm konumlar için giderim verimlerinde herhangi bir farklılık gözlenmemiştir. “Giriş” ve “Orta” yerleşim düzenlerinde bulanık giderim verimleri ilk 30 dakika süresince değişim göstermemiş ve daha sonra artmaya başlamıştır. “Çıkış” yerleşim düzeninde ise bulanıklık giderim verimlerinde ilk 30 dakikada önce artışlar ve sonra azalmalar gözlenmiştir. Elektrotlar bu yerleşim düzeninde atıksu numunelerinin alım noktasına en yakın mesafededir. Bulanıklık giderim verimindeki artış ve azalışlara, elektrot yüzeylerinden ortama verilen alüminyum iyonlarının konsantrasyonu ile elektroliz sonucu oluşan gaz kabarcıklarının neden olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5.13 Kesikli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).

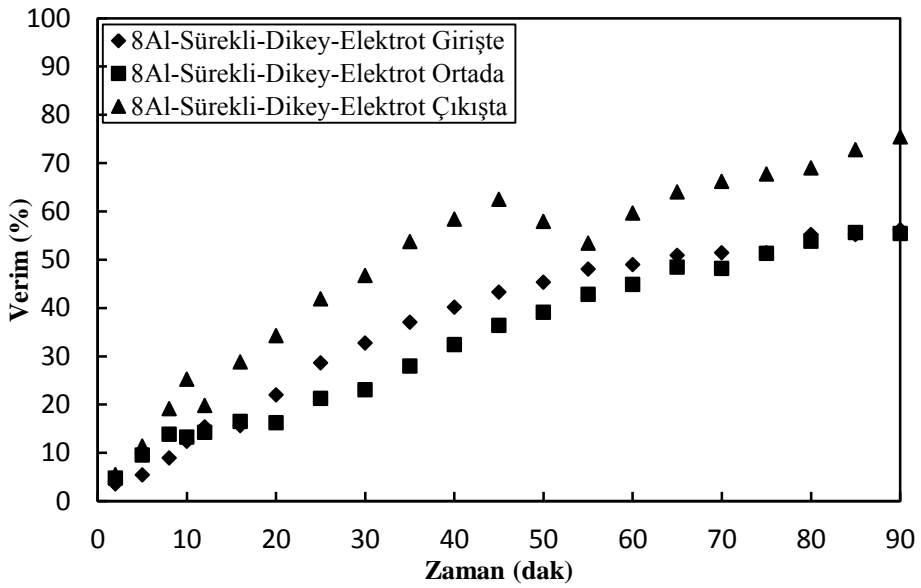
b) Sürekli Akışlı Elektrokinetik Deneyler

Elektrotların ünitelerdeki konumunun arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla kesikli akış çalışma modunda yapılan deney koşullarında sürekli akışlı deneyler de gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yatay ünite de gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 5.14’de görülmektedir. Buna göre, çalışma modunun değişmesi elektrot konumunun bulanıklığa etkisini değiştirmemiş ancak sürekli akışta bulanıklık giderim verimi daha düşük bulunmuştur. Deneylerde bulanıklık giderimi 15 ve 40 dakika arasında artış göstermiş, daha sonrasında ise sabit kalmıştır. 90 dakikalık deney süresi sonunda, sürekli akışlı deneylerde her üç konumda da bulanıklık giderimi %75 civarındadır.



Şekil 5.14 Sürekli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Yatay Ünite).

Yatay ünitenin ardından sürekli akış çalışma modundaki deneyler dikey ünite de yapılmıştır. Dikey üniteden elde edilen deney sonuçları Şekil 5.15’de görülmektedir.



Şekil 5.15 Sürekli akış çalışma modunda, elektrotların ünitelerdeki konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi (Dikey Ünite).

Şekil 5.15 incelendiğinde dikey ünite de elektrot yerleşiminin kesikli ve sürekli akışta farklılık gösterdiği görülmektedir. Sürekli akışta, dikey ünite de elektrotların ünitenin girişinde ve ortasında olduğu durumlarda bulanıklık giderim verimleri %55’dir ve bu değer kesikli akışta elde edilen verim değerinden %27 daha düşüktür. Ancak, elektrotların ünitenin çıkışında

bulunduğu durumda sürekli akışta elde edilen bulanıklık giderim verimi kesikli akıştaki ile aynı değerdedir. Elektrotların çıkış yerleşim düzeninde atıksu numunelerinin alım noktasına en yakın mesafede olmasından dolayı, bu yerleşim düzeninde en yüksek giderim veriminin elde edildiği düşünülmektedir.

5.2.3.1 Ortalama Kalış Süresi

Atıksu arıtımı için kullanılan reaktörlerin hidrolik performansının belirlenmesinde boyalar ya da bazı izleyicilerin kullanımı basit ve başarılı bir yöntemdir (Metcalf&Eddy 2003). Bu yöntemde, seçilen bir izleyici (boya, tuz, vb.) çalışılan reaktörün girişine enjekte edilir. Belirli zaman aralıklarında reaktörün çıkışından alınan numunelerle izleyicinin konsantrasyon ölçümleri yapılır ve izleyicinin reaktörün girişinden çıkışına gelene kadar geçen süre hesaplanır. İzleyici ölçümlerinden elde edilen verilerle C grafiği olarak bilinen konsantrasyon-zaman grafiği çizilir. C grafiğinin karakterizasyonu için, grafiğin dağılımının ağırlık merkezine göre bir ortalama değer belirlenir. Ortalama kalış süresi olarak tanımlanan bu değer:

$$\bar{t}_c = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (5.1)$$

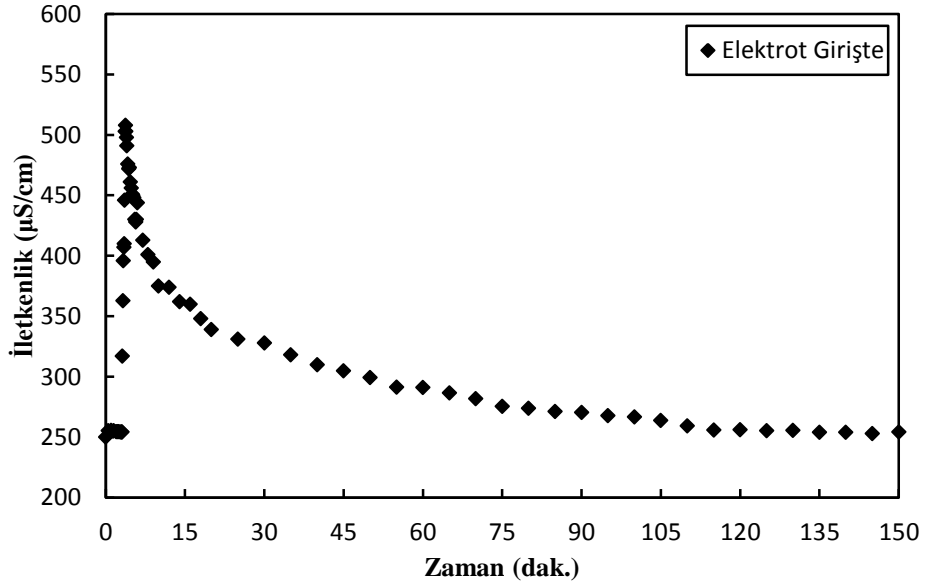
denklemleri ile hesaplanır. Burada, t, \bar{t}_c ve C(t) sırasıyla zamanı, ortalama kalış süresini ve “t” anındaki izleyici konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Konsantrasyon verilerindeki dağılım yayılımı varyans değeri (σ_c^2) ile hesaplanır:

$$\sigma_c^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} - (\bar{t}_c)^2 \quad (5.2)$$

Yatay ve dikey elektrokinetik ünitelerin ortalama kalış sürelerinin belirlenmesi amacıyla iletkenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar 90 mL/dak debide ve sürekli akış modunda gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde üniteler çeşme suyu ile doldurulmuş ve çeşme suyunun iletkenliği ölçülmüştür. Deneyin başlangıcından 2 dakika sonra 6,70 mS/cm değerinde iletkenliğe sahip tuz çözeltisi (izleyici) ünitenin girişine 1 dakika boyunca enjekte edilmiş ve 3. dakikadan itibaren üniteye tekrar çeşme suyu verilmiştir. Ünitenin çıkışındaki iletkenlik değerleri belirli zaman aralıklarında ölçülmüş ve toplam deney süresi 150 dakika

olarak belirlenmiştir. Şekil 5.16, yatay ünite de elektrot yerleşimi girişte olduğunda, çıkış hattındaki suyun iletkenliğinin zamana göre değişimini göstermektedir. Görülmektedir ki; çıkıştaki suyun iletkenliği çok kısa sürede girişteki tuzlu suyun iletkenliğine eşit olmaktadır. Ayrıca çıkış suyunun iletkenlik değerinin oldukça uzun bir süre sonra başlangıçtaki giriş suyunun iletkenlik değerine düştüğü gözlenmektedir. Deneyler farklı iletkenliklere sahip tuz çözeltileri hazırlanarak tekrarlanmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.16 Elektrot yerleşimi girişte olduğunda, çıkış hattındaki suyun iletkenliğinin değişimi (Yatay Ünite).

Tuz çözeltisi eklenerek yapılan izleyici testlerinden elde edilen iletkenlik değerlerine göre Denklem (5.1) kullanılarak her iki ünite için farklı elektrot yerleşim düzenlerinde ortalama kalış süreleri hesaplanmıştır. İntegral hesaplamalarında trapez kuralı uygulanmıştır. Yatay ünite de deneyler sonucu elektrotların giriş, orta ve çıkış bölümünde olduğu durumlarda elde edilen ortalama kalış süresi değerleri sırasıyla 33, 38 ve 26 dakika ve varyans değerleri ise 26, 30 ve 20 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu deneylerde hidrolik kalış süresi (θ) ise:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (5.3)$$

denklemini ile 50 dakika olarak hesaplanmıştır. Burada “V” reaktörün hacmini ve “Q” ise atıksuyun debisini ifade etmektedir. İdeal bir reaktörde hidrolik kalış süresi ile ortalama kalış süresi birbirlerine yakın değerler olacaktır. Ancak elde edilen tüm ortalama kalış süresi değerlerinin hidrolik kalış süresinden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca

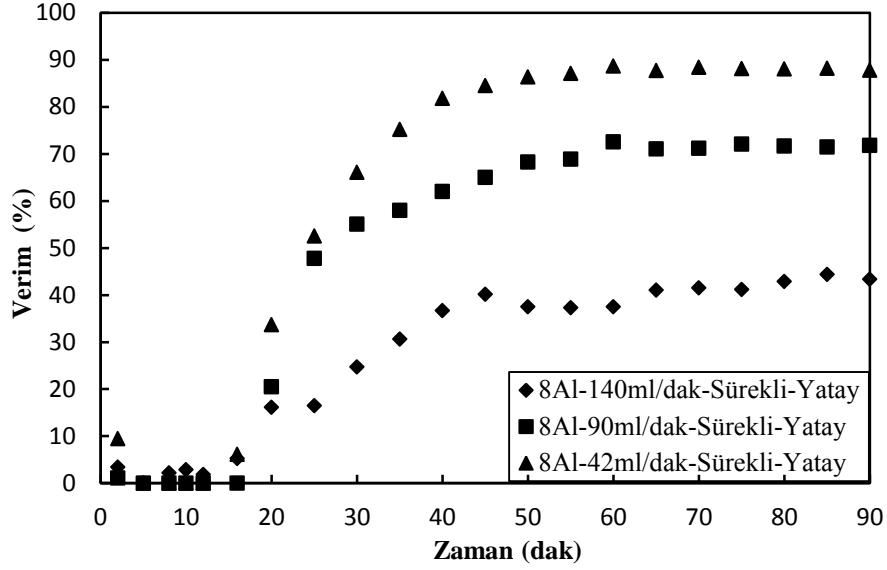
elektrotların ünitenin ortasına yerleştirilmesi durumunda en yüksek ortalama kalış süresi hesaplandığından bu yerleşim düzeninde en iyi giderim verimlerinin elde edilmesi beklenmektedir. Ancak, yatay üniteye elektrot konumunun değiştirilmesi, arıtım verimini etkilememiştir. Yatay elektrokinetik üniteye arıtım esnasında su, ünitenin girişinden çıkışına doğru ilerlerken, elektrotların alt ve üst noktalarında bulunan bölgeler boyunca hareket etmektedir ve iki elektrot arasına girmemektedir. Bu nedenle, suyun büyük bir kısmı elektrot ile temas etmeyerek çıkışa ulaştığı için yatay üniteye elektrot tasarımı geliştirilmelidir.

Dikey ünite için de tuz çözeltileri ile iletkenlik testleri farklı elektrot yerleşim düzenleri için gerçekleştirilmiştir. Elektrotlar ünitenin giriş, orta ve çıkış bölümüne yerleştirilerek hesaplanan ortalama kalış süreleri sırasıyla 39, 40 ve 39 dakika, varyans değerleri ise 29, 32 ve 31 dakikadır. Bu değerlerde hidrolik kalış süresinden daha düşüktür. Dikey üniteye elde edilen sonuçlar, elektrot yerleşiminin arıtım verimini etkilemediğini göstermektedir.

5.2.4 Debinin Arıtım Verimine Etkisi

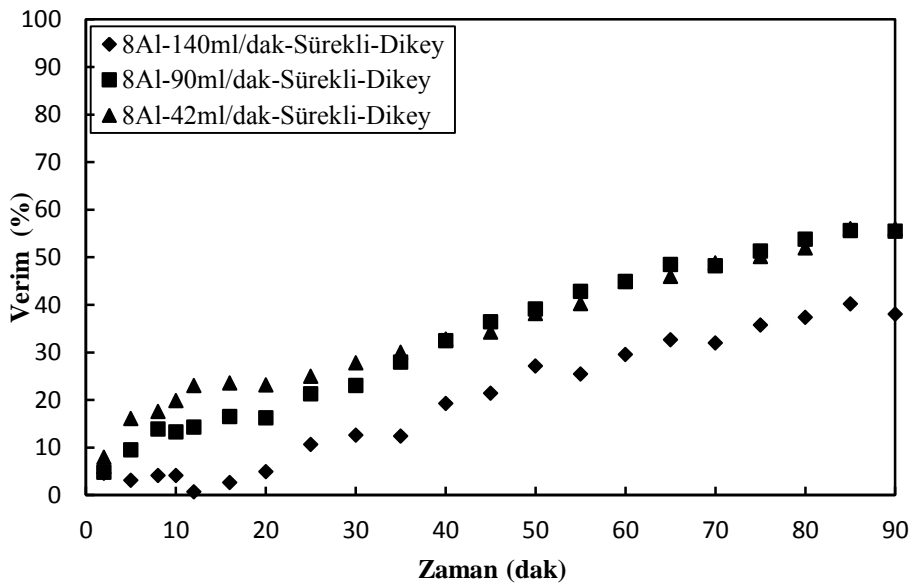
Atıksu giriş debisinin elektrokinetik yöntemin arıtım verimine etkisini araştırmak amacı ile bor yağı ile hazırlanan sentetik atıksular, farklı debilerde sürekli akışlı çalışma modundaki deneyler ile arıtmaya çalışılmıştır. Deneyler 8 adet alüminyum elektrota 15 V voltaj farkı uygulanarak, yatay ve dikey ünitelerde gerçekleştirilmiştir. Uygulanan debiler 42, 90 ve 140 mL/dak'dır.

İlk olarak yatay üniteye gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 5.17'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre sistemden geçen debi arttıkça bulanıklık giderim verimlerinde azalma gözlenmektedir ve bu sonuç literatürdeki sonuçlar ile uyum göstermektedir (Bakırcı 2014; Ding et al. 2016; Moises et al. 2010). Şekil 5.17'ye göre deneyin başlangıcından yaklaşık 15 dakika sonra, her üç debi değerinde de arıtım veriminin artmaya başladığı görülmektedir. 15. dakikadan sonra bulanıklık giderim verimleri 40. dakikaya kadar artmış ve daha sonra sabit kalmıştır. 90 dakikalık deney süresi sonunda 140, 90 ve 42 mL/dak'lık debi değerlerinden elde edilen bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %43, %71 ve %88'dir. Debi değeri arttıkça atıksuyun üniteye hidrolik kalış süresi azaldığından arıtım verimi de azalmaktadır.



Şekil 5.17 Debinin arıtım verimine etkisi (Yatay Ünite).

Debinin arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla dikey ünite de gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Şekil 5.18’de sunulmuştur. Sonuçlar yatay üniteye göre farklılık göstermektedir. Dikey ünite de atıksuyun hızındaki artışların suda karışımları artırabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle 42 ve 90 mL/dak debilerde aynı arıtım verimleri elde edilmiştir. Debinin değişimi ile dikey ünite de çok büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Her üç debide de elde edilen giderim eğrileri benzer şekilde artış göstermektedir. 42 ve 90 mL/dak’da %55 bulanıklık giderim verimi sağlanırken, 140 mL/dak’da %40 oranında giderim verimi elde edilmiştir.

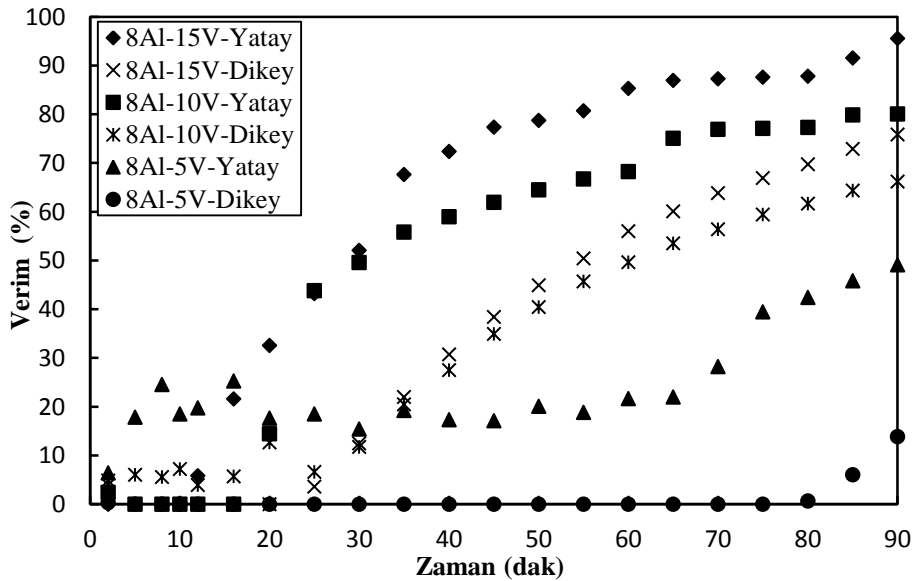


Şekil 5.18 Debinin arıtım verimine etkisi (Dikey Ünite).

5.2.5 Optimum Elektrokinetik Arıtım Koşullarının Belirlenmesi

Öncelikle yatay ve dikey ünitelerde gerçekleştirilen elektrokinetik deneylerde elde edilen bulanıklık verimlerine göre en uygun çalışma koşulları belirlenmiştir. Daha sonra, belirlenen en uygun çalışma şartlarında yağ giderim verimleri KOİ deneyleri yapılarak test edilmiştir. Ayrıca bu şartlar altında maliyet analizleri de yapılmıştır. Sonuç olarak, bulanıklık ve KOİ giderim verimleri ile birlikte maliyet analizleri de karşılaştırılarak bor yağı içeren atıksuların arıtımında uygulanacak en uygun çalışma şartları belirlenmiştir.

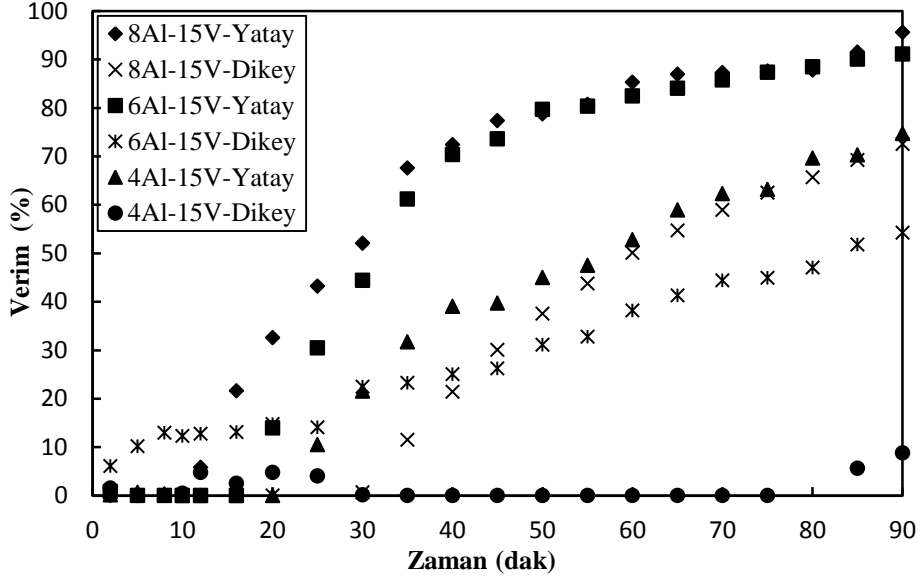
İlk çalışılan parametre olan voltaj farkının arıtım verimine etkisi için yatay ve dikey ünitelerde kesikli akışlı deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.19'da yapılmıştır. Buna göre, düşük voltajlarda yapılan arıtım çalışmalarının her iki ünite için de çok başarılı olmadığı görülmektedir. Voltaj farkının artması iki ünite de arıtım verimini arttırmıştır. Bu nedenle yapılan deneylerde her iki ünite için de voltaj farkı 15 V olarak seçilmiştir.



Şekil 5.19 Yatay ve dikey ünitelerde, voltaj farkının bulanıklık giderim verimine etkisi.

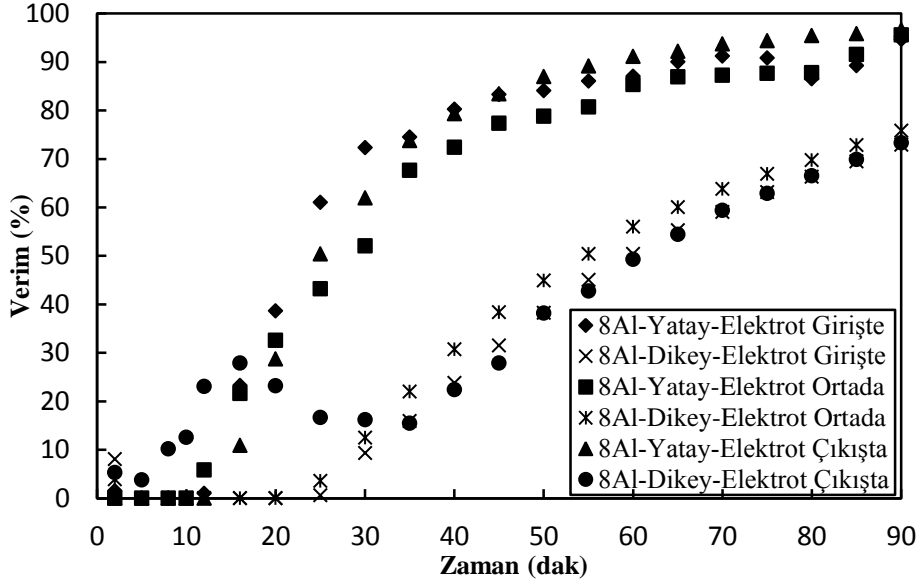
Elektrot alanının arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla yatay ve dikey ünite de yapılan kesikli akışlı deneyler karşılaştırılmış ve Şekil 5.20'de sunulmuştur. Yatay ünite de 6 ve 8 elektrot kullanılması durumunda 90 dakika sonunda arıtım verimi neredeyse aynıdır. Ancak genel olarak her iki ünite de elektrot alanının artması bulanıklık giderim verimini arttırmaktadır. Özellikle dikey ünite de elektrot alanının artmasıyla arıtım veriminin yüksek

oranda arttığı görülmektedir. Bu sebeple çalışılan en yüksek elektrot alanı olan 8 elektrot en iyi giderimi sağlayan optimum elektrot sayısı olarak seçilmiştir. Yapılan tüm uygulamalar 8 adet alüminyum elektrot kullanılarak yapılmıştır.



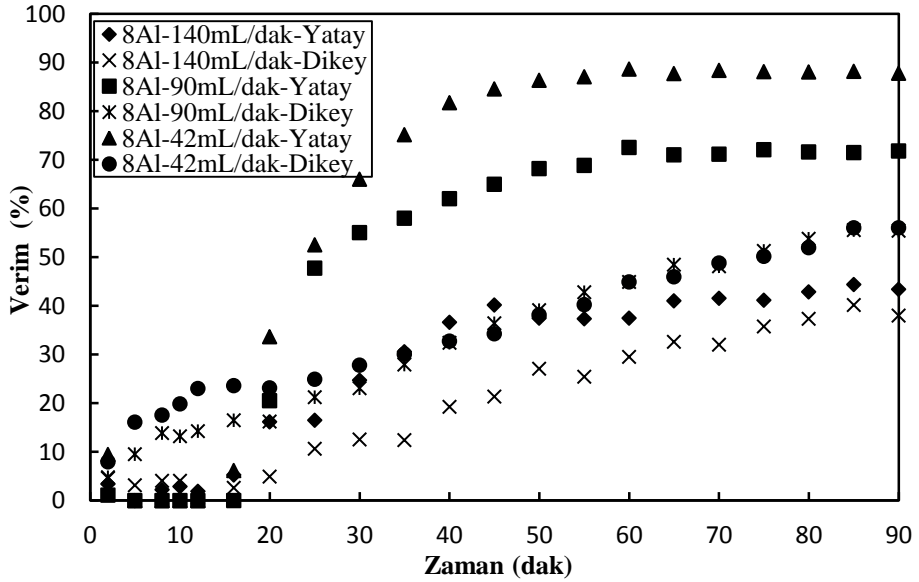
Şekil 5.20 Yatay ve dikey ünitelerde, elektrot alanının bulanıklık giderim verimine etkisi.

Elektrotların ünitelerde bulunan konumunun arıtım verimine etkisi belirlenmiş ve yatay ve dikey ünitelerde elde edilen bulanıklık giderim verimleri Şekil 5.21’de karşılaştırılmıştır. Buna göre, elektrotların ünitelerdeki konumunun değiştirilmesinin bulanıklık gideriminde önemli derecede bir değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. En iyi arıtım verimini sağlayan optimum elektrot konumu olarak elektrotların ünitenin ortasında bulunduğu durum seçilmiş ve tüm deneylerde elektrotlar ünitelerin orta kısmına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.21 Yatay ve dikey ünitelerde, elektrot konumunun bulanıklık giderim verimine etkisi.

Debi değişiminin bulanıklık giderim verimine etkisini belirlemek amacıyla yapılan sürekli akışlı deneyler yatay ve dikey ünitelerde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.22’de sunulmuştur. Debinin artması her iki ünite de bulanıklık gideriminde azalmaya neden olmuştur. Ancak bu azalma yatay ünite de dikey üniteye göre daha belirgindir. Elde edilen sonuçlara göre uygulamalarda optimum çalışma debisi 90 mL/dak olarak seçilmiştir.



Şekil 5.22 Yatay ve dikey ünitelerde, debinin bulanıklık giderim verimine etkisi.

5.2.5.1 Optimum Arıtım Koşullarında Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Giderimi Analizi

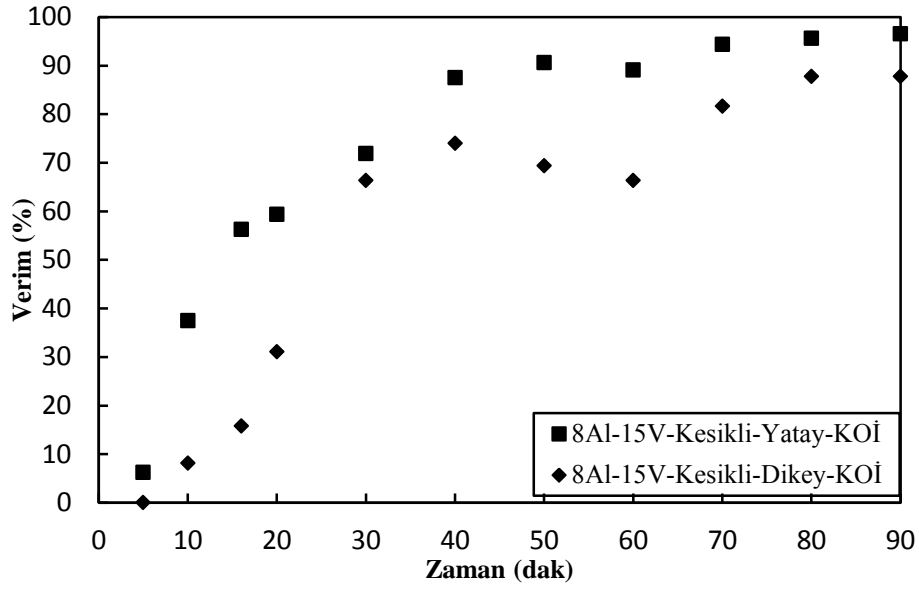
Uygulamalarda optimum arıtım koşulları belirlenmiş ve yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilere göre en iyi arıtım verimini sağlayan deneyler tekrar edilerek atıksuyun kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi incelenmiştir. Bu amaçla hem yatay hem de dikey ünite de 15 V voltaj farkında ve 90 mL/dak'lık atıksu debisinde yapılan deneylerde 8 adet alüminyum elektrot kullanılmış ve elektrotlar ünitelerin orta kısmına yerleştirilmiştir. Uygulamalar hem kesikli hem de sürekli akışlı çalışma modlarında gerçekleştirilmiştir. % 2 oranında bor yağı içeren atıksuların başlangıç KOİ değerlerinin 50000-60000 mg KOİ/L aralığında değişim gösterdiği gözlenmiştir.

a) Kesikli Akışlı Elektrokinetik Deneyler

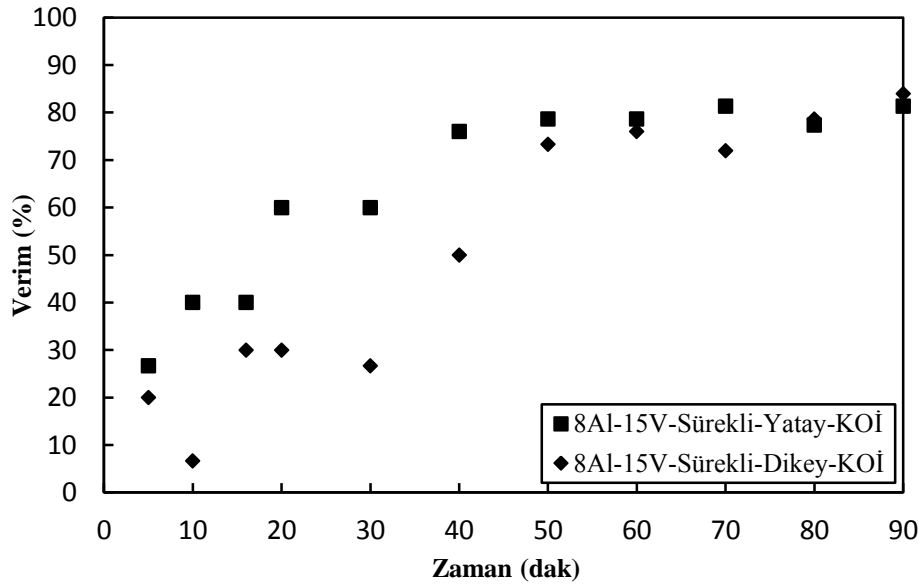
KOİ giderim veriminin belirlenmesi için yatay ve dikey ünitelerde kesikli akışlı çalışma modunda yapılan deneylerin sonuçları Şekil 5.23'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre yapılan arıtım yüksek oranda KOİ giderimi sağlamaktadır. 90 dakikalık deney süresi sonunda, optimum deney koşullarında ve kesikli akışlı çalışma modunda yatay ünite de elde edilen KOİ giderim verimi %97 olarak bulunurken, dikey ünite de bu değer %88 olarak hesaplanmıştır. Her iki ünite de oldukça yüksek KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Bununla birlikte uygulamalar sonrasında yatay ve dikey ünitelerde ölçülen son KOİ değerleri sırasıyla 1760 ve 6272 mg/L'dir.

b) Sürekli Akışlı Elektrokinetik Deneyler

KOİ giderim veriminin belirlenmesi için yatay ve dikey ünitelerde sürekli akışlı çalışma modunda deneyler yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Şekil 5.24'de görülmektedir. Buna göre, sürekli akışta yapılan arıtım kesikli akışta yapılan arıtıma göre daha düşük oranda KOİ giderimi sağlamaktadır. Kesikli akışlı çalışma modundan farklı olarak sürekli akışta her iki ünitenin KOİ giderim verimi neredeyse aynıdır ancak deney sonunda dikey ünite çok az da olsa daha iyi giderim verimi sağlamıştır. 90 dakikalık deney süresi sonunda, optimum deney koşullarında ve sürekli akışlı çalışma modunda her iki ünite de elde edilen KOİ giderim veriminin %80 civarında olduğu bulunmuştur. Uygulamalar sonrasında yatay ve dikey ünitelerde ölçülen son KOİ değerleri sırasıyla 10976 ve 9408 mg/L'dir.



Şekil 5.23 Yatay ve dikey ünitelerde kesikli akış modunda elde edilen KOİ giderim verimleri.



Şekil 5.24 Yatay ve dikey ünitelerde sürekli akış modunda elde edilen KOİ giderim verimleri.

Kesikli ve sürekli akışlı çalışma modlarından elde edilen KOİ değerleri “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği”nde Tablo 15’te (Tablo 15.2 Metal Sanayii: Genelde Metal Hazırlama ve İşleme) bulunan “Metal Sanayi Atıksularının Alıcı Ortama Deşarj Standartları”nda belirtilen değerlerden daha yüksektir. Bu nedenle arıtımda daha yüksek voltaj farkı veya daha büyük elektrot alanı kullanılarak atıksu deşarj standartları sağlanabilir.

5.2.5.2 Optimum Arıtım Koşullarının Maliyet Analizi

Elektrokinetik arıtım deneylerinde tüketilen enerji miktarı ölçülen akım değerleri kullanılarak hesaplanmıştır:

$$E = \int_0^t V I dt \quad (5.4)$$

Burada V elektrotlara uygulanan voltaj farkını (Volt), I ise deney süresince elektrotlardan geçen akım değerini (A) ifade etmektedir. Elektrotlara sabit voltaj farkı uygulandığında:

$$E = V \int_0^t I dt \quad (5.5)$$

elde edilir. Denklem 5.5'te yer alan integral hesaplamalarında sayısal yöntemlerden trapez kuralı uygulanmıştır.

Spesifik enerji (E_s) ise enerji tüketimini arıtılan toplam su hacmine göre ifade etmektedir:

$$E_s = \frac{V \int_0^t I dt}{\eta v} \quad (5.6)$$

Burada v atıksu hacmi (m^3), η ise bulanıklık giderimidir. Ayrıca spesifik enerji tüketimi atıksudan giderilen 1 kg KOİ değerine göre de hesaplanabilmektedir:

$$E_{s,KOI} = \frac{V \int_0^t I dt}{\eta (KOI_t - KOI_0) v} \quad (5.7)$$

Burada KOI_0 atıksuyun başlangıç KOİ değerini, KOI_t ise "t" anında atıksuyun KOİ değerini ifade etmektedir (Genc and Bakirci 2015).

Bir elektrokimyasal arıtımda işletim maliyeti hesabında kullanılan elektrik enerjisi sarfiyatının yanı sıra kullanılan elektrot malzemelerinin miktarı ve diğer kimyasalların fiyatlarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu durumda bir elektrokimyasal arıtımın işletme maliyeti (Kobya et al. 2008b):

$$\dot{M} = aC_{enerji} + bC_{elektrot} + cC_{kimyasal} \quad (5.8)$$

olarak ifade edilebilir. Burada C_{enerji} arıtımda kullanılan elektrik enerjisini, C_{elektrot} kullanılan elektrot ağırlığını, C_{kimyasal} da kullanılan kimyasal miktarını tanımlamaktadır.

Yapılan elektrokinetik arıtım deneylerinin maliyet analizlerinde C_{enerji} değerleri Denklem (5.6) veya Denklem (5.7) kullanılarak hesaplanmıştır. C_{elektrot} değeri için ise ortalama elektrot tüketim değeri olan 0,6 g kullanılmıştır ve alüminyum levhanın fiyatı 2 \$/kg olarak alınmıştır. Deneylerde herhangi bir kimyasal kullanılmadığı için C_{kimyasal} değeri sıfırdır. Elde edilen enerji tüketimi ve işletme maliyeti değerleri Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Kesikli ve sürekli çalışma modlarında yatay ünite elde edilen bulanıklık ve KOİ giderim verimleri dikey ünite elde edilen değerlerden daha yüksektir. Ancak, bulanıklık giderim verimini kesikli akışlı çalışma modunda, yatay ünite kullanarak %25 oranında arttırmak için spesifik enerji tüketimini de %18 oranında arttırmak gerekmektedir. KOİ gideriminde ise kesikli akışlı çalışma modunda dikey ünite %88 ve yatay ünite %97 oranında verim elde edilmiştir. Ancak %97 oranında giderim veriminin sağlandığı durumda spesifik enerji tüketimi de %47 oranında artış göstermiştir. TEDAŞ’dan elde edilen bilgilere göre elektrik kullanım ücreti 0,148 \$/kWh’dır. Buna göre, yatay ünite kesikli akışlı çalışma modunda bulanıklık ve KOİ giderimi için tüketilen enerji maliyeti sırasıyla 1,74 \$/m³ ve 0,033 \$/kg_{KOİ} olarak hesaplanmıştır. Dikey ünite ise kesikli akışlı çalışma modunda, bulanıklık giderim maliyeti 1,48 \$/m³ ve KOİ giderim maliyeti ise 0,022 \$/kg_{KOİ}’dir.

Sürekli akışlı çalışma modunda ise yatay ünite elde edilen bulanıklık giderim verimi %72 iken, dikey ünite elde edilen verim %55’tir. Bununla birlikte, yatay ünite kullanılması ile tüketilen enerji miktarı %13 oranında artış göstermektedir. Yatay ve dikey ünitelerde, bulanıklık giderimi için, sürekli akışlı çalışma modunda hesaplanan enerji maliyetleri sırasıyla 2,17 \$/m³ ve 1,92 \$/m³’tür. Her iki ünite elde edilen KOİ giderim verimleri Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere birbirine çok yakın değerlerdedir. Ancak, aynı KOİ giderimini sağlmasına rağmen yatay ünite kullanımı, %40 daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır.

Çizelge 5.1 Optimum uygulama koşullarında yapılan deneylerin enerji tüketim değerleri.

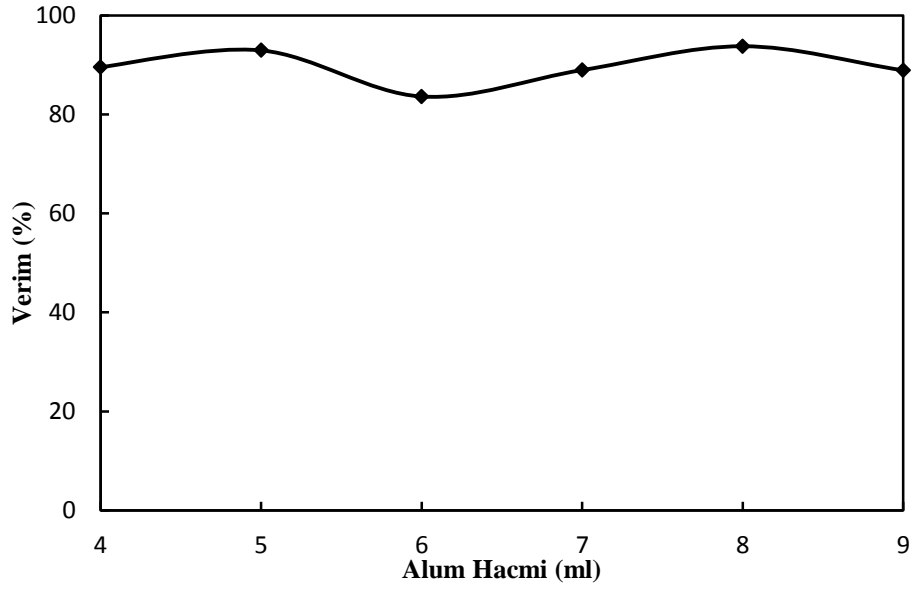
		<i>Birimler</i>	<i>Kesikli Akış</i>	<i>Sürekli Akış</i>
<i>Yatay Elektrokinetik Ünite</i>	Bulanıklık giderimi	%	95	72
	KOİ giderimi	%	97	81
	E	(kW-sa)	0,067	0,085
	E _s	(kW-sa/m ³)	11,77	14,64
	E _{s,KOI}	(kW-sa/kg _{KOI})	0,22	0,21
	İM	(\$/m ³)	2,94	2,34
<i>Dikey Elektrokinetik Ünite</i>	Bulanıklık Giderimi	%	76	55
	KOİ Giderimi	%	88	83
	E	(kW-sa)	0,045	0,058
	E _s	(kW-sa/m ³)	9,97	12,95
	E _{s,KOI}	(kW-sa/kg _{KOI})	0,15	0,15
	İM	(\$/m ³)	2,68	2,09

5.3 KOAGÜLASYON-FLOKÜLASYON İLE ARITIM

Su ile karıştırılarak hacmen %2 oranında bor yağı içeren atıksu numunelerinin koagülasyon/flokülasyon yöntemi ile arıtımı yapılmıştır. Kullanılan bor yağı sarı renktedir, su ile karıştırıldığında süt beyazı bir renk almaktadır. Koagülasyon/flokülasyon sonrasında süt beyazı renk sadece erlenin üst kısmında gözlenmiştir. Bu çalışmada alüminyum sülfat (alum) ve demir (III) klorür kimyasalları koagülant olarak kullanılmıştır. Jar testi deneyleri yapılarak en iyi bulanıklık giderimini sağlayan optimum koagülant dozajı, optimum pH ve optimum karıştırma süresi belirlenmiştir.

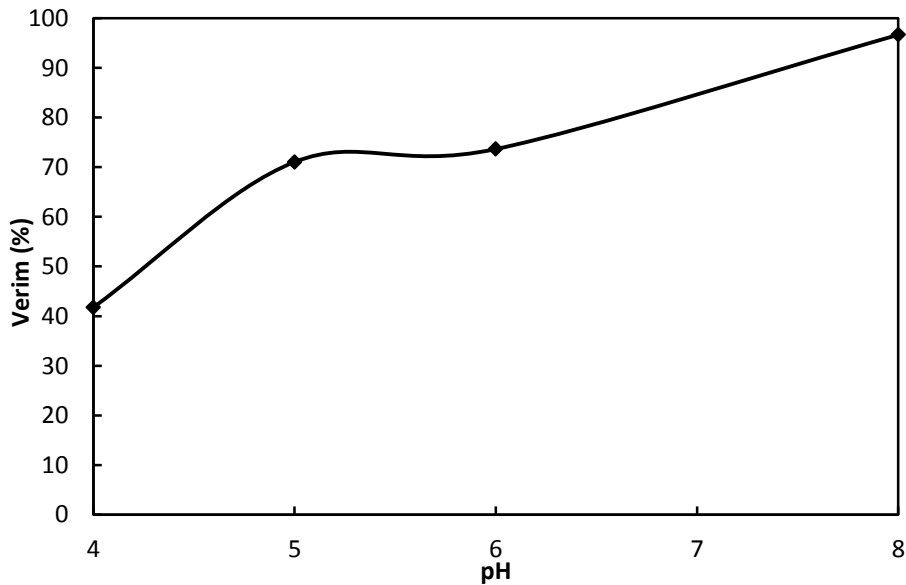
5.3.1 Alum Çözeltisi ile Koagülasyon-Flokülasyon

%2 oranında bor yağı içeren, 300 mL hacmindeki atıksuya 50 g/L alum çözeltisinden farklı dozajlarda eklemeler yapılmıştır. Daha sonra erlenler çalkalayıcıya yerleştirilerek alum eklemeleri yapılan atıksu numuneleri 1 dakika hızlı, daha sonra yavaş olmak üzere toplam 45 dakika boyunca karıştırılmıştır. Şekil 5.25’de atıksu numunelerine eklenen alum hacmine karşılık koagülasyon/flokülasyon sonucunda elde edilen bulanıklık giderim verimleri görülmektedir. 50 g/L alum çözeltisinden 5 mL dozajlamada bulanıklık gideriminin (%93) maksimum olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak 300 mL bor yağı içeren atıksu için optimum alum dozajı 250 mg olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.25 Optimum alum dozajı.

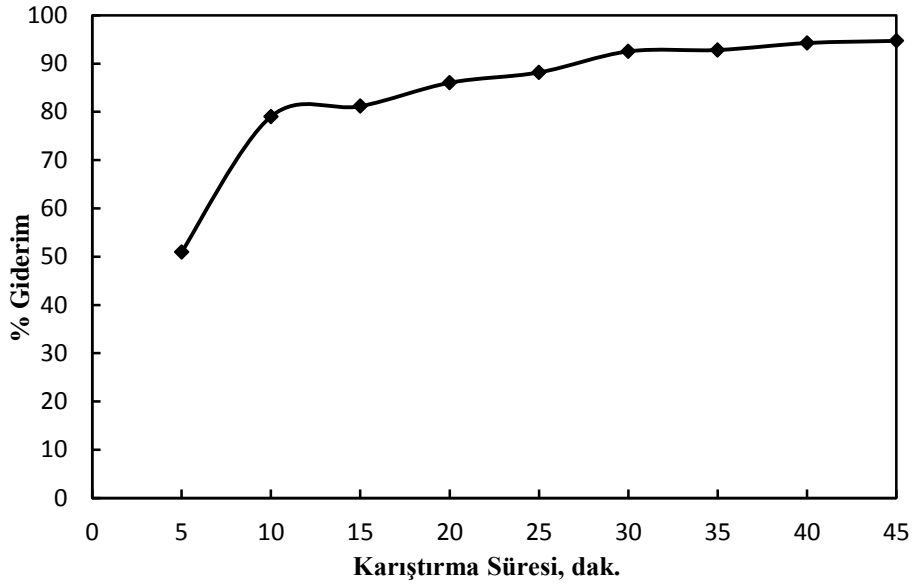
Optimum alum dozajı elde edildikten sonra optimum pH belirleme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin başlangıcında bor yağlı atıksuların pH değerleri asetik asit çözeltisi kullanılarak ayarlanmıştır. Bu çalışmada pH 4 – 8 aralığında çalışılmıştır. pH ayarlamasından sonra her bir atıksu numunesine 50 g/L alum çözeltisinden 5 mL eklenmiş ve numuneler 1 dakika hızlı, daha sonra yavaş olmak üzere toplam 45 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen pH-bulanıklık giderim verimleri Şekil 5.26’da sunulmuştur.



Şekil 5.26 pH’ın bulanıklık giderim verimine etkisi.

Bulanıklık gideriminin pH 8’de en yüksek olduğu görülmektedir. Bu pH değeri asetik asit eklemesi yapılmadan, bor yağı içeren atıksuların pH değeridir.

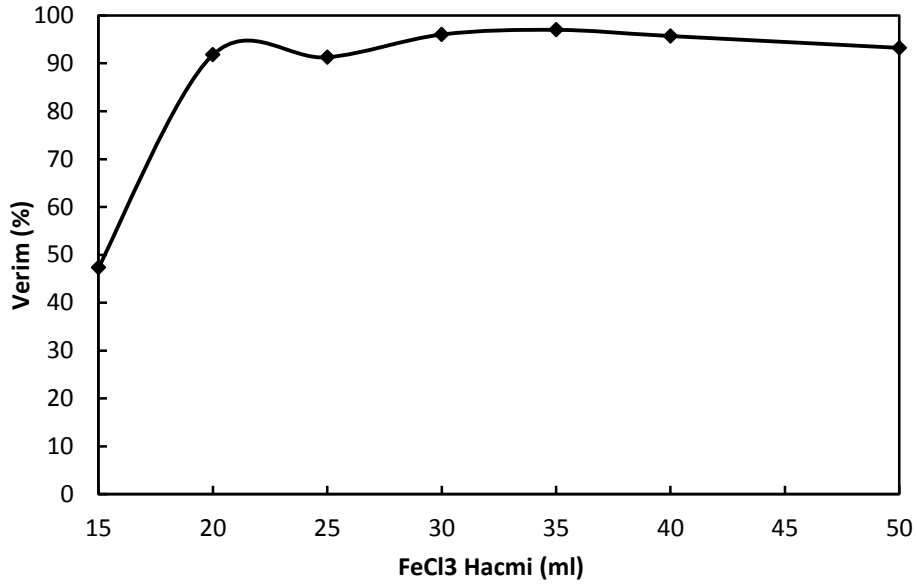
Şekil 5.27’de yavaş karıştırma süresinin bor yağlı atıksularda bulanıklık giderimine etkisi gözlenmektedir. Bulanıklık giderim verimlerindeki artış, karıştırma süresi 20 dakikaya kadar artırıldığında oldukça hızlı bir artış göstermektedir. Karıştırma süresi 20 dakikadan 35 dakikaya uzatıldığında bulanıklık giderim verimleri artmaya devam etmektedir ancak artışların miktarı azalmaktadır. %2 oranında bor yağ içeren atıksuların koagülasyon/flokülasyon ile arıtımında %94 bulanıklık giderim verimi elde etmek için yavaş karıştırma süresinin 40 - 45 dakika aralığında olması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 5.27 Karıştırma süresinin bulanıklığa etkisi.

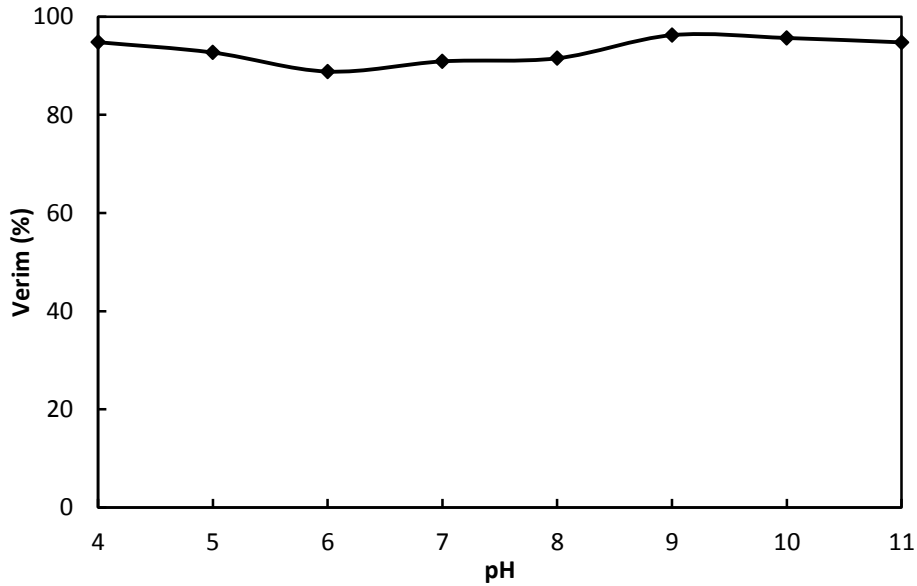
5.3.2 Demir (III) Klorür Çözeltisi ile Koagülasyon-Flokülasyon

Alum çözeltisi ile yapılan tüm optimizasyonlar demir (III) klorür ($FeCl_3$) çözeltisi ile de yapılmıştır. Bor yağlı atıksuların $FeCl_3$ ile koagülasyon/flokülasyon ile arıtımında, erlenin alt kısmı berrak turuncu rengindedir ve üst kısımda beyaz bir köpük oluşmaktadır. $FeCl_3$ eklemeleri 100 g/L $FeCl_3$ çözeltisi kullanılarak yapılmıştır. Farklı miktarlarda eklenen $FeCl_3$ hacmine karşılık elde edilen bulanıklık giderim verimleri Şekil 5.28’de görülmektedir. $FeCl_3$ eklemesinin 15 mL’den 20 mL’ye çıkarılması ile bulanıklık giderim veriminin %48’den %90’a çıktığı gözlenmiştir. 35 mL $FeCl_3$ eklendiğinde ise giderim verimi %97 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre 300 mL bor yağlı atıksuların koagülasyon/flokülasyon ile arıtımında %97 bulanıklık giderim verimi sağlamak için optimum $FeCl_3$ dozajı 3500 mg olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.28 Optimum FeCl₃ dozajı.

Şekil 5.29’da bor yağı atıksuların optimum dozajda FeCl₃ eklemeleri sonrası pH değiştirilerek elde edilen bulanıklık giderim verimleri gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre bor yağı içeren atıksuyun FeCl₃ ile koagülasyonunda, başlangıç pH’ının bulanıklık giderim veriminde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.29 pH’ın bulanıklık giderim verimine etkisi.

5.3.3 Koagülasyon-Flokülasyon Prosesinin Maliyet Analizi

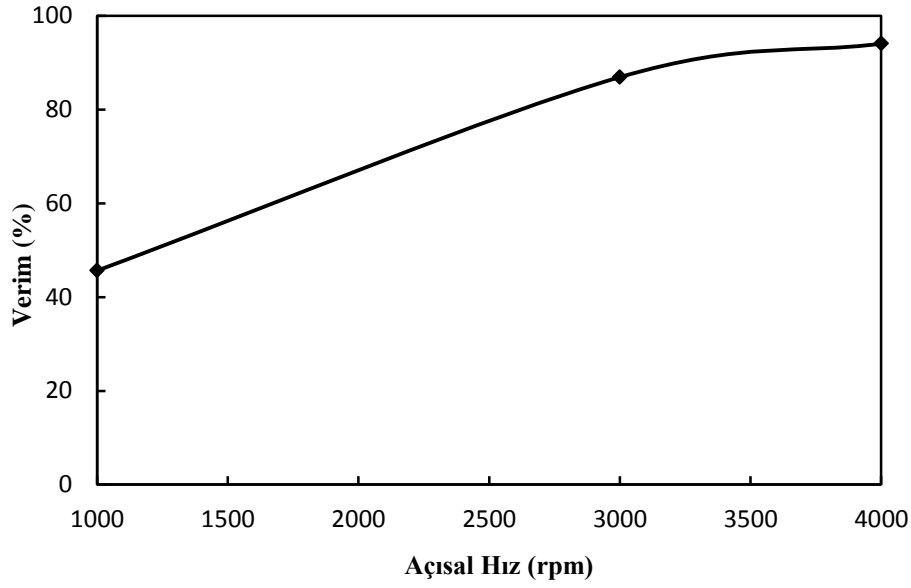
Koagülasyon-flokülasyon prosesinin işletme maliyetini kullanılan koagülant maliyeti oluşturmaktadır. Hesaplamalarda, 300 mL yağlı atıksuyun arıtımı için gerekli alum ve FeCl₃ için bulunan optimum dozajlar kullanılmıştır. 1 kg alumun fiyatı 2,19 \$ ve 1 kg FeCl₃'ün fiyatı ise 6,73 \$'dır. Buna göre, arıtımda koagülant olarak alum ve FeCl₃ kullanıldığında sistemin işletme maliyeti sırasıyla 1,8 \$/m³ ve 78,5 \$/m³ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre arıtımda FeCl₃ kullanımı oldukça pahalı bir yöntemdir. Bu nedenle, koagülasyon/flokülasyon ile yağlı atıksuların arıtımında koagülant olarak alum kullanılmasının daha ekonomik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.4 FİLTRASYON İLE ARITIM

Bor yağı ile hazırlanan (hacimce %2) atıksuların filtrasyon ile arıtımı, vakum filtrasyon ünitesinde selüloz nitrat (8.0 µm) membran kullanılarak test edilmiştir. Filtrasyondan sonra süzüntünün beyaz renkli olduğu ve üst kısmında da köpük oluştuğu gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre bor yağlı atıksuların arıtımında filtre ortamı gözenekliliğinin 8.0 µm'den küçük olması gerektiği ve ultrafiltrasyon membran kullanımının yağ giderim veriminde olumlu sonuçlar verebileceği önerilmektedir.

5.5 SANTRİFÜJ İLE ARITIM

Hacimce %2 bor yağı içeren emülsiyonların santrifüj ile arıtımı önce koagülant eklemesi yapılmadan test edilmiştir. Ancak bor yağının yoğunluğunun suya çok yakın olması nedeniyle arıtım verimlerinin çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle santrifüj uygulamalarında emülsiyonlara önce koagülasyon deneylerinde elde edilen optimum alum (50 g/L alum çözeltisinden 5 mL) eklemesi yapılmıştır. Ayrıca, koagülasyon deneylerinde başlangıç pH'ının giderim verimine önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlendiği için, santrifüj ile arıtım deneylerinde, hazırlanan emülsiyonlara arıtım öncesi herhangi bir pH ayarlaması yapılmamıştır.



Şekil 5.30 Açısal hız değişiminin bulanıklık giderimine etkisi.

Santrifüj deneyleri 50 mL hacmindeki tüpler kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve aynı şartlar altında üç numune hazırlanmıştır. Bulanıklık giderim verimleri üç numunenin ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması olarak sunulmuştur. Toplam santrifüj süresi 15 dakika olarak belirlenmiştir ve 1000, 3000 ve 4000 rpm'deki dönüş hızlarında çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bulanıklık giderim verimi açısal hızın artmasıyla artmaktadır (Şekil 5.30). 4000 rpm dönüş hızında %94 oranında bulanıklık giderim verimi elde edilmiştir. Ancak bu giderim verimi optimum alum miktarı eklemesi ve en yüksek dönüş hızında elde edildiğinden, arıtım maliyetinin oldukça yüksek olacağı tahmin edilmektedir.

5.6 ELEKTROKİMYASAL ARITIM VE DİĞER ARITIM DENEYLERİNDE ELDE EDİLEN GİDERİM VERİMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bor yağı ile hazırlanan atıksu numunelerinin elektrokimyasal arıtım yöntemi ve geleneksel arıtım prosesleri (koagülasyon/flokülasyon, filtrasyon ve santrifüj) ile arıtım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen arıtım verimi ve maliyet analizi sonuçlarına göre, yağlı atıksu arıtımında elektrokimyasal arıtım ile geleneksel arıtımın performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bor yağlı atıksuların mikrofiltrasyon membranları ile arıtımı sağlanamadığından filtrasyon işlemi için maliyet analizleri yapılmamıştır. Ayrıca atıksuların santrifüj ile arıtımında alum eklemesi yapılması gerektiğinden bu prosesin işletim maliyeti koagülasyondan daha yüksek olacaktır. Bu nedenle bu bölümde, elektrokimyasal arıtım ile koagülasyon/flokülasyon prosesinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Koagülasyon/flokülasyon ile arıtım deneylerinden elde edilen koagülant kullanımı sonuçlarına göre yapılan maliyet hesaplamalarında işletme maliyeti 1,8 \$/m³ olarak bulunmuştur. Elektrokimyasal arıtımda ise elektrik enerjisi ve elektrot tüketiminin toplamı olarak hesaplanan işletme maliyeti değeri, en yüksek giderimi sağlayan yatay ünite ve kesikli akışlı çalışma modunda 2,94 \$/m³'tür. Diğer deneylerden elde edilen sonuçlar da yatay ünite elde edilen işletme maliyeti ile benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlar, elektrokimyasal arıtımın kimyasal koagülasyon/flokülasyon prosesine göre daha yüksek işletme maliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, elektrokimyasal arıtımda belirleyici parametre elektrik enerjisi ücretidir. Elektrik enerjisindeki fiyat değişimleri doğrudan arıtım fiyatını etkileyebilecektir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Metal kesme sıvısı içeren sentetik atıksuların hazırlanmasında kesme sıvısı olarak Petrol Ofisi bor yağı kullanılmıştır. Elde edilen yağlı atıksuların arıtımında elektrokimyasal arıtım yöntemi uygulanarak, voltaj farkı, elektrot alanı, elektrot yerleşimi, debi ve çalışma modu parametrelerinin arıtım verimine etkileri incelenmiştir.

Elektrokimyasal arıtım deneyleri yatay ve dikey olmak üzere iki farklı elektrokinetik ünite gerçekleştirilmiştir. Voltaj farkı ve elektrot alanının arıtım verimine etkisinin belirlendiği deneyler kesikli akışlı çalışma modunda gerçekleştirilirken, debinin arıtım verimine etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneyler sürekli akışlı çalışma modunda yapılmıştır. Elektrotların ünitelerdeki konumunun arıtım verimine etkisinin incelendiği uygulamalar her iki çalışma modunda gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Elektrotlara uygulanan potansiyel farkı arttıkça yağ giderim verimi artmaktadır. Elektrotlarda 5V, 10V ve 15 V voltaj farkı uygulandığında yatay elektrokinetik ünite bulanıklık giderim verimleri %49, %80 ve %95'dir. Dikey ünite elde edilen verimler ise sırasıyla %13, %66 ve %75'tir.
- Elektrot alanı arttıkça arıtım verimi artmaktadır. Aynı yüzey alanına sahip alüminyum levhalardan 4, 6 ve 8 adet elektrot kullanıldığında yatay üniteye giderim verimleri %70, %90 ve %95'dir. Dikey ünite de ise bu değerler %13, %54 ve %75 olarak bulunmuştur.
- Elektrotların yatay veya dikey üniteler içerisinde farklı konumlarda yerleşiminin, arıtım verimi üzerine etkisinin çok az olduğu gözlenmiştir.
- Atıksuyun debisindeki artış yağ giderim verimlerinin düşmesine neden olmuştur. Atıksu debileri 42, 90 ve 140 mL/dak olduğunda yatay ünite elde edilen giderim verimleri sırasıyla %88, %71 ve %43 olarak hesaplanmıştır. Dikey ünite ise 42 ve 90 mL/dak

atıksu debilerinde %55 giderim verimi elde edilirken, 140 mL/dak'da %40 oranında bulanıklık giderimi sağlanmıştır.

- En iyi giderim verimini sağlayan optimum arıtım koşullarında deneyler tekrarlanarak atıksuyun KOİ giderim verimleri incelenmiştir. Kesikli akışlı çalışma modunda yatay ve dikey ünite de elde edilen KOİ giderim verimleri sırasıyla %97 ve %88'dir. Sürekli akışlı çalışma modunda ise her iki ünite de %80 oranında KOİ giderimi sağlanmıştır.
- Optimum arıtım koşullarında yapılan deneylerin maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, kesikli akışlı çalışma modunda yatay ve dikey ünitelerde bulanıklık giderimi için hesaplanan enerji maliyeti sırasıyla 1,74 \$/m³ ve 1,48 \$/m³'tür. Sürekli akışlı çalışma modunda ise, yatay ve dikey ünitelerde bulanıklık giderimi için tüketilen enerji maliyeti 2,17 \$/m³ ve 1,92 \$/m³ olarak hesaplanmıştır.
- Atıksu numunelerinin arıtımında koagülasyon-flokülasyon prosesi kullanılmıştır. Deneylerde koagülant olarak alum ve FeCl₃ kullanıldığında elde edilen bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %93 ve %97'dir. Koagülasyon-flokülasyon prosesinin optimum arıtım koşullarında maliyet analizi de yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu, alum ve FeCl₃ koagülantlarının kullanıldığı deneyler sonucunda hesaplanan işletme maliyetleri sırasıyla 1,8 \$/m³ ve 78,5 \$/m³'tür.
- Santrifüj yöntemi, bor yağı ile hazırlanan atıksu numunelerinin arıtımında uygulanan bir diğer prosestir. Bu yöntemde koagülant olmadan yapılan deneylerin arıtım verimleri çok düşük olduğu için numunelere alum eklemesi yapılmıştır. Dönüş hızı arttıkça bulanıklık giderimi de artmıştır. 1000, 3000 ve 4000 rpm dönüş hızlarında elde edilen giderim verimleri sırasıyla %46, %87 ve %94'tür.

KAYNAKLAR

- Aitbara A, Cherifi M, Hazourli S and Leclerc J P** (2016) Continuous treatment of industrial dairy effluent by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Desalination and Water Treatment*, 57: 3395-3404.
- Akbaş H** (2014) Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Renk Gideriminin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 73 s.
- Ardhan N, Ruttithiwapanich T, Songkasiri W and Phalakornkule C** (2015) Comparison of performance of continuous-flow and batch electrocoagulators: A case study for eliminating reactive blue 21 using iron electrodes. *Separation and Purification Technology*, 146: 75-84.
- Aşkın Ş** (2011) Bitkisel Tabanlı Metal Kesme Sıvılarının Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Giderimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Gebze, 71 s.
- Bakırcı B** (2014) Kesme Sıvılarının Karakterizasyonu ve Elektrokoagülasyon ile Atıksulardan Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 111 s.
- Bensadok K, Belkacem M and Nezzal G** (2007) Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. *Desalination*, 206: 440-448.
- Bensadok K, Benammar S, Lopicque F and Nezzal G** (2008) Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 152: 423-430.
- Bhatnagar R, Joshi H, Mall I D and Srivastava V C** (2014) Electrochemical oxidation of textile industry wastewater by graphite electrodes. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 49: 955-966.
- Bilgili M S, Ince M, Tani G T, Adar E, Balahorli V and Yildiz S** (2016) Batch and continuous treatability of oily wastewaters from port waste reception facilities: A pilot scale study. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 760: 119-126.
- Cambiella A, Benito J A, Pazos C and Coca J** (2007) Interfacial properties of oil-in-water emulsions designed to be used as metalworking fluids. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 305: 112-119.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Cambiella A, Benito J M, Pazos C and Coca J** (2006) Centrifugal separation efficiency in the treatment of waste emulsified oils. *Chemical Engineering Research & Design*, 84: 69-76.
- Camcı S** (2008) Metal Kaplama Atıksuyunun Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Arıtılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 170 s.
- Canizares P, Martinez F, Jimenez C, Saez C and Rodrigo M A** (2008) Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions. *Journal of Hazardous Materials*, 151: 44-51.
- Cerqueira A A, Souza P S A and Marques M R C** (2014) Effects of Direct and Alternating Current on the Treatment of Oily Water in an Electroflocculation Process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31: 693-701.
- Chachou L, Gueraini Y, Bouhalouane Y, Poncin S, Li H Z and Bensadok K** (2015) Application of the electro-Fenton process for cutting fluid mineralization. *Environmental Technology*, 36: 1924-1932.
- Chen G H** (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38: 11-41.
- Cheng C, Phipps D and Alkhaddar R M** (2005) Treatment of spent metalworking fluids. *Water Research*, 39: 4051-4063.
- Chopra A and Sharma A K** (2015) Effect of electrochemical treatment on the COD removal from biologically treated municipal wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 53: 41-47.
- Chou W L, Wang C T and Chang S Y** (2009) Study of COD and turbidity removal from real oxide-CMP wastewater by iron electrocoagulation and the evaluation of specific energy consumption. *Journal of Hazardous Materials*, 168: 1200-1207.
- Coskun T, Ilhan F, Demir N M, Debik E and Kurt U** (2012) Optimization of energy costs in the pretreatment of olive mill wastewaters by electrocoagulation. *Environmental Technology*, 33: 801-807.
- Çiftçi Ç** (2007) Metal Kesme Atıksularının Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 83 s.
- Dedeli A** (2008) Fosfatlama Banyosu Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 120 s.
- Deluhery J and Rajagopalan N** (2005) A turbidimetric method for the rapid evaluation of MWF emulsion stability. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 256: 145-149.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ding Y W, Sun W, Cao L M and Yang J** (2016) A spontaneous catalytic membrane reactor to dechlorinate 2,4,6-TCP as an organic pollutant in wastewater and to reclaim electricity simultaneously. *Chemical Engineering Journal*, 285: 573-580.
- Dolapçı F** (2010) Bitkisel Kesme Sıvılarının Bileşim-Özellik Bağlılıklarının Modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 146 s.
- Eryılmaz C ve Genç A** (2015) Seyreltik Emülsiyeye Yağlı Atıksuların Arıtım Yöntemleri. TMMOB ÇMO 11. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Bursa, 336-347.
- Fouad Y O** (2013) Electrocoagulation of Crude Oil From Oil-In-Water Emulsions Using a Rectangular Cell with a Horizontal Aluminium Wire Gauze Anode. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 34: 214-221.
- Fouad Y O A, Konsowa A H, Farag H A and Sedahmed G H** (2009) Performance of an electrocoagulation cell with horizontally oriented electrodes in oil separation compared to a cell with vertical electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 145: 436-440.
- Genç A and Bakirci B** (2015) Treatment of emulsified oils by electrocoagulation: pulsed voltage applications. *Water Science and Technology*, 71: 1196-1202.
- Gengeç E** (2012) Melanoidin ve Melanoidin İçeren Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı. *Doktora Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 148 s.
- Greeley M and Rajagopalan N** (2004) Impact of environmental contaminants on machining properties of metalworking fluids. *Tribology International*, 37: 327-332.
- Hami M L, Al-Hashimi M A and Al-Doori M M** (2007) Effect of activated carbon on BOD and COD removal in a dissolved air flotation unit treating refinery wastewater. *Desalination*, 216: 116-122.
- Hao M M, Bai Z S, Wang H L and Liu W J** (2013) Removal of oil from electric desalting wastewater using centrifugal contactors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 111: 37-41.
- Hesampour M, Krzyzaniak A and Nystrom M** (2008) Treatment of waste water from metal working by ultrafiltration, considering the effects of operating conditions. *Desalination*, 222: 212-221.
- Ibrahim D S, Devi P S, Veerababhu C and Balasubramanian N** (2014) Treatment of Petroleum Effluent Using a Tubular Electrochemical Reactor. *Petroleum Science and Technology*, 32: 1932-1939.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Jimenez C, Talavera B, Saez C, Canizares P and Rodrigo M A** (2010) Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85: 1368-1373.
- Karahan M** (2010) Ham Soya Yağından Metal Kesme Sıvı Eldesi ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Gebze, 94 s.
- Knecht V, Levine Z A and Vernier P T** (2010) Electrophoresis of neutral oil in water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 352: 223-231.
- Kobyay M, Bayramoglu M, Can O T, Sözbir M ve Akyol A** (2008a) Endüstriyel Atıksuların Arıtılması İçin Elektrokimyasal Reaktör Geliştirilmesi Institute, Kocaeli, 169 s.
- Kobyay M, Ciftci C, Bayramoglu M and Sensoy M T** (2008b) Study on the treatment of waste metal cutting fluids using electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 60: 285-291.
- Korbahti B K and Artut K** (2010) Electrochemical oil/water demulsification and purification of bilge water using Pt/Ir electrodes. *Desalination*, 258: 219-228.
- Köksal Z** (2015) Antep Fıstığı İşleme Atıksularının Sürekli Sistemde Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri ile Arıtımının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 108 s.
- Lai C L and Lin S H** (2004) Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere*, 54: 235-242.
- Li X B, Liu J T, Wang Y T, Xu H X, Cao Y J and Deng X W** (2015) Separation of Oil from Wastewater by Coal Adsorption-Column Flotation. *Separation Science and Technology*, 50: 583-591.
- Long J J, Zu Y G, Fu Y J, Luo M, Mu P S, Zhao C J, Li C Y, Wang W and Li J** (2012) Oil removal from oily water systems using immobilized flaxseed gum gel beads. *Rsc Advances*, 2: 5172-5177.
- Maleki A, Daraei H, Shahmoradi B, Razee S and Ghobadi N** (2014) Electrocoagulation efficiency and energy consumption probing by artificial intelligent approaches. *Desalination and Water Treatment*, 52: 2400-2411.
- Martinez-Delgadillo S A, Morales-Mora M A and Barcelo I D** (2010) Electrocoagulation Treatment to Remove Pollutants from Petroleum Refinery Wastewater. *Sustainable Environmental Research*, 20: 227-231.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- McClements D J** (2007) Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47: 611-649.
- Metcalf&Eddy** (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition, ISBN: 007-124140, McGraw-Hill, New York, 1819 p.
- Moises T P, Patricia B H, Barrera-Diaz C E, Gabriela R M and Natividad-Rangel R** (2010) Treatment of industrial effluents by a continuous system: Electrocoagulation - Activated sludge. *Bioresource Technology*, 101: 7761-7766.
- Mollah M Y A, Schennach R, Parga J R and Cocke D L** (2001) Electrocoagulation (EC) - science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84: 29-41.
- Mostefa N M and Tir M** (2004) Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions. *Desalination*, 161: 115-121.
- Muric A, Petrinic I and Christensen M L** (2014) Comparison of ceramic and polymeric ultrafiltration membranes for treating wastewater from metalworking industry. *Chemical Engineering Journal*, 255: 403-410.
- Muszynski A, Zaleska-Radziwill M, Lebkowska M and Nowak D** (2007) Biological and electrochemical treatment of used metalworking fluids: A toxicity-reduction evaluation. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 52: 483-488.
- Rattanapan C, Sawain A, Suksaroj T and Suksaroj C** (2011) Enhanced efficiency of dissolved air flotation for biodiesel wastewater treatment by acidification and coagulation processes. *Desalination*, 280: 370-377.
- Romero J A P, Cardoso F S S, Figueiredo R T, Silva D P and Cavalcanti E B** (2013) Treatment of Biodiesel Wastewater by Combined Electroflotation and Electrooxidation Processes. *Separation Science and Technology*, 48: 2073-2079.
- Safari S, Aghdam M A and Kariminia H R** (2016) Electrocoagulation for COD and diesel removal from oily wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13: 231-242.
- Sangal V K, Mishra I M and Kushwaha J P** (2013) Electrocoagulation of Soluble Oil Wastewater: Parametric and Kinetic Study. *Separation Science and Technology*, 48: 1062-1072.
- Shen F, Chen X M, Gao P and Chen G H** (2003) Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater. *Chemical Engineering Science*, 58: 987-993.
- Shin S H and Kim D S** (2001) Studies on the interfacial characterization of O/W emulsion for the optimization of its treatment. *Environmental Science & Technology*, 35: 3040-3047.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Silva V F, Batista L N, De Robertis E, Castro C S C, Cunha V S and Costa M A S** (2016) Thermal and rheological behavior of ecofriendly metal cutting fluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123: 973-980.
- Sokovic M and Mijanovic K** (2001) Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 109: 181-189.
- Şanlı N** (2006) Deri Sanayi Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon ile Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 98 s.
- Şensoy M T** (2008) Sürekli Akış Kontrollü Bir Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Atıksularının Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 76 s.
- Şık E** (2009) Bitkisel Tabanlı Yağlardan Metal Kesme Sıvısı Eldesi ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Gebze, 104 s.
- Taştaban M** (2013) Alüminyum Elektrodla Elektrokoagülasyon Prosesi ile Asidik pH Aralığında Florür Giderimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 79 s.
- Teli A, Vyrides I and Stuckey D C** (2015) Treatment of metalworking fluids using a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR). *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90: 507-513.
- Thirugnanasambandham K, Kandasamy S, Sivakumar V, Kumar R K and Mohanavelu R** (2015) Modeling of by-product recovery and performance evaluation of Electro-Fenton treatment technique to treat poultry wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 46: 89-97.
- Ulucan K and Kurt U** (2015) Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 747: 104-111.
- Yang C L** (2007) Electrochemical coagulation for oily water demulsification. *Separation and Purification Technology*, 54: 388-395.
- Yiğit S** (2008) Nikel-Siyanür Metal Kaplama İşlemi Durulama Banyo Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 151 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Zhao S, Huang G H, Fu H Y and Wang Y F (2014) Enhanced Coagulation/Flocculation by Combining Diatomite with Synthetic Polymers for Oily Wastewater Treatment. *Separation Science and Technology*, 49: 999-1007.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Sakarya’da doğan Candan ERYILMAZ, ilköğrenimini Kartal Öğretmen Salih Nafiz Tüzün İlköğretim Okulu’nda, ortaöğrenimini Kartal Medine Tayfur Sökmen Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi’nde tamamladı. 2007 yılında Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü’nde üniversite eğitimine başladı. Üniversite 3. Sınıf bahar dönemini Erasmus programı ile gittiği Prag’da, Institute of Chemical Technology’de okudu. 2012 yılında üniversite eğitimini tamamladı. 2013 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansına Araştırma Görevlisi olarak başladı. Halen aynı bölümde çalışmalarına ve eğitime devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ:

Adres: İncivez Mah. Aydoğmuş Sok. Alagözler Mevsim Evleri, A/12
Merkez/ZONGULDAK

Tel: (+90) 372 291 11 00 / 1858

E-posta: candankose@outlook.com