

**REAKTİF TEKSTİL BOYA ÇÖZELTİLERİNİN
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ
İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

Ruhi MALKOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**2008
SİVAS**

**REAKTİF TEKSTİL BOYA ÇÖZELTİLERİNİN
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ
İLE ARITIMININ İNCELENMESİ**

**Ruhi MALKOÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bünyamin KARAGÖZOĞLU

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan “Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım Kılavuzu” adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
SUMMARY	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ	3
2.1. Tekstil Endüstrisinde Üretim Proses ve İşlemleri	3
2.1.1. Pamuklu Tekstil Endüstrisi	3
2.1.2. Yünlü Tekstil Endüstrisi	3
2.1.3. Sentetik Tekstil Endüstrisi	4
2.2. Boyarmaddeler ve Boyama Atıksularının Özellikleri	4
2.2.1. Boyarmaddeler	4
2.2.1.1. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması	4
2.2.1.1.1. Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırma	4
2.2.1.1.2. Boyama Özelliklerine Göre Boyar Maddeler	5
2.2.1.1.3. Kimyasal Yapısına Göre Boyar Maddeler	8
2.2.1.1.3.1. Reaktif Tekstil Boyaları ve Özellikleri	8
2.2.2. Boyama Atıksularının Özellikleri	12
2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu	13
2.3.1. Atıksu Karakterizasyonunda Temel Kirletici Parametreler	13
2.3.2. Pamuklu Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu	15
2.3.3. Yünlü Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu	15
2.3.4. Sentetik Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu	15
2.3.5. Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarj Standartları	15
2.4. Tekstil Atıksularının Arıtım Prosesleri	16
2.4.1. Tekstil Atıksularının Kimyasal Oksidasyonu	17
2.4.2. Tekstil Atıksularının Biyolojik Oksidasyonu	19
2.4.3. Tekstil Atıksularının Kimyasal İndirgeme ile Arıtımı	19
2.4.4. Tekstil Atıksularının Membran Proseslerle Arıtımı	20

2.4.5. Tekstil Atıksularının Ters Osmoz ve Elektrodializ ile Arıtımı.....	20
2.4.6. Tekstil Atıksularının Adsorpsiyon ile Arıtımı.....	21
2.4.7. Tekstil Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı.....	21
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM PSÖZESLERİ	23
3.1. Elektrokimyasal Proseste Yeralan Bazı Kavramlar.....	23
3.1.1. Faraday kanunu ve eşitlikler.....	25
3.2. Elektrokoagülasyon Prosesinin Teorisi.....	26
3.3. Elektrokoagülasyon Prosesinde Kullanılan Elektrot Bağlantı Tipleri.....	31
3.4. Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları.....	33
3.5. Elektrokimyasal Atıksu Arıtım Prosesleri.....	34
3.6. Elektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulama Alanları.....	35
4. MATERYAL ve METOD.....	38
4.1. Materyal.....	38
4.2. EC Deneyi Düzenegi ve EC Deneyleri.....	39
4.3. Deneysel İşlem	40
4.4. Analitik Metotlar.....	41
4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi.....	41
4.4.2. KOI Ölçümü.....	43
4.4.3. Türbidite Ölçümü.....	44
4.4.2. pH ve İletkenlik Ölçümleri.....	44
4.5. Hesaplamalar ve Kullanılan Eşitlikler.....	44
5. DENEYSEL BULGULAR.....	46
5.1. Remazol Brilliant Orange 3R spec gran Boya Çözeltilisinin Alüminyum ve Demir Elektrot ile Elektrokoagülasyonu	46
5.1.1. Elektrokoagülasyon Üzerine pH 'ın Etkisi.....	46
5.1.2. Elektrokoagülasyon Üzerine Akım Yoğunluğu'nun Etkisi.....	50
5.1.3. Elektrokoagülasyon Üzerine İletkenliğin Etkisi	53
5.1.4. Elektrokoagülasyon Üzerine Zamanın Etkisi.....	54
5.1.5. Elektrokoagülasyon Üzerine Boya Konsantrasyonunun Etkisi.....	58
5.1.6. Elektrokoagülasyon Prosesinde Enerji Tüketimi ve Maliyet.....	61
5.1.7 Elektrokoagülasyon Prosesinde Çamur Oluşumu.....	61
5.2. Remazol Ultra Red RGB Boya Çözeltilisinin Alüminyum ve Demir Elektrot ile Elektrokoagülasyonu.....	62
5.2.1. Elektrokoagülasyon Üzerine pH 'ın Etkisi.....	62
5.2.2. Elektrokoagülasyon Üzerine Akım Yoğunluğu'nun Etkisi.....	64
5.2.3. Elektrokoagülasyon üzerine iletkenliğin etkisi	67
5.2.4. Elektrokoagülasyon Üzerine Zamanın Etkisi.....	69

5.2.5. Elektrokoagülasyon Üzerine Boya Konsantrasyonunun Etkisi.....	71
5.2.6. Elektrokoagülasyon Prosesinde Enerji Tüketimi ve Maliyet.....	74
5.2.7. Elektrokoagülasyon Prosesinde Çamur Oluşumu.....	74
6. TARTIŞMA ve SONUÇ	75
7. KAYNAKLAR.....	79
8. ÖZGEÇMİŞ.....	82
9. EKLER.....	83

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**REAKTİF TEKSTİL BOYA ÇÖZELTİLERİNİN ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE
ARITIMININ İNCELENMESİ**
Ruhi MALKOÇ

Cumhuriyet Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Müh. Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bünyamin KARAGÖZOĞLU

Bu çalışmada elektrokoagülasyon ile reaktif tekstil boyası çözeltilerinden (Remazol Brilliant Orange 3R Spec Gran (reactive orange 16), Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)) renk giderimi, KOİ ve türbidite giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum ve demir elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Renk, KOİ ve türbidite giderimi üzerine pH, akım yoğunluğu, iletkenlik, zaman ve konsantrasyon parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi, elektrot tüketimi ve oluşan çamur miktarları hesaplanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında Remazol Brilliant Orange 3R Spec Gran boya çözeltisi kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda, alüminyum elektrotlar ile elektrokoagülasyonda %79,55 renk, %60,20 KOİ, %91,97 türbidite giderim verimi elde edilmiştir. Alüminyum için optimum deney şartları ise, pH:6, akım yoğunluğu 100A/m², iletkenlik 500 µS/cm ve 20 dakika deney süresi ve olarak bulunmuştur. Demir elektrotları ile elektrokoagülasyonda ise %99,07 renk, %42,26 KOİ ve %91,89 türbidite giderim verimi elde edilmiştir. Demir için optimum deney şartları ise, pH:8, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 1000 µS/cm ve 20 dakika deney süresi ve olarak bulunmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise Remazol Ultra Red RGB boya çözeltisi kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda, alüminyum elektrotlar ile elektrokoagülasyonda %95,49 renk, %89,34 KOİ ve %92,18 türbidite giderim verimi elde edilmiştir. Alüminyum için optimum deney şartları ise, pH:3, akım yoğunluğu 50 A/m², iletkenlik 250 µS/cm ve 20 dakika deney süresi ve olarak bulunmuştur. Demir elektrotları ile elektrokoagülasyonda ise %99,94 renk, %66,83 KOİ ve %83,15 türbidite giderim verimi elde edilmiştir. Demir için optimum deney şartları ise, pH:5, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 500 µS/cm ve 20 dakika deney süresi ve olarak bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler : Tekstil Atıksuyu, Elektrokoagülasyon, Renk giderimi, Reaktif boyalar

SUMMARY

MSc Thesis

INVESTIGATION OF TREATMENT OF THE REACTIVE TEXTILE DYES WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION

Ruhi MALKOÇ

Cumhuriyet University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Ass. Prof. Dr. Bünyamin KARAGÖZOĞLU

The purpose of this study is to research the removal of dye, colour and turbidity from reactive textile solutions (Remazol Brilliant Orange 3R Spec Gran (reactive orange 16), Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)). This for aim, an electrochemical reactor which has monopolar parallel connected aluminium and iron electrodes was designed. The effect on the decolourition removal of COD and turbidity of parameters such as, pH, current density, conductivity, time and concentration were investigated. Furthermore consumption of energy and electrodes were studied.

The frist step of this study were used to reactive textile dyestuff Remazol Brilliant Orange 3R Spec Gran. At the end of this study aluminium electrodes via electrocoagulation was obtained to removal of %79,55 dye , %60,20 COD, %91,97 turbidity. Optimum conditions on the removal effecies of above mentioned parameters were determined as current density; 100 A/m², conductivity; 500 µS/cm, time 60 minutes and pH:6. Iron electrodes via electrocoagulation was determined the removal of %99,07 dye, %42,26 COD and %91,89 turbidity. Optimum conditions for iron electrodes were determined as current density; 75 A/m², conductivity; 1000 µS/cm, time 20 minutes and pH:8.

In the second part of the study reactive textile dyestuff Remazol Ultra Red RGB were used. At the end of this study aluminium electrodes via electrocoagulation was obtained to removal of %95,49 dye COD: %89,34, Turbidity: %92,18. Optimum conditions on the removal effecies of above mentioned parameters were determined as current density; 50 A/m², conductivity; 250 µS/cm, time 20 minutes and pH:3. Iron electrodes via electrocoagulation was determined the removal of %99,94 dye, %66,83 COD and %83.15 turbidity. Optimum conditions for iron electrodes were determined as current density; 75 A/m², conductivity; 500 µS/cm, time 20 minutes and pH:5.

Keywords: Textile wastewater, Electrocoagulation, Dye treatment, Reactive dyes

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında yardım ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Bünyamin KARAGÖZOĞLU'na ve Gebze yüksek teknolojiler enstitüsü çevre mühendisliği bölümü hocalarından sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KOBYA'ya yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvar çalışmalarında büyük yardımlarını gördüğüm Arş. Gör. Fuat ÖZYONAR'a, büyük maddi ve manevi desteklerini gördüğüm aileme ve tezin tüm aşamalarında emeği geçen herkese teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü	23
Şekil 3.2.	Elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen reaksiyon basamakları	24
Şekil 3.3.	Sulu ortamda alüminyum kompleksleri ve pH ilişkisi	27
Şekil 3.4.	Elektrokoagülasyon’da oluşacak polimerik Al türleri	28
Şekil 3.5.	Sulu ortamda demir kompleksleri ve pH ilişkisi	29
Şekil 3.6.	Paralel bağlı monopolar EC reaktörü	31
Şekil 3.7.	Seri bağlı monopolar EC reaktörü	32
Şekil 3.8.	Paralel bağlı bipolar EC reaktörü	32
Şekil 4.1.	Kullanılan reaktif tekstil renksinin kimyasal yapısı	38
Şekil 4.2.	Kullanılan reaktif tekstil renksinin kimyasal yapısı	38
Şekil 4.3.	Elektrokoagülasyon deney düzeneğinin şematik görünüşü	40
Şekil 4.4.	Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğinin görünüşü	40
Şekil 4.5.	Remazol Brilliant Orange 3R spec gran renksinin 200-700 nm arası absorbansı	42
Şekil 4.6.	Remazol Ultra Red RGB renksinin 200-700 nm arası absorbansı	42
Şekil 4.7.	Remazol Brilliant Orange 3R spec gran renksi için absorbans-konsantrasyon arsındaki kalibrasyon eğrisi ($\lambda=492$)	43
Şekil 4.8.	Remazol Ultra Red RGB renksi için absorbans-konsantrasyon arsındaki kalibrasyon eğrisi ($\lambda=516$)	43
Şekil 4.9.	Absorbans-KOI kalibrasyon eğrisi	44
Şekil 5.1.	Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH’nın renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	49
Şekil 5.2.	Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	52
Şekil 5.3.	Elektrokoagülasyon prosesinde iletkenliğin renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	54
Şekil 5.4.	Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	57
Şekil 5.5.	Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç boya konsantrasyonunun, renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	60
Şekil 5.6.	Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH’nın renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi	63

Şekil 5.7.	Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.	66
Şekil 5.8.	Elektrokoagülasyon prosesinde iletkenliğin renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.	68
Şekil 5.9.	Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.	71
Şekil 5.10.	Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç renk konsantrasyonunun, renk, KOI ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOI giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Reaktif Gruplarına Göre Dünyadaki Bazı Reaktif Boyarmadde Üreticileri	9
Çizelge 2.2.	Reaktif Boyalardaki Bazı Gruplar ve Özellikleri I.	10
Çizelge 2.3.	Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Remazol Reaktif Tekstil Boyaları.	11
Çizelge 2.4.	Remazol Reaktif Tekstil Boyalarının Özellikleri.	12
Çizelge 2.5.	Atıksu Karakterizasyonunda Kullanılan Temel Kirletici Parametreler	14
Çizelge 2.6.	Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları.	16
Çizelge 2.7.	Bazı Oksidasyon Proseslerinin Arıtım Avantaj ve Dezavantajları	17
Çizelge 3.1.	Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları	24
Çizelge 3.2.	Al^{3+} sulu ortamda oluşan hidroksil kompleks türleri	27
Çizelge 3.3.	Fe^{3+} ve Fe^{2+} sulu ortamda oluşan hidroksil kompleks türleri	29
Çizelge 4.1.	Kullanılan reaktif tekstil boyalarının özellikleri	39

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

		Birim
A	Aktif anot yüzey alanı	[m ²]
AC	Alternatif akım	[Amper]
AKM	Askıda katı madde	[mg/l]
TAKM	Toplam askıda katı madde	[mg/l]
BOİ₅	Biyolojik oksijen ihtiyacı	[mg/l]
CE	Faraday değerindeki kayıp veya akım verimi	[-]
CI	Colour index	[-]
C_{oB}	Boyanın deneye başlangıç konsantrasyonu	[mg/l]
C_B	Boyanın deneyden sonraki konsantrasyonu	[mg/l]
dk.	Dakika	[dk]
DC	Direkt akım	[Amper]
DO	Çözünmüş oksijen	[mg/l]
DOC	Organik karbon	[mg/g]
E	Akım verimi	[-]
E	Elektrik enerjisi	[Wh]
EC	Elektrokoagülasyon prosesi	[-]
EF	Elektroflotasyon prosesi	[-]
EO	Elektrooksidasyon prosesi	[-]
F	Faraday sabiti ve 96485 C/mol	[C/mol]
I	Akım şiddeti	[A, mA]
I_j	Bir elektrottaki toplam akım	[A, mA]
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi	[-]
J	Akım yoğunluğu	[mA/cm ²]
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı	[mg/l]
KOİ₀	Başlangıç KOİ değeri	[mg/l]
m	Teorik olarak çözünen metalin (mol olarak) miktarı	[mol]
m_{act}	Pratikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı	[mol]
M_A	Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı	[g]
M_{Ate}	Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı	[g]
M_K	Pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı	[g]
M_T	Toplam çözünen alüminyum miktarı	[g]
MA	Molekül ağırlığı	[g]
n	Çözünen metalin iyon yükü	[-]
pH	Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonu	[-]
pH_b	Atıksuyun başlangıç pH değeri	[-]

pH_s	Atıksuyun deney sonu pH değeri	[-]
q	Akımın miktarı (yük)	C
q_p	Oluşan ürünün harcadığı yük	C
q_T	Toplam harcanan yük değeri	C
R_{KOI}	KOI giderme verimi	[-]
R_{Boya}	Boya giderme verimi	[-]
R_{TURB}	Türbidite giderme verimi	[-]
SKKY	Su kalitesi kontrol yönetmeliği	[-]
SS	Süspanse katılar	[mg/l]
T	Sıcaklık	[°C, °K]
t	Zaman	[sn, dak., h]
TURB	Türbidite	NTU
TURB₀	Başlangıç türbidite değeri	NTU
V	Volt	[Volt]
v	Elektrolit hacmi	[ml, m ³]
λ	Dalga boyu	nm

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

Her geçen gün nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte yeni endüstri dalları ortaya çıkmış, mevcut endüstri dalları ise artan nüfus ile kapasitelerini arttırmıştır. Bu durum mevcut doğal kaynakların ve bunların en önemlisi olan suyun kullanımı arttırmaktadır. Kullanılan bu sular kirlenmiş olarak tekrar doğal su ortamlarına verilmektedir. Endüstrilerden kaynaklanan atıksular, evsel atıksulara göre kaynak, miktar ve karakter açısından büyük farklılıklar gösterirler. Endüstriyel atıksuların doğaya yaptığı etkiler çok daha önemli düzeyde, doğal dengeyi değiştirici ve bazı durumlarda geri dönülemez nitelikte olmaktadır. Çevrenin kirlenmesine neden olan etkenlerin kontrol altına alınması ve endüstri tesislerinin kullanılmış sularının doğal su ortamlarının kirlenmesini engelleyecek şekilde arıtılması gerekmektedir.

Türkiye’de endüstriyel kirlenme konusunda 1974 yılına kadar bir yasal düzenleme bulunmamaktadır. 1974 yılında 1380 sayılı su ürünleri kanunu çerçevesinde endüstriyel için deşarj standartları geliştirilmiştir. 1983 tarihli çevre kanununda endüstriyel kirlenme kontrolü, genel kirlenme kontrolü çerçevesinde belirli esaslara bağlamıştır. Bunların dışında belediyelerce ön artıma standartları yürürlüğe konulmuştur.

Türkiye’de en gelişmiş endüstri dalı tekstildir. Tekstil endüstrisi Türkiye’de toplam endüstriyel üretimin %20 sini oluşturmaktadır (Tünay,1996). Tekstil endüstrilerin yüksek su tüketimi dolayısıyla atıksu üretimi fazladır. Bu atıksuların kirlilik kaynağı liflerde mevcut olan safsızlıklar, kullanılan kimyasal maddeler, boyamada kullanılan boyar maddelerdir. Boyar madde atıksuya renk vermektedir. Renkli tekstil atıksuları alıcı su ortamlarında birikerek hem suyun estetik görünümü bozar hem de ışık geçirgenliğini azaltır. Işık geçirgenliğinin azalması çözünmüş oksijen miktarını ve dolayısıyla canlıların yok olmasına sebep olmakla beraber suyun yeniden kullanım imkanlarını da kısıtlamıştır. Aynı zamanda bazı boyar maddelerin toksik maddeler içerdiği de bilinmektedir.

Ülkemizde şu an kullanılan tekstil atıksuyu arıtma yöntemlerinden ve standartlarında renk parametresi olmadığı için, renk giderimine yönelik çalışmalar sıklıkla yapılmaktadır. Tekstil atıksuları genellikle fiziksel ve biyolojik yöntemlerle istenilen standartların altına indirilebilmektedir.

Literatürde tekstil atıksularından renk giderimi ve arıtılması sırasında birçok yöntem geliştirilmiştir. Daha önce denenmiş olan biyolojik oksidasyon, kimyasal çöktürme, ozonla oksidasyon, adsorbsiyon, kimyasal oksidasyon, membran prosesler gibi bir çok proses uygulanmıştır. Yüksek renk giderimi elde edilmesi sebebiyle tekstil atıksularının arıtımı sırasında elektro kimyasal yöntemlerin daha fazla kullanıldığını görmekteyiz. Tekstil atıksularının alıcı ortamlar üzerine etkileri dikkate alınarak ve yakın zamanda renk içinde standart oluşturulacağı düşünüldükçe, bulanıklık giderimi yanında renk gideriminde de elektrokoagülasyon yönteminin ne kadar etkili olabileceği önem kazanmaktadır.

Son yıllarda elektrokimyasal prosesler ile atıksuların arıtımı üzerine yoğun bir ilgi bulunmaktadır. Elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri arasında gerçek anlamda uygulamaya geçen elektrokoagülasyondur. Elektrokoagülasyon atıksuların arıtımı için basit ve etkili bir yöntemdir.

1.2. Çalışmanın amaç ve kapsamı

Bu çalışmada, reaktif tekstil boya çözeltilerinin (Remazol Brilliant Orange 3R spec gran (reactive orange 16), Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)) elektrokoagülasyon (EC) ile arıtılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, boya çözeltilerinden renk giderimi, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve türbidite giderimi üzerine; alüminyum ve demir elektrot kullanılan EC prosesi ile pH, akım yoğunluğu, iletkenlik, zaman ve boya konsantrasyonu parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Ayrıca, EC prosesinde, enerji, elektrot tüketim ve maliyet değerleri ile oluşan çamur miktarları hesaplanmıştır.

2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ

2.1. Tekstil Endüstrisinde Üretim Proses ve İşlemleri

Tekstil endüstrisi kategorisi, tabii ve fabrikasyon elyafları kullanarak kumaş ve diğer tekstil ürünleri üreten tesisleri kapsar. Fabrikasyon elyafların üretimi ve giyim sanayi bu kategori dışındadır. Tekstil endüstrisi tabii ve fabrikasyon ipliklerin hazırlanması, dokuma, örme veya başka yöntemlerle kumaş, triko, halı gibi tekstil ürünleri haline getirilmesi, iplik ve kumaşlara boya, baskı, apre gibi terbiye işlemlerinin uygulanması işlemlerini içerir.

Tekstil endüstrisi Cumhuriyet dönemine sayısı 10 'dan az pamuk ipliği fabrikası ile girmiş, sonra en hızlı gelişen sektörlerden biri olmuştur. Halen Türkiye sanayisindeki payı %20'nin üzerindedir. Endüstri, İstanbul, Adana ve İzmir illerinde yoğunlaşmakla birlikte hemen tüm yurda dağılmış bulunmaktadır. Tekstil endüstrisinin hammaddesi elyaftır. Doğal elyaflar arasında pamuk, keten, kenevir, yün, ipek, mohair ve kıllar, fabrikasyon elyaflar arasında reyon, kazein, asetat-selüloz ester, naylon, polyester, akrilik ve vinil bulunur. Tekstil endüstrisinde yer alan proses ve işlemler işlenen elyafla bazı farklılıklar göstermekle beraber çoğunlukla benzerdir. Pamuklu yün ve sentetik elyaflar için üretim aşamaları aşağıda özetlenmiştir (Tünay, 1996).

2.1.1. Pamuklu Tekstil Endüstrisi

Pamuk elyafı, iplik yapımı, dokuma hazırlık ve ürünlerinin terbiyesi olarak üç aşamada işlenir. İplik yapımı, açma temizleme, tarama, çekme, eğirme, bobinleme gibi işlemleri kapsar. Bunlar çoğunlukla mekanik kuru işlemlerdir. Dokuma hazırlık işlemleri, bobin ve çile hazırlaması, çözümler, tahar, haşıllama ve dokuma işlemlerini kapsar, bu işlemlerde kuru işlemlerdir. Terbiye işlemlerinde önemli miktarlarda su kullanımı vardır. Başlıca terbiye işlemleri haşıl sökme, yıkama, pişirme, merserizasyon, kasar, boyama ve apre işlemleridir. Haşıl sökme ve dokuma sırasında aşınma ve germeyi önlemek için uygulanan nişastanın asit veya enzimle giderilmesi işlemidir. Pişirme işlemi bir bazla pamuklu ürünün kaynatılması ve temizlenmesi işlemidir. Kasar, klorit, hipoklorit veya hidrojen peroksit kullanılarak temizlenmesi işlemidir. Boyamada reaktif naftol, direkt, kükürtlü, indigo gibi çeşitli boya türleri kullanılır. Kasar ve boya çok su kullanılan işlemlerdir. Apre son ürüne tutum, buruşmazlık, çekmezlik, su geçirmezlik gibi özelliklerin kazandırıldığı son işlemlerdir (Tünay, 1996).

2.1.2. Yünlü Tekstil Endüstrisi

Pamuklu tekstil ile aynı aşamalarda gerçekleştirilen yünlü tekstil işlemlerinde ilk ve en önemli fark yünün (yaprak, yapağı) yıkanmasıdır. Çok kirli yağlı atıksu oluşturan bu işlem ayrı bir alt kategori oluşturur. İlk aşamada yün aşama, taraklama gibi işlemler yapılır ve kamgarn veya strayhgarn iplik olarak sentetik madde katkıları da yapılarak bobinlere sarılır ve dokunur. Terbiye işlemleri arasında karbonizasyon, dinkleme, yıkama, boyama ve apre işlemleri yapılır. Boyamada

başlıca asit, metelize ve mordant boyalar kullanılır, sonra sıcak su veya kimyasal maddeler ile fisaj yapılır. Apre işlemleri keçeleşmezlik işlemi ve pamuklu kumaşlara uygulanan diğer işlemleri kapsar (Tünay, 1996).

2.1.3. Sentetik Tekstil Endüstrisi

Selülozik ve organik polimerlerin elyafları pamuk ve yünlere karıştırılarak veya ayrı olarak iplik hazırlama, haşıl sökme, boyama ve apre işlemlerinden geçer. Boyamada asit, bazik, dispers ve naftol gibi boyalar kullanılır. İpek iplik üretiminde ipek çekimi, liflerin terbiyesi, yıkama, ağartma, boyama işlemleri bulunur. Halı üretimi lateks ile taban kaplaması işlemini içerir. Keçeleştirilmiş ve dokusuz yüzeyli kumaş üretimi de keçeleştirme, yıkama boyama vb. işlemlerini kapsar (Tünay, 1996).

2.2. Boyarmaddeler ve Boyama Atıksularının Özellikleri

2.2.1. Boyarmaddeler

Boyarmaddeler, diğer maddelerle az veya çok renk verebilen, kendiside renkli olan maddelerdir. Boyarmaddenin tekstil boyama prosesinde kullanılabilmesi için gerekli iki özelliği, renkliliği ve elyaf üzerine bağlanabilmesidir. Bütün renkli organik bileşikler rengi oluşturan doymamış kromofor grubu içerirler. Bu grubu taşıyan bileşiklere kromojen adı verilir. Bir kromojenin boyarmadde olabilmesi için molekülde kromofordan başka oksokrom adı verilen amino ($-NH_2$), yer değiştiren amino ($-NHR$, $-NR_2$), hidroksil ($-OH$), metoksil ($-OCH_3$), sülfonik ($-SO_3H$) ve karboksil ($-COOH$) gruplarının da bulunması gerekir. Bu gruplar aynı zamanda molekülün elyafa karşı affiniyete sahip olmasını ve suda çözünmesini de sağlar. Kromofor grupları; nitro ($R.NO_2$), nitrozo (N_2O), azo ($-N=N-$), karbonil ($C=O$), etilenik çifte bağ ($-C=C-$), tiyokarbonil ($-C=S-$) gibi çifte bağlı gruplardan oluşur (Özcan, 1978; Arııcı, 2000).

2.2.1.1. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması

2.2.1.1.1. Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırma

1. Suda Çözünen Boyarmaddeler

Boyarmadde molekülü en az bir tane tuz oluşturabilen grup taşır. Sentez esnasında kullanılan başlangıç maddeleri suda çözündürücü grup içermiyorsa, bu grubu boyarmadde molekülüne sonradan eklemek suretiyle de çözünürlük sağlanabilir. Ancak boyarmadde sentezinde tercih edilen yöntem, başlangıç maddelerinin iyonik grup içermesidir. Suda çözünebilen boyarmaddeler tuz teşkil edebilen grubun karakterine göre 3'e ayrılır.

Suda Çözünen Anyonik Boyarmaddeler

Suda çözünen grup olarak en çok sülfonik ($-SO_3$), kısmen de karboksilik (COO^-) asitlerin sodyum tuzlarını içerirler. ($-SO_3Na$ ve $-COONa$). Renk, anyonun mezomerisinden ileri gelir.

Suda Çözünen Katyonik Boyarmaddeler

Moleküldeki çözünürlüğü sağlayan grup olarak bir bazik grup ($-NH_2$), asitlerle tuz teşkil etmiş halde bulunur. Asit olarak anorganik asitler (HCl) veya $(COOH)_2$ gibi organik asitler kullanılır.

Zwitter İyon Karakterli Boyarmaddeler

Moleküllerinde hem asidik hem de bazik gruplar bulunur ve bir iç tuz oluştururlar. Boyama esnasında bazik veya nötral ortamda anyonik boyarmadde gibi davranırlar.

2. Suda Çözünmeyen Boyarmaddeler

Tekstilde ve diğer alanlarda kullanılan, suda çözünmeyen boyarmaddeler çeşitli gruplara ayrılabilir.

3. Substratta Çözünen Boyarmaddeler

Suda çok ince süspansiyonları halinde dağıtırlar. Özellikle sentetik elyaf üzerinde uygulanan dispersiyon boyarmaddeleri bu sınıfa girer.

Organik Çözücülerde Çözünen Boyarmaddeler

Bu sınıfa giren boyarmaddeler her çeşit organik çözücüde çözünürler. Solvent boyarmaddeleri de denilen bu boyarmaddeler spray veya lak halinde uygulanabilirler. Vaks, petrol ürünleri ve matbaa mürekkebinin renklendirilmesinde kullanılırlar.

Geçici Çözünürlüğü Olan Boyarmaddeler

Çeşitli indirgeme maddeleri ile suda çözünebilir hale getirildikten sonra elyafa uygulanabilirler. Daha sonra elyaf içinde iken yeniden yükseltgenerek suda çözünmez hale getirilirler. Küpe ve kükürt boyarmaddelerinin uygulanması bu prensibe göredir.

Polikondensasyon Boyarmaddeleri

Elyaf üzerine uygulanırken veya uygulandıktan sonra birbiri ile veya başka moleküllerle kondanse olarak büyük moleküller oluşturan boyarmaddelerdir. Bunlardan Inthion boyarmaddeleri elyaf üzerinde sodyum sülfür ile polimer yapıda disülfürleri oluştururlar.

Elyaf İçinde Oluşturulan Boyarmaddeler

Elyaf içinde kimyasal bir reaksiyon ile iki ayrı bileşenden oluşturulan boyarmaddeler bu sınıfa girer. Suda çözünmeyen pigmentlerdir. Azoik boyarmaddeler ve ftalosiyaninler bu sınıfa girer.

Pigmentler

Boyarmaddelerden farklı yapıda, elyafa ve diğer substratlara karşı affinitesi olmayan bileşiklerdir. Pigmentler süspansiyonları halinde kuruyan yağlar ve reçineler içinde uygulanırlar

2.2.1.1.2. Boyama Özelliklerine Göre Boyar Maddeler

Genellikle boyama uygulayıcıları, boyarmaddenin kimyasal yapısına değil, onun hangi yöntemle elyafı boyayabildiğine bakmaktadırlar. Bu nedenle boyama özelliğine göre sınıflandırma yapılmıştır.

Bazik (katyonik) Boyarmaddeler

Bunlar organik bazların hidroklorürleri veya asetat tuzları şeklindedir. Renkli kısım katyon olup, pozitif yük taşıyıcı olarak N ve S atomu içerirler. Bazik (proton alan) olarak etki ettiklerinden sulu çözeltilerde bulunan boyarmadde katyonu elyafın anyonik gruplarıyla elyaf-boyarmadde tuzunu oluştururlar. Bazik boyarmaddelerin en karakteristik özellikleri parlak olmaları ve geniş renk şiddetleridir. Yün, ipek ve pamuk üzerinde ışığa ve yıkamaya karşı mukavemetleri çok düşüktür. Günümüzde, bazik boyarmaddeler pamuk boyamada pek kullanılmazlar, çünkü reaktif boyarmaddelerle pamuk üzerinde çok parlak renkler elde edilebilmektedir. Ancak poliakrilonitril üzerinde ışığa dayanıklılıkları iyi olduğundan “orlon” boyanmasında geniş olarak kullanılır. Genellikle asetik asit ve tannik asit ile ve 80-90 °C ‘de boyama yapılır (Gezergen Asma, 1998).

Asit Boyarmaddeler

Moleküllerinde sülfonil (-SO₄H) veya karbonik asit (-COOH) grubu içerirler. Asit boyarmaddeler genellikle protein elyafın boyanmasında kullanılırlar. Öncelikle yün, ipek, poliamid (nylon) katyonik modifiye akrilik elyafı, deri ve besin maddelerinin boyanmasında kullanılır. Asit boyarmaddeler, 60-80 °C ‘de düşük veya nötr pH değerlerinde kullanılır (Gezergen Asma, 1998).

Direkt Boyarmaddeler

Bunlar genellikle sülfonik asitlerin, bazen de karboksilli asitlerin sodyum tuzlarıdır. Renkli kısmı oluşturan iyon, anyon şeklindedir. Yapı bakımından pek çoğu azo boyarmaddeler grubuna girer ve (boya.SO₃)-Na⁺ genel formülüyle ifade edilir. Direkt boyarmaddelerin selülozik elyafa bağlanmasında, boyarmaddelerin elyaf üzerinde yaklaşmasından sonra elyaf üzerine çekilebilmesi için elyaf yakınlarında konsantrasyonların çok büyük olması gerekir. Bu ancak boyarmadde kümelerinin oluşması ile mümkündür. Boyarmadde molekülleri Van der Waals ve hidrojen bağları sayesinde kümeleşir ve boyarmaddeler elyafı çok küçük olan kanallara difüze edilir. Boyarmadde konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu yerlerden, düşük olduğu yerlere doğru hareket edebilirler. Kaynatma ile hareketlenen boyarmaddeler tuz ilavesiyle çözeltide dağılırlar ve ısıtıcı ile birlikte doğrudan uygulanabilirler (Gezergen Asma, 1998). Direkt boyarmaddeleri ucuz olmaları, boyama işlemlerinin basit oluşu ve boyama sırasında elyafın yıpranmaması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Genellikle selülozik elyafın boyanmasında, bazen de, kağıt, deri, ipek, nylon boyamada kullanılırlar. Boyama sırasında sıcaklık yüksek olduğu gibi, boya banyolarına sodyum klorit veya sülfat eklenir (Gezergen Asma, 1998).

Reaktif Boyarmaddeler

Elyaf üzerine kovalent bağla bağlanan bu boyarmaddeler selülozik elyaf, yün, ipek ve poliamid boyamada yaygın olarak kullanılır. Kimyasal reaksiyon sonucu kovalent bağ oluşturdıklarından, elde edilen boyanın yıkamaya karşı dayanıklılığı yüksek ve renkler çok parlaktır. Boyama soğukta bekletmeyle yapıldığı için enerji tasarrufu sağlanır. Reaktif

boyarmaddelerin molekülleri çok küçük olduğundan elyaf içine difüzyon hızları büyüktür, dolayısıyla boyama kısa sürede tamamlanır. Reaktif boyarmaddeler ile yapılan yün boyama, nötr pH değerinde zayıf asit banyolarında yapılır (Gezergen Asma, 1998).

Sülfür Boyarmaddeler

Sülfür boyarmaddeler amino ve nitro grupları içeren organik bileşiklerin, sülfür veya sodyum sülfid ile yüksek sıcaklıkta reaksiyonu sonucu elde edilir ve genellikle alkali banyolarda pamuk elyafın boyanmasında kullanılır. Ayrıca poliamid ve viskon rayon boyamada kullanılabilirler. Genellikle koyu mavi, siyah, kahve gibi koyu renkleri kullanılır. Sülfür boyalar suda çözünmezler, kimyasal indirgeyici maddelerle alkali çözeltide çözünür hale getirildikten sonra yüksek sıcaklıkta (100 °C 'de) kullanılırlar (Gezergen Asma, 1998).

Küpe Boyarmaddeler

Moleküllerinde en az iki oksijen atomu içeren renkli bileşiklerdir. İri, ince ve çok ince toz halinde bulunabilirler. Donmaya karşı dayanıklı, kurumayan, çökmeyen, dispersiyon haline getirilmiş sıvılarda yaygın olarak kullanılır. Bu boyarmaddeler karbonil grubu içerir ve suda çözünmezler. Bunlar sadece indirgeme ile suda çözünür hale getirilerek boyamada kullanılırlar. Daha sonra oksidasyonla yeniden çözünemez hale getirilirler. İndirgeme aracı olarak Na₂SO₄, NaOH ve NaHSO₃ kullanılır. Oksidasyon için ise hava kullanılır. Daha çok selülozik, kısmen de protein elyafın boyanmasında kullanılır. Işığa, yıkamaya, sürtünmeye karşı dayanıklıdır (Gezergen Asma, 1998).

Mordan Boyarmaddeler

Bunlar asidik veya bazik fonksiyonel gruplar içerirler. Bitkisel ve hayvansal elyaf ile kararsız bileşikler oluştururlar. Bu nedenle, hem elyaf hem de boyarmaddeye karşı aynı ilgiyi gösteren bir madde önce elyafa yerleştirilir, daha sonra elyaf ile boyarmadde suda çözünmeyen bir bileşik vermek üzere reaksiyona sokulur. Mordan olarak genellikle krom, bazen de Al, Sn, Fe, Cr tuzları kullanılır. Değişik şekillerde mordanlama gerçekleştirilebilir. Boyamadan önce mordanlama yapıldığında, krom bileşikleri katıldıktan sonra boyama gerçekleştirilir, daha sonra da krom indirmek için potasyum hidrojen tartarat kullanılır. Boyama ve klorlama işlemi aynı anda aynı banyo içinde yapıldığı zaman ise pH 6 civarına getirilerek, amonyum sülfat ve potasyum kromat eklenir. En çok kullanılan ve hızlı olan, yün boyandıktan sonra krom katılarak yapılan boyamadır (Gezergen Asma, 1998).

Metal-Kompleks Boyarmaddeler

Belirli gruplara sahip bazı azo boyarmaddeleri ile metal iyonlarının kompleks teşkili ile oluşturdukları boyarmaddelerdir. Kompleks oluşumunda azo grubu rol oynar. Metal katyonu olarak Co, Cr ve Ni iyonları kullanılır. 1:1 ve 1:2 'lik metal kompleks boyarmaddeler olmak üzere ikiye ayrılır. Krom kompleksleri daha çok yün, poliamid, bakır kompleksleri ise pamuk ve deri boyamacılığında kullanılır. Işık ve yıkama haslıkları yüksektir.

Pigment Boyarmaddeler

Tekstil elyafı organik ve anorganik pigmentlerle boyanabilir. Çoğunlukla organik olanları tercih edilir. Pigmentlerin elyaf affinitesi yoktur. Kimyasal bağ ve absorpsiyon yapmazlar. Elyaf üzerine bağlayıcı madde denilen sentetik reçineler ile bağlanırlar. Suda çözünmediklerinden sudaki yağ ve yağdaki su emülsiyonları şeklinde ince dağılmış olarak kullanılırlar. Emülsiyon, elyaf veya kumaşa emdirildikten sonra bozulur. Pigment, kumaş yüzeyinde ince dağılmış halde kalır. Sıkılarak kurutulduktan sonra 140-170 °C 'de termofiks edilir. Özellikle açık renklerde yıkama ve ışık haslıkları iyidir. Sürtünme haslığının yüksek olmayışı, koyu renklerin elde edilememesi, bağlatıcı filmin hava etkisiyle parçalanması, bağlayıcının kumaşa sertlik vermesi dezavantajlarıdır.

Dispers Boyarmaddeler

Dispers boyarmaddeler amino ve hidroksil grupları içerirler ve molekül ağırlıkları düşüktür. Suda eser miktarda çözünebilen, bu nedenle sudaki dispersiyonları halinde uygulanabilen boyarmaddelerdir. Boyarmadde, boyama işlemi sırasında dispersiyon ortamından hidrofob elyaf üzerine difüzyon yolu ile çekilir. Boyama boyarmaddenin elyaf içinde çözünmesi ile gerçekleşir. Dispers boyarmaddelerin elyaf içine difüzyonu oldukça yavaştır. Boyama uzun sürede gerçekleştiğinden pratik değillerdir. Dispers boyarmaddeler poliester, poliamid ve akrilik elyafın boyanmasında kullanılır.

2.2.1.1.3. Kimyasal Yapısına Göre Boyar Maddeler

Kimyasal yapılarına göre boyalar aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Azo boyarmaddeleri
- Nitro ve nitrozo boyarmaddeleri
- Polimetin boyarmaddeleri
- Arilmetin boyarmaddeleri

Boyarmaddelerin; nitrozo, nitro, monoazo, disazo, trisazo, poliazo, stilben, difenil metan, triaril metan, ksanten, akridin, kinolin, metin, tiazol, indamin, indofenil, azin, oksazin, tiazin, kükürt, lakton, aminokinon, hidroksiketon, indigoid, antrakınon, ftalosiyanın, kloro ve dikloro-triazinil ve remazol olmak üzere türleri vardır. Sınıflandırma yapılırken molekülün temel yapısı esas alınabildiği gibi molekülün kromojen ve renk verici özellikteki kısımda esas kabul edilmektedir (Uygun, 2003).

2.2.1.1.3.1. Reaktif Tekstil Boyaları ve Özellikleri

Reaktif boyalarının başlangıç tarihi 1950 yılları olmasına karşın, geniş şekilde tüketimi 1970 'lerden sonra başlamıştır. Reaktif boyalar, difüzyon sistemine göre çalışan direkt boyaların aksine, selülozla kovalent bağ oluşturarak yıkama haslığı yüksek boyama sağlar. Işık ve yıkama haslıkları bakımından küp boyar maddelerden daha düşük, direkt boyalardan daha üstündür. Küp boyar maddelerin renk gamı dar ve tonları mat, boyaması zor ve fiyatları yüksek olduğundan,

reaktif boyar maddelerin tüketimi devamlı artmaktadır. Boyar maddenin kromofor gövdesini, selüloza bağlayan aktif gruba reaktif grup denir. Dünyada üretilen çeşitli reaktif boyalar reaktif gruplarına göre sınıflandırılırlar. Belli başlı reaktif gruplar ve temsilcileri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Reaktif Gruplarına Göre Dünyadaki Bazı Reaktif Boyarmadde Üreticileri(Uygun, 2003).

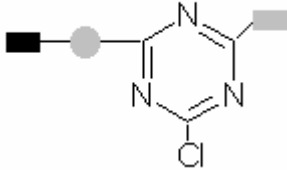
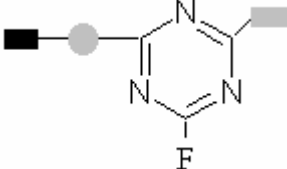
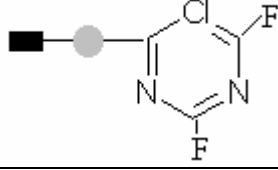
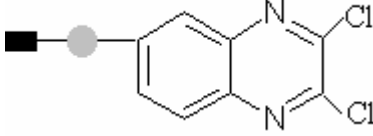
BOYA REAKTİF GRUPLARI	TİCARİ İSMİ	BOYA ÜRETİCİLERİ
DICHLOROTRIAZINE(DCT)	PROCION MX BASILEN M	BASF BASF
MONOCHLOROTRIAZINE(MCT)	CIBACRON CIBACRON E PROCION H,HE,SP BASILEN E,P DRIMAREN P SUMUFIX H	CIBA-GEIGY CIBA-GEIGY BASF BASF CLARIANT SUMITOMO
SULFATOETHYL-SULFONE(VS)	REMAZOL SUMUFIX RIFAZOL KIMSOLINE	DYSTAR SUMITOMO ITOCHU KISC&KISCO
TRICHLOROPYRIMIDINE(TCP)	CIBACRON T- E DRIMAREN X	CIBA-GEIGY CLARIANT
DICHLOROQUINOXALINE(DCQ)	LEVAFIX E	DYSTAR
DIFLUOROCHLOROPYRIMIDINE(DFCP)	LEVAFIX E-A DRIMAREN K	DYSTAR CLARIANT
MONOFLOROTIAZINE(MFT)	CIBACRON F LEVAFIX E-N	CIBA-GEIGY DYSTAR
FLOROCHLOROMETHYL PYRIMIDINE	LEVAFIX PN	DYSTAR
MONOCHLOROTRIAZINE/b-SULFATOETHYL SULFONE (SUPRA)	SUMUFIX SUPRA REMAZOL SN RIFAFIX KIMSOLINE	SUMITOMO DYSTAR ITOCHU KISC&KISCO

Reaktif tekstil boyaları boyama işlemlerinde çok fazla ve yaygın bir şekilde kullanılan boyalardır. Bu boyalar genellikle çözünür grup, kromofor grup, reaktif grup ve köprüden ibarettir. Bunun yanı sıra farklı anchor gruplarına sahip olup, bu husus Çizelge 2.2. ‘de verilmiştir.

Reaktif tekstil boyalarında en fazla kullanılanı Remazol tekstil boyaları olarak piyasada bulunan DYSTAR firması tarafında üretilen boyalardır. Bu boyalar; kovalent bağ, parlak renk tonları, yüksek düzeyde renk kalıcılığı, boyama prosesinin basitliği, selülozik veya lifli maddelere

boyanmasında çok yaygın bir şekilde kullanımı gibi özelliklere sahiptir. Remazol tekstil boyaları ve içerdikleri anchor grupları ve özellikleri sırasıyla Çizelge 2.3 ve 2.4 'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Reaktif Boyalardaki Bazı Gruplar ve Özellikleri (Can, 2002).

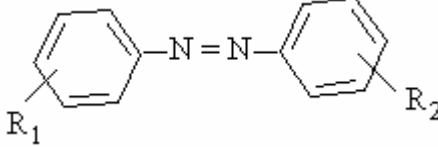
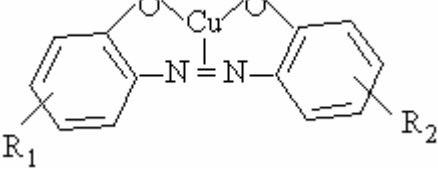
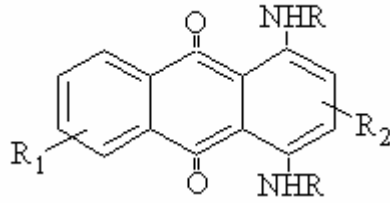
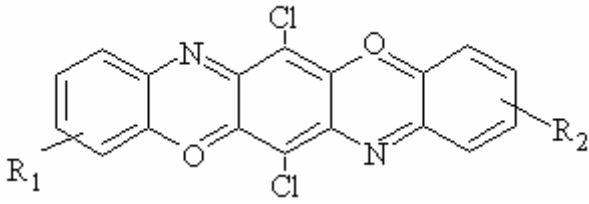
Anchor Grup	Açıklama	Özellik
Monoklorotriazin (MCT) Monochlorotriazine		•düşük reaktivite •serbest AOX
Monoflortriazin (MFT) Monoflortriazine		•orta-yüksek reaktivite •serbest AOX
Diflorklorprimidin (FCP) Diflorklorprimidin		•yüksek reaktivite •hidroliz olmayan AOX(Cl)
Diklorckinokzalıt (DCC) Dichlorchinoxaline		•yüksek reaktivite •hidroliz olmayan AOX(Cl)
Vinilfülfon (VS) Vinylsulfone	-SO ₂ -CH ₂ -CH ₂	•orta derecede reaktivite •serbest AOX

■ Kromofor grup ● Köprü ■ Boya molekülünün geri kalan kısmı

Çizelge 2.3. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Remazol Reaktif Tekstil Boyaları (Can, 2002).

Marka Adı	CI Index	Anchor grup	Kromofor grup
Remazol Black A	-	VS+DCT	-
Remazol Black B 133	Black 5	VS+VS	Diazo
Remazol Black RL	Black 31	VS	Azo Cu complex
Remazol Black GF	-	VS+VS	-
Remazol Black NF	-	VS+VS	-
Remazol Deep Black N150	-	VS	-
Remazol Turquoise Blue G133	Blue 21	VS	Phthalocyanine/Cu compl.
Remazol Navy Blue GG	-	VS+VS	-
Remazol Navy Blue RGB	-	VS+VS	-
Remazol Brillaant Blue R	Blue 19	VS	-
Remazol Brilliant Blue RN	-	VS	-
Remazol Brilliant Blue BB	Blue 220	VS	Formazan Cu compl.
Remazol Brilliant Violet 5R	-	VS	-
Remazol Blue CA	-	MFT+VS	-
Remazol Red 3B	-	VS	-
Remazol Red GWF	-	VS	Azo
Remazol Red	Red 23	-	-
Remazol Red RB 133	Red 198	MCT+VS	-
Remazol Rot 3B (Red 3B)	-	VS	-
Remazol Brilliant Red F3B	-	VS	-
Remazol Brilliant Red 3BS	-	MCT+VS	-
Remazol Red RR	-	MCT+VS	-
Remazol Red FLM	-	VS	-
Remazol Orange RR gran	-	MCT+VS	-
Remazol Brilliant Orange 3R	Orange 16	VS	Azo
Remazol Orange BN	-	VS	-
Remazol Brilliant Yellow GL	-	VS	-
Remazol Brilliant Yellow 4GL	Yellow 160	VS	Azo
Remazol Golden Yellow RNL	Orange 107	VS	Azo
Remazol Yellow GR	Yellow 15	VS	-
Remazol Yellow GN	-	VS+VS	-
Remazol Yellow 3RS	Yellow 176	MCT+VS	-
Remazol Brilliant Green GB	-	VS	-

Çizelge 2.4. Remazol Reaktif Tekstil Boyalarının Özellikleri (Uygun, 2003).

Anchor Grup	Açıklama	Özellik
Azo, Disazo		•sarı, turuncu, kırmızı, mavi ve koyu tonlar
Metal-Azo kompleksi		•sarı, kahverengi, mavi, menekşe, koyu yeşil, siyah tonlar •yüksek ışık kalıcılığı •metal kompleksleri
Anthrakininon		•mavi, menekşe renkleri, parlak tonlar •yüksek ışık kalıcılığı
Cu-(Ni) Formazin	-	•kırmızımsı, yeşilimsi ve mavi tonlar •yüksek ışık kalıcılığı •Cu, Ni metal kompleks.
Triphendioxazine		•mavi, kırmızı, menekşe renkleri, parlak tonlar •yüksek ışık kalıcılığı •organik bağlı AOX
Cu ve Ni Phthalocyanine	-	•parlak turkuaz ve yeşil tonlar •yüksek ışık kalıcılığı •kararlı metal komplek.

2.2.2. Boyama Atıksularının Özellikleri

Boyama atıksuları koyu renge, geniş pH aralığına, yüksek sıcaklığa, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), toplam çözünmüş katı, yüksek iletkenliğe ve bazen de yüksek alkaliniteye sahiptirler.

Boyama atıksularının en kötü tarafı kuvvetli renkleridir. Boyar maddelerin tipine bağlı olarak, boyama atıksularının rengi kırmızı, kahverengi, mavi, mor ve siyahtan farklı olarak yoğunluk ve koyuluğa bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Boyama atıksularının rengi günden güne ve hatta gün içinde değişik zamanlarda değişebilir, çünkü müşteri istekleri nedeniyle boyama proseslerinde sık sık değişik boyar maddeler kullanılır. Rengin değişimi aynı zamanda boyahane atıksuyunun KOİ içeriğinin sık sık inip-çıkmasına neden olur (Lin ve Peng, 1994).

Büyük pH salınımları boyahane atıksularının bir olumsuz özelliğidir. pH değişikliğinin asıl nedeni boyama prosesinde değişik türlerde boyar maddelerin kullanılmasıdır. Atıksuyun pH'ı 2-12 arasında değişebilir. Böyle büyük pH değişimi, kimyasal arıtma prosesleri veya aktif çamur proseslerinin sınırlandırılmış pH toleransları dolayısıyla sıkıntı yaratır. Bu nedenle boyama atıksuyu proseslerinde kısmen uygun pH ayarlaması gerekli olmaktadır.

Boyama atıksularının sıcaklığı anormal yüksektir. Boyama prosesi esnasında çeşitli kademelerde 90 °C 'nin üzerinde durulama suları kullanılmaktadır. Tekstil atıksularının 40 °C 'ye varan sıcaklıkları, bu sıcak durulama sularına mal edilebilir. Yine boyamaya yardımcı olması için kullanılan tuzlar bu suların iletkenliğini arttırmaktadır.

Boyama atıksuları kullanılan kimyasallar ve boyarmaddelerden kaynaklanan toksik bileşikler ve ağır metaller içerebilmektedir. Boyama atıksuları bu yapılarıyla atıksu arıtma tesislerinde problemlere neden olmaktadır. Bu problemleri, çamurda kabarma, renkte süreklilik, pH 'da, sıcaklıkta, ağır metallerde aşırılık ve hidrolik akış hızında değişiklikler olarak sıralayabiliriz. Ayrıca birçok boya çeşidi, biyolojik ayrışmaya dayanıklı olarak geliştirildiğinden tekstil atıksularından biyolojik yöntemlerle giderimi sağlanamamıştır. Böylece renk giderimi tekstil atıksularında karşılaşılan en önemli çevresel problemlerden biri olmuştur (Buckley, 1992).

2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu

2.3.1. Atıksu Karakterizasyonunda Temel Kirletici Parametreler

Atıksuların karakteri elyaf cinsi, uygulanan işlemler ve kullanılan kimyasal maddelere bağlı olarak değişkendir. Tekstil endüstrisinde temel kirleticiler; BOİ₅, KOİ, AKM, yağ ve gres, toplam krom, fenol ve sülfürdür. Bunların dışında özellikle kullanılan boya ve diğer kimyasal maddelere bağlı olarak hem organik nitelikli hem de ağır metal olarak çok sayıda mikrokirletici atıksularda bulunmaktadır. Atıksu karakterizasyonunda kullanılan temel kirletici parametreler Çizelge 2.5'de verilmiştir (Tünay, 1996).

Tekstil atıksularında, tesis içindeki proseslerde kullanılan boyalar, sodyum karbonat, sodyum klorit, sabun, sodyum sülfat, alkol, pigment, vb. çeşitli kimyasallar ve doğal elyaftan dolayı katı madde miktarı oldukça yüksektir.

Tekstil endüstrisinde yağ ve gresin en önemli kaynakları, yüzeysel aktif madde içeren boyarmaddeler ve beraberinde kullanılan yağlar ve doğal elyaflardır. Özellikle yünün işlenmesi sırasında, elyafı kayganlaştırmak ve ipliklerin birbirine yapışmasını önlemek için çeşitli yağlar

kullanılmaktadır. Bu amaçla zeytin ve yerfıstığı birinci sınıf yünler için, olein yağı ise ikinci kalite yünler için kullanılmaktadır. Pamuklu tekstil endüstrisinde yağ ve gres düşüktür, ama tünl  tekstilde oldukça yüksektir. Tekstil endüstrisi atıksularında yağ ve gres konsantrasyonu 12-6000 mg/l arasında değişmektedir (Tünay, 1996).

Tekstil endüstrisinde kullanılan kükürtlü boyalar ve sodyum sülfat, sodyum s lf t, sodyum hidro s lf t gibi kükürtlü kimyasal maddeler oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Dolayısıyla tekstil atıksularında bu tür bileşiklerin oranı oldukça yüksektir. Tekstil atıksularındaki sülfatın kaynağı, boyama esnasında kullanılan sodyum sülfattır. S lf t ise çeşitli birimlerde klorun deklorine edilmesinde kullanılır.

Çizelge 2.5. Atıksu Karakterizasyonunda Kullanılan Temel Kirletici Parametreler (Tünay, 1996).

Fiziksel parametreler	Kimyasal parametreler	Biyolojik Parametreler	Deşarj bilgileri
Renk	pH	BOŞ	Ortalama günlük akış oranı
Koku	KOÇ	Patojenik mikroorganizmalar	Sürekli maksimum akış oranı
Radyoaktivite	TOK	Toksisite	Akış değişimin maksimum oranı
Sıcaklık	�norganik bileşenler		
AKM	Klor ihtiya�ı		
�O	Yağ ve hidrokarbonlar		
Köpük	Fenol		
Korozyon	Toplam ����nm�ş tuzlar		
Bulanıklık	Sülfatlar		
	Azot ve fosfor		
	Sertlik		
	Klor iyonu		
	Alkalinite		

Sülfür kaynağı ise kükürtlü boya banyolarıdır. Bu banyolarda kükürtlü boyarmaddelerin yanı sıra boyarmaddesinin yaklaşık yarısına kadar kullanılan sodyum sülfür çözücüsü de atıksu konsantrasyonunu arttırmaktadır.

Tekstil endüstrisi atıksuları boya banyolarından gelen yüksek oranda boyarmadde ve boyamaya yardımcı kimyasallar içerirler. Tekstil atıksuları biyolojik olarak ayrışabilmektedir, fakat özellikle boyarmaddelerden kaynaklanan toksik bileşikler (kromatlar, sülfürler, hidrojen peroksit vb.) bazen biyolojik proseslerde olumsuzluklara neden olabilir, mikroorganizmalara tesir ederek biyolojik sistemin çökmesine neden olabilirler. Tekstil endüstrisinde boyama sonucu oluşan renkli sular alıcı ortamlarda hem estetik bozukluğa neden olmakta hem de ışık geçirgenliğini engelleyerek biyolojik aktiviteleri azaltmaktadır. Boya moleküllerine, boyanacak elyafın veya kumaşın türüne göre ve boyama işleminin  zelliliğine göre yardımcı maddelerin ilave edilmesi arıtma işlemini zorlaştırmaktadır. Bu maddeler, birden fazla uzun aromatik halka ve çift bağ taşıması sebebiyle biyolojik ayrışabilirlikleri az, dayanıklı ve kalıcı kimyasal maddelerdir.

2.3.2. Pamuklu Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu

Pamuklu tekstil endüstrisi atıksularının en önemli kirlilik parametreleri; KOİ, yüksek pH, sıcaklık, toksik maddeler, yüzey aktif maddeler, yağ-gres, sülfürler, AKM ve alkalinitedir. Ortalama büyüklükte bir pamuklu tekstil tesisi için, nişastalı atıklar toplam atıksu hacminin %16'sını, BOİ'nin %53'ünü, toplam katıların %36'sını ve alkalinitenin ise %6'sını teşkil etmektedir. Kostik soda; toplam atıksu hacminin %19'unu, BOİ'nin %37'sini, toplam katıların %43'ünü ve toplam alkalinitenin ise %60'ını oluşturmaktadır. Yıkama, ağartma, boyama ve apre atıkları; kompozit atık hacminin %65'ini, BOİ'nin %10'unu, toplam katı maddenin %2'sini ve toplam alkalinitenin ise %34'ünü oluşturmaktadır (Tünay, 1996).

2.3.3. Yünlü Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu

Yün atıksularında, saman, diken, pıtrık, toprak, kum, alkali maddeler, organik asitler, yağ, H₂S, boyalar, deterjanlar, kimyasal ve organik maddeler bulunur. Yapak yıkama atıkları; kum ve toprak, pıtrık, yün gresi ve organik asitler içerir. Bu atıklar kahverengi ve bulanıktır. Gres emülsiyonları ve diğer organik bileşikler içerir. Çıkış suyundaki gres miktarı 25 g/l gibi yüksek değerlerde olabilir. Kuvvetli alkalidirler, yüksek miktarda organik bileşik ve AKM içerirler (Tünay, 1996).

Diğer proseslerden gelen atıklar; boyları, solventleri, asitleri içerirler. Bileşimleri ve konsantrasyonları, kullanılan kimyasal maddelere ve hammaddenin saflığına bağlıdır. Boya atıklarında krom, meta kromel asit ve sülfür boyları bulunabilir. Yünlü tekstil atıksularının genel özellikleri ise; yüksek asidite, çeşitli organik maddeler, boyalar, aktif yıkama maddeleri, tuzlar ve yüksek konsantrasyonda yağlar içermeleridir.

2.3.4. Sentetik Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu

Sentetik tekstil sanayi atıksularının en önemli özellikleri boyamadan kaynaklanan yüksek KOİ ve toksisitedir.

2.3.5. Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarj Standartları

Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılmasında sınırlayıcı faktör atıksuyun deşarj standartlarıdır. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde tekstil atıksularının alıcı ortamlara deşarj standartlarında kısıtlama getirilen parametreler; BOİ₅, KOİ, toplam AKM, amonyum azotu, serbest klor, toplam krom, yağ ve gres, pH, fenol, balık biyodeneyi (ZSF), sülfür ve sülfid parametreleridir. Atıksuların atıksu altyapı tesislerine deşarjında ön görülen deşarj standartları Çizelge 2.6'da verilmiştir (SKKY, 1988).

İSKİ kanalizasyon şebekelerine atıksularını veren tesisler için, İSKİ'nin sağlanmasını istediği deşarj standartları yönetmeliği genel yaklaşımlar ve teknik açıdan Su Kirliliği Kontrol

Yönetmeliği ile uyum sağlamakta olup, deşarj kriterleri ve arıtma zorunluluğu gibi temel kavramlarda ayrılmaktadır

Çizelge 2.6. Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları (SKKY, 1988).

<i>Parametre</i>	<i>Tam Arıtma Altyapı Tesislerine Deşarj, mg/l</i>	Derin Deniz deşarjı ile Altyapı Tesislerine Deşarj, mg/l
Sıcaklık (°C)	40	40
pH	6.5-10.0	6.0-10.0
AKM	500	350
Yağ ve Gres	250	50
Petrol Kökenli Yağlar	50	10
KOI	4000	600
Sülfat	1000	1000
Topla Sülfür	2	2
Fenol	20	10
Serbest Klor	5	5
Toplam Azot	(a)	40
Toplam Fosfor	(a)	10
Arsenik (As)	3	10
Toplam Siyanür	10	10
Toplam Kurşun (Pb)	3	3
Toplam Kadmiyum (Cd)	2	2
Toplam Krom (Cr)	5	5
Toplam Civa (Hg)	0.2	0.2
Toplam Bakır (Cu)	2	2
Toplam Nikel (Ni)	5	5
Toplam Çinko (Zn)	10	10
Toplam Kalay (Sn)	5	5
Cl ⁻ (Klorür)	1000	-
Yüzey Aktif Maddeler	Biyolojik olarak parçalanabilir olmalı	

2.4. Tekstil Atıksularının Arıtım Prosesleri

Tekstil atıksuları ve boya çözeltilerinin arıtımının arıtımı fizikokimyasal, biyolojik ve elektrokimyasal, UV oksidasyon ve membran prosesler gibi ileri teknolojiler ile artırlmaktadır. Tekstil atıksularının arıtım prosesleri aşağıda özetlenmiştir.

2.4.1. Tekstil Atıksularının Kimyasal Oksidasyonu

Kimyasal oksidasyon prosesi; kimyasal ortamdaki kimyasal türler arasında elektron transferine dayanır. Bu proseslerden bazılarının avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.7’de gösterilmiştir (Shu ve Huang, 1995; Namboodri ve diğ., 1994). Bu proseslerde amaç boyar maddelerle oluşan toksik bileşiklerin oksitlenerek biyolojik olarak parçalanabilir şekle dönüştürülmesidir. Bu amaçla oksidant olarak ozon (O₃), klor (Cl₂), hidrojen peroksit (H₂O₂), potasyum permanganat (KMnO₄) gibi oksitleyiciler kullanılmaktadır.

Çizelge 2.7. Bazı Oksidasyon Proseslerinin Arıtım Avantaj ve Dezavantajları (Shu ve Huang, 1995; Namboodri ve diğ., 1994).

Arıtım prosesi	Avantaj	Dezavantaj
Fenton	Ekipman basit ve kolaylığı KOİ’ nin azaltılması (reaktif boyalar dışında)	Çamur oluşumu Uzun reaksiyon sürmesi Tuz oluşumu Tehlikeli At ıklar
Fenton çamur geri kazanım Sistemi(FSR)	Ekipman basit ve kolaylığı (reaktif boyalar dışında)	Tuz oluşumu Gaz oluşumu (H ₂ O ₂ elektroliz esnasında)
UV/H ₂ O	Çamur oluşur tuz oluşur İşletme kolaylığı ve güvenlik Kısa reaksiyon süresi KOİ azalması	Tüm boyalara uygulanmaz S S partiküllerinin ayrılması gerekir
O ₃ /H ₂ O ₂	Çamur ve tuz oluşmuyor Kısa reaksiyon süresi Reaktif boyalar için çok kısa reaksiyon süresi	Tüm boyalara uygulanmaz Toksik, tehlikeli ve problemlili kontrol KOİ azaltılmaz

Ozon:

Ozon (O₃), oksijenin allotropudur. Normal şartlarda gaz olup, kendine has bir kokuya ve mavimsi bir renge sahiptir. Ozonun sudaki çözünürlüğü ve kararlılığı, sıcaklığa, pH ve kısmi basınca bağlıdır. Kararsız bir madde olan ozon havanın oksijeninden elde edilir. Meydana gelen radikal maddeler havanın oksijeni ile reaksiyona girerek ozonun oluşumunu sağlamaktadır.



Ozon, organik maddeleri kuvvetli oksitleyici özelliğe sahiptir. Bu özelliğinden dolayı ozon içme sularında tat ve koku giderimi, atıksularda ise organik maddeler, renk ve toksik bileşiklerin giderilmesinde kullanılır. Dispers tekstil boyaları dışındaki tüm boyaların ozonlama ile gideriminde yüksek arıtım verimleri elde edilmektedir. Tekstil endüstrisinde çok fazla atıksu oluşmakta olup, ozon ile tekstil atıksularının arıtım maliyetinin yüksek olması bu işlemin en

önemli dezavantajdır. Bir diğer dezavantaj ise, boyar maddelerin ozonlanması sonucu oluşan parçalanma ürünlerinin su ekosistemindeki flora ve fauna üzerine toksik etkisinin gözlenmesidir. Bazı boyar maddeler ozonla hemen reaksiyona girmektedir. Metal içeren ve antrakınon boyarmaddeler ise ozonla parçalanmaya direnç göstermektedir. Birçok boyar madde kükürt, klorür ve klor içermekte olup, toksik parçalanma ürünleri açığa çıkabilmektedir.

Namboodri ve Perkins tarafından dispers boyar maddelerden ozonlama ile renk giderim çalışmaları yapılmış olup; Disperse Red 13 ve Blue için 40 saniyede; Red 60 ve Orange 3 için ise 60 saniyede renk giderimi gerçekleşmiştir. 1 dakikada %70 'lik renk giderimi ve geri kalan kısmı ise 3 dakikada giderildiğini tespit etmişlerdir. 0.02 g/l Disperse Red 13 ve Disperse Blue 60 için 160 mg/l, Red 60 ve Orange 3240 mg/l ozon tüketildiğinde %100 renk giderimi sağlandığı sonucuna varmışlardır (Ölmez, 1999).

Klor:

Klor hem dezenfektan hem de oksidant özelliğe sahip olması nedeniyle organik maddeleri oksitlemektedir. Sonuçta daha toksik klorlu organik bileşikler meydana gelmektedir. En yaygın kullanılan oksitan klor bileşikler $Cl_2(g)$, $NaOCl$, ve ClO_2 'tir. Tekstil endüstrisinde renk gideriminde $Cl_2(g)$ ve $NaOCl$ yaygın olarak kullanılmaktadır. $NaOCl$ sudaki reaksiyonları aşağıdaki şekildedir:



Bu yöntemle birçok boyar maddenin rengi giderilebilmesine rağmen rengin tamamını gidermek mümkün değildir. Ayrıca ortamda oluşan bazı klorlu bileşiklerin alıcı ortamlarda bazı olumsuz etkileri de söz konusudur.

Klordioksit (ClO_2):

Klordan daha az etkili olup, tam bir renk giderimi sağlayamamaktadır. Buna ek olarak bazı boya grupları üzerine ise hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Ancak klordioksit reaktif, direkt, dispers ve anyonik metalik boyarmaddeler üzerinde oldukça etkilidir. Son renk giderme prosesi olarak kullanılabilir.

Hidrojen Peroksit:

Hidrojen peroksit (H_2O_2) normal şartlar altında oldukça etkisizdir. Fakat asidik ortamda demir (II) ile fenton reaktifini oluşturmaktadır. Fenton reaktifi ortamda hidroksil radikallerini oluşturmakta olup, bu radikaller boyar maddelerin rengini gidermektedir. Fenton reaktifi hem çözünür hem de çözünmeyen boyar maddelerin rengini gidermede oldukça etkindir. Oluşan

reaksiyon sonucunda kimyasal oksijen giderimi de sağlanmaktadır. Fenton reaktifinin en önemli dezavantajı ise, her m³ atıksu arıtımı için 4 \$ 'lık yüksek işletme maliyetidir (Uygun, 2003).

Acid Red 337 ile hazırlanan sentetik boya ve Acid Red 151 'in kullanıldığı boya atıksuyundan fenton prosesi ile renk ve KOİ giderme çalışması yapılmıştır. Çalışmalar sonunda sentetik numune için renk giderme verimi %96, KOİ giderme verimi 290 mg/l 'den 55 mg/l düşürülerek %81 olarak gerçekleşmiştir. Atıksuda ise renk giderme verimi %91, KOİ giderme verimi 2380 mg/l 'den 650 mg/l düşürülerek %73 olarak gerçekleşmiştir (Külünk, 2000).

2.4.2. Tekstil Atıksularının Biyolojik Oksidasyonu

Tekstil boyama işlemlerinde farklı özellik ve kimyasal yapıda boyar maddeler kullanılmaktadır. Bunun sonucunda da çok kompleks ve biyolojik ayrışabilirliği zor atıksular ortaya çıkmaktadır. Tekstil atıksularının arıtımında biyoproses olarak en yaygın aktif çamur kullanılmakta olup, arıtmadan çıkan sularda renk problemi oluşmaktadır. Diğer bir ifadeyle renk giderimi oldukça düşüktür (Slokar ve Marechal, 1998).

Son zamanlarda, tekstil atıksularının arıtımında anaerobik ve/veya aerobik sistemlerin birlikte kullanılması üzerine çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Burada anaerobik sistem birinci aşamada azo boyar maddelerin sahip olduğu çift azo bağının parçalanması ve ortaya çıkan parçalanma ürünlerinin ise aerobik bir sistem tarafından son ürünlere oksitlenmesinden ibarettir. Aerobik biofilm sistemler ise tekstil atıksularının arıtımındaki en uygun sistemlerdir.

Anaerobik arıtma yöntemleri üzerine yapılan laboratuvar şartlarında ise renk giderimi için iyi sonuçlar alınmasına rağmen, bir takım problemler mevcuttur. Gerçek bir tekstil atıksuyunda sülfat ve nitrat gibi iyonların bulunması sistemin verimini azaltabilmektedir. Ayrıca anaerobik arıtmada oluşan H₂S gazı diğer önemli bir problemidir. Tekstil atıksularının anaerobik arıtımında azo boyar maddelerin parçalanmasında sonucu aromatik aminlerin oluşumu ancak anaerobik bir ortamda gerçekleşmektedir (Başbüyük ve diğ., 1998).

Anaerobik arıtma işleminin azo boyası içeren karışımlardan renk giderimi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, orijinal atığın anaerobik arıtımında 5 gün içerisindeki KOİ değerinde %58 bir azalma gözlemlendiği tespit edilmiştir. Hazırlanan sentetik numunelerde ise boya miktarı artıkça % KOİ gideriminin azaldığı görülmüştür. Renk parametrelerinde kısa sürede meydana gelen değişim azo çift bağlarının anaerobik arıtımı esnasında oluştuğu sonucuna varılmıştır (Takımcı, 1996).

2.4.3. Tekstil Atıksularının Kimyasal İndirgeme ile Arıtımı

Kimyasal indirgeme tekstil atıksularının ön arıtmada kullanılan yöntemlerden biridir. Azo boyarmaddeler çift azo bağının parçalanması ile aromatik aminlere çevrilebilir. Oluşan bu aromatik aminlerin biyolojik olarak parçalanması, azo boyar maddelerin parçalanmasından daha kolaydır. Pek çok azo boyar madde için kimyasal indirgeme oldukça etkilidir. Bundan dolayı en

yaygın kullanılan kimyasal indirgeyici kimyasal madde sodyum hiposülfittir. Yaygın olarak kullanılan diğer indirgeyiciler ise; thioüre dioksit (formamidin sülfirik asit), sodyum borhidit, sodyum formaldehit sülfö okzalit ve SnCl_2 'dir (Başbüyük ve diğ., 1998).

2.4.4. Tekstil Atıksularının Membran Proseslerle Arıtımı

Membran sistemleri tekstil atıksularından boyar maddeleri uzaklaştırmada kullanılmaktadır. Arıtmadan çıkan suyun yeniden kullanımı ve bazı boyar maddelerin geri kazanımı gibi avantajları vardır. Başlıca membran sistemleri; ters osmoz, ultrafiltrasyon, elektrodializdir. Bu teknolojiler 1980 'lerde vat, indigo boyar maddelerin geri kazanımı amacıyla Amerika Birleşik Devletlerin'de kullanılmaya başlanmıştır. Geri kazanım açısından membran proseslerinin kullanımı ileriki yıllarda artacak gibi görünmektedir. Membran sistemlerinin en önemli problemi membranlarda biriken maddelerin uzaklaştırılmasıdır.

Ultrafiltrasyon prosesi ile tekstil atıksularının arıtımı ile yüksek moleköl ağırlığına sahip maddeler, mikroorganizmalar ve askıda maddeler atıksudan ayrılmaktadır. Ayrılan bu maddelerin gözenek çapı 0.001-0.10 μm arasındadır. Membranlar düşük enerji ve basınçta, pH 1-13 aralığında kullanılabilir. Bu prosesler de % 95 'e varan verimler elde edilebilmektedir (Can, 2002).

Nanofiltrasyon membranları kullanılarak tekstil boya atıksularından, renk, KOİ ve iletkenlik giderme çalışmalarında verim her üç parametre için %96 'nın üzerinde gerçekleşmiştir. Besleme suyu KOİ değeri 400-720 mg/l arasında ve süzöntü KOİ 'si ise mg/l'nin altındadır. %80 geri kazanım sağlandığında renk 500 Pt-Co birim değerinden 20 Pt-Co birim değerine düşmüştür. Renk, KOİ ve iletkenlikteki bu kayda değer düşüş, süzöntü suyunun boya banyoları ve diğer proseslerde yeniden kullanımın mümkün olduğunu göstermiştir (Kural, 2000).

2.4.5. Tekstil Atıksularının Ters Osmoz ve Elektrodializ ile Arıtımı

Gözenek çapı 0.001 μm küçük olan maddelerin ayırımı sağlanmaktadır. Enerji tüketimi ve basıncın yüksek olmasının yanı sıra maksimum 45 °C 'de çalışan ters osmoz membran sistemleri ile maddelerin ayırımı (tuz dahil) gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak, atıksuyun yaklaşık %95 'i tekrar prosese geri döndürülebilmektedir. Ters osmoz membranların en önemli problemi ise, yüksek sıcaklıklara ve oksidantlara karşı dayanıklılığının sınırlılığıdır.

Tekstil atıksularının arıtımında kullanılan diğer bir ayırma prosesi elektrodializdir. Bu proseste en önemli parametre kullanılan membranların özelliğidir. Bu membranlar anyonik ve katyonik olmak üzere ikiye ayrılır. Atıksulardan ayrılması istenen bileşikler moleküller yüklerine göre membranlarda tutulmaktadır. Anyonik membranlar anyonların geçmesine müsaade ederken katyonları tutmaktadır. Katyonik membranlar ise katyonların geçmesine izin verirken anyonların tutulmasını sağlayarak ayırma işlemi sağlanmaktadır (Uygun, 2003). Boyama prosesi atıksularının ters osmoz ile arıtılması için yapılan çalışmada, poliakrilik-zikronyum oksitten yapılmış tüp şeklindeki membran kullanıldığında boya pigmentlerinde %97 azalma ve %95 geri kazanım

sağlanmıştır (Yalçın, 1998). Sonuç olarak; ters osmoz prosesi ile tekstil sanayi atıksularında %90 geri kazanım sağlanmaktadır.

2.4.6. Tekstil Atıksularının Adsorpsiyon ile Arıtımı

Adsorpsiyon fiziksel, kimyasal veya değişim adsorpsiyonu şeklinde olabilir. Adsorpsiyonun verimi yüzey alanına, pH 'a, sıcaklığa, adsorbantın yapısına ve karışım özelliğine göre değişir. Adsorpsiyon işlemi amacıyla en yaygın kullanılan adsorbant aktif karbondur. Aktif karbonun asidik, bazik ve dispers boyalar için uygun olduğu ancak direk boyalar için ise renk gideriminin zor olduğu belirtilmiştir. Aktif karbonun pahalı ve rejenarasyonunun zor olması yeni adsorbant maddelerinin denenmesini gündeme getirmiştir. Bu amaçla silika, kil, şekerkamışı posası, mısır bitkisi, pirinç, kitin, uçucu kül ve kömür gibi bir takım ucuz adsorbantlar kullanılmıştır (Başibüyük ve diğ., 1998).

2.4.7. Tekstil Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı

Suya kimyasal maddeler ilave edilerek (koagülantlar) çökelme özellikleri iyi olmayan çok ince süspanse madde veya kolloidlerin daha iyi çökebilen yapılara dönüştürülmesi işlemi kimyasal koagülasyon olarak bilinmektedir. Bu işlem kolloidal taneciklerin etrafındaki elektriksel çift tabakanın bastırılması ile elde edilen bir elektriksel denge stabilizasyonudur. Teorik olarak tanımlanırsa, koagülasyon işlemi, kolloidal taneciklerin elektriksel dengelerinin bozulması işlemidir. Bu olaya destabilizasyon adı verilmektedir. Flokülasyon ise stabilliği bozulmuş kolloidlerin bir araya getirilip yumak teşkili ve yumakların büyütülmesi işlemidir (Özgürses, 2003).

Bu işlemler için kullanılan en yaygın kimyasal koagülantlar alüminyum ve demir tuzlarıdır. Ancak son zamanlarda boyar maddelerin yapılarında meydana gelen değişimler, boyar maddelerin artık kimyasal koagülantlar ile uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu amaçla organik polimerler kullanılmaya başlanmıştır. Bu organik polimerler inorganik maddelere göre daha iyi renk giderimi ve daha az çamur oluşumu sağlamasına rağmen polimer kullanımı da tam bir renk giderimi sağlayamamaktadır. Katyonik boyalar kimyasal yapılarından dolayı son derece zayıf koagüle olmakta veya hiç koagüle olmamaktadır. Asit, direkt, vat, mordant ve reaktif boyalar koagüle olmakla birlikte oluşan flokların zayıf yapıda yumaklar oluşturmakta ve flokülant ilavesi bile çökelme verimini pek arttırmamaktadır. Bu bakımdan yukarıda bahsedilen tipteki boyar maddelerin koagülasyon-flokülasyon işlemi ile uzaklaştırılmasında pek iyi sonuç alınamamaktadır.

Diğer taraftan sülfür ve dispers boyalar çok iyi koagüle olmaktadır. Bundan dolayı da son derece kolay çökmekte olup buna bağlı olarak da renk giderimi oldukça yüksektir. Bundan dolayı koagülasyon - flokülasyon işlemi bu tür boyalar için son derece uygundur (Başibüyük ve diğ., 1998).

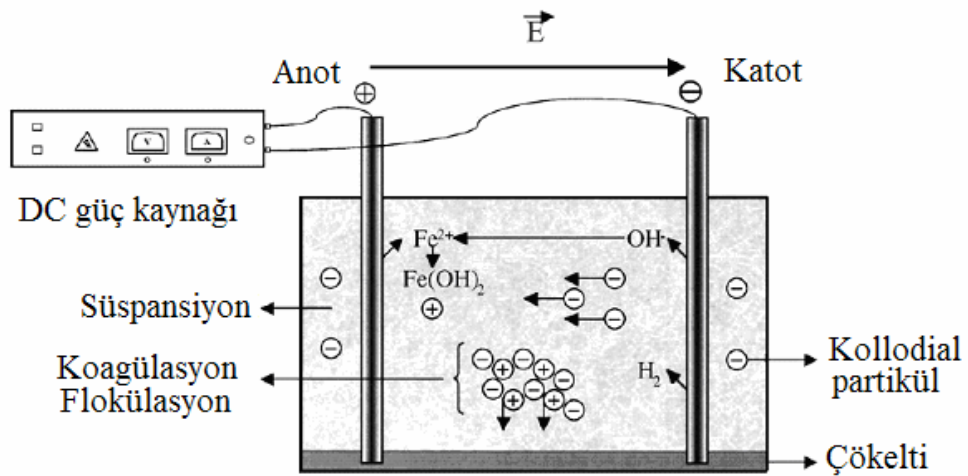
Pamuklu ve sentetik kumaş üretimi yapan bir tekstil fabrikası atıksuyu $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ koagülanları ve koagölasyona yardımcı olması için anyonik polielektrolitlerin kullanıldığı kimyasal çöktürme işlemi ile arıtmaya çalışılmıştır. 650 mg/l KOİ, 128 NTU türbiditeye sahip olan atıksudan çalışmalar sonunda %70 KOİ, %99 türbidite giderimi gerçekleşmiştir (Gezergen Asma, 1998).

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESLERİ

Sanayileşme ile atıksu oluşumu ve çeşitliliği artmıştır. Özellikle son yıllarda hızla gelişen tekstil sanayisi de bunlardan biridir. Alıcı su ortamlarındaki flora ve fauna üzerinde olumsuz etkilere neden olacak çok fazla miktarda ve kompleks atıksuların ortaya çıkması üzerine tekstil atıksularının arıtımının yapılarak deşarjı öngörülmektedir. Tekstil atıksularının arıtımı üzerine birçok arıtım prosesi geliştirilmiştir. Bu atıksuların arıtımında kullanılan fiziko-kimyasal ve biyolojik arıtım proseslerinin birçok dezavantajları bulunmaktadır. Mikroorganizmalar üzerine toksisite, arıtım proses kontrolü, çamur miktarı, kimyasal madde tüketiminin veya maliyetinin yüksekliği, arıtım tesis alanı büyüklüğü gibi birçok sınırlandırıcı dezavantaj mevcuttur. Bundan dolayıdır ki sözkonusu dezavantajları ortadan kaldıracak daha etkili, ekonomik ve işletme kolaylığı gereken arıtım sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Alıcı ortam deşarj standartlarının sıkılaştırılması daha etkili ve giderim verimi yüksek “ileri atıksu arıtım proseslerinin” geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle toksik ve tehlikeli atıksuların arıtımında pratikte kullanılabilecek ileri atıksu arıtım proseslerinden en önemlisi “elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri” olarak göze çarpmaktadır (Özgürses, 2003).

3.1. Elektrokimyasal Proseste Yeralan Bazı Kavramlar

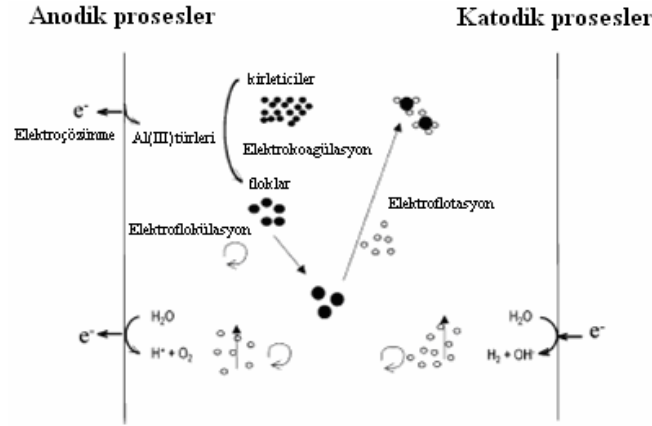
Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin anotta yükseltgendiği ve katotta indirgendiği homojen olmayan tepkimelerden oluşur. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır (Pletcher ve diğ., 1990). Bir elektroliz hücresinin şematik olarak görünüşü Şekil 3.1’de, anot ve katot da gerçekleşen reaksiyonlar ise Şekil 3.2 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bir elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı, güç sağlayıcı ve elektroliz çözeltisinin belli bir iletkenliğe sahip olması gerekir.



Şekil 3.1. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü (Larue ve Vorobrev, 2003).

Çizelge 3.1. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları (Delipınar, 2007).

Anot reaksiyonları	Katot reaksiyonları
•Anot elektron verir •Anotta yükseltgenme •Anodik çözünme: ($\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$) •Anyonlar anotta toplanır •Anolit bölge oluşur •Anotta oksijen: $2\text{H}_2\text{O} - 4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+$ •Ortamda klor var ise: $2\text{Cl}^- - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 \uparrow$	•Katot elektron alır •Katotta indirgenme •Katodik birikme: ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$) •Katyonlar katotta toplanır •Katolit bölge oluşur •Katotta hidrojen: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$ •Gazın indirgenmesi: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$



Şekil 3.2. Elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen reaksiyon basamakları (Canizares ve diğ., 2005).

Elektrokimyasal prosesleri çevre kirlilik problemlerini önlemede ve çözmeye ön plana çıkaran esas kriterleri aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz (Rajeshwar ve diğ., 1994; Delipinar, 2007).

- **Çok Yönlülük:** Elektrokimyasal prosesler birçok çevre probleminin çözümünde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Elektrokimyasal yükseltgenme ve indirgenme sonucu, çözeltilerin derişiklendirilmesi veya seyreltilmesi yani faz ayrımları gerçekleştirilir. Sonuç olarak, birçok kirlenmenin ve maddenin çok düşük konsantrasyonlara kadar bile ayrılması söz konusudur.

- **Enerji verimliliği:** Elektrokimyasal prosesler, klasik proseslere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadırlar (termal yanma gibi). Düşük elektriksel akım dağılımları, voltaj düşmeleri ve yan reaksiyonlardan dolayı oluşan güç kayıplarını minimize etmek için uygun elektrot ve hücre dizaynları ile enerji verimleri artırılabilir. Böylece enerji, klasik sistemlere göre daha az tüketilmiş olacaktır.

- **Otomasyona uyma kabiliyeti:** Elektrokimyasal proseslerde elektriksel değişkenler (voltaj ve akım gibi) genellikle veri elde etmeyi kolaylaştırma, proses kontrolü ve otomasyonu için uygun özelliktedir.

• **Çevre uyumu:** Elektrokimyasal proseslerde ana reaktif elektrot olup, temiz bir reaktifdir. Proseste genellikle çok fazla ekstra reaktifler gerekmemektedir. İlave olarak bu proseslerin birçoğunun yüksek seçicilik özelliğinden dolayı ikincil ürünlerin oluşumu gözlenmemektedir.

• **Maliyet tesirliliği:** Elektrokimyasal ekipmanın üretimi, işletilmesi ve kontrolünün tasarlanması basit ve ucuzdur. Birçok ekipmana göre çok az bir alan işgal etmektedir.

3.1.1. Faraday kanunu ve eşitlikler

Elektrokimyasal proseslerde kullanılan temel kanun Faraday Kanunu ve akım verim eşitlikleridir. Bir elektrokimyasal hücrede geçen akımın miktarı q ve akım şiddeti I ile t zaman arasındaki ilişki;

$$q = \int (I dt) \quad (3.1)$$

reaksiyonu ile tanımlanır. Yukarıdaki eşitlikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı Faraday kanunu ile ifade edilirse (Scott, 1995);

$$m = \frac{q}{n \cdot F} = \frac{I \cdot t}{n \cdot F} \quad (3.2)$$

eşitliği elde edilir.

Bu eşitlikte; n : çözünen metalin tesir değeri, F : Faraday sabiti ve 96485 C/mol değerine eşittir.

Elektrokimyasal bir proseste; Faraday değeri ile akım verimi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$CE = \frac{q_p}{q_T} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte; q_p : oluşan ürünün harcadığı yük ve q_T : toplam harcanan yük değerini ifade etmektedir. Oluşan ürün veya harcanan materyalin miktarı esas alınarak ölçülen (m_{act}) ve teorik (m) akım verimi arasındaki ilişki;

$$CE = \frac{m_{act}}{m} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir. (3.2) eşitliği (3.4) eşitliğinde yerine yazılırsa;

$$CE = \frac{m_{act} \cdot n \cdot F}{q} \quad (3.5)$$

eşitliği elde edilir.

Bir elektrottaki toplam akım, her reaksiyonun akımlarının toplamına eşit olacaktır. Bu durumda bir elektrottaki toplam akım I_j ,

$$I = \sum I_j \quad (3.6)$$

olacaktır. Elektrokimyasal proseste herhangi bir anda akım verimi, akıma bağlı olarak:

$$CE = \frac{I_j}{I} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.

3.2. Elektrokoagülasyon Prosesinin Teorisi

Kimyasal koagülasyon (CC), koloidal maddelerin çözelti içindeki yüklü partiküllerin zıt yüklü iyonlarla birlikte karşılıklı çarpışması ile stabil halden destabil hale getirip yani nötralize edilip bir araya toplanarak çökelmelerinin sağlanması olayıdır. Bu amaçla uygun kimyasal maddeler çözeltiye ilave edilir. Alüm gibi bir kimyasal madde atıksuların arıtımı için uzun sürelerden beri büyük ölçüde kullanılmıştır. Koagülasyon koloidal partiküllerin kimyasal madde ile net yüzey yükünün azaltılması sonucu ve elektrostatik itme kuvvetiyle sıkışması ile bir araya gelip yeterli Van Der Waals kuvvetiyle tutunup birikmesiyle gerçekleştirilir. Çözeltideki zıt yüklerin neden olduğu elektriksel çift tabakanın itme potansiyelindeki azalma, yüzey yükünün azaltılması ile sağlanır. Kimyasal koagülasyondan farklı olarak; elektrokoagülasyon'da (EC) koagülant, uygun anot materyalinin yükseltgenmesi sonucu oluşur. Bu proseste yüklü iyon türleri ile anottan çözünmüş olan metal iyonları metal hidroksit floklarını oluşturur (Mollah ve diğ., 2001; Delipinar, 2007).

Çözelti sistemlerinin elektrokimyasal proses mekanizması oldukça karmaşıktır. Proseste genellikle EC (elektrokoagülasyon), EF (elektroflotasyon) ve EO (elektrooksidasyon) olmak üzere üç önemli mekanizmanın birlikte meydana geldiğine inanılmaktadır (Mollah ve diğ., 2001). Elektrokimyasal proseste anotta yükseltgenme, kattotta ise indirgenme olacaktır. EC prosesinde genellikle ard arda üç aşamanın olduğu kabul edilmektedir. Bu aşamalar;

1. Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile koagülant türlerin oluşumu
2. Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması
3. Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması

Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması aşağıdaki şekilde tanımlanır;

- Çözelti içinden geçen akımdan dolayı çözünen elektrotun çözünmesiyle meydana gelen iyonların etkileşimleri sonucu yüklü türlerin, oluşan iyonlar etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılması sağlanır.
- Sudaki mevcut iyonik türlerin yüklerinin nötralizasyonu elektrokimyasal olarak çözünen elektrotlar tarafından üretilen zıt iyonlarla sağlanır.

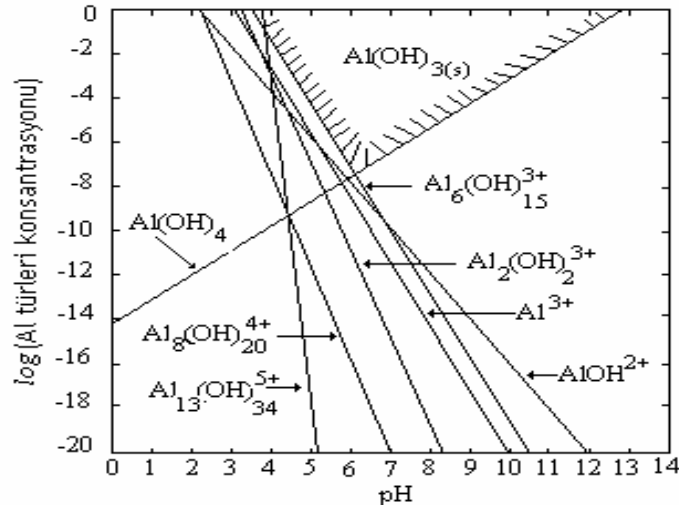
EC'nin mekanizması, ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki koloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin konsantrasyonu gibi özellikler de EC prosesi üzerine etki etmektedir. EC'de alüminyum ve demir elektrotlar en çok tercih edilen ve kullanılan elektrot materyalleridir (Mollah ve diğ., 2001).

A) Alüminyum Elektrot

EC’de çok sık kullanılan çözünen alüminyum elektrotların sulu ortamda oluşturacağı Al kompleksleri önemlidir. Sulu ortamda Al^{3+} ’nın oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri Çizelge 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir. Çizelgede gösterilen reaksiyonlardan da görüleceği gibi sudaki hidroksil iyonları elektrotlardan çözünmüş olan Al^{3+} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerine göre komplekslerin oluşumuna yol açacaktır (Benefield ve diğ., 1982).

Çizelge 3.2. Sulu ortamda Al^{3+} ’nın oluşturduğu hidroksil kompleks türleri (25°C) (Mollah ve diğ., 2001; Delipınar, 2007).

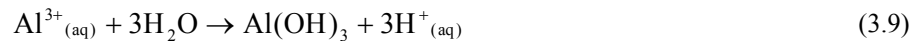
Reaksiyon	$\log K$
1. $Al^{3+} \rightleftharpoons Al(OH)^{2+} + H^+$	-5.02
2. $2Al^{3+} \rightleftharpoons Al_2(OH)_2^{4+} + 2H^+$	-6.27
3. $6Al^{3+} \rightleftharpoons Al_6(OH)_{15}^{3+} + 15H^+$	-47.00
4. $8Al^{3+} \rightleftharpoons Al_8(OH)_{20}^{4+} + 20H^+$	-68.70
5. $13Al^{3+} \rightleftharpoons Al_{13}(OH)_{34}^{5+} + 34H^+$	-97.39
6. $Al^{3+} \rightleftharpoons Al(OH)_4^- + 4H^+$	-23.57
7. $Al(OH)_3(s) \rightleftharpoons Al^{3+}_{(aq)} + 3OH^-_{(aq)}$	-32.34



Şekil 3.3. Sulu Ortamda Alüminyum Kompleksleri ve pH İlişkisi (Şengül ve Küçükgül, 1997).

Alüminyum anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH’ da katyonik tek molekülü Al^{3+} ve $Al(OH)_2^+$ gibi türlerdir ki bunlar uygun pH değerlerinde önce $Al(OH)_3$ ’e ve sonuçta aşağıdaki reaksiyonlara göre $Al_n(OH)_{3n}$ ’e polimerleşirler (Mollah ve diğ., 2001).

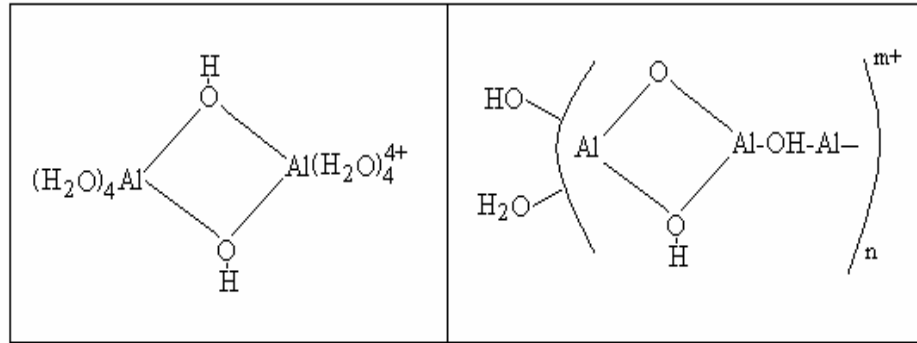
Anotta:



Katotta:

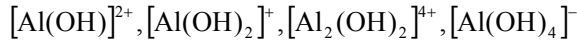


Bununla birlikte sulu ortamın pH değerine bağlı olarak $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ ve $Al(OH)_4^-$ gibi diğer iyonik türler sistemde mevcut olabilir. Örneğin, dimetrik ve polimerik Al^{3+} hidroksil komplekslerinin yapısı Şekil 3.4' de gösterilmiştir.

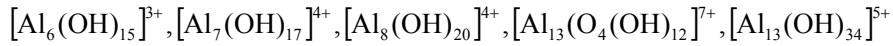


Şekil 3.4 Elektrokoagülasyon'da Oluşacak Polimerik Al Türleri (Mollah ve diğ., 2001) .

Monomerik alüminyum türleri:



Polimerik alüminyum türleri:



Monomerik, dimerik ve polimerik hidroksitlerin oluşumu zamansal olarak birbirinden farklılık gösterir. Monomerik hidroksitlerin oluşumu 10-4 saniye, dimerik hidroksitlerin oluşumu 1 saniye, Al_{13} polimerik türlerin oluşumu ise dakikalar sonunda olmaktadır. $Al(OH)_{3(s)}$ amorfun çökmesi 1 saniye bazen yıllarca sürebilmektedir, $Al(OH)_{3(s)}$ kristalin çökmesi aylar veya yıllarca sürebilmektedir (Rebhun ve diğ., 1993).

Elektrokoagülasyon işleminin net bir şekilde açıklanması oldukça zordur. EC'daki voltaj aralığı, temel elektrokimyasal çalışmalarda kullanılmamaktadır. Temel elektrokimyasal çalışmalarda sınırlayıcı tabaka tepkisinden etkilenmenin yanısıra, reaksiyonlar için 10-60V arası bir voltaj gerekmektedir (Mollah ve diğ., 2001).

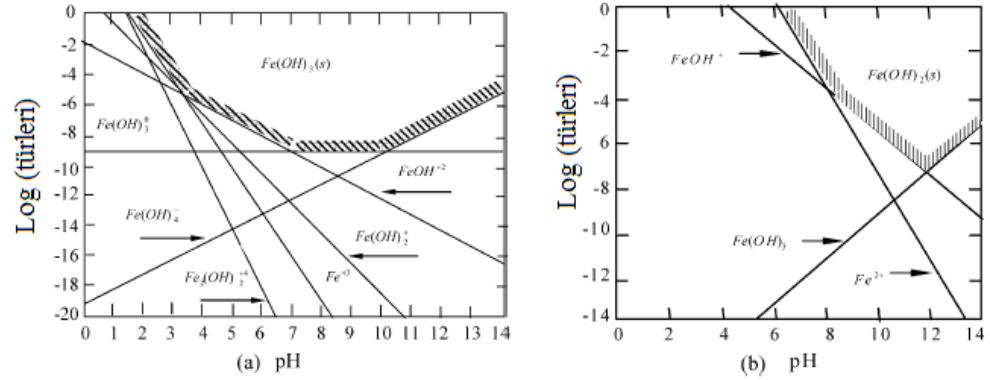
B) Demir Elektrot

Elektrokoagülasyonda çok sık kullanılan çözünen demir elektrotların sulu ortamda oluşturacağı Fe kompleksleri önemlidir. Sulu ortamda Fe^{3+} 'ün oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri Çizelge 3.3 ve Şekil 3.5' de verilmiştir.

Çizelgede gösterilen reaksiyonlardan da görüleceği gibi sudaki hidroksil iyonları, elektrotlardan çözünmüş olan Fe^{3+} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerlerine göre komplekslerin oluşumuna yol açacaktır (Pykhteev ve diğ., 1999; Benefield ve diğ., 1982).

Çizelge 3.3. Sulu ortamda Fe^{3+} ve Fe^{2+} 'nin oluşturduğu hidroksil kompleks türleri (Çiftçi, 2007).

Reaksiyon	LogK
1. $\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})^{2+} + \text{H}^+$	-3.00
2. $\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_2^+ + 2\text{H}^+$	-6.40
3. $2\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_2^{4+} + 2\text{H}^+$	-3.10
4. $\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3^0 + 3\text{H}^+$	-13.10
5. $\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_4^- + 4\text{H}^+$	-23.50
6. $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})^+ + \text{H}^+$	-8.30
7. $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_2^0 + 2\text{H}^+$	-17.20
8. $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_3^- + 3\text{H}^+$	-32.00
9. $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}(\text{OH})_4^{2-} + 4\text{H}^+$	-46.40

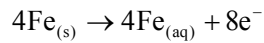


Şekil 3.5. Sulu ortamda demir kompleksleri ve pH ilişkisi (a. Fe^{+3} ve b. Fe^{+2}) (İrdemez ve diğ., 2006).

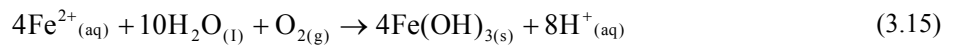
Demir anodun elektrolitik çözeltideki ürünleri düşük pH'da $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ gibi anyonik türlerdir. Bu türler uygun pH değerlerinde önce $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$ 'e, sonuçta aşağıdaki mekanizmalardaki reaksiyonlara göre $\text{Fe}_n(\text{OH})_{2n-3n}$ 'e polimerleşirler (Mollah ve diğ., 2001).

Mekanizma 1:

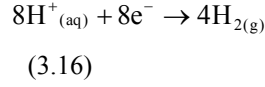
Anotta;



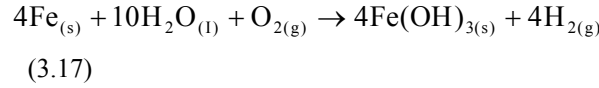
(3.14)



Katotta;

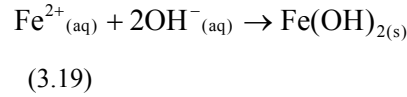


Toplamda;



Mekanizma II:

Anotta;



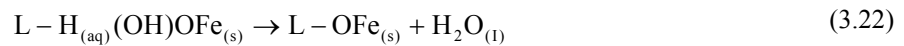
Katotta;



Toplamda;

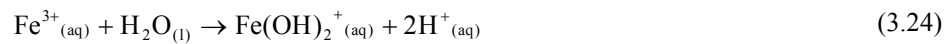


Elektrostatik çekicilik veya kompleksleşme ve takip eden koagülasyon yoluyla atıksudan kirleticileri ayıran $\text{Fe}(\text{OH})n_{(\text{s})}$ akıntıda jelatinimsi bir süspansiyon oluşturur. Yüzey kompleksleşme modunda kirletici $\text{Fe}(\text{OH})n_{(\text{s})}$ 'a kimyasal olarak bağlanan bir ligand gibi davranır (Mollah ve diğ., 2001).



Aynı zamanda Fe^{3+} katyonlarının prehidrolizi su arıtımı için reaktif halkaların oluşumuna sebep olur. Bu oksihidroksi demir katyonları için yapısal modeller literatürde geniş ölçüde rapor edilmiştir (Mollah ve diğ., 2001).

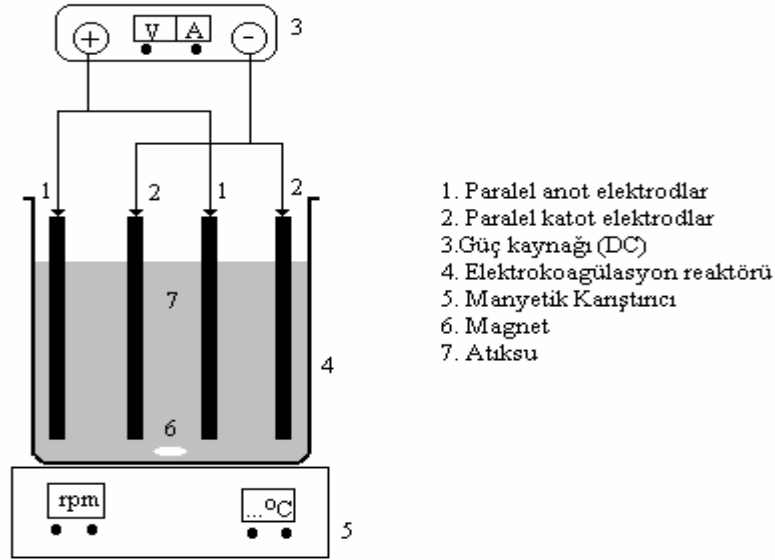
Redoks reaksiyonu ile üretilen H_2 flotasyon yoluyla, çözünmüş veya askıdaki maddeleri giderebilir. Fe^{3+} iyonları çözeltinin pH'sına bağlı olarak hidrasyon geçirebilirler ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ türleri asidik koşullar altında bulunurlar. İlgili reaksiyonlar aşağıdadır (Mollah ve diğ., 2001).



Alkali koşullar altında ayrıca Fe(OH)_6^+ ve Fe(OH)_4^+ iyonları da vardır (Mollah ve diğ., 2001). Hem anyonik hem de katyonik türlerin çözünen anot olarak demir plaka/çubuk kullanarak elektrokoagülasyonu oldukça kolay anlaşılır uygulamalardır.

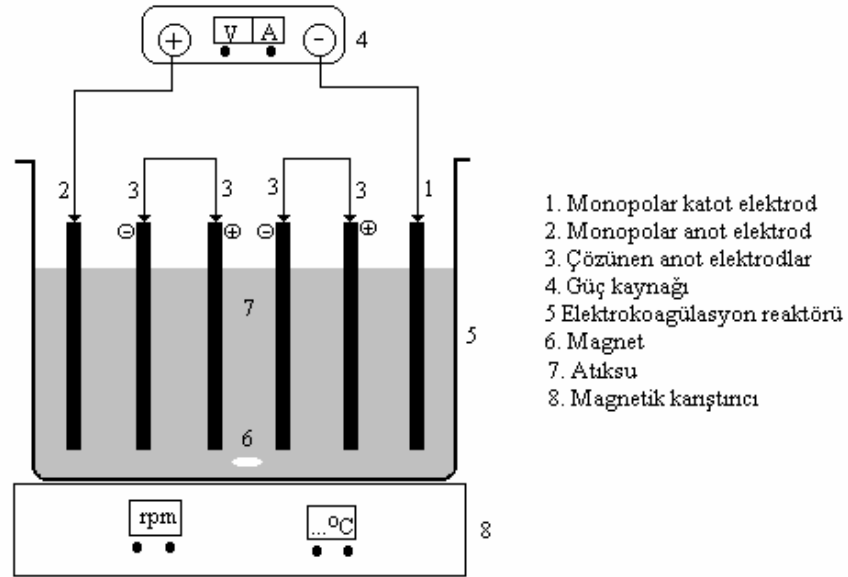
3.3. Elektrokoagülasyon Prosesinde Kullanılan Elektrot Bağlantı Tipleri

Bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşan basit bir EC reaktöründe, çözünen anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Bu durumda anotta oksidasyon olacağından anot materyali elektrokimyasal olarak çözünecektir. Bu arada katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Fakat bu durum atıksu arıtımı için uygun değildir; çünkü metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir. Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Çift anot ve katotdan ibaret paralel bağlı bir monopolar EC reaktörü Şekil 3.6’da görülmektedir (Delipınar, 2007).



Şekil 3.6. Paralel bağlı monopolar EC reaktörü (Delipınar, 2007; Mollah ve diğ., 2001).

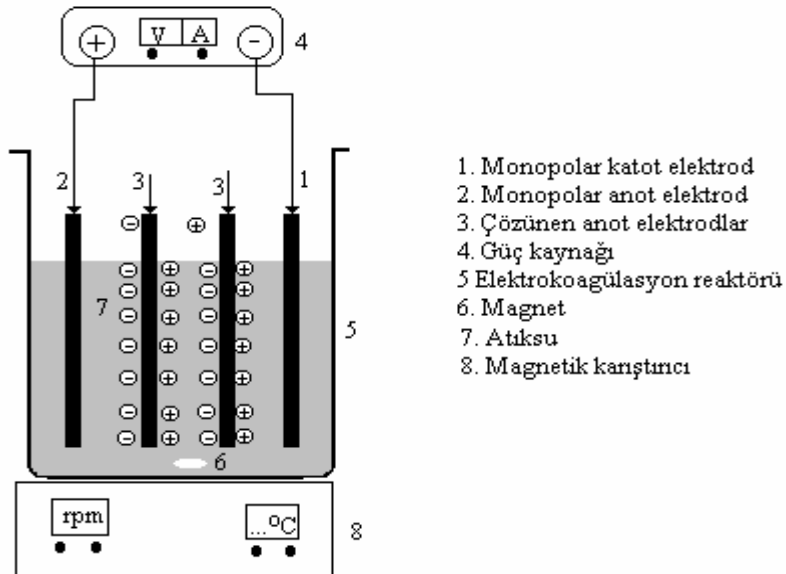
Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 3.7’de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Diğer taraftan ise monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır (Delipınar, 2007).



Şekil 3.7. Seri bağlı monopolar EC reaktörü (Delipınar, 2007; Mollah ve diğ., 2001).

Seri bağlı EC’de ortama verilecek akımın geçmesi için daha yüksek bir potansiyel fark uygulamak gerekmektedir. Çünkü seri bağlı EC reaktörlerinde direnç daha yüksektir. Bu yüzden reaktör içinde her yerde akım aynı değerdedir.

Bir diğer EC reaktöründe ise elektrotlar paralel çift kutuplu (bipolar) olarak bağlanmaktadır (Şekil 3.8). Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar yerleştirilmiştir. Bu EC reaktör şekli, prosesin kullanım ve işletim kolaylığı amacıyla düzenlenmiştir. EC reaktöründeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır.



Şekil 3.8. Paralel bağlı bipolar EC reaktörü (Delipınar, 2007).

EC reaktörlerinde doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) uygulanmaktadır. Doğru akım elektrokoagülasyon (DC) teknolojisinde; oksitlenmeden dolayı anot metaryalinde bir çözünme meydana getirirken, diğer tarafta yani katotta su geçirmeyen bir oksit tabakasının oluşmasına neden olmaktadır. Bu olay EC’de verim kaybına sebep olmaktadır. EC reaktöründe çözünen paralel plaka elektrotlar eklenerek doğru akım kayıpları bir ölçüde küçültülür. Ancak bir çok elektrokoagülasyon işleminde alternatif akım tercih edilmektedir (Scott, 1995; Mollah ve diğ., 2001; Delipinar, 2007).

Elektrokimyasal arıtım esnasında elektrotların anot tarafında anodik katot tarafında ise katodik reaksiyonlar oluşacaktır. Elektrotların iyon oluşturduğu sistemde demir ve alüminyum gibi çözünen metal levhalar kullanılabilir. Ortama çözünen bu metal levhalar çözeltide yüklü partikülleri nötralize ederek koagülasyon işleminin başlamasını sağlamaktadır. Elektrotlardan çözünen iyonlar, kimyasal reaksiyon gerçekleşmesi ile koloidal maddelerin çökmesine ve elektroflotasyonla reaktör yüzeyine çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca elektriksel alandan dolayı sudaki koloidal partiküller, yağlar veya diğer bileşiklerin ayrılması da sağlanmaktadır. EC’de anot ve katot reaksiyonları ve ortamda oluşacak serbest radikal türleri, reaktör içindeki su ve bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Tüm bu karmaşık elektrokoagülasyon işleminde kirleticiler atıksulardan uzaklaştırılarak arıtım yapılmış olunur (Eyvaz, 2005).

3.4. Elektrokoagülasyon Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokoagülasyonun avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Mollah ve diğ., 2001).

Elektrokoagülasyonun Avantajları

1. Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
2. Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
3. Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
4. Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağl su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
5. Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katılar içerir.
6. EC prosesleri, en küçük koloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
7. EC’de, kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddenin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olur.

8. Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, böylece daha kolay ayrılmaları sağlanır.
9. EC hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.
10. EC prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese ilave edilen güneş panellerinden temin edilebilir (Delipınar, 2007).

Elektrokoagülasyonun Dezavantajları

1. Çözünen 'harcanan elektrot' ların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
2. Bazı yerlerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.
3. Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosenin verimliliğini düşürebilir
4. Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir (Delipınar, 2007).

3.5. Elektrokimyasal Atıksu Arıtım Prosesleri

Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrooksidasyon (EO), elektroflotasyon (EF) ve elektrokoagülasyon (EC) prosesleri kullanılmaktadır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilir. Atıksuda bulunan kirleticilerin bu prosesler ile oksidasyonu, adsorbsiyonu veya reaktör yüzeyinde birikerek ayrımı sağlanmaktadır.

Elektrokimyasal atıksu arıtım proseslerini birbirinden ayıran en önemli özellik kirleticilerin giderilmesini sağlayan elektrokimyasal prosenin şekli ve yapısıdır. Bu durumu belirleyen kullanılan elektrotların özellikleridir. EO ve EF proseslerinde ortama karşı dayanıklı çözünmeyen inert metal veya metal alaşımlarından yapılmış elektrotlar kullanılmaktadır. Ortam özelliklerinin oldukça önemli olduğu ortamda elektrotlardan çıkan O₂ gazı ile organik maddelerin oksidasyonu gerçekleşmektedir. EF'de ise, oksidasyondan ziyade çıkan H₂ gazları yardımıyla kirleticilerin reaktör yüzeyinde toplanarak ayrılması sağlanır. EC'de, ortamda çözünen metal elektrotlar (Al ve Fe gibi) kullanılmaktadır. Bu elektrotlardan çözünen metal iyonları ortam koşullarına göre metal-polimer kompleksleri oluşturarak kirleticileri adsorplayarak koagüle olmaktadır. EC'da koagüle edilen partiküller atıksularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek onları adsorbe etmektedir. Böylece oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyon sonucu oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine çıkabilmektedirler. Bu yöntem renk, KOİ, toplam organik karbon, askıda madde ve ağır metallerin tekstil atıksularından giderilmesinde kullanılmaktadır (Romanov ve diğ., 2000).

EC prosesinde kirleticilerin kısmen de olsa elektrooksidasyonu gerçekleşmektedir. EC'nin kimyasal koagülasyon prosesine göre farkı; ortamdan kirletici gideriminin oksidasyon, koagülasyon ve flotasyon olaylarının birlikte olabilmesidir (Delipınar, 2007).

3.6. Elektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulama Alanları

Atıksu arıtımında Elektrokoagülasyon prosesi ilk olarak 1889'da İngiltere'de kullanılmıştır (Matteson ve diğ.,1995). Daha sonra ABD'de 1909'da demir ve alüminyum elektrotlar kullanılan bir elektrokoagülasyon prosesi ile atıksuların arıtımı ile ilgili bir patent alınmıştır. Büyük ölçekte içme sularının arıtımı elektrokoagülasyon ile 1946'da ABD'de uygulanmıştır. Demir elektrotlar kullanılarak 1956'da İngiltere'de nehir suları arıtılmıştır ve 1946 ve 1956 yıllarında yapılan iki araştırmada ise renk ve türbidite gideriminde yüksek kalitede arıtılmış su elde edilmiştir. Kimyasal koagülasyonla karşılaştırıldığında yüksek başlangıç yatırım maliyetinden dolayı o yıllarda pek kabul görmemiştir. Son zamanlarda, atıksu deşarj çıkışlarına getirilen sınırlamalardan dolayı EC yeniden gündeme gelmiştir. 1972'de EC ile gıda endüstrisi atıksuları arıtılmıştır. Bu çalışmada, Elektrokoagülasyon prosesi çözünmüş hava flotasyonu ile yapılan kimyasal dozlama prosesi ile karşılaştırılmıştır. Her iki proseste de flok oluşumu söz konusu olup, EC'de daha hızlı yoğun bir flokleşme gözlemlenmiştir. EC prosesi ile daha sonra kültürlerden mikroorganizmaların, atıksudan çözünmüş maddeler ve protein giderimi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Matteson ve diğ., 1995). 1980'de Rus bilim adamları atıksuların farklı metotlar ile arıtımını inceleyerek EC ile bu konudaki düşüncelere yeni bakış açıları getirmişler ve yağ-su karışımlarından yağı gidermişlerdir. Alüminyum elektrotlar kullanıldığında istenmeyen çökeltilerin oluşumu yukarıdaki çalışmaların ortak görüşüdür. EC sürecinde meydana gelen çökeltiler genellikle çok fazla metal hidroksit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu hidroksitler çözünen elektrot malzemesinden ileri gelmektedir. Eğer alüminyum elektrotlar kullanılıyorsa, sonuçta oluşacak çökeltiler çöp sahalarına boşaltılacaktır. EC'da bundan dolayı demir elektrotlar daha fazla tercih edilmektedir. Çünkü çöp deponi alanlarında ağır metal kirliliği ortaya çıkabilir. EC'da demir elektrot kullanması halinde Al elektrot kullanıldığı sistem kadar renk açısından bir şeffaflık sağlanamamaktadır. Çok az miktarda da olsa çözünmüş demir iyonları suda renk oluşumuna yol açmaktadır (Şanlı, 2006).

EC proseslerinde genellikle doğru akım (DC) ve doğru akım güç sağlayıcıları kullanılmaktadır. 1980'li yılların başında alternatif akım kullanan EC sistemleri üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Özellikle maden endüstrisinde oluşan kömür partikülleri ve süspanse killerin stabilitesi yani kararlılığının kırılmasında alternatif akımlı EC sistemi kullanılmıştır (EPA, 1993).

Ayrıca Elektrokoagülasyon bir çok endüstri de kullanılmış olup kağıt ve kağıt hamuru endüstrisinde, maden ve metal proses endüstrisinde, gıda, yağ, boya, maden sanayi atıksuları, organik madde içeren sızıntı suları, flor giderimi, lokanta, tekstil, sentetik deterjan ve maden üretim işlemleri atıksularının arıtımında kullanım alanları söz konusudur.

EC ile yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

EC ile özellikle tekstil atıksularının arıtımında büyük verimler elde edilmiştir. EC ile reaktif tekstil boyası (Remazol Red RB 133) çözeltilerinden renk giderimi (Can ve diğ., 2002) ve tekstil atıksularından KOİ ve türbidite giderimi araştırılmıştır (Koby ve diğ., 2003). Drimarene

Discharge X-3GL reaktif azo ve Samaron Yellow 4 dispers azo boyalarının, demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak gideriminin yapıldığı çalışmada, demir ve alüminyum elektrotlar ile reaktif boya gideriminde, boya konsantrasyonu artışına bağlı olarak giderme veriminin değişmediği görülmüştür. Dispers boya konsantrasyonu artışında ise demir elektrotlar kullanılması halinde renk giderme veriminin daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Do ve diğ., 1994).

Yapılan bir başka çalışmada Reaktif tekstil boyası çözeltilerinden (Levafix Orange E3 GA) renk giderimi ve türbidite giderimi araştırılmış ve bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum ve demir elektrotların kullanılmıştır. Çalışma sonunda pH: 3 için %99,99 boya giderme verimi elde edilirken, pH:11 için %76,58'lik bir verim elde edilmiştir (Uygun, 2003).

Öğütveren ve arkadaşları (1992), yaptıkları çalışmada Acilan Blau tekstil boyası, bipolar çelik Raching halkaları ve çözünür demir elektrotlar kullanılarak giderilmiştir. Bu çalışmada en iyi boya giderme verimi pH: 8,01'de %85-95 oranında elde edilmiştir. EC ile Orange II tekstil boyasının giderimi üzerine pH, karıştırma hızı, boya konsantrasyonu, elektrotlar arası mesafe, akım yoğunluğu, sıcaklık gibi parametre etkilerinin araştırıldığı diğer bir çalışmada ise (Daneshvar ve diğ., 2003), renk ve KOİ gideriminde sırasıyla %98 ve %84 bir verim elde edilmiştir. Tekstil boyası olan Acid Orange II'nin elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesi ile gideriminin incelendiği çalışmada ise EC verimi üzerine arıtım süresi, iletkenlik, hava akış hızı ve voltaj etkileri incelenmiştir. KOİ ve renk giderimi %99 ve %87 olarak gerçekleşmiştir (Xiong ve diğ., 2001).

Yüksek klor iyonu içeren bir tekstil atıksuyunun Ti/RuO₂, Ti/Pt ve Ti/Pt/Ir elektrotlar ile direkt veya indirekt elektrooksidasyonu neticesinde organik türlerin oksidasyonunda oldukça etkili olduğu görülmüştür. Başlangıç 6330 mg/l klor konsantrasyonu ve 960 mg/l COD içeriğine sahip atıksu 60 dakikalık elektrooksidasyon süresi sonucunda Ti/RuO₂, Ti/Pt ve Ti/Pt/Ir elektrotlar kullanılarak arıtılmış olup, sırasıyla %92, 87.5 ve 85.2 COD giderimi elde edilmiştir (Naumezyk ve diğ., 1994).

Congo Red, Acid Blue 2K, Acid-Bright Orange boya çözelti atıksularının elektrokimyasal arıtımında yükseltgenme ürünleri ve optimum giderme parametreleri tespit edilmiştir. Elektrooksidasyon süresi sonucunda boya giderme veriminin %60-70 ve arıtılmış suyun toksik özellik taşımadığı ifade edilmiştir (Yokovlev ve diğ., 1988).

Elektrokoagülasyonla entegre et ve et ürünleri tesisi atıksularının arıtımıyla ilgili yapılan bir çalışmada Al ve Fe elektrotları kullanılmış, Al elektrot kullanıldığında KOİ, yağ-gres ve türbidite gideriminde sırasıyla %77,47-%94,79-%94,87, Fe elektrot kullanıldığında KOİ, yağ-gres ve türbidite gideriminde sırasıyla, %76,73-%94-%94,2 verimler elde edilmiştir (Özyonar, 2007).

EC'nun çöp sızıntı sularının arıtımıyla ilgili yapılan bir çalışmada, katot olarak bakır plaka ve anot olarak ise alüminyum veya demir plaka kullanıldığı elektrokoagülasyon sistemi ile çöp sahası sızıntı suları arıtılmıştır (Tsai ve diğ., 1997). Çöp sahası sızıntı sularında %30-50 arası bir KOİ giderimi elde edilmiştir.

Yüksek KOİ: 292-4240 mg/l, BOİ₅: 58–2240 mg/l, SS: 13,2-1320 mg/l, yağ ve gres: 52,6-2100 mg/l içeriğine sahip lokanta (restaurant) atıksuları EC prosesi ile demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak başarılı bir şekilde arıtılmıştır. Çalışma sonucunda yağ ve gres, SS, KOİ ve BOİ₅ için giderim veriminin sırasıyla %94,4-99,9, %84,1-99, %68-94,5 ve %59,3-93,4 olduğu rapor edilmiştir (Chen ve diğ., 2000).

KOİ: 80-190 mg/l, SS: 45-85 mg/l, türbidite: 7,5-18,5 NTU, iletkenlik: 1150-1750, sertlik:165-185 mg/l CaCO₃, alkalinite: 350-460 mg/l içeriğine sahip büyük bir kimyasal fiber tesisi atık sularının üç çift demir elektrot kullanılarak arıtıldığı çalışmada (Lin ve Lin, 1998). EC ile KOİ giderimi %70-85 arasında, aynı atıksu kimyasal koagülasyon ile %20-30 arası KOİ giderimi gerçekleştirilmiş ve EC prosesi çıkış suları ilave iyon değiştirici sistem kullanılarak deşarj standartları sağlanmıştır.

Kil içeren çözeltilerden kil partiküllerinin gideriminin yapıldığı bir çalışmada ise (Holt ve diğ., 2002), kesikli bir elektrokoagülasyon reaktörünün matematiksel olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Al elektrotların kullanıldığı sistemde 0,25 A’de giderme verimi %86, 2 A’de ise %40 oranında flotasyon ve koagülasyonun bir arada aynı sistemde gerçekleştiği rapor edilmiştir.

KOİ: 900 mg/l ve SS: 340mg/l olan bir şehir atıksuyu EC ve EF sisteminin birlikte kullanıldığı ve akış hızı 1 m³/saat olacak şekilde arıtılmıştır (Pouet ve Grasmick, 1995). KOİ, SS ve türbidite giderim verimleri sırasıyla %75, %85 ve %90 olarak bulunmuştur.

Demir elektrotlar kullanılarak EC ve FeCl₃, FeSO₄ demir tuzları ile kimyasal dozlama yapılarak sulu çözeltilerden kaolin partiküllerinin giderildiği çalışmada (Larue ve Vorobiev, 2003). pH: 5-6 arasında giderme veriminin maximum olduğu rapor edilmiştir.

İçme sularının arıtımında etkili yeni bir proses olarak tanımlanan EC ile ayrıca maden ve çöp sızıntı atık suları da arıtılmıştır. E-coli gideriminin oldukça iyi olduğu ifade edilmiştir. Maden sızıntı sularından kobalt 9,95 mg/l’ den 0,006 mg/l değerine, çöp sızıntı sularından ise demir derişimi 130 mg/l ‘den 0,015 mg/l ‘ye değerine düşürülmüştür (Mills, 2000).

Hafif tuzlu ve acı suların EC metoduyla ile arıtılmasının araştırılması amacıyla demir elektrotların kullanıldığı sistemden %75’lık sertlik giderimi elde edilmiştir (Sanfan, 1991).

Endüstriyel yumurta proses atık sularının kimyasal koagülasyon ve EC ile arıtımı gerçekleştirildiği diğer bir çalışmada ise KOİ, türbidite ve toplam süspanse katı madde giderimi sırasıyla %90, %97 ve %95 olmuştur (Xu ve diğ., 2002).

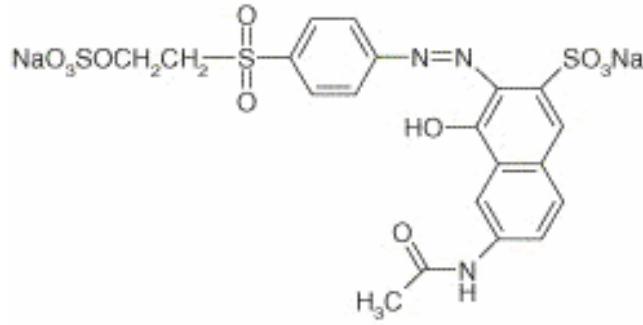
Ozonlama ve elektrokoagülasyon ile tekstil atıksularının arıtımının yapıldığı çalışmada, ozonlama ile %95-99 renk ve %60 oranında KOİ giderim elde edilirken, EC ile renk % 80-100 ve KOİ %70-80 arasında giderim değerlerine ulaşılmıştır. EC prosesi çıkış suyu KOİ değeri 123 mg/l olarak tespit edilmiştir (Ciardelli ve Rabieri, 2001).

4. MATERİYAL ve METOD

4.1. Materyal

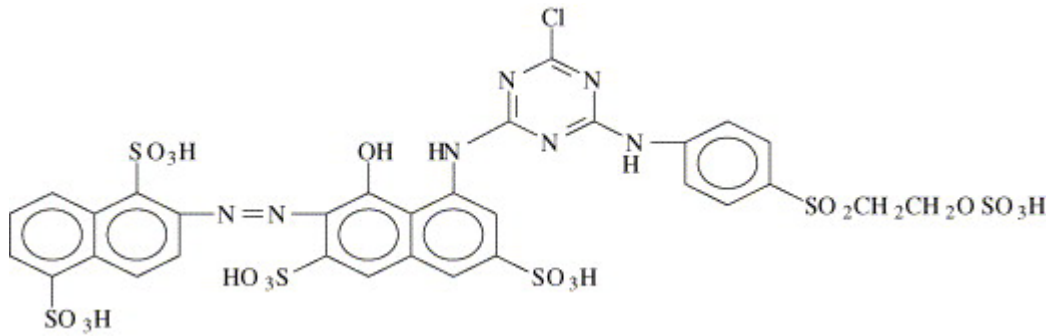
Bu çalışmada, ticari amaçlı olarak kullanılan reaktif tekstil boyalarının (Remazol Brilliant Orange 3R spec gran (reactive orange 16), Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)) elektrokoagülasyonla arıtılabilirliği incelenmiştir.

EC deneylerinde DyStar firmasının Türkiye’deki dağıtıcı firmasından temin edilen reaktif tekstil boyaları kullanılmış olup bu boyaların kimyasal yapıları Şekil 4.1. ve 4 .2’de kimyasal, fiziksel ve ekolojik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Remazol Brilliant Orange 3R spec gran (reactive orange 16)

Şekil 4.1. Kullanılan reaktif tekstil boyasının kimyasal yapısı (Baldrian ve Snajdr, 2006).



Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)

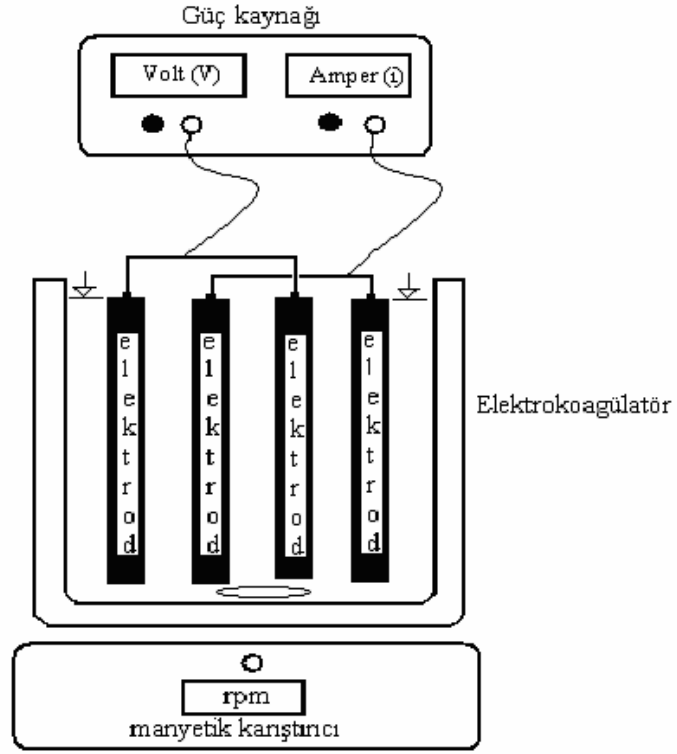
Şekil 4.2. Kullanılan reaktif tekstil boyasının kimyasal yapısı (Lü ve Chiou, 2005).

Çizelge 4.1. Kullanılan reaktif tekstil boyalarının özellikleri

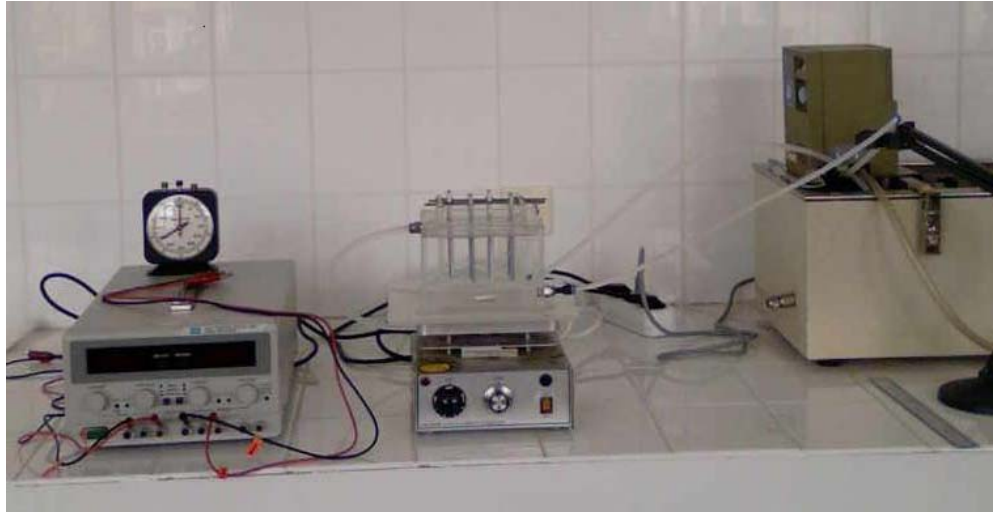
Parametre	Özellik	
Colour index numarası	Rective Orange 16	Rective Red 239
Chromophore	Azo	Azo
Reaktif Anchor sistemi		
Molar kütlesi (hidrolize olmamış)		
λ_m (nm)	492	516
Saf boya yüzdesi	55-60	25-35
Su da çözünürlüğü 293 K (g/l)	>50	
Akut oral toxicity LD ₅₀ (mg/kg)	2000	5000
Balık toxicity LC ₀ (mg/l)	>500	>500
pH miktarı(10 g/l su da)	6	~5,5
COD miktarı (mg/g)	850	737
BOI ₅ miktarı (mg/g)	11	-
DOC miktarı (mg/g)	304	-
Temin edildiği Firma	DyStar	DyStar

4.2. EC Deneyi Düzeneği ve EC Deneyleri

Elektrokoagülasyon (EC) deneyleri Şekil 4.3’de gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrollü, dijital bir güç kaynağı (GPC 6030D DC power supply) ile sağlanmıştır. Karıştırma manyetik bir karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. EC deneylerinde kullanılan 100 x 100 x 130 mm boyutlarındaki reaktör çift cidarlı olup, plexiglasstan yapılmıştır. Reaktör ceketli olarak tasarlanıp elektrot potansiyeli etkisi ile ısınan elektrolitin sıcaklığı 25 °C’de sabit tutulmuş ve bu sabit sıcaklık değeri bir su sirkülatörü ile sağlanmıştır (Şekil 4.4). Reaktörde her bir deneyde 750 ml boya çözeltisi kullanılmıştır. Reaktörde monopolar paralel bağlı şekilde 2 anot ve 2 katot olmak üzere 4 elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 20 mm aralıklarla yerleştirilmiş ve tamamen çözeltiye batırılmış durumdadır. Elektrot materyali olarak 43x50x3 mm boyutlarında, 129 cm² aktif yüzey alanına sahip alüminyum ve demir plakalar kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum plakalar, Al: %99,53; Si: %0,12; Fe: %0,25 içeriğine, demir plakalar ise %99,32 Fe içeriğine sahiptir.



Şekil 4.3. Elektrokoagülasyon deney düzeneği şematik görünüşü



Şekil 4.4. Deneysel çalışmada kullanılan elektrokoagülasyon deney düzeneği görünüşü.

4.3. Deneysel İşlem

Elektrotlar, elektrokoagülasyon reaktörüne yerleştirildikten sonra reaktöre 750 ml. elektrolit (boya çözeltisi) konulmuştur. Güç kaynağı üzerinde istenen akım ve voltaj ayarlaması yapıldıktan sonra deneysel çalışmalara başlanmıştır. Deney bitiminden hemen sonra reaktörden

alınan numuneler çift kat kaba filtre kâğıdından süzölmüş ve süzölen numuneler daha sonra analiz edilmiştir.

Her deneyden önce elektrotlar deney süresince elektrot yüzeyinde biriken kir ve pasları gidermek için önceden hazırlanan temizleme çözeltisinde 1-5 dakika bekletilmiştir. Temizleme çözeltisi olarak %35 'lik 100 ml HCl ve % 2.8 'lik 200 ml hekzametilen tetramin ((CH₂)₆N₄) çözeltisi kullanılmıştır (Do ve Chen, 1994).

pH ayarlaması için 0.1 M HCl veya 0.1 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. İletkenlik ayarlaması Na₂SO₄ tuzu ile yapılmıştır. EC sonunda tüm çözelti ve çamur karışımı oda sıcaklığında kaba filtre kâğıdından süzölmüş ve etüvde 103 °C'de 1 saat kurutularak çamur ağırlığı hesaplanmıştır.

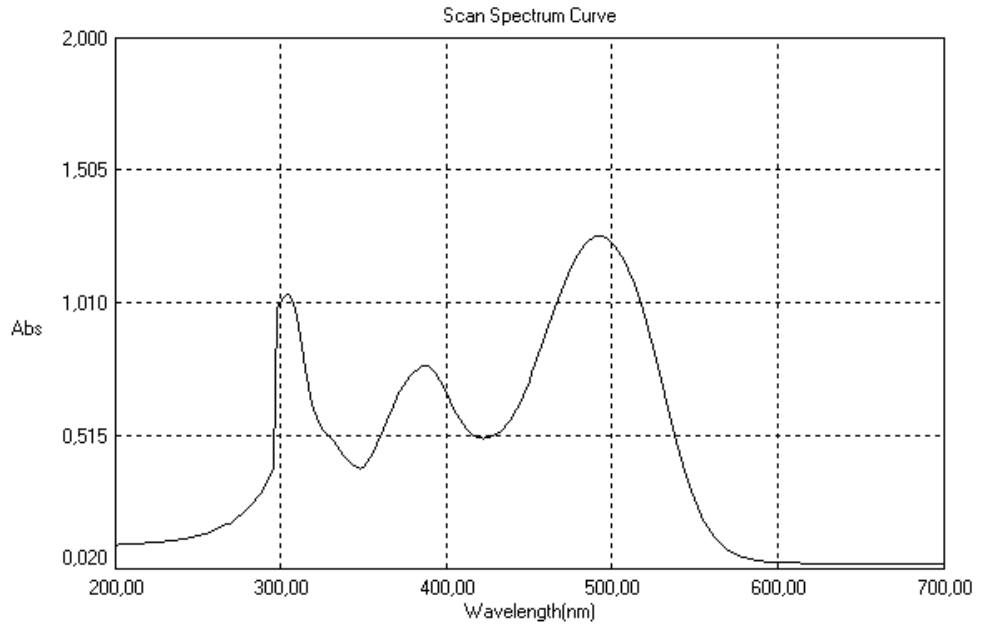
4.4. Analitik Metotlar

4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi

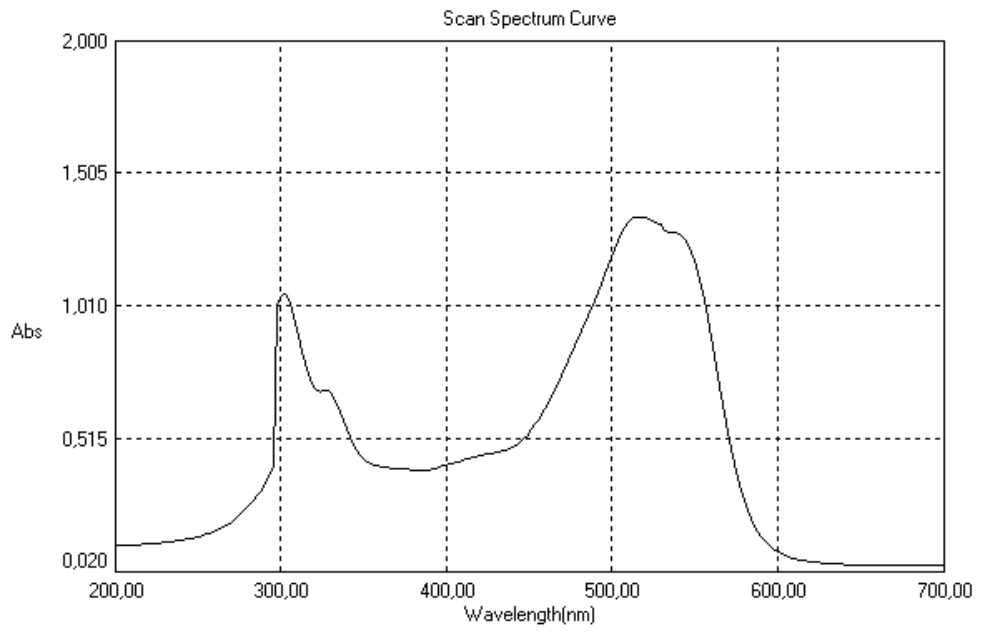
Çalışmalarda kullanılan farklı konsantrasyonlarda boya çözeltileri saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Chebios marka optimum-one UV-VIS spektrofometre' de, boyaların maksimum dalga boyları (reactive orange 16 λ_m =492 nm, reactive red 239 λ_m =516 nm) tespit edilmiştir. Farklı pH 'larda boya çözeltilerinin maksimum dalga boyunda bir değişim olmadığı görölmüştür. Boyaların absorbans dalga boyu grafikleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Tespit edilen maksimum dalga boyunda kalibrasyon eğrileri hazırlanmıştır (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Giriş ve çıkış boya konsantrasyonları ölçölerek renk giderme verimi (R) aşağıdaki formöl ile hesaplanmıştır:

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (4.1)$$

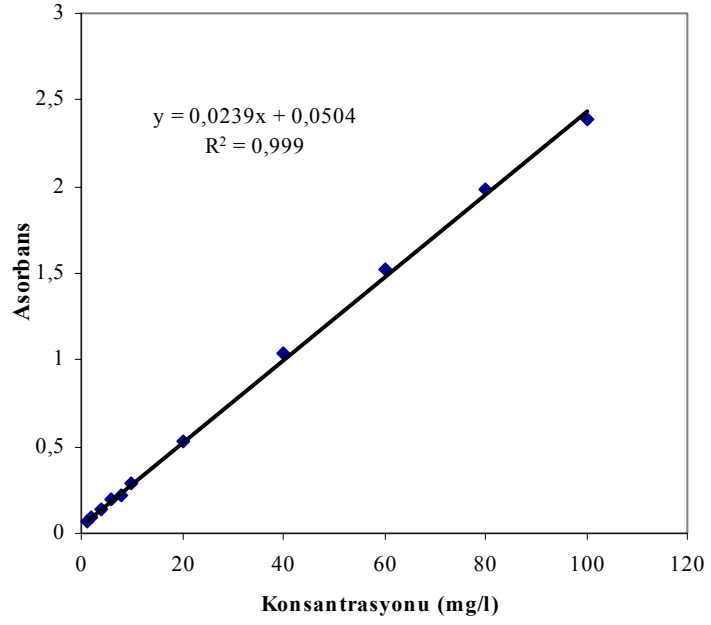
Bu eşitlikte C₀ ve C_t sırasıyla başlangıç ve herhangi bir t anındaki boya konsantrasyonunu ifade etmektedir.



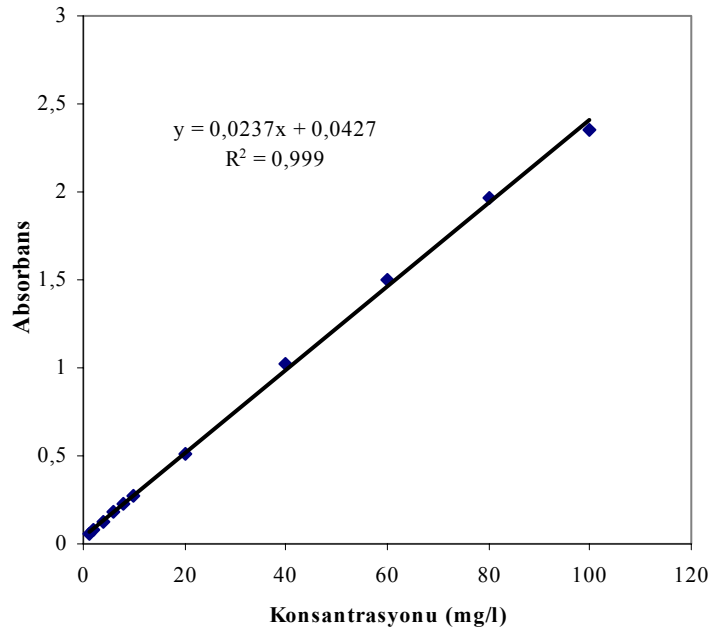
Şekil4.5. Remazol Brilliant Orange 3R spec gran boyasının 200-700 nm arası absorbanısı.



Şekil4.6. Remazol Ultra Red RGB boyasının 200-700 nm arası absorbanısı



Şekil4.7. Remazol Brilliant Orange 3R spec gran için absorbans-konsantrasyon arasındaki kalibrasyon eğrisi ($\lambda=492\text{nm}$).

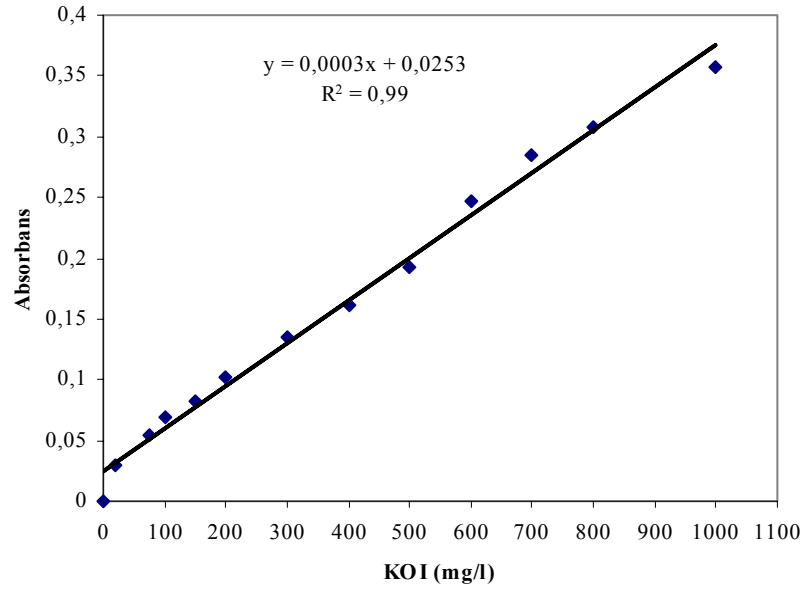


Şekil4.8. Remazol Ultra Red RGB için absorbans-konsantrasyon arasındaki kalibrasyon eğrisi ($\lambda=516\text{nm}$).

4.4.2. KOI Ölçümü

KOI ölçümleri, Standart Metotlarda ifade edilen “Open Reflux” kolorimetrik metoda göre yapılmış olup KOI ölçümü öncesinde Merck marka Spectroquant TR320 model termoreaktör

kullanılmıştır. KOI absorbans ölçümü Chebios marka optimum-one UV-VIS spektrofometre’ de yapılmış ve kalibrasyon ergisi potasyum hidrojen ftalat standart çözeltisinden (20-1000 mg O₂/l KOI) hazırlanmıştır. “Open Reflux” kolorimetrik metoda göre hazırlanan potasyum hidrojen ftalat standart çözeltisinden (20-1000 mg O₂/l KOI) bir standart eğri hazırlanmış olup Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Absorbans-KOI kalibrasyon eğrisi .

4.4.3. Türbidite Ölçümü

Türbidite ölçümleri standart metodlarda belirtilen analiz yöntemlerine (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater) göre yapılmıştır. Türbidite ölçümü Water Proof marka MicroTPI arazitipi türbidimetre’de ölçülmüştür.

4.4.4. pH ve İletkenlik Ölçümleri

pH ve iletkenlik, ölçümleri standart metodlarda belirtilen analiz yöntemlerine (Standard Methods for Examination of Water and Wastewater) göre yapılmıştır. pH ölçümleri, Consort marka C931 Model pH-metre ile, iletkenlik ölçümleri ise WTW Marka 340İ model arazi tipi iletkenlik cihazı ile ölçülmüştür

4.5. Hesaplamalar ve Kullanılan Eşitlikler:

Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (4.1)$$

Burada; J: Akım yoğunluğu, A/m²,

I: Akım şiddeti, Amper,

A: Aktif anot yüzey alanı, m²'dir.

Akım Verimi: Anotta çökecek maddenin mol miktarı elektrolizin faraday kanunuyla hesaplanır ve m ile gösterilir.

$$m = \frac{I \cdot t}{n \cdot F} \quad (4.2)$$

Burada; I: Akım şiddeti, Amper,

t: Zaman, sn.

n: İyon yükü (alüminyum için ve demir için 3+) ,

F: Faraday sabiti (96485 C mol⁻¹) olarak tanımlanır.

Buradan anot elektrottaki teorik çözünme miktarı, M_{ATe} (g) hesaplanır

$$M_{ATe} = m \cdot (MA) \quad (4.3)$$

MA: Molekül ağırlığı (alüminyum için 26.982 g, demir için 55.85 g) 'dır.

$$E = \frac{M_A}{M_{ATe}} \quad (4.4)$$

Bu eşitlikte; E: Akım verimi, M_A: Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı (g) 'dır.

Toplam çözünen alüminyum ve demir miktarı (M_T): Toplam çözünen Al ve Fe miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$M_T = M_A + M_K \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte; M_K: pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı (g) 'dır.

Enerji Tüketimi: Harcanan elektrik enerjisini Watt saat (Wh) cinsinden aşağıdaki verilen eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (4.6)$$

Burada; E: Elektrik enerjisi (Wh) ,V: volt, I: akım şiddeti (A), t. zaman (saat)'dir.

Faraday/m³ : Faraday aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$(\text{Faraday} / \text{m}^3) = \frac{I \cdot t}{F \cdot v} \quad (4.7)$$

Burada, I: akım şiddeti (Amper), t: Zaman (sn), v: Elektrolit hacmi (m³)

5. DENEYSEL BULGULAR

Bu çalışmada reaktif tekstil boyaları Remazol Brilliant Orange 3R spec gran (reactive orange 16) ve Remazol Ultra Red RGB (reactive red 239)'nin sulu çözeltileri, alüminyum ve demir elektrotları kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada her iki boya çözeltisi için paralel adımlar izlenmiş olup elektrokoagülasyonla renk, KOİ ve türbidite giderimleri üzerine pH, akım yoğunluğu, iletkenlik, zaman, boya konsantrasyonu gibi parametrelerin etkisi araştırılmış olup, her bir elektrot için bu parametrelerin etkileri aşağıda detaylı olarak ele alınmıştır.

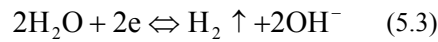
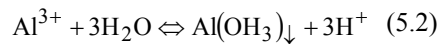
5.1. Remazol Brilliant Orange 3R spec gran Boya Çözeltisinin Alüminyum ve Demir Elektrot ile Elektrokoagülasyonu

5.1.1. Elektrokoagülasyon Üzerine pH 'ın Etkisi

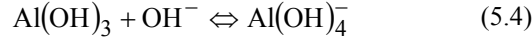
Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH etkisini belirlemek amacıyla 100 A/m² akım yoğunluğu ve 20 dakika elektrokoagülasyon süresi ve 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi, 1000 µS/cm iletkenlik başlangıç şartları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elektrokoagülasyon prosesi üzerine başlangıç pH'ın etkisini belirlemek amacıyla pH aralığı 3-9 olarak seçilmiştir. Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak yapılan bu çalışmada elektrotlar sisteme monopolar–paralel bağlanarak elektrokoagülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda Elektrokoagülasyon üzerine pH'ın etkisinin incelendiği çalışmalar sonucunda da renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri araştırılmıştır.

Sulu çözelti içerisinde anot ve katot reaksiyonları sonucu çözeltinin pH değerinde değişimler meydana gelmektedir. Çözelti pH'ına bağlı olarak çözünen metal iyonları farklı pH değerlerinde farklı metal hidroksit türleri oluştururlar (Mollah, 2001). Örneğin alüminyum elektrotları kullanılan elektrokoagülasyon prosesinde pH dengesi değişimi anot ve katotta meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile kontrol edilmektedir.

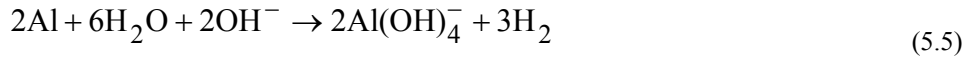
Anotta alüminyum yükseltgenirken, katotta ise su indirgenmektedir.



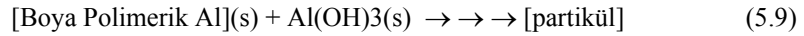
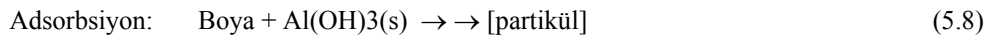
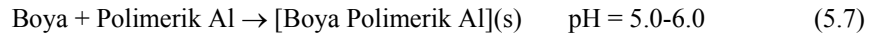
- Katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen oluşumu ve hidroksit birikmesi sonucu pH artmaktadır.
- Al(OH)₃ çok yüksek pH'larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı aşağıdaki eşitlikte de gösterildiği gibi mevcut OH⁻ iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH'ını düşürmektedir (Can ve diğ., 2003).



Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerin pH'ları bir süre sonra pH 9 değerine kadar artmakta (eşitlik 5.3), bu değer üstüne çıkamamaktadır. pH 9'un üzerindeki çözeltilerde ise deneyden bir süre sonra 5.4 reaksiyonu gereği pH 9 değerinde ortam dengelenmektedir. Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde anot elektrottaki elektrokimyasal çözünmenin dışında, katotta H₂ çıkışı sırasında üretilen OH⁻ iyonlarının kimyasal atakları sonucu elektrotlarda kimyasal çözünme meydana gelmektedir (Chen, 2000).



Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları, pH'a bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur (Can, 2002). Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler ve bunun sonucunda bir çok monomerik ve polimerik alüminyum türleri ortaya çıkmaktadır. En çok bilinen **monomerik** türler; Al(OH)^{2+} , Al(OH)_2^+ , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, Al(OH)_4^- , ve en çok bilinen **polimerik** türler; $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ 'dir. Değişik türlerin oluşma oranları renk giderme prosesinde önemli bir rol oynar. Boya molekülleri ve hidroliz ürünleri arasında, mevcut iyon çeşidine ve ortamın pH 'sına bağlı olarak bunların oranları arasında aynı zamanda birkaç etkileşme mekanizması mümkündür. Son yıllarda var olduğu düşünülen asıl etkileşme mekanizması farklı pH aralıkları için çökeltme ve adsorbsiyon olduğu ifade edilmektedir. Düşük pH aralığında flokülasyonla çökeltme, pH > 6.5 olduğu aralıklarda adsorbsiyonla renk giderimi gerçekleşir (Rebhun ve diğ., 1993).

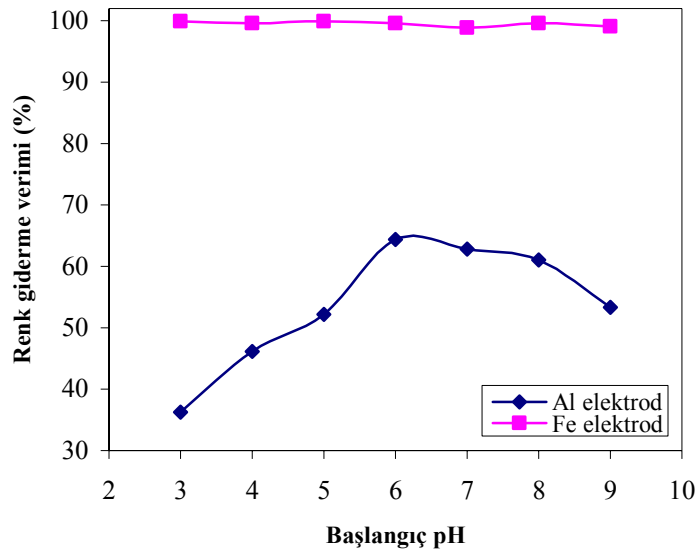


Demir elektrotların kullanılması sonucu bu materyalin anodik çözünmesi sonucu çözeltide oluşan Fe⁺² ve Fe⁺³ iyonları elektrokoagülasyon reaktöründe Fe(OH)_n floklarının meydana gelmesine neden olur. Elektrokoagülasyon proseslerinde demir elektrotunun kullanılması durumunda, kirleticilerin yük dengesinin bozunması çeşitli pH'lardaki demir komplekslerinin oluşması sonucu meydana gelir ve yük dengesi bozulan kirleticiler demir hidroksit türleri ile birleşerek çökelti oluştururlar (Mollah ve diğ., 2001; Benefield ve diğ., 1982).

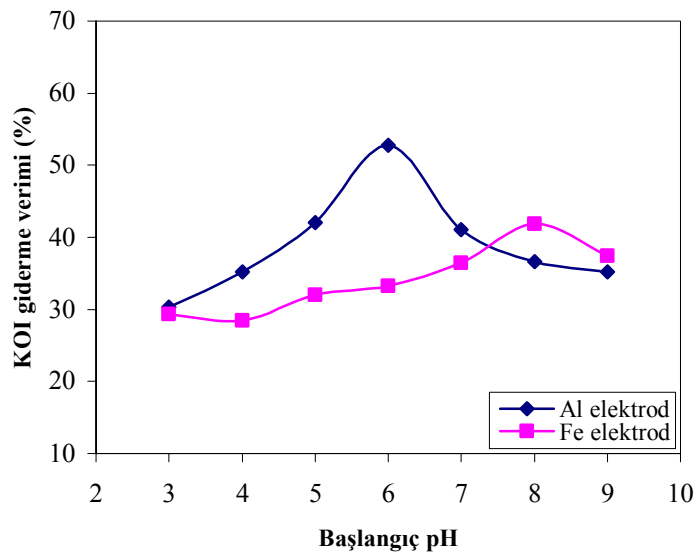
Yüksek alkali şartlarda (pH'larda) demir kompleksleri Fe(OH)₆ ve Fe(OH)₄ iyonları şeklinde bulunabilir. Meydana gelen demir hidroksit türlerinde çökelebilen, flok oluşumunda ve

kirletici absorbe etmekte etkili olan türün $\text{Fe}(\text{OH})_3$ olduğu, en kararlı pH aralığı olan 8-8,5 değerlerinde en iyi giderme verimlerinin elde edildiği bildirilmektedir (Çiftçi, 2007).

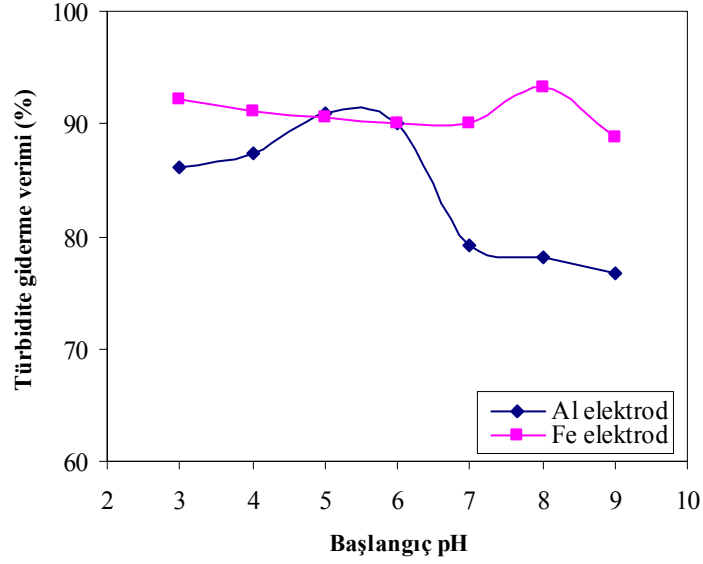
Bu çalışmada, Remazol Brilliant Orange 3R spec gran boya çözeltisi elektrokoagülasyonu üzerine başlangıç pH'nın etkisi için elde edilen sonuçlar, demir ve alüminyum elektrotlar için Şekil 5.1 (a), (b), (c) ve çizelge Ek.1, Ek.2'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.1. Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH'nın renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

Elektrokoagülasyon deneylerinde kullanılan Al ve Fe elektrot için renk, KOİ, ve türbidite giderimlerinin pH değişimine bağlı olduğu şekilden görülmektedir. Al elektrot için giriş pH'sının 3,4,5,6 olduğu durumda renk giderme verimi %36,23-%64,42 değerlerinde gerçekleşmiştir. Giriş pH'sını 6 olduğu durumda renk giderme verimi Al elektrotu için %64,42 ile en yüksek değeri sağlamış ve pH'ın artarak (son pH) 7,40'te son bulunduğu görülmüştür. pH: 6'ya kadar renk giderme verimindeki artış şöyle açıklanmıştır, deney esnasında sırasıyla (5.6), (5.7), (5.8) ve (5.9) no'lu denklemlerinin oluşma pH'larından geçtiğinden boya gideriminde hepsinin etkisini gösterdiği düşünülmektedir. Giriş pH'sının 7,8,9 olduğu durumda renk giderme verimi %53-62 dolaylarında gerçekleşmiş ve pH'ın artarak yaklaşık 8,5-9 değerlerinde son bulunduğu görülmüştür. Deney pH'sı 7,8,9 dan yaklaşık 9'a artarken sadece (5.8), (5.9) nolu denklemlerin oluşma pH'larından geçtiğinden renk gideriminde (5.6) ve (5.7) no'lu denklemlerin etkisi görülmemekte, bu durum renk giderme veriminin pH'ya göre daha düşük gerçekleşmesine neden olmuştur (Şekil 5.1 (a)). pH: 6 değerinde KOİ gideriminin %52,78 ile en yüksek giderme verimine sahip olduğu görülmektedir. KOİ giderme verimindeki değişimin renk giderme verimindeki değişimle paralellik gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.1 (b)). Türbidite giderme verimi % 90,86 ile pH: 5'te en yüksek giderme verimine ulaştığı pH: 6'da ise bu verimin çok az bir değişimle % 90,12'ye düştüğü görülmektedir. pH 7,8,9 değerlerinde türbidite gideriminin yaklaşık %77 dolaylarında

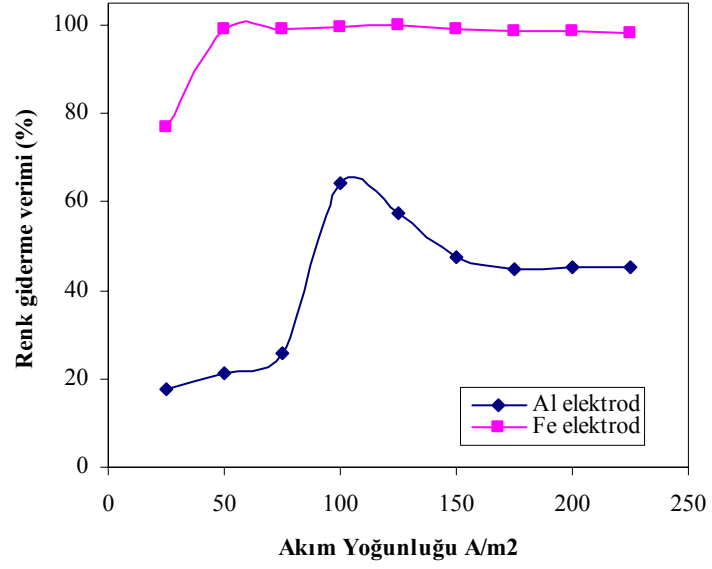
gerçekleşmiş olması da daha önce açıklandığı gibi bu pH aralıklarında sadece adsorbsiyon olayının gerçekleşmesi şeklinde düşünülebilir (Şekil 5.1 (c)). Bu üç parametredeki giderme verimi birlikte değerlendirildiğinde Al elektrot için başlangıç pH değerinin 6 seçilmesine karar verilmiştir. Deneysel işlemler sonucunda tüm başlangıç pH değerlerinin elektrokoagülasyon prosesi sonunda arttığı gözlenmiştir. Bununla nedeni çözelti içerisinde OH^- iyonlarının artmasıdır.

Fe elektrot kullanılması durumunda renk giderme veriminin tüm başlangıç pH değerlerinde yüksek olduğu ve yaklaşık % 99 oranında gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 5.1 (a)). KOİ giderme verimine bakıldığında ise en yüksek verimin %41,85 'le pH: 8'de olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.1 (b)). pH: 8 için türbidite giderme verimine bakıldığında %93,19 ile en yüksek giderme verimine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 5.1 (c)). Bu üç parametredeki giderme verimleri dikkate alındığında Fe elektrot için başlangıç pH değerinin 8 olarak seçilmesi uygun görülmüştür. Al elektrotta olduğu gibi Fe elektrotta da deneysel işlemler sonucunda başlangıç pH değerinin arttığı gözlenmiştir.

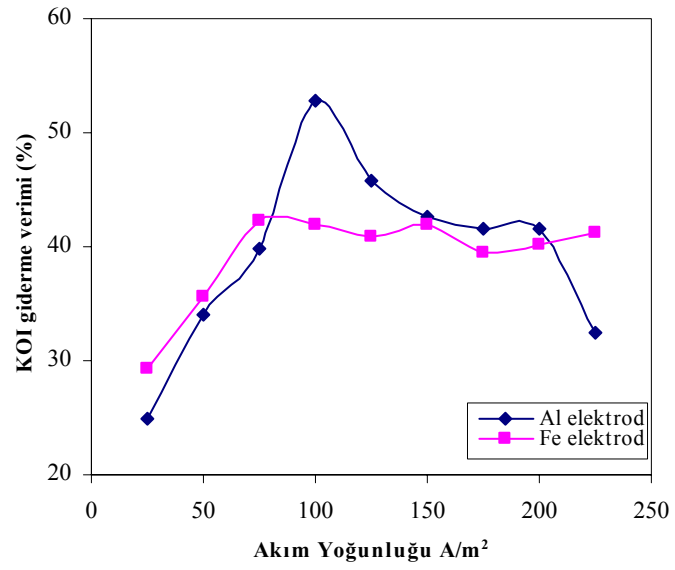
5.1.2. Elektrokoagülasyon Üzerine Akım Yoğunluğu'nun Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu iyon hareketleri önemli olduğundan akım ve bu nedenle de akım yoğunluğu sistemin işletilmesinde bakılması gereken önemli bir parametredir. Elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin uzaklaştırılması kimyasal koagülasyon prensiplerine dayanmaktadır (Çiftçi, 2007).

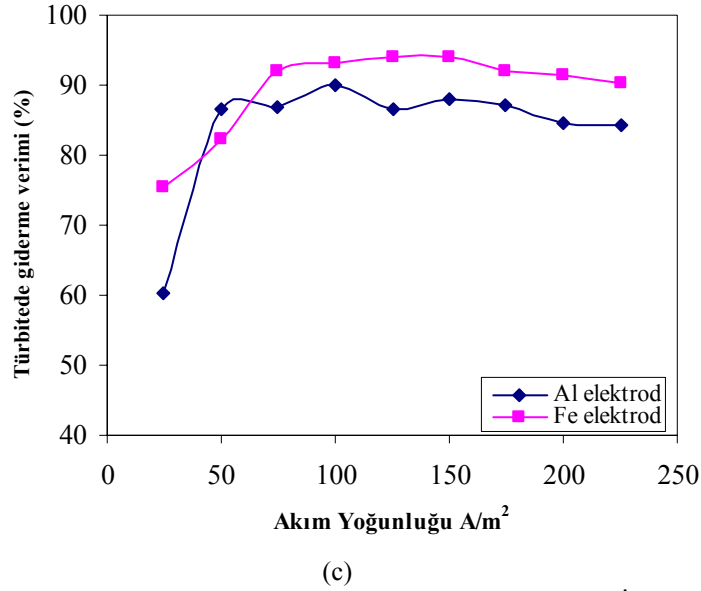
Elektrokoagülasyon prosesinde renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine akım yoğunluğunun etkisini belirlemek amacıyla sisteme 25-225 A/m^2 aralığında akım yoğunluğu uygulanmıştır. Akım yoğunluğu deneyleri alüminyum elektrotları için pH:6, demir elektrotları için pH:8, 20 dakika elektrokoagülasyon süresi 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi ve 1000 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlik başlangıç şartları altında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.2. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.3, Ek.4'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)
Şekil 5.2. Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

Akım yoğunluğunun elektrokoagülasyon prosesi üzerine etkisi incelendiğinde alüminyum elektrot için maksimum renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri en yüksek 100 A/m² akım yoğunluğunda gerçekleşmiştir. Renk için en yüksek giderme verimi %64,42, KOİ için %52,78 ve türbidite için %90,12 olarak elde edilmiştir (şekil 5.2). Deneysel sonuçlardan görüleceği gibi akım yoğunluğunun 100 A/m² olduğu noktaya kadar 20 dakikalık sürede renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu, 100-225 A/m² arasında ise giderme veriminin çok az bir düşüş gösterdiği ve %45 civarında sabit kaldığı görülmektedir. Akım yoğunluğu 25’den 225 A/m²’ye artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 6,03’ten 35,05’e artmaktadır, enerji tüketimi ise 0,85 kwh/m³’den 45,16 kwh/m³’e artmaktadır. Bunun sonucu olarak akım yoğunluğunun enerji tüketimine ve ayrıca elektrotlar arası potansiyel farkına etki ettiğinden enerji tüketimini de doğrudan etkilemektedir. Enerji ve alüminyum tüketimi göz önüne alınarak en uygun akım yoğunluğu 100 A/m² alınmış olup bundan sonraki tüm deneyler bu akım yoğunluğunda yürütülmüştür.

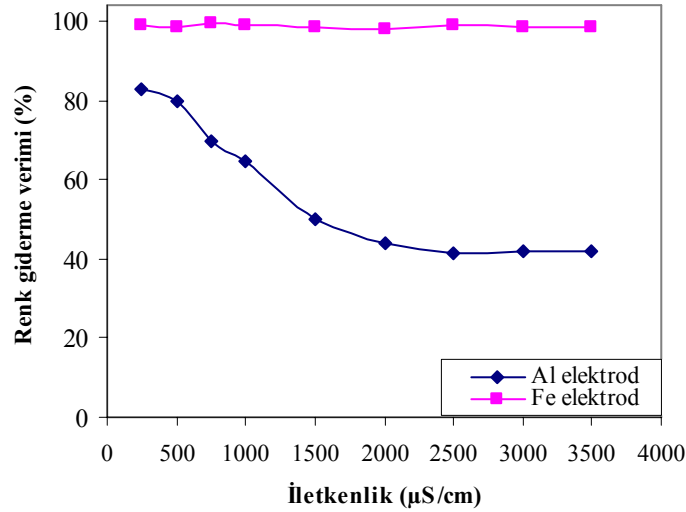
Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrot kullanıldığında sonuçlardan görüleceği üzere akım yoğunluğunun 50 A/m² olduğu noktaya kadar renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu (%76-%98), 50-225 A/m² arasında ise bu artışın bariz bir şekilde yavaşladığı ve sabit kaldığı görülmektedir (%99-%98) (Şekil 5.2 (a)). KOİ giderme verimine bakıldığında ise en yüksek verimin % 42,26 ile 75 A/m²’de gerçekleştiği görülmektedir (şekil 5.2 (b)). Türbidite giderme verimi ise 75-225 A/m² akım yoğunluklarında yaklaşık %90-%94 oranında bir giderim verimi göstermiştir (şekil 5.2 (c)). Akım yoğunluğu 25’den 225 A/m²’ye artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 7,07’den 39,75’e, enerji tüketimi ise 1,0 kwh/m³’den 51,21 kwh/m³’e artmaktadır. Akım yoğunluğunun artması enerji ve elektrot tüketimini dolayısıyla maliyeti artırmaktadır, bu

nedenle renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri için en uygun akım yoğunluğunun 75 A/m^2 olarak seçilmesine karar verilmiştir. 75 A/m^2 akım yoğunluğunda renk, KOİ ve türbidite giderim verimleri sırasıyla %99,07, %42,26, %91,89 şeklinde gerçekleşmiştir

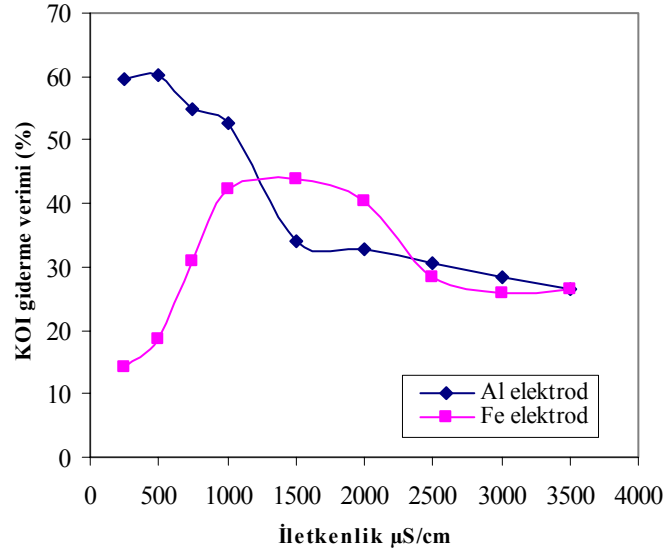
5.1.3. Elektrokoagülasyon Üzerine İletkenliğin Etkisi

Atıksuların arıtımında çözeltinin iletkenliği elektrokimyasal prosesler için önemli bir ektendir. Elektrokimyasal prosesler elektrot yüzeyinden çözeltiye ve çözelti içinde heterojen iyon transfer reaksiyonlarına dayanmaktadır (Öğütveren ve Koparal, 1992).

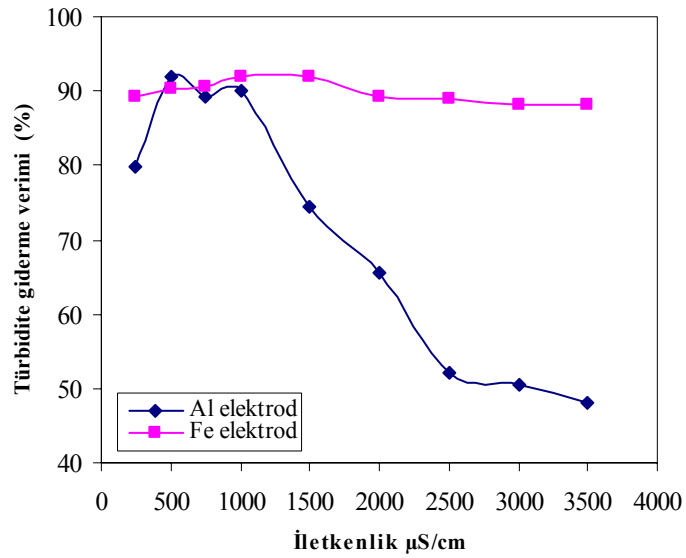
Elektrokoagülasyon prosesinde çözelti iletkenliğinin giderme verimlerine etkisini incelemek amacıyla boya çözeltisinin iletkenliği, Na_2SO_4 destek elektroliti ilavesi ile 250-3500 $\mu\text{S/cm}$ aralığında incelenmiştir. İletkenlik deneyleri Al elektrot için pH:6, akım yoğunluğu 100 A/m^2 , Fe elektrot için pH:8, akım yoğunluğu 75 A/m^2 , 20 dakika elektrokoagülasyon süresi 250 rpm karıştırma hızı ve 300 mg/l boya çözeltisi başlangıç şartları altında gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde çözelti iletkenliğinin giderme verimlerine etkisini incelendiği renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.3. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.5, Ek.6'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.3. Elektrokoagülasyon prosesinde iletkenliğin renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

İletkenliğin elektrokoagülasyon prosesi üzerine etkisi incelendiği deneysel çalışmada alüminyum elektrot için maksimum renk giderme veriminin 250 $\mu\text{S/cm}$ 'de (%82,95) gerçekleştiği, 250-3500 $\mu\text{S/cm}$ aralığındaki artışa paralel olarak renk giderme verimindeki düşüş ve 2500

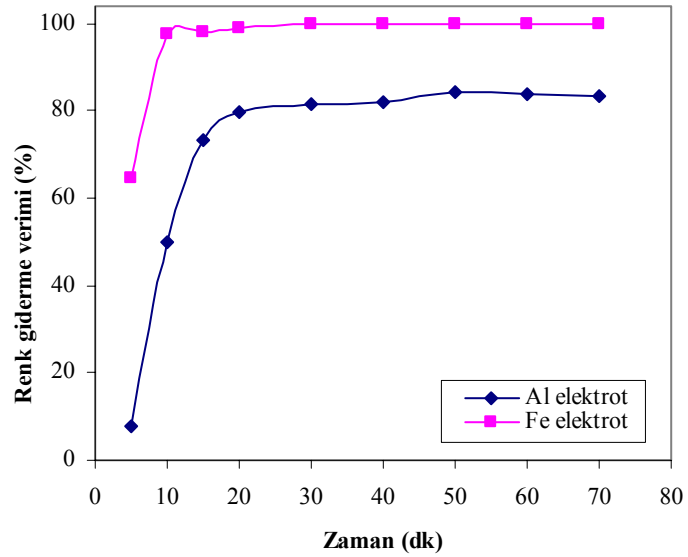
$\mu\text{S}/\text{cm}$ 'nin üzerindeki değerlerde ise bu düşüşün dengeye ulaştığı görülmektedir (şekil 5.3 (a)). İletkenlik deneylerde çözelti iletkenliğindeki artış elektrotlar arası potansiyelin düşmesine neden olmaktadır. İletkenlik 250 'den 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel 33,2'den 7,07 V'a azalmaktadır. Bu sonuç göz önüne alındığında renk giderme verimi ve buna paralel olarak potansiyel farktaki azalışla birlikte giderme verimlerindeki düşüşün, 9,36 V'un altındaki değerlerde bir dengeye vardığı görülmektedir. Renk giderme verimlerindeki düşüş iletkenlik artışıyla potansiyel farkının azalması sonucu anodik oksidasyonun azalmasından dolayıdır. Elektrokimyasal prosesin kullanıldığı sistemlerde etkili olan elektrokoagülasyon, elektroflasyon ve elektrooksidasyon mekanizmalarının aynı anda gerçekleşebileceği belirtilmiştir (Lin ve Peng, 1994). İletkenliğin etkisinin araştırıldığı bu aşamada 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'den sonra renk giderme verimindeki düşüşün dengeye ulaşması potansiyel farkının 9,36 voltun altına düştüğü noktadan itibaren elektrooksidasyonun etkisini yitirdiği şeklinde açıklanabilir. Çözünen metal anotların uygulandığı bir elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen metal hidroksitler boyayı adsorblarken, anotta boyanın kısmen direkt oksidasyona uğradığını gösteren bazı bulguların varlığı belirtilmiştir (Scott, 1995). KOİ giderme verimlerine bakıldığında 250 ve 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de sırasıyla %59,56, %60,2 ile en yüksek giderme verimlerinin elde edildiği ve bundan sonraki değerler için verimin düştüğü görülmektedir (şekil 5.3 (b)). Türbidite giderme verimine bakıldığında ise en yüksek giderme verimlerinin 250 ve 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de elde edildiği (%90-91), bundan sonraki iletkenlik değerlerinde ise renk ve KOİ giderimine paralel olarak düştüğü görülmektedir (şekil 5.3 (b)). Renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri göz önünde tutulduğunda Al elektrot için iletkenlik 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak seçilmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrot kullanıldığında renk giderme veriminin en yüksek %99,32 ile 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de ikinci en yüksek değerin ise %99,07 ile 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de gerçekleştiği bununla beraber diğer iletkenlik değerlerinde de verimin % 98'in üzerinde olduğu görülmektedir (şekil 5.3 (a)). İletkenlik deneylerinde çözelti iletkenliğindeki artış elektrotlar arası potansiyelin düşmesine neden olmaktadır. İletkenlik 250 'den 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel 36,14'den 6,27 V'a azalmakla birlikte, iletkenliğe bağlı olarak renk giderme kapasitesi çok fazla değişmemiştir. Giderme verimlerinin çok yüksek çıkması ve değişmemesi anottaki oksidasyonun bütün iletkenlik değerlerinde kimsen artışı şeklinde yorumlanabilir. KOİ giderme verimi en yüksek 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de %43,81 ikinci en yüksek değerin ise %42,26 ile 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlikte gerçekleştiği görülmektedir (şekil 5.3 (b)). Türbidite giderme verimine bakıldığında ise en yüksek giderme veriminin %91,89 ile 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlikte olduğu tespit edilmiştir (şekil 5.3 (c)). Bu üç parametre göz önünde tutulduğunda Fe elektrot için en uygun iletkenlik değerinin 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak alınmasına karar verilmiştir.

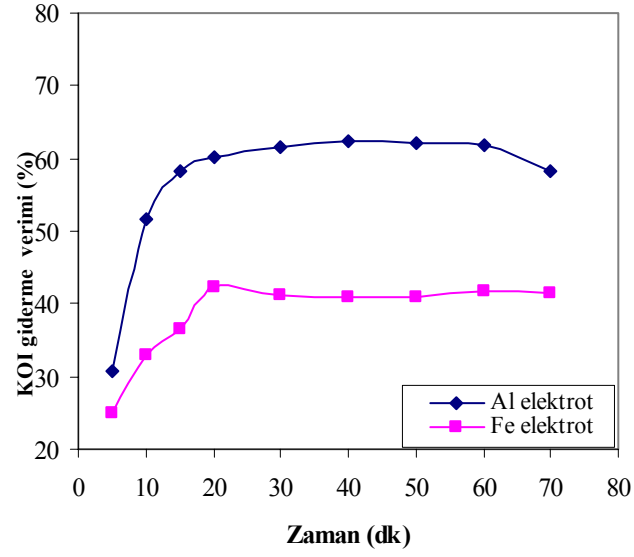
5.1.4. Elektrokoagülasyon Üzerine Zamanın Etkisi

Elektrokoagülasyon işleminde renk, KOİ ve türbidite gideriminde rol oynayan alüminyum ve demir hidroksitlerin oluşumu ve miktarları zamana bağlı olduğundan giderme verimleri açısından zaman parametresi oldukça önemlidir.

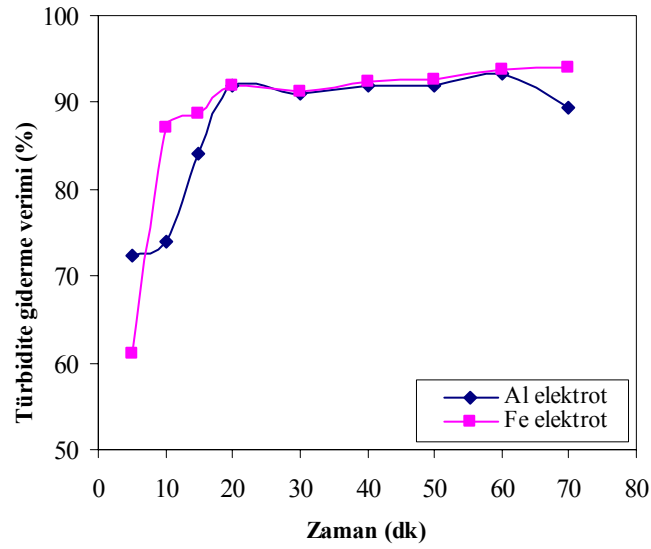
Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 5-70 dakikalar arası çeşitli sürelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Al elektrot için pH:6, akım yoğunluğu 100 A/m², iletkenlik 500 µS/cm, Fe elektrot için pH:8, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 1000 µS/cm, 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi başlangıç şartları altında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.4. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.7, Ek.8’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.4. Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

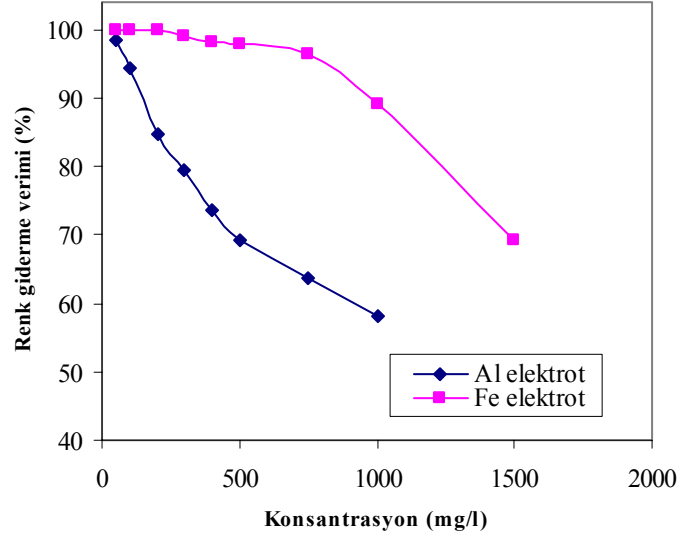
Elektrokoagülasyon deneylerinde Al elektrot üzerine zamanın etkisi incelendiğinde renk giderme veriminin 5 dakikada %7,7, 5 dakika sonra verimin hızlı bir artış göstererek 10 dakikada %49,86, 20 dakikada ise %79,55 değerine ulaştığı ve 20 dakikanın üzerindeki sürelerde

verimin sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 5.9 (a)). KOİ ve türbidite giderimlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.9 (b)(c)). 20 dakikada optimum giderme verimlerine ulaşıldığı için Al elektrotlar en uygun zaman periyodu olarak başlangıç değerlerinde alındığı üzere 20 dakika olarak belirlenmiştir.

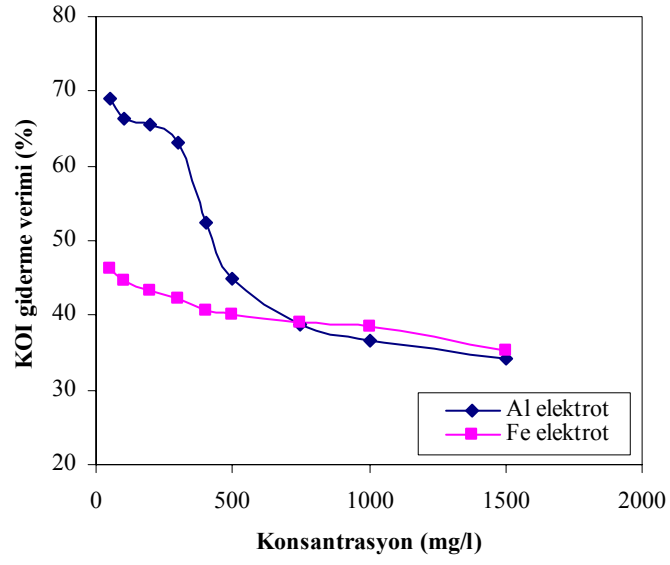
Fe elektrot için zamanın elektrokoagülasyon prosesi üzerine etkisinin incelendiği deneysel sonuçlarda 5-10 dakikalar arası renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu ve renk giderme veriminin 5 dakikada % 64,53, 10 dakikada ise % 97,81 olarak gerçekleştiği bu dakikadan itibaren bu artışın yavaşladığı 70 dakika sonunda % 99,81'e ulaştığı görülmektedir (şekil 5.4.(a)). KOİ giderme veriminin 20 dakikaya kadar sürekli bir artış gösterdiği, 20 dakikada % 42,26 ile en yüksek değerine ulaştığı ve bu dakikadan itibaren çok az bir düşüşle sabitlendiği tespit edilmiştir (şekil 5.4.(b)). Türbidite giderme veriminde de renk giderimine paralel olarak 5-10 dakikalar arasında hızlı bir artış ve bu artışın 10-70 dakikalar arsında yavaşladığı ve 70 dakikada ise en yüksek değere ulaştığı görülmektedir (%94,26) (şekil 5.4.(c)). Bu üç kirlilik parametresindeki giderme verimleri göz önünde tutulduğunda 20 dakikadan sonra verimlerde fazla bir değişiklik olmadığı bu nedenle Fe elektrot için elektrokoagülasyon süresinin başlangıç şartlarında olduğu gibi 20 dakika alınmasına karar verilmiştir. 20 dakikada renk giderme verimi %99,07, türbidite giderme verimi ise %91, 89 olarak tespit edilmiştir.

5.1.5. Elektrokoagülasyon Üzerine Boya Konsantrasyonunun Etkisi

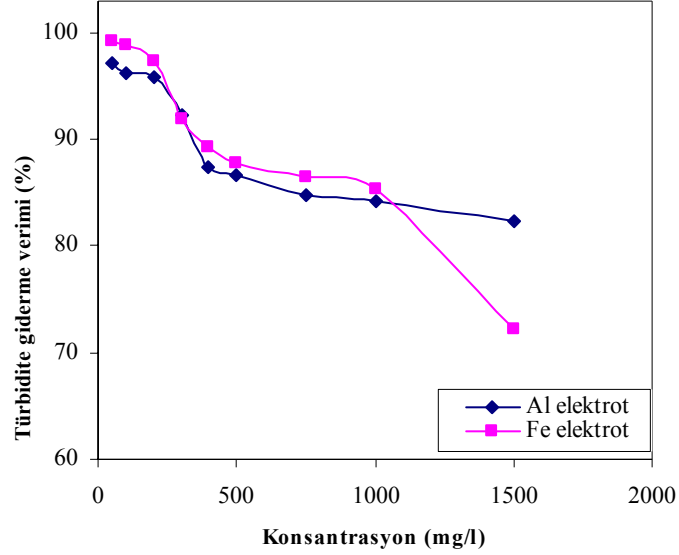
Elektrokoagülasyon prosesi üzerine boya konsantrasyonunun etkisi 50-1500 mg/l boya konsantrasyon aralığında incelenmiştir. Deney şartları Al elektrot için pH:6, akım yoğunluğu 100 A/m², iletkenlik 500 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika, Fe elektrot için pH:8, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 1000 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika, 250 rpm karıştırma hızı başlangıç şartlarında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyse ilgili deney sonuçları Şekil 5.5. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.9, Ek.10'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.5. Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç boya konsantrasyonunun, renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

Al elektrot için elektrokoagülasyon deney verileri incelendiğinde, renk giderme veriminin 50 mg/l boya konsantrasyonunda %98,31 olduğu, konsantrasyon artıkça verimin düşmeye başladığı, 500 mg/l'de %69,17 olduğu ve verimin düşmeye devam ederek 1500 mg/l'de %48,23 değerine ulaştığı görülmektedir (şekil 5.5.(a)). KOİ gideriminde 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda verimin en yüksek %68,89 olarak elde edildiği, başlangıç boya konsantrasyon değerinin artmaya başlamasıyla verimin düşmeye başladığı (500 mg/l'de %44,78) ve bundan sonraki başlangıç boya konsantrasyonu değerlerinde de verimin düşmeye devam ederek 1500 mg/l boya konsantrasyonunda %34,28 değerine düştüğü görülmektedir (şekil 5.5.(b)). Türbidite giderme verimine bakıldığında ise 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda en yüksek giderme veriminin %97,13 olduğu bu değerden sonra verimin düşmeye başladığı ve 1500 mg/l boya konsantrasyonunda ise %82,33'lik bir giderme veriminin elde edildiği görülmektedir (şekil 5.5.(c)).

Fe elektrot için elektrokoagülasyonun boya konsantrasyonunun etkisinin incelendiği deneysel sonuçlardan 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda %99,98'lik renk gideriminin sağlandığı görülmektedir. Renk gideriminin 750 mg/l'de %96,27'ye düştüğü bundan sonraki, konsantrasyonlarda düşüşün artarak devam ettiği görülmektedir (şekil 5.5.(a)). 50 mg/l boya konsantrasyonunda KOİ giderme verimi %46,12 olarak gerçekleşirken 1500 mg/l'de verimin %35,27'ye düştüğü görülmektedir (şekil 5.5.(b)). Türbidite giderme verimi ise 50 mg/l boya

konsantrasyonunda %99,17 olarak gerçekleşirken 1500 mg/l'de ise giderme verimin %72,18'e düştüğü görülmektedir (şekil 5.5.(c)).

Sonuç olarak bakıldığında sabit elektrokoagülasyon şartlarında renk giderme verimi boya konsantrasyonu artıkça Al ve Fe elektrotların her ikisinin kullanılması durumunda da düşmektedir yorumu yapılabilir. Boya konsantrasyonunun renk giderme verimine etkisinden dolayı kg boya giderimi için enerji tüketimi değişmektedir.

5.1.6. Elektrokoagülasyon Prosesinde Enerji Tüketimi ve Maliyet

Elektrokoagülasyon prosesinde maliyeti oluşturan iki unsur enerji ve elektrot maliyetidir.

Enerji hesabı $E=V.I.t$ formülüne göre kWh olarak hesaplanmaktadır. Akım yoğunlundaki artışın (akım ve voltaj miktarı arttığı için) ve elektrokoagülasyon süresinin enerji tüketimini doğrudan artırdığı, iletkenlik miktarındaki artışın ise verilen voltaj miktarında düşüşe sebep olduğu için dolaylı olarak enerji tüketimi azalttığı yapılan deneysel çalışmalarda tespit edilmiştir.

Elektrot maliyeti ise elektrotlardan kopan miktarlara göre hesaplanmıştır. Elektrotlarda kopmalara neden olan en önemli iki faktör akım yoğunluğu ve elektrokoagülasyon süresidir ve her ikisinde artması harcanan elektrot miktarını ve dolayısıyla da maliyeti artırmaktadır.

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrot kullanıldığında, optimum koşullar göz önünde tutulduğunda (300 mg/l boya çözeltinde, pH:6, akım yoğunluğu 100 A/m², iletkenlik 500 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika) enerji tüketiminin 8,61 Wh olduğu, toplam işletme (enerji+elektrot maliyeti) maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından bakıldığında sırasıyla 1,489 \$/m³, 6,238 \$/kg boya, 9,687 \$/kg KOİ değerleri elde edilmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrot kullanıldığında ise, optimum koşullar göz önünde tutulduğunda (300 mg/l boya çözeltinde, pH:8, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 1000 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika) enerji tüketiminin 6,13 Wh olduğu, toplam işletme maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından bakıldığında sırasıyla 0,957 \$/m³, 1,698 \$/kg boya, 4,657 \$/kg KOİ değerleri elde edilmiştir. Al ve Fe elektrotlar için enerji tüketimi ve maliyetleri çalışmanın tamamı göz önüne alındığında irdelenen bütün değişken parametreler için hesaplanmış ve ilgili çizelgelerde sunulmuştur.

5.1.7 Elektrokoagülasyon Prosesinde Çamur Oluşumu

Elektrokoagülasyon prosesinde çamur oluşumunu etkileyen faktörler şu şekilde açıklanabilir. Al ve Fe hidroksit türlerinin çeşitliliği ve miktarlarını değiştirdiği için pH değişimi ve akım yoğunluğudur. Aynı zamanda elektrokoagülasyon süresinin değişimi de elektrotların süreç içerisinde kopma miktarlarını değiştirdiğinden oluşan çamur miktarlarını etkilemektedir.

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrot kullanıldığında, 300 mg/l boya çözeltinde, optimum koşullarlarda 2,22 kg/m³ çamur oluşmuştur.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrot kullanıldığında ise, 300 mg/l boya çözeltinde, optimum koşullarda 1,62 kg/m³ çamur oluşmuştur. Al ve Fe elektrotlar için çalışmanın tamamı göz önüne alındığında irdelenen bütün değişken parametrelerde oluşan çamur miktarları hesaplanmış ve ilgili çizelgelerde sunulmuştur.

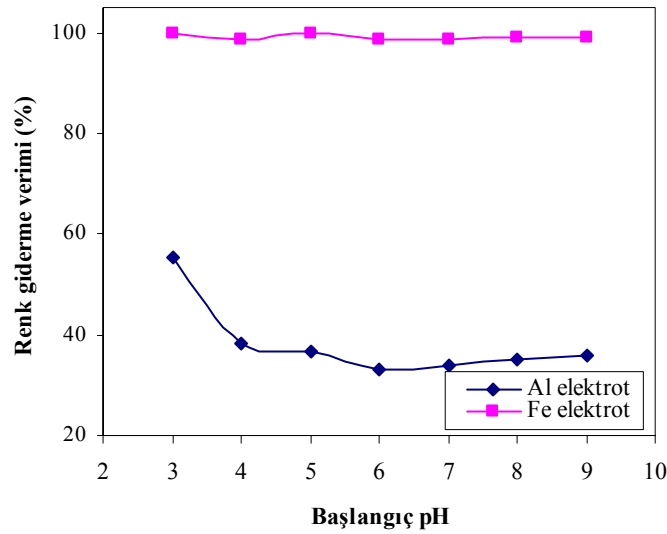
5.2. Remazol Ultra Red RGB Boya Çözeltisinin Alüminyum ve Demir Elektrot ile Elektrokoagülasyonu

5.2.1. Elektrokoagülasyon Üzerine pH 'ın Etkisi

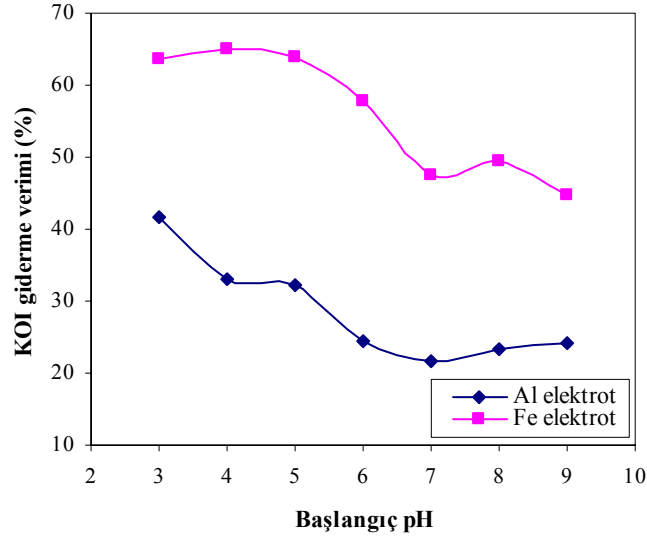
Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH etkisini belirlemek amacıyla 100 A/m² akım yoğunluğu ve 20 dakika elektrokoagülasyon süresi ve 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi, 1000 µS/cm iletkenlik başlangıç şartları altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda elektrokoagülasyon prosesi üzerine başlangıç pH'ın etkisini belirlemek amacıyla pH aralığı 3-9 olarak seçilmiştir. Alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak yapılan bu çalışmada elektrotlar sisteme monopolar–paralel bağlanarak elektrokoagülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda da renk, KOİ, ve türbitide giderme verimleri incelenmiştir.

pH'nın sulu çözeltideki etkileri ve reaksiyonlara bölüm 5.1.1'de ayrıntılı olarak değinilmiştir.

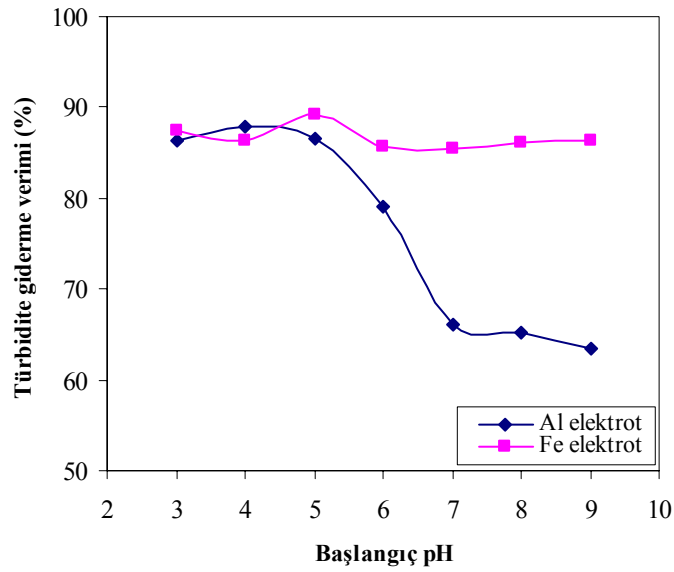
Bu çalışmada, Remazol Ultra Red RGB boya çözeltisi elektrokoagülasyonu üzerine başlangıç pH'nın etkisi için elde edilen sonuçlar, demir ve alüminyum elektrotlar için Şekil 5.6 (a), (b), (c) ve çizelge Ek.11, Ek.12'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6. Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç atıksu pH'nın renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

Elektrokoagülasyon deneylerinde Al elektrot kullanılması durumunda pH'nın etkisine bakıldığında pH: 3 değerinde renk giderme verimi %55,46 ile en yüksek değerde olduğu, diğer pH değerlerinde ise verimlerin düştüğü (%33-%38) ve yaklaşık sabit değerlerde kaldığı görülmüştür (Şekil 5.6 (a) ve (b)). pH:3'te renk giderme veriminin en yüksek değerde olmasının sebebi şu şekilde açıklanabilir, pH:3'ten pH:7'ye artarken deney esnasında sırasıyla (5.6), (5.7),5.8) ve (5.9)

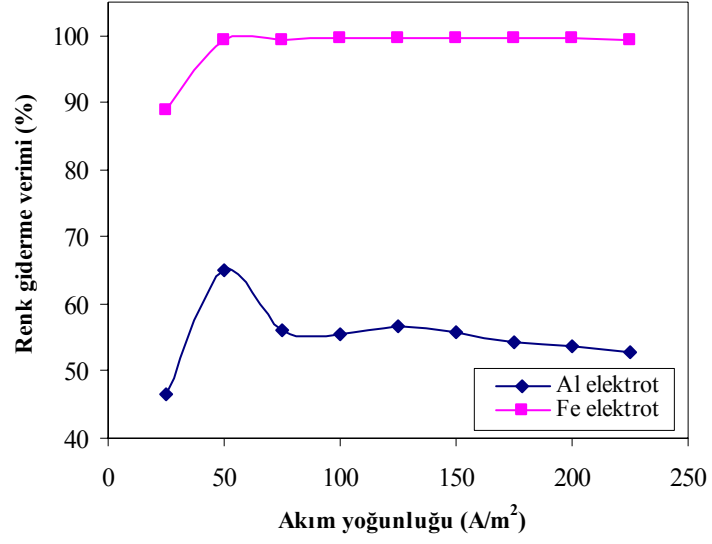
no'lu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden renk gideriminde çökelme ve adsorpsiyon mekanizmalarının her ikisinde etkisini gösterdiği söylenebilir. pH:4-9 değerlerinde ise pH:3'ten farklı olarak önemli derecede bir düşüşün gerçekleştiği ve bu durumun yalnızca (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH'larından geçtiği şeklinde açıklanabilir. KOİ giderme veriminde giriş pH'sının 3 olduğu durumda %41,60 ile en yüksek giderme verimi elde edilmiştir. Türbidite giderme verimine bakıldığında ise en yüksek giderme verimleri pH 3-5 aralığında gerçekleşmiş olup (%86-87), diğer pH aralıklarında ise türbidite giderme veriminin düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 5.6 (c)). Her üç parametre için giderme verimleri bakıldığında Al elektrot için başlangıç pH değeri 3 olarak seçilmiştir.

Fe elektrot kullanılması durumunda renk giderme veriminin tüm başlangıç pH değerlerinde çok yüksek olduğu (%99) yani pH'ın renk giderme verimini fazla etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 5.6 (a)). KOİ giderme verimine bakıldığında ise pH 3-5 aralığında %63-%65 dolaylarında bir giderme veriminin elde edildiği, diğer pH değerlerinde ise verimin düştüğü görülmektedir (Şekil 5.6 (b)). Türbidite giderme veriminin ise bütün pH değerlerinde %85'in üzerinde olduğu, en yüksek giderme verimin ise %89,26 ile pH:5'te olduğu şekilden görülmektedir (Şekil 5.6 (c)). Üç kirlilik parametresindeki giderme verimleri ortak olarak değerlendirildiğinde kullanılan boyanın başlangıç pH değerinin 5 olarak seçilmesine karar verilmiştir. Aynı pH aralığında renk giderme verimi %99,64, KOİ giderme verimi ise %63,8 olarak bulunmuştur.

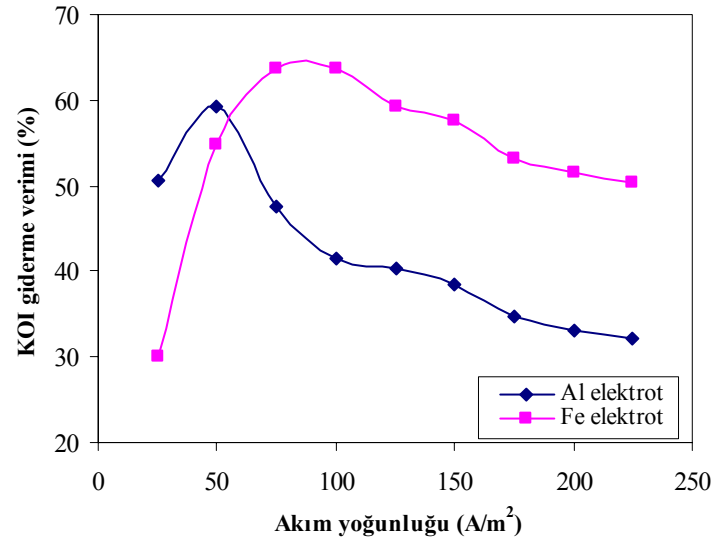
Her iki elektrot içinde deneysel işlemler sonucu pH değerlerinin artışı gözlemlenmiştir.

5.2.2. Elektrokoagülasyon Üzerine Akım Yoğunluğu'nun Etkisi

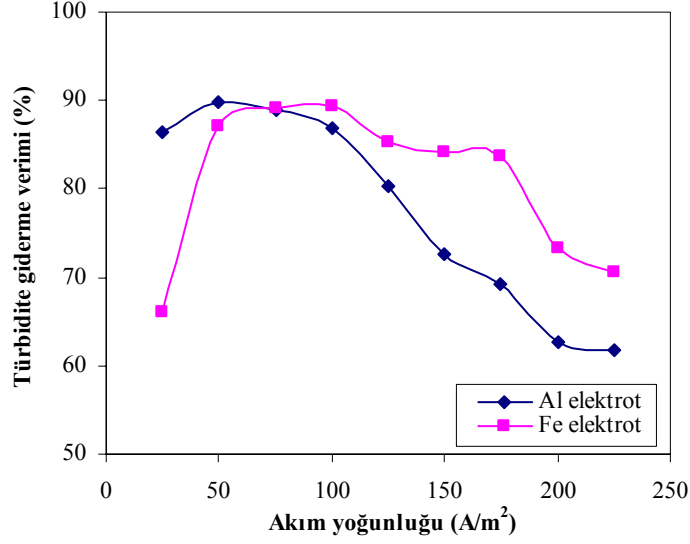
Elektrokoagülasyon prosesinde renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine akım yoğunluğunun etkisini belirlemek amacıyla sisteme 25-225 A/m² aralığında akım yoğunluğu uygulanmıştır. Akım yoğunluğu deneyleri alüminyum elektrotları için pH:3, demir elektrotları için pH:5 ,20 dakika elektrokoagülasyon süresi 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi ve 1000 µS/cm iletkenlik başlangıç şartları altında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.7. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.13, Ek.14'te verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.7. Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

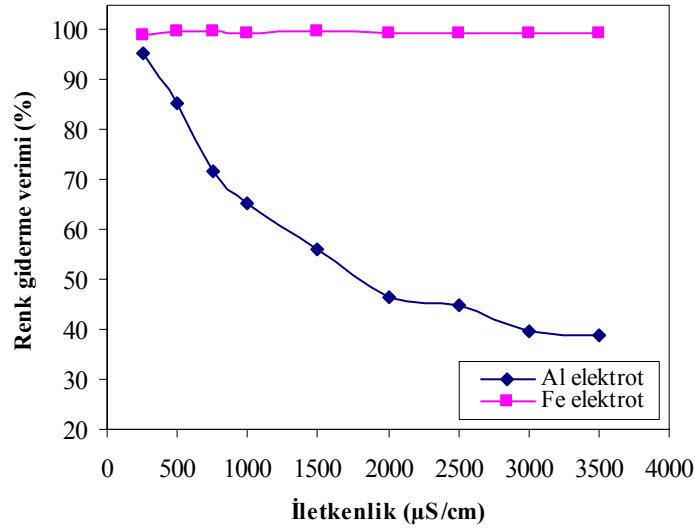
Elektrokoagülasyon deneylerinde Al elektrot üzerine akım yoğunluğunun etkisi incelendiğinde, renk, KOİ ve türbidite giderme verimlerinin 25 A/m² akım yoğunluğunda düşük, 50 A/m² akım yoğunluğunda en yüksek değerlerine ulaştıkları ve akım yoğunluğu arttıkça giderme verimlerinin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 5.7.(a), (b), (c)). 50 A/m² akım yoğunluğunda renk giderme verimi %65,14, KOİ giderme verimi %59,16 ve türbidite giderme verimi %89,84 olarak bulunmuştur. Al elektrotun kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde akım yoğunluğu 25’den 225 A/m²’ye artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 5,4’den 32,23’e, enerji tüketimi ise 0,77 kwh/m³’den 41,52 kwh/m³’e artmaktadır. Enerji ve elektrot tüketimi ve giderme verimleri göz önüne alındığında Al elektrot için optimum akım yoğunluğunun 50 A/m² alınması uygun görülmüştür.

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrot kullanıldığında sonuçlardan görüleceği üzere akım yoğunluğunun 50 A/m² olduğu noktaya kadar renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu (%88-%99), 50-225 A/m² arasında ise bu artışın akım yoğunluğundan etkilenmediği ve sabit değerlerde kaldığı görülmüştür (%97-%99) (Şekil 5.7 (a)). Akım yoğunluğu 25 A/m²’den 100 A/m²’ye artarken KOİ giderme veriminin %29,98’den %63,80’e arttığı daha sonraki akım yoğunluklarında ise verimin düştüğü görülmektedir (Şekil 5.7 (b)). Türbidite için giderme verimi ise 25 A/m² akım yoğunluğunda %66,12 iken 100 A/m²’de %89,26 değerine çıkmıştır ve bunun üzerindeki akım yoğunluklarında ise verimin düştüğü gözlenmiştir (%89-%70)(Şekil 5.7 (b)). Fe

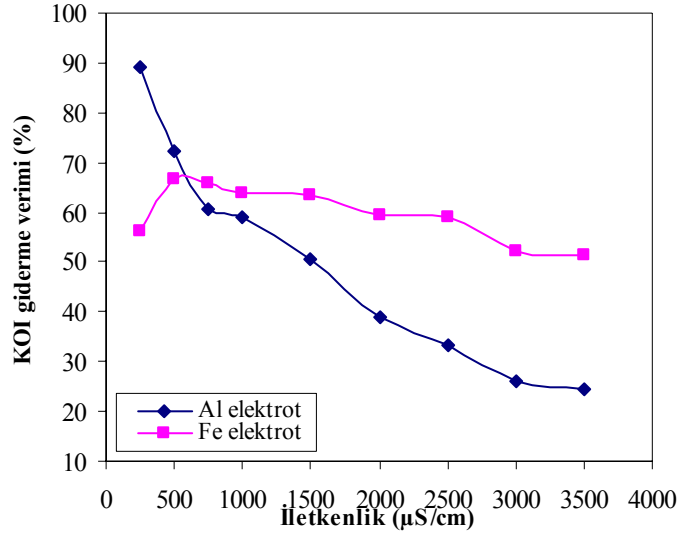
elektrotun kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde akım yoğunluğu 25’den 225 A/m²’ye artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 5,11’den 33,42’e, enerji tüketimi ise 0,73 kwh/m³’den 43,07 kwh/m³’e artmaktadır. Akım yoğunluğunun artması enerji ve elektrot tüketimini direkt etkilemesinden ve her üç parametre için giderme verimleri dikkate alındığında en uygun akım yoğunluğunun 75 A/m² seçilmesine karar verilmiştir. 75 A/m² akım yoğunluğunda renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,38, %63,65, %89,21 olarak elde edilmiştir.

5.2.3. Elektrokoagülasyon Üzerine İletkenliğin Etkisi

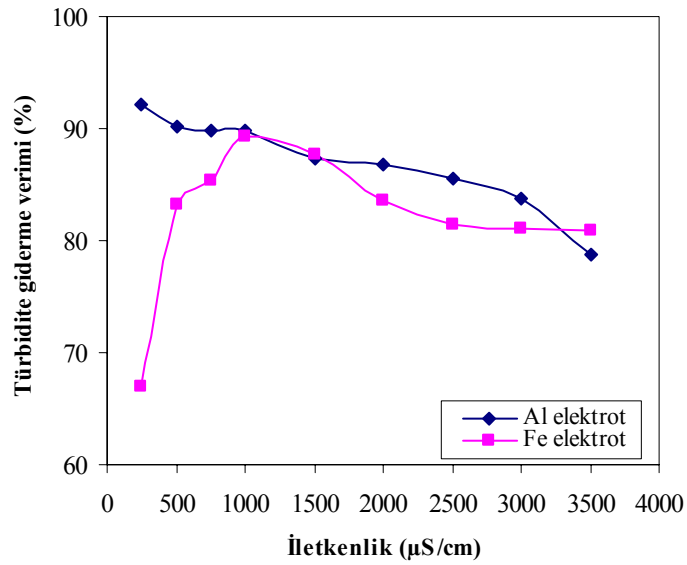
Elektrokoagülasyon prosesinde çözelti iletkenliğinin giderme verimlerine etkisini incelemek amacıyla boya çözeltisinin iletkenliği, Na₂SO₄ destek elektroliti ilavesi ile 250-3500 µS/cm aralığında incelenmiştir. İletkenlik deneyleri Al elektrot için pH:3, akım yoğunluğu 50 A/m², Fe elektrot için pH:5, akım yoğunluğu 75 A/m², 20 dakika elektrokoagülasyon süresi 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi başlangıç şartları altında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.8. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.15, Ek.16’da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.8. Elektrokoagülasyon prosesinde iletkenliğin renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

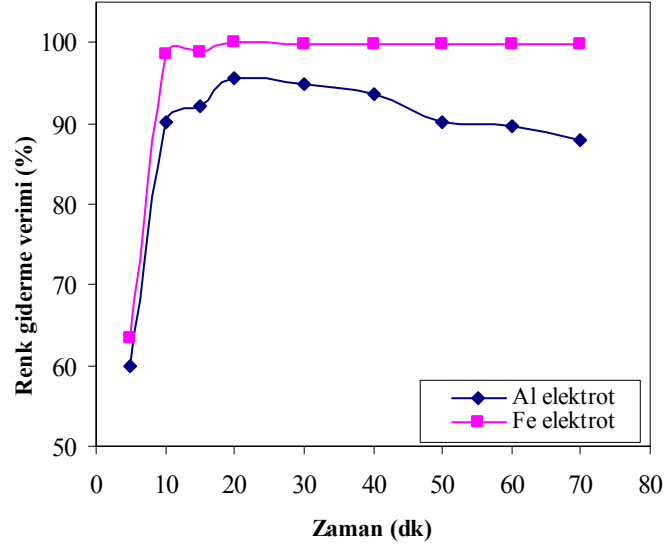
İletkenliğin elektrokoagülasyon prosesi üzerine etkisi incelendiği deneysel çalışmada alüminyum elektrot için maksimum renk giderme veriminin 250 $\mu\text{S/cm}$ 'de (%95,49) gerçekleştiği, 250-3500 $\mu\text{S/cm}$ aralığındaki artışa paralel olarak renk giderme verimindeki düşüş ve 3000 $\mu\text{S/cm}$ 'nin üzerindeki değerlerde bu düşüşün dengeye ulaştığı görülmektedir (şekil 5.8 (a)). İletkenlik deneylerde çözelti iletkenliğindeki artış elektrotlar arası potansiyelin düşmesine neden olmaktadır. İletkenlik 250 'den 3500 $\mu\text{S/cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel 28,83'den 4,21

V'a azalmaktadır. Bu sonuç göz önüne alındığında renk giderme verimi ve buna paralel olarak potansiyel farktaki azalışla birlikte giderme verimlerindeki düşüşün, 4,96 V'un altındaki değerlerde bir dengeye vardığı görülmektedir. Renk giderme verimlerindeki düşüş iletkenlik artışıyla potansiyel farkının azalması sonucu anodik oksidasyonun azalmasından dolayıdır. İletkenliğin etkisinin araştırıldığı bu aşamada 3000 $\mu\text{S/cm}$ 'den sonra renk giderme verimlerindeki azalış ve bu azalışın dengeye ulaşması potansiyel farkının 4,96 voltun altına düştüğü noktadan itibaren elektrooksidasyonun etkisini yitirdiği şeklinde açıklanabilir. KOİ giderme verimlerine bakıldığında 250 $\mu\text{S/cm}$ 'de %89,34 ile en yüksek giderme veriminin elde edildiği ve 3000 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlik değerine kadar verimin düştüğü ve bu noktadan sonraki değerlerde sabit kaldığı görülmektedir (şekil 5.8 (b)). Türbidite giderme verimine bakıldığında ise en yüksek giderme veriminin %92,18 ile 250 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlikte olduğu tespit edilmiştir (şekil 5.8 (c)). Renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri göz önüne alındığında Al elektrot için iletkenlik değeri 250 $\mu\text{S/cm}$ olarak seçilmiştir.

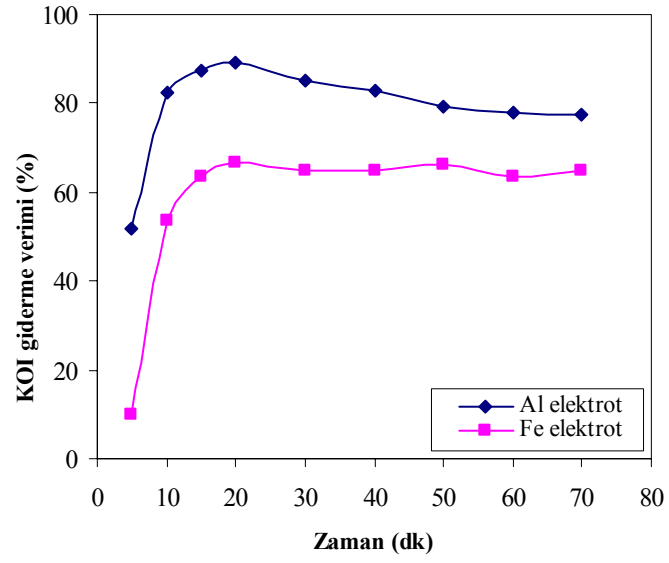
Demir elektrot için iletkenliğin etkisi incelendiğinde renk giderme verimini iletkenliğin fazla etkilemediği, tüm iletkenlik değerlerinde verimin %98'in üzerinde olduğu görülmektedir (şekil 5.8 (a)). İletkenlik 250 'den 3500 $\mu\text{S/cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel 39,93'den 6,16 V'a azalmakla birlikte, iletkenliğe bağlı olarak renk giderme kapasitesi çok fazla değişmemiştir. Giderme verimlerinin çok yüksek çıkması ve değişmemesi anottaki oksidasyonun bütün iletkenlik değerlerinde artışı şeklinde yorumlanabilir. KOİ giderme veriminin %66,83 ile 500 $\mu\text{S/cm}$ 'de en yüksek değerine ulaştığı ve bu iletkenlik değerinden sonra verimin kısmi bir düşüş gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.8 (b)). Türbidite giderme verimine bakıldığında ise en yüksek giderme veriminin %89,26 ile 1000 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlikte olduğu tespit edilmiştir (şekil 5.8 (c)). Bu üç parametre göz önünde tutulduğunda elektrot için en uygun iletkenlik değerinin 500 $\mu\text{S/cm}$ olarak alınmasına karar verilmiştir. 500 $\mu\text{S/cm}$ ' renk ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,94, %83,15 olarak bulunmuştur.

5.2.4. Elektrokoagülasyon Üzerine Zamanın Etkisi

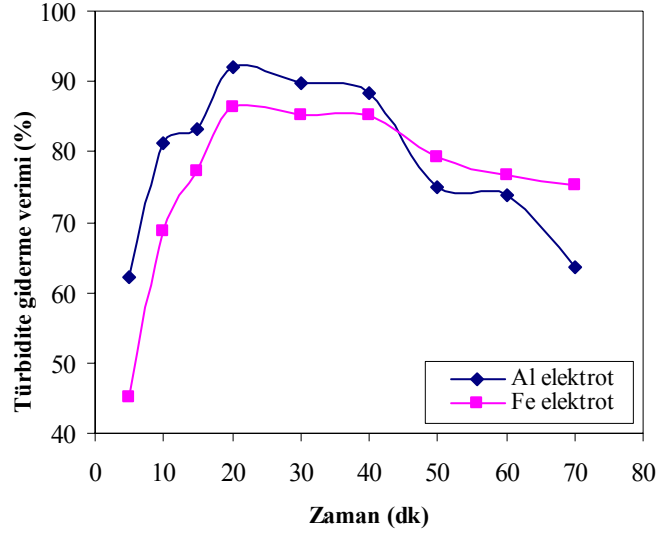
Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 5-70 dakikalar arası sürelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Al elektrot için pH:3, akım yoğunluğu 50 A/m^2 , iletkenlik 250 $\mu\text{S/cm}$, Fe elektrot için pH:5, akım yoğunluğu 50 A/m^2 , iletkenlik 500 $\mu\text{S/cm}$, 250 rpm karıştırma hızı, 300 mg/l boya çözeltisi şartları altında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbidite giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.9. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.17, Ek.18'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.9. Elektrokoagülasyon prosesinde zamanın renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

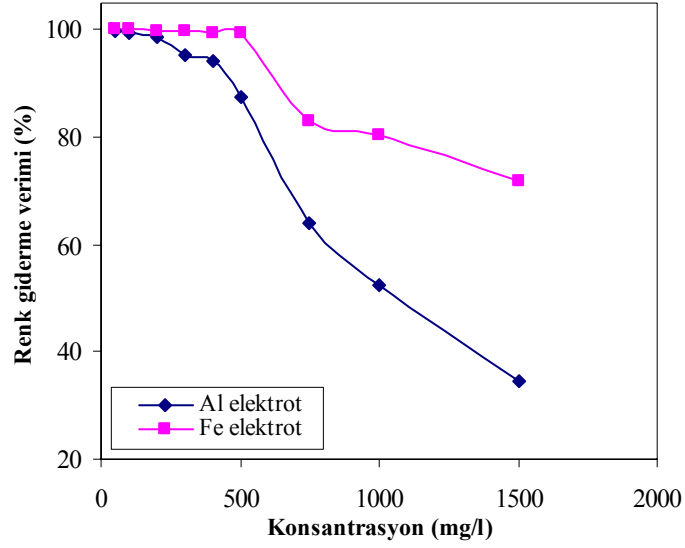
Elektrokoagülasyon deneylerinde Al elektrot üzerine zamanın etkisi incelendiğinde renk giderme veriminin 5 dakikada %59,8, 5 dakikadan sonra verimin hızlı bir artış göstererek 10. dakikada %90,23, 20 dakikada ise %95,49 ile maksimum değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.9 (a)). KOİ ve türbidite giderimlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.9 (b)(c)). 20 dakikada maksimum giderme verimlerine ulaşıldığı için Al elektrotlar en uygun zaman periyodu başlangıç değerlerinde alındığı üzere 20 dakika olarak belirlenmiştir.

Demir elektrotlar için zamanın etkisi incelendiğinde renk giderme verimin 5 dakikada %63,45, 5 dakikadan sonra verimin hızlı bir şekilde artarak 10 dakikada %98 ve bundan sonraki zaman periyotlarında yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür (Şekil 5.9 (a)). KOİ giderme verimi incelendiğinde 5 dakikada verimin çok düşük olduğu (%10,1), bu dakikadan sonra verim artarak 20 dakikada %66,83 ile maksimum giderme verimine ulaştığı ve bundan sonraki zamanlarda sabitlendiği görülmektedir (Şekil 5.9 (b)). Türbidite giderme veriminin ise 20 dakikaya kadar arttığı bu dakikadan sonra ise düştüğü görülmektedir (Şekil 5.9 (b)). Giderme verimleri dikkate alındığında Fe elektrotlar içinde en uygun elektrokoagülasyon süresinin 20 dakika olduğu belirlenmiştir.

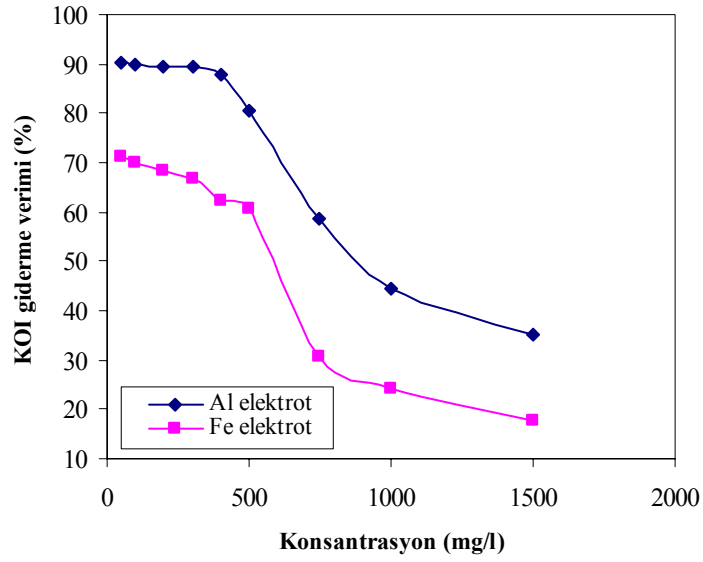
5.2.5. Elektrokoagülasyon Üzerine Boya Konsantrasyonunun Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesi üzerine boya konsantrasyonunun etkisi 50-1500 mg/l boya konsantrasyon aralığında incelenmiştir. Deney şartları Al elektrot için pH:3, akım yoğunluğu 50 A/m², iletkenlik 250 µS/cm, Fe elektrot için pH:5, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 500

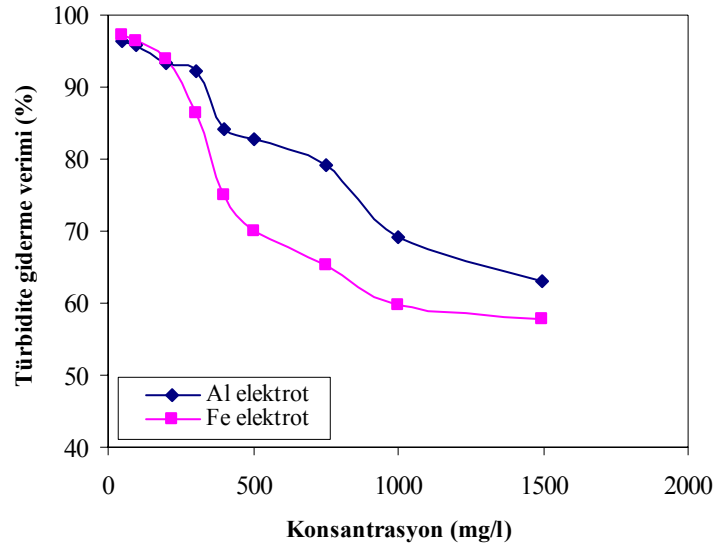
$\mu\text{S/cm}$, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika, 250 rpm karıştırma hızı başlangıç şartlarında gerçekleştirilmiştir. Renk, KOİ ve türbitide giderimiyle ilgili deney sonuçları Şekil 5.10. (a), (b), (c) ve çizelge Ek.19, Ek.20’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.10. Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç boya konsantrasyonunun, renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri üzerine etkisi , (a) renk giderme verimi, (b) KOİ giderme verimi, (c) türbidite giderme verimi.

Al elektrot için elektrokoagülasyon deney verileri incelendiğinde, renk giderme veriminin 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda %99,31 olduğu, konsantrasyon artıkcı verimin düşmeye başladığı, 500 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda %87,41, bu konsantrasyon değerinden sonra verimin hızlı bir şekilde azalarak 1500 mg/l'de %34,67'ye kadar düştüğü görülmektedir (şekil 5.10.(a)). KOİ giderme verimine bakıldığında en yüksek giderme veriminin 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda %90,17 olarak gerçekleştiği ve başlangıç boya konsantrasyon değerlerinin artmaya başlamasıyla verimin düşmeye başladığı 500 mg/l'de %80,68, bundan sonraki başlangıç boya konsantrasyonu değerlerinde ise ani bir düşüş göstererek 1500 mg/l'de %35,16 değerine ulaştığı görülmektedir (şekil 5.10.(b)). Türbidite giderme veriminde de renk ve KOİ giderimine paralel olarak benzer sonuçların gerçekleştiği görülmüştür (şekil 5.10.(c)).

Fe elektrot için elektrokoagülasyon deney verileri incelendiğinde, Renk giderme veriminin 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda %99,96 olduğu ve 500 mg/l boya konsantrasyonuna kadar fazla bir değişim göstermediği, 500 mg/l boya konsantrasyonundan sonra verimdeki düşüşün arttığı ve 1500 mg/l boya konsantrasyonunda %71,81 değerine düştüğü görülmektedir (şekil 5.10.(a)). KOİ giderme verimi 50 ve 500 mg/l başlangıç boya konsantrasyonlarında sırasıyla %71,39, %60,77 olarak elde edilmiş ve 500 mg/l başlangıç boya konsantrasyonundan sonra verimin çok hızlı bir şekilde azalarak 1500 mg/l'de %17,66 değerine düştüğü görülmektedir (şekil 5.10.(b)). 50 mg/l başlangıç boya konsantrasyonunda türbidite giderme verimi %97,18 olarak elde

edilmiştir. Boya konsantrasyonunun artmasıyla birlikte giderim verimlerinde bir düşüş gözlenmiş ve 1500 mg/l'de giderme verimi %57,68 olarak gerçekleşmiştir (şekil 5.10.(c)).

5.2.6. Elektrokoagülasyon Prosesinde Enerji Tüketimi ve Maliyet

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrot kullanıldığında, optimum koşullar göz önünde tutulduğunda (300 mg/l boya çözeltinde, pH:3, akım yoğunluğu 50 A/m², iletkenlik 250 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika) enerji tüketiminin 6,15 Wh olduğu, toplam işletme maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından bakıldığında sırasıyla 0,665 \$/m³, 2,322 \$/kg boya, 3,336 \$/kg KOİ değerleri elde edilmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrot kullanıldığında ise, optimum koşullar göz önünde tutulduğunda (300 mg/l boya çözeltinde, pH:5, akım yoğunluğu 75 A/m², iletkenlik 500 µS/cm, elektrokoagülasyon süresi 20 dakika) enerji tüketiminin 8,72 Wh olduğu, toplam işletme (enerji+elektrot maliyeti) maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından bakıldığında sırasıyla 0,672 \$/m³, 2,240 \$/kg boya, 4,437 \$/kg KOİ değerleri elde edilmiştir. Al ve Fe elektrotlar için enerji tüketimi ve maliyetleri çalışmanın tamamı göz önüne alındığında irdelenen bütün değişken parametreler için hesaplanmış ve ilgili çizelgelerde sunulmuştur.

5.2.7. Elektrokoagülasyon Prosesinde Çamur Oluşumu

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrot kullanıldığında ise, 300 mg/l boya çözeltinde, optimum koşullarlarda 0,86 kg/m³ çamur oluşmuştur.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrot kullanıldığında ise, 300 mg/l boya çözeltinde, optimum koşullarlarda 1,96 kg/ m³ çamur oluşmuştur. Al ve Fe elektrotlar için çalışmanın tamamı göz önüne alındığında irdelenen bütün değişken parametrelerde oluşan çamur miktarları hesaplanmış ve ilgili çizelgelerde sunulmuştur.

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

Elektrokoagülasyon deneylerinde Remazol Brilliant Orange 3R spec gran boya çözeltisi kullanılması durumunda ;

Al elektrot

Elektrokoagülasyon çalışmalarında renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri açıcından optimum pH 6 olarak belirlenmiştir. pH:6'nın altındaki ve üstündeki pH değerlerinde verimin daha az olduğu görülmektedir. Sadece renk giderme verimi açısından bakıldığında pH: 7 ve 8'de iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.. pH:6'da renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %64,42-%52,78-%90,12'dir.

Akım yoğunluğunun giderme verimleri üzerine etkisine bakıldığında, akım yoğunluğunun artmasının verimleri artırdığı ancak bir noktadan sonra verimlerin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Giderme verimleri dikkate alındığında optimum akım yoğunluğu 100 A/m² olarak belirlenmiştir.

İletkenliğin giderme verimleri üzerine etkisi incelendiğinde, verimlerin 500 µS/cm'ye kadar arttığı daha sonra artan iletkenlik değerleriyle birlikte verimlerin düştüğü görülmüştür. 500 µS/cm'de giderme verimleri maksimum çıktığı için optimum iletkenlik değeri olarak belirlenmiştir. Bu iletkenlik değerinde renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %79,55-%60,2-%91,97 olarak bulunmuştur.

Zamanın etkisi incelendiğinde, zamanın artmasıyla giderme verimlerinin arttığı, 20 dakikadan sonra ise verimlerin fazla değişmediği ve sabitlendiği görülmüştür bu nedenle optimum elektrokoagülasyon süresi başlangıçta olduğu gibi 20 dakika olarak belirlenmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç boya konsantrasyonunun artması giderme verimlerinin düşmesine neden olduğu belirlenmiştir. Genel bir ifadeyle sabit elektrokoagülasyon şartlarında giderme verimleri boya konsantrasyonu arttıkça düşmektedir. Boya konsantrasyonu artırıldığı zaman boyanın koagülasyonu için gerekli koagülant türlerinin miktarı da arttırılmalıdır.

Elektrokoagülasyon prosesinde 300 mg/l boya konsantrasyonunda optimum koşullarda enerji tüketimi 8,61 Wh olduğu, toplam işletme (enerji+elektrot maliyeti) maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından değerlendirildiğinde sırasıyla 1,498 \$/m³, 6,238 \$/kg boya, 9,687 \$/kg KOİ şeklinde olduğu belirlenmiştir.

Fe elektrot

Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH değerlerinin etkisi incelendiğinde, tüm pH değerlerinde renk giderme veriminin %99'un üzerinde olduğu belirlenmiştir. Türbidite giderme verimi de tüm pH değerlerinde %88'in üzerinde çıkmıştır. KOİ giderme verimine bakıldığında ise

verimin pH:8'e kadar attığı bu pH değerinden sonra düştüğü görülmüştür. pH:8'de maksimum KOİ ve türbidite giderme verimi elde edildiği için optimum pH değeri 8 olarak belirlenmiştir. pH:8'de renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,60-%41,85-%93,19 olarak bulunmuştur.

Akım yoğunluğunun giderme verimleri üzerine etkisine bakıldığında, renk giderme verimi için akım yoğunluğu 50 A/m²'de verimde bir artış gözlenmiş ve bu yoğunluktan sonra verimin fazla değişmediği ve sabit değerlerde kaldığı görülmüştür. KOİ ve türbidite giderme verimleri ilk başta artan akım yoğunluğuyla birlikte artmış ve 75 A/m²'den sonra ise düşmüştür. Giderme verimleri ve enerji tüketimi dikkate alındığında optimum akım yoğunluğu 75 A/m² olarak belirlenmiştir. 75 A/m²'de renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,07-%42,26-%91,89 olarak tespit edilmiştir.

İletkenliğin artması renk ve türbidite giderme verimlerini fazla değiştirmemiş, KOİ giderme verimi ise artan iletkenlik değerleriyle birlikte artmış ve 1500 µS/cm iletkenlik değerinden sonra düşmüştür. Giderme verimleri göz önünde tutulduğunda optimum iletkenlik 1000 µS/cm olarak belirlenmiştir.

Zamanın etkisi incelendiğinde, zamanın artmasıyla giderme verimlerinin arttığı, 20 dakikadan sonra ise verimlerin fazla değişmediği sabit kaldığı görülmüştür. Bu nedenle optimum elektrokoagülasyon süresi 20 dakika olarak belirlenmiştir.

Boya konsantrasyonunu etkisi incelendiğinde ise, Al elektrotta olduğu gibi başlangıç boya konsantrasyonunu artmasıyla birlikte kirlilik parametrelerindeki giderme verimleri düşmüştür.

Elektrokoagülasyon prosesinde 300 mg/l boya çözeltinde, optimum koşullar göz önünde tutulduğunda enerji tüketiminin 6,13 Wh olduğu, toplam işletme maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından değerlendirildiğinde sırasıyla 0,957 \$/m³, 1,698 \$/kg boya, 4,657 \$/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Elektrokoagülasyon deneylerinde Remazol Ultra Red RGB gran boya çözeltisi kullanılması durumunda ;

Al elektrot

Elektrokoagülasyon çalışmalarında renk ve KOİ giderme verimlerinin pH:3'te maksimum değerde olduğu ve artan pH değerleriyle birlikte verimlerin düştüğü belirlenmiştir. Giderme verimleri açısından optimum pH değeri 3 seçilmiştir. pH:3'te renk giderme verimi %55,46, KOİ giderme verimi %41,6 ve türbidite giderme verimi ise %86,33 olarak bulunmuştur.

Akım yoğunluğunun giderme verimleri üzerine etkisi incelendiğinde, akım yoğunluğunun artmasıyla giderme verimleri artmış ancak 50 A/m²'den sonraki değerlerde bir azalış göstermiştir. 50 A/m²'de giderme verimleri en yüksek değerlerde çıktığı için bu değer optimum akım

yoğunluğu olarak seçilmiştir. Bu akım yoğunluğunda renk KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %65,14-%59,35-%89,84 olarak bulunmuştur.

İletkenliğin giderme verimleri üzerine etkisi incelendiğinde, verimlerin 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de en yüksek değerlerde çıktığı ve artan iletkenlik değerleriyle verimlerin düştüğü belirlenmiştir. Maksimum giderme verimlerine bakıldığında optimum iletkenlik değeri 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak seçilmiştir. 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'de renk KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %95,49-%89,34-%92,18 olarak elde edilmiştir.

Zamanın etkisi incelendiğinde, giderme verimlerinin 20 dakikaya kadar hızlı bir artış gösterdiği, 20 dakikadan sonra ise giderme verimlerinde bir azalış söz konusudur. Bu nedenle 20 dakika optimum elektrokoagülasyon süresi olarak belirlenmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç boya konsantrasyonunun artması yine giderme verimlerinin düşmesine neden olmuştur.

Elektrokoagülasyon prosesinde 300 mg/l boya konsantrasyonunda optimum koşullarda enerji tüketimi enerji tüketiminin 6,15 Wh olduğu, toplam işletme maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından değerlendirildiğinde sırasıyla 0,665 \$/m³, 2,322 \$/kg boya, 3,336 \$/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Fe elektrot

Elektrokoagülasyon prosesinde başlangıç pH değerlerinin etkisi incelendiğinde, tüm pH değerlerinde renk giderme veriminin %98'un üzerinde olduğu belirlenmiştir. KOİ giderme verimine bakıldığında ise verimin pH:5'ten sonra düştüğü görülmüştür. Türbidite giderme verimi ise maksimum pH:5'te çıkmıştır. pH:5'te renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,64-%63,80-%89,26 olarak bulunmuştur.

Akım yoğunluğunun giderme verimleri üzerine etkisine bakıldığında, renk, KOİ ve türbidite giderme verimlerinin 75 A/m² akım yoğunluğuna kadar arttığı, bu akım yoğunluğundan sonra renk giderme verimlerinde bir artışın olmadığı ve sabit değerlerde kaldığı, KOİ ve türbidite giderme verimlerinin ise düştüğü belirlenmiştir. Akım yoğunluğu için optimum değer 75 A/m² olarak alınmıştır. Bu akım yoğunluğunda renk, KOİ ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %99,38-%63,65-%89,21 olarak bulunmuştur.

İletkenliğin artmasının giderme verimleri artırdığı, belli bir iletkenlik değerinden sonra renk giderme veriminin sabit değerlerde kaldığı, KOİ ve türbidite giderme verimlerinin ise düştüğü belirlenmiştir. Optimum iletkenlik değeri 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak seçilmiştir. 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde renk giderme verimi %99,94, KOİ giderme verimi %66,83 ve türbidite giderme verimi ise %83,15 olarak bulunmuştur.

Zamanın etkisi incelendiğinde, zamanın artmasıyla giderme verimlerinin arttığı, 20 dakikadan sonra renk ve KOİ giderme verimlerinin fazla değişmediği, türbidite giderme veriminin

ise düştüğü belirlenmiştir. Bu nedenle optimum elektrokoagölasyon süresi 20 dakika olarak belirlenmiştir.

Boya konsantrasyonunun etkisinin incelendiği çalışmalarda ise 500 mg/l'ye kadar renk giderme verimin fazla değişmediği, 500 mg/l'den sonra verimin hızlı bir şekilde düştüğü belirlenmiştir. Başlangıç boya konsantrasyonunun artmasıyla KOİ ve türbidite giderim verimleri, renk giderimine paralel olarak bir azalış göstermiştir.

Elektrokoagölasyon prosesinde 300 mg/l boya konsantrasyonunda optimum koşullarda enerji tüketimi 8,72 Wh, toplam işletme (enerji+elektrot maliyeti) maliyetinin çözelti hacmi, giderilen boya ve KOİ açısından değerlendirildiğinde sırasıyla 0,672 \$/m³, 2,240 \$/kg boya, 4,437 \$/kg KOİ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak kullanılan her iki boya çözeltisi içinde, renk giderime veriminde Fe elektrotların Al elektrotlara göre daha yüksek sonuç verdiği, KOİ giderme veriminde ise Al elektrotların Fe elektrotlara göre daha yüksek sonuç verdiği belirlenmiştir,

Yapılan bu çalışma ile ilgili olarak aşağıdaki öneriler verilebilir;

- Elektrokoagölasyon uygulanmasında farklı türde elektrotlar için elektrokoagölasyon verimi araştırılabilir (Nikel, pilatin, elik, bakır v.s)
- Farklı türde elektrotlar anot ve katot seçilerek (demir anot- alüminyum katot, alüminyum anot -demir katot) elektrokoagölasyonun verimi araştırılabilir.
- Farklı türdeki boyalar ve farklı özellikteki tekstil atıksuları için elektrokoagölasyon araştırılabilir.
- Değişik Elektrokoagölasyon reaktörleri için (seri bağlı monopolar, paralel bağlı bipolar) verim araştırılabilir.
- Elektrokoagölasyonda farklı karıştırma hızları denenmek suretiyle proseste verim araştırılabilir.
- Elektrokoagölasyon prosesine kimyasal koagölantlar ilave edilerek arıtma veriminin değişimi araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

- Arıcı, Y., 2000, Tekstil Endüstrisinde Reaktif Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi İle Giderilmesi, Yük. Lis. Tezi, İTÜ Çevre Müh. Anabilim Dalı, İstanbul
- Baldrian, P., Snajdr, J., 2006, Production of ligninolytic by litter-decomposing fungi and their to decolorize synthetic dyes, *Enzyme and Microbial Technology*, 39.1023-1029.
- Başbüyük, M., Yüceer, A. ve Yılmaz, T., 1998, Tekstil Atıksularında Renk Giderilmesinde Kullanılan İleri Teknolojiler, Kayseri I. Atıksu Sempozyumu, Kayseri, 82-86.
- Benefield, LD., Judkins, JF., and Jr, Weand, LB., 1982, *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, Pretice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Buckley, C.A., 1992, Membrane Technology For The Treatment Of Dyehouse Effluents. *Water Sci. And Tech.*, V.25, n.10.
- Can, O.T., 2002, Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Atıksu ve Boyalarının Elektrokoagülasyon İle Arıtımı, GYTE Müh., ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Can, O. T., Bayramoğlu, M., and Kobya, M., 2002, Decolorization Of Reactive Dye Solutions By Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 3391-3396,
- Canizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Martınez, F., and Rodrigo, M. A., 2005, Electrodisolution of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 4178-4185
- Chen, G., Chen, X., Yue, PL., 2000, Separation of Pollutants From Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19. 65-76
- Chen, G., Chen, X., Yue, PL., 2000, Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 126, No. 9.
- Chen X., Chen G., Yue P.L., 2002, Investigation On The Electrolysis Voltage Of Electrocoagulation, *Chem. Eng. Sci.*, 57, 2449-2455.
- Ciardelli, G., Ranieri, N., 2001, The Treatment And Reuse Of Wastewater İn The Textile İndustry By Means Of Ozonation And Electroflocculation, *Water Res.*, 35, 567-572.
- Çiftçi, Ç., 2007, Metal Kesme Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı, GYTE Müh., ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze, s. 14-36.
- Delipınar, Ş., 2007, Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı, GYTE Müh. ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 3-81.
- Do, J.-S., Chen, M.-L., 1994, Decolourization Of Dye-Containing Solutions By Electrocoagulation., *Journal of Applied Electrochemistry*, 24, 785-790.
- EPA, 1993, Electro Pure Alternating Current Electrocoagulation, *Emerging Tecnol*, summary, EPA/540/s-93/504, p.5.
- Eyvaz, M., 2005, Demir ve Alüminyum Elektrotların Farklı Bağlantıları İle Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonu, GYTE Müh. ve Fen. Bil. Ens., Yüksek lisans Tezi, Gebze, s., 41.
- Gezergen Asma, S., 1998, Tekstil Sanayi Atıksularının Arıtılması Üzerine Bir Araştırma, Yük. Lis. Tezi, GYTE Çevre Müh. A.B.D., Gebze.
- Holt, P.K., Barton, G.W., Mitchell, C.A., 2002, Mathematical analysis of a batch electrocoagulation reactor, *Water Sci. Technol.*, 2, 65-71.

- İredmez, Ş., Demircioğlu, N., Yıldız, Y. Ş., 2006, The effects of pH on Phosphate Removal From Wastewater By Electrocoagulation With Iron Plate Electrodes, Journal of Hazardous Materials B137, 1231–1235
- Koby, M., Can, O. T., and Bayramoğlu, M., 2003, Treatment of Textile Wastewaters By Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes, Journal of Hazardous Materials, B100, 163-178.
- Kural, E., 2000, Tekstil Boyahane Atıksularının Nanofiltrasyon Membranları İle Geri Kazanımı ve Renk Giderimi, Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul
- Külünk, A., 2000, Tekstil Endüstrisinde Asit Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi ile Giderilmesi, Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul.
- Larue, O., Vorobiev, E., 2003, Floc Size Estimation In Iron Induced Electrocoagulation And Coagulation Using Sedimentation Data, Int. J. Miner Proc., 1629, 1-15.
- Lin, S.H., Lin, C.S., 1998, Reclamation Of Wastewater Effluent From A Chemical Fiber Plant. Desalination, 120, 185–195.
- Lin SH, Peng CF., 1994, Treatment of textile wastewater by electrochemical method. Water Res; 28:277-82.
- Liu, H.L. and Chiou, Y.R., 2005, Optimal decolorization efficiency of Reactive Red 239 by UV/TiO₂ Photocatalytic process with response surface methodology, Chemacal Engineering 112.173-179.
- Matteson, M.J., Dobson, R.L., Glenn, Jr., R.W., Kukunoor, N.S., Waits, III. W.H. and Clayfield, E.J., 1995, Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles, Colloids Surf. A., 104, 101-109.
- Mills, D., 2000, A new process for Elektrocoagulation, JAWWA, 92, 34-43.
- Mollah, MYA., Schennach, R., Parga, JR., and Cocke, DL., 2001, Elektrocoagulation (EC) Science and Applications, Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41.
- Nambodri, C.G., Walsh, W.K., 1996, Ultraviolet light/hydrogen peroxide system for decolorizing spent reactive dyebath wastewater, Am. Dyestuff Rep., 15, 32-45.
- Naumczyk, J., Szpyrkowicz, L. and Zilio-Grandi, F., 1994, Electrochemical Treatment of Textile Wastewater, Wat. Sci. Tech., 11, 17-24, (1994)
- Uygun, R., 2003, Demir ve Alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Boyalarının Elektrokoagülasyon İle Arıtımı, GYTE Müh., ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Öğütveren, Ü.B., Koparal, S., 1992, Electrochemical Treatment of Water Containing Dye-Subs: Anodic Oxidation of Congo Red and Xiron Blau 2RHD, Journal Environmental Studies, Vol.42, pp. 41-52.
- Ölmez, T., 1999, Tekstil Endüstrisinde Reaktif Banyolarda Ozon ile Renk Giderimi, Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul.
- Özgürses, M.T., 2003, Elektrokoagülasyon İle Reaktif Tekstil Boya Çözeltilerinin Arıtımı, GYTE Müh., ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze, s, 33.
- Özyonar, F., 2007, Entegre Et Ve Et Ürünleri Tesisleri Atıksularının Kimyasal Koagülasyon Ve Elektrokoagülasyon Yöntemleriyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, C.Ü. Fen Bil. Ens. Yüksek Lisans Tezi, Gebze, s, 79-80.
- Pletcher, D., Walsh F.C., 1990, Industrial Electrochemistry, The Universty Press, Cambridge.

- Pouet, M.F., Grasmick, A., 1995, Urban Wastewater Treatment By Electrocoagulation and Flotation, *Water Sci. Technol.*, 31, 275-283.
- Pykhteev, O.Y., Ofimou, A.A., Moskuin, L.N., 1999, Hydrolysis of iron (III) aqua complexes, *Russ. J. Appl. Chem.*, 72, 9-20.
- Rajeshwar, K., İbanez, J.G., Swai, G.M., 1994, Electrochemistry and The Environmental, *Journal of Applied Electrochemistry*, 24, 1077-1091.
- Rebhun, M., Lurie, M., 1993, Control of Organic Matter by Coagulation and Floc Separation, *Wat. Sci. Tech.*, 27, 1-20,
- Romanov, A., Kobya, M., Dimoğlu, A., 2000, Atıksulardaki Kolloidal Partiküllerin Elektroflotokoagülasyonla Giderimi, İTÜ 7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu 2000, S. 67-74, İstanbul.
- Sanfan, W., 1991, Studies On Economic Property of Pretredent Process of Brackish Water Using EC Method, *Desalination*, 82, 359-363.
- Scott, K., 1995, *Electrochemical Processes For Clean Technology*. University of Newcastle upon Tyne.
- Shu, H.Y., Huang, C.R., 1995, Ultraviolet Enhanced Oxidation for Color Removal of Azo Dye Wastewater, *American Dyestuff Reporter*, 30-34
- Slokar, Y.M., Marechal, A.M.L., 1998, Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dye Pig.* 37, 335-356, 1998.
- Su Kirlenmesi Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı:25687, 31 aralık 2004.
- Şanlı, N., 2006, Deri Sanayi Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ve Elektrokoagülasyon ile Arıtımı, *GYTE Müh. ve Fen. Bil. Ens.*, Yüksek lisans Tezi, Gebze, s., 32.
- Şengül, F., ve Küçükgül, E.Y., 1997, Çevre Mühendisliğinde Fiziksel- Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler, *Dokuz Eylül Üni. Mühendislik Fak. Yayınları* , No: 153, 4. Baskı.
- Takımcı, F., 1996, Azo boyası içeren tekstil atıksuyunun anaerobik olarak arıtılması ve renk giderimi, *Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul*.
- Tsai, C.T., Lin, S.T., Shue, Y.C., Su, P.L., 1997, Electrolysis Of Soluble Organic Matter İn Leachate From Landfills. *Water Res.* 31, 3073–3081
- Tünay, O., 1996, Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- Uygun R., 2002, Demir ve alüminyum Elektrotlar Kullanılarak Tekstil Boyalarının Elektrokoagülasyon İle Arıtımı, *GYTE Müh. Ve Fen Bil. Ens.*, Yüksek Lisans Tezi, s, 33-55, Gebze.
- Yalçın, F., (1998), Membran Proseslerle Endüstriyel Atıksularda Renk Giderimi, *Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul*.
- Xiong, Y., Strunk, P.J., Xia, H., Zhu, X., Karlsson, H.T., 2001, Treatment Of Dye Wastewater Containing Acid Orange II Using A Cell With Three-Phase Three-Dimensional Electrode, *Water. Res.*, 35, 4226-4230.
- Xu, L.J., Sheldon, B.W., Larick, D.K., Carawan, R.E., 2002, Recovery and Utilization Of Useful By-Products From Egg Processing Wastewater By Electrocoagulation. *Poultry Sci.* 81 785–792.

8. ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Sivas'ta doğdu. İlköğrenimini Hüyüklyurt Köyü İlkokulunda, Orta öğrenimini Sivas Başöğretmen Atatürk Ortaokulunda tamamladı. Lise öğrenimini ise Sivas Cumhuriyet Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Sivas Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2005 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Çevre Bilimleri Anabilim dalında Yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen bu bölümde öğrenimine devam etmektedir.

9.EKLER

Ek.1.

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrotları üzerine başlangıç pH'nın etkisi.

Parametre	Başlangıç pH						
	3	4	5	6	7	8	9
Ölçülen son pH	6,75	6,81	6,95	7,40	8,63	8,96	9,01
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	19,84	16,47	18,71	20,02	20	20,44	20,48
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	191,31	161,64	143,4	106,74	111,39	116,94	139,98
R_{BOYA} (%)	36,23	46,12	52,2	64,42	62,87	61,02	53,34
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	177,94	165,49	148,00	120,55	150,50	161,76	165,33
$R_{KOİ}$ (%)	30,3	35,18	42,03	52,78	41,05	36,64	35,24
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	0,56	0,51	0,37	0,40	0,93	0,89	0,94
R_{TURB} (%)	86,17	87,4	90,86	90,12	77,03	78,12	76,67
Anodik Çözünme (g)	0,212	0,2309	0,3132	0,3324	0,2799	0,3186	0,2834
Katodik Çözünme (g)	0,0517	0,0562	0,0761	0,0885	0,0452	0,0654	0,0399
Toplam Çözünme (g)	0,2637	0,2871	0,3893	0,4209	0,3251	0,3840	0,3233
Akım Verimliliği (%)	146,93	160,02	217,06	230,37	193,98	220,81	196,41
Harcanan Al (kg/m ³ atıksu)	0,35	0,38	0,52	0,56	0,43	0,51	0,43
Toplam Çözünme (kg Al/kg Boya)	3,23	2,77	3,31	2,90	2,30	2,80	2,69
Toplam Çözünme (kg Al/kg KOİ)	4,54	4,26	4,84	4,16	4,14	5,47	4,79
Enerji Tüketimi (Wh)	8,53	7,08	8,05	8,61	8,6	8,79	8,81
kg Boya başına tüketilen kWh	78,48	51,17	51,40	44,55	45,60	48,02	55,06
kg KOİ başına tüketilen kWh	110,27	78,83	75,02	63,90	82,06	93,97	97,92
Faraday, (F/m ³)	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,633	0,689	0,934	1,010	0,780	0,921	0,776
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,512	0,425	0,483	0,517	0,516	0,527	0,529
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	5,821	4,979	5,965	5,226	4,136	5,033	4,848
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	8,179	7,670	8,705	7,495	7,443	9,850	8,622
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	4,709	3,070	3,084	2,673	2,736	2,881	3,303
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	6,616	4,730	4,501	3,834	4,924	5,638	5,875
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	1,145	1,114	1,417	1,527	1,296	1,449	1,304
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	10,530	8,049	9,049	7,899	6,872	7,914	8,151
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	14,796	12,400	13,206	11,329	12,367	15,488	14,498
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	2,04	2,84	2,52	2,67	2,33	2,41	2,24

Ek.2.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrotları üzerine başlangıç pH'nın etkisi.

Parametre	Başlangıç pH						
	3	4	5	6	7	8	9
Ölçülen pH	6,46	6,5	6,79	7,18	8,47	9,46	9,52
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	19,37	18	18,96	19,84	21,77	21,4	24,57
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	0,27	1,26	0,27	1,11	3,33	1,2	2,88
R _{BOYA} (%)	99,91	99,58	99,91	99,63	98,89	99,60	99,04
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	180,29	182,57	173,48	170,34	162,24	148,46	159,84
R _{KOİ} (%)	29,38	28,49	32,05	33,28	36,45	41,85	37,39
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	0,32	0,36	0,38	0,40	0,41	0,28	0,45
R _{TURB} (%)	92,17	91,14	90,65	90,12	89,98	93,19	88,78
Anodik Çözünme (g)	0,6783	0,4606	0,4453	0,4493	0,4473	0,4456	0,4524
Katodik Çözünme (g)	0,167	0,1341	0,0204	0,0183	0,0118	0,01	0,0065
Toplam Çözünme (g)	0,8453	0,5947	0,4657	0,4676	0,4591	0,4556	0,4589
Akım Verimliliği (%)	227,97	154,80	149,66	151,00	150,33	149,76	152,05
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	1,13	0,79	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	3,76	2,65	2,07	2,09	2,06	2,03	2,06
Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	15,02	10,90	7,59	7,34	6,58	5,68	6,41
Enerji Tüketimi (Wh)	8,33	7,74	8,15	8,53	9,36	9,2	10,56
kg Boya başına tüketilen kWh	27,79	25,91	27,19	28,54	31,55	30,79	35,54
kg KOİ başına tüketilen kWh	111,06	106,41	99,60	100,40	100,58	86,11	110,63
Faraday, (F/m ³)	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,338	0,238	0,186	0,187	0,184	0,182	0,184
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,500	0,464	0,489	0,512	0,562	0,552	0,634
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	1,128	0,796	0,621	0,626	0,619	0,610	0,618
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	4,507	3,270	2,276	2,201	1,973	1,705	1,922
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	1,668	1,555	1,631	1,712	1,893	1,847	2,132
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	6,663	6,385	5,976	6,024	6,035	5,166	6,638
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,838	0,702	0,675	0,699	0,745	0,734	0,817
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	2,795	2,351	2,253	2,338	2,512	2,457	2,750
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	11,170	9,655	8,252	8,225	8,008	6,872	8,560
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	2,42	2,55	2,21	2,34	2,41	2,52	2,37

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine akım yoğunluğunun etkisi.

Parametre	Akım Yoğunluğu (A/m ²)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Başlangıç pH	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Son pH	6,41	6,89	7,15	7,4	7,3	7,48	8	7,9	7,71
Akım (A)	0,32	0,64	0,96	1,29	1,61	1,93	2,26	2,58	2,90
Voltaj (V)	6,03	11,14	15,49	20,02	23,44	27,13	30,61	31,53	35,05
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	246,39	236,34	222,66	106,74	127,8	157,65	166,26	164,04	164,19
R_{BOYA} (%)	17,87	21,22	25,78	64,42	57,4	47,45	44,58	45,32	45,27
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	191,68	168,32	153,46	120,55	138,60	146,41	149,22	149,22	172,56
$R_{KOİ}$ (%)	24,92	34,07	39,89	52,78	45,71	42,65	41,55	41,55	32,41
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	1,61	0,54	0,53	0,40	0,54	0,49	0,52	0,62	0,64
$R_{TURB.}$ (%)	60,24	86,66	86,8	90,12	86,66	87,9	87,16	84,69	84,19
Anodik Çözünme (g)	0,0911	0,206	0,3164	0,3324	0,4114	0,4416	0,4576	0,4989	0,5123
Katodik Çözünme (g)	0,0524	0,0675	0,0849	0,0885	0,1445	0,2442	0,2690	0,2728	0,2812
Toplam Çözünme (g)	0,1435	0,2735	0,4013	0,4209	0,5559	0,6858	0,7266	0,7717	0,7935
Akım Verimliliği (%)	254,54	287,79	294,68	230,37	228,45	204,57	181,03	172,88	157,94
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,19	0,36	0,53	0,56	0,74	0,91	0,97	1,03	1,06
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	3,57	5,73	6,92	2,90	4,30	6,42	7,24	7,57	7,79

Ek.3.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	3,01	4,19	5,25	4,16	6,35	8,40	9,13	9,70	12,78
Enerji Tüketimi (Wh)	0,64	2,73	4,96	8,61	12,58	17,45	23,06	27,12	33,88
kg Boya başına tüketilen kWh	11,94	42,88	64,13	44,55	73,05	122,59	172,42	199,47	249,47
kg KOİ başına tüketilen kWh	10,06	31,39	48,70	63,90	107,80	160,26	217,39	255,66	409,46
Faraday, (F/m ³)	5,31	10,61	15,92	21,39	26,7	32,00	37,48	42,78	48,09
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,344	0,656	0,963	1,010	1,334	1,646	1,743	1,852	1,904
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,038	0,164	0,298	0,517	0,755	1,047	1,384	1,627	2,033
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	6,423	10,308	12,450	5,226	7,746	11,560	13,036	13,619	14,019
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	5,412	7,545	9,455	7,495	11,430	15,112	16,435	17,455	23,010
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,716	2,573	3,848	2,673	4,383	7,355	10,345	11,968	14,968
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,604	1,883	2,922	3,834	6,468	9,616	13,043	15,340	24,568
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,383	0,820	1,260	1,527	2,089	2,693	3,127	3,479	3,937
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	7,139	12,881	16,298	7,899	12,129	18,915	23,381	25,587	28,987
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	6,016	9,428	12,377	11,329	17,898	24,728	29,479	32,795	47,578
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,59	1,21	1,85	2,67	2,84	3,03	3,78	3,92	4,05

Ek.3.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine akım yoğunluğunun etkisi.

Parametre	Akım Yoğunluğu (A/m ²)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Başlangıç pH	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Son pH	8,16	9,76	10,22	10,03	9,49	10,04	9,61	10,25	10,26
Akım (A)	0,32	0,64	0,96	1,29	1,61	1,93	2,26	2,58	2,90
Voltaj (V)	7,07	12,72	19,17	21,4	24,01	30,17	31,77	36,65	39,75
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (µS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	69,78	3,27	2,79	1,2	0,54	2,4	7,02	3,99	4,95
R _{BOYA} (%)	76,74	98,91	99,07	99,6	99,82	99,2	97,66	98,67	98,35
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	180,29	164,39	147,41	148,46	150,96	148,46	154,64	152,92	150,14
R _{KOİ} (%)	29,38	35,61	42,26	41,85	40,87	41,85	39,43	40,1	41,19
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	0,99	0,72	0,33	0,28	0,24	0,25	0,32	0,35	0,39
R _{TURB.} (%)	75,46	82,17	91,89	93,19	94,01	93,87	92,11	91,4	90,28
Anodik Çözünme (g)	0,1189	0,2306	0,3364	0,4456	0,5666	0,67	0,8028	0,8865	1,0173
Katodik Çözünme (g)	0,0033	0,0037	0,0056	0,01	0,0092	0,0135	0,0145	0,0162	0,0168
Toplam Çözünme (g)	0,1222	0,2343	0,3420	0,4556	0,5758	0,6835	0,8173	0,9027	1,0341
Akım Verimliliği (%)	161,09	156,21	151,91	149,76	152,58	150,51	154,01	148,97	152,09
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,16	0,31	0,46	0,61	0,77	0,91	1,09	1,20	1,38
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,71	1,05	1,53	2,03	2,56	3,06	3,72	4,07	4,67

Ek.4.

Ek.4.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	2,17	3,44	4,23	5,68	7,36	8,53	10,82	11,75	13,11
Enerji Tüketimi (Wh)	0,75	2,71	6,13	9,2	12,88	19,41	23,93	31,52	38,42
kg Boya başına tüketilen kWh	3,26	9,13	20,63	30,79	43,01	65,22	81,68	106,48	130,22
kg KOİ başına tüketilen kWh	10,00	29,81	56,82	86,11	123,44	181,67	237,72	307,89	365,35
Faraday, (F/m ³)	5,31	10,61	15,92	21,39	26,7	32	37,48	42,78	48,09
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,049	0,094	0,137	0,182	0,230	0,273	0,327	0,361	0,414
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,045	0,163	0,368	0,552	0,773	1,165	1,436	1,891	2,305
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,212	0,316	0,460	0,610	0,769	0,918	1,116	1,220	1,402
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,652	1,031	1,268	1,705	2,207	2,558	3,247	3,526	3,933
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,195	0,548	1,238	1,847	2,581	3,913	4,901	6,389	7,813
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,600	1,789	3,409	5,166	7,406	10,900	14,263	18,473	21,921
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,094	0,256	0,505	0,734	1,003	1,438	1,763	2,252	2,719
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	0,408	0,864	1,698	2,457	3,350	4,832	6,016	7,608	9,214
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,251	2,819	4,677	6,872	9,613	13,458	17,510	21,999	25,854
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,49	1,28	1,62	2,52	2,65	2,84	2,91	2,89	3,02

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine iletkenliğin etkisi.

Parametre	İletkenlik (µS/cm)								
	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Başlangıç pH	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Son pH	6,88	7,32	7,24	7,4	7,54	7,21	7	6,89	6,77
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	33,2	32,28	25,73	20,02	14,05	11,08	9,36	8,14	7,07
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	150,15	61,35	90,72	106,74	149,31	167,55	176,52	174,03	173,58
R _{BOYA} (%)	82,95	79,55	69,76	64,42	50,23	44,15	41,16	41,99	42,14
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	140,52	101,61	115,17	120,55	168,04	171,38	177,28	182,67	187,57
R _{KOİ} (%)	59,56	60,2	54,89	52,78	34,18	32,87	30,56	28,45	26,53
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	0,82	0,33	0,44	0,40	1,03	1,39	1,94	2,00	2,11
R _{TURB.} (%)	90,24	91,97	89,13	90,12	74,56	65,67	52,12	50,5	48
Anodik Çözünme (g)	0,0694	0,248	0,2715	0,3324	0,2216	0,2654	0,3006	0,3261	0,2228
Katodik Çözünme (g)	0,0629	0,1572	0,1995	0,0885	0,1474	0,1469	0,1421	0,1312	0,2305
Toplam Çözünme (g)	0,1323	0,4052	0,4710	0,4209	0,3690	0,4123	0,4427	0,4573	0,4533
Akım Verimliliği (%)	48,10	171,88	188,16	230,37	153,58	183,94	208,33	226,00	154,41
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,18	0,54	0,63	0,56	0,49	0,55	0,59	0,61	0,60
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	1,18	2,26	3,00	2,90	3,26	4,15	4,78	4,84	4,78

Ek.5.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	1,54	3,51	4,48	4,16	5,64	6,55	7,56	8,39	8,92
Enerji Tüketimi (Wh)	14,28	13,88	11,06	8,61	6,04	4,76	4,02	3,5	3,04
kg Boya başına tüketilen kWh	95,30	58,16	52,85	44,55	40,08	35,94	32,56	27,78	24,05
kg KOİ başına tüketilen kWh	124,41	90,31	78,92	63,90	69,22	56,72	51,53	48,19	44,88
Faraday, (F/m ³)	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,317	0,972	1,130	1,010	0,885	0,989	1,062	1,097	1,088
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,857	0,833	0,664	0,517	0,362	0,286	0,241	0,210	0,182
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	2,118	4,074	5,400	5,226	5,875	7,469	8,602	8,710	8,603
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	2,766	6,326	8,065	7,495	10,146	11,789	13,615	15,107	16,058
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	5,718	3,490	3,171	2,673	2,405	2,156	1,953	1,667	1,443
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	7,465	5,419	4,735	3,834	4,153	3,403	3,092	2,891	2,693
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	1,174	1,805	1,794	1,527	1,248	1,275	1,303	1,307	1,270
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	7,836	7,564	8,571	7,899	8,280	9,625	10,556	10,377	10,046
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	10,230	11,745	12,800	11,329	14,299	15,192	16,706	17,998	18,751
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	1,11	2,22	1,97	2,67	1,63	1,27	1,47	1,79	1,48

EK.5.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine iletkenliğin etkisi.

Parametre	İletkenlik (µS/cm)								
	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Başlangıç pH	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Son pH	7,16	9,1	8,96	10,03	10,52	10,66	10,79	10,8	10,81
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	36,14	30,04	23,77	19,17	14,57	11,23	8,66	7,38	6,27
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	3,39	5,25	2,04	2,79	4,26	6,93	3,54	5,04	5,22
R _{BOYA} (%)	98,87	98,25	99,32	99,07	98,58	97,69	98,82	98,32	98,26
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	219,12	208,20	176,13	147,41	143,45	152,34	182,92	188,95	188,05
R _{KOİ} (%)	14,17	18,45	31,01	42,26	43,81	40,33	28,35	25,99	26,34
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	0,44	0,39	0,38	0,33	0,33	0,44	0,45	0,48	0,48
R _{TURB.} (%)	89,23	90,28	90,58	91,89	91,82	89,19	88,98	88,19	88,24
Anodik Çözünme (g)	0,2682	0,434	0,3435	0,3364	0,3406	0,3391	0,3424	0,3506	0,3527
Katodik Çözünme (g)	0,0059	0,0055	0,0049	0,0056	0,0103	0,0035	0,0059	0,0046	0,0043
Toplam Çözünme (g)	0,2741	0,4395	0,3484	0,3420	0,3509	0,3426	0,3483	0,3552	0,3570
Akım Verimliliği (%)	121,11	195,98	155,11	151,91	153,80	153,13	154,62	158,32	159,27
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,37	0,59	0,46	0,46	0,47	0,46	0,46	0,47	0,48
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	1,23	1,99	1,56	1,53	1,58	1,56	1,57	1,61	1,61

Ek.6.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	10,10	12,44	5,87	4,23	4,18	4,44	6,41	7,14	7,08
Enerji Tüketimi (Wh)	11,56	9,73	7,61	6,13	4,66	3,59	2,77	2,36	2,01
kg Boya başına tüketilen kWh	38,97	33,01	25,54	20,63	15,76	12,25	9,34	8,00	6,82
kg KOİ başına tüketilen kWh	319,55	206,57	96,12	56,82	41,66	34,87	38,27	35,57	29,89
Faraday, (F/m ³)	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,110	0,176	0,139	0,137	0,140	0,137	0,139	0,142	0,143
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,694	0,584	0,457	0,368	0,280	0,215	0,166	0,142	0,121
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,370	0,596	0,468	0,460	0,474	0,467	0,470	0,482	0,484
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	3,030	3,731	1,760	1,268	1,255	1,331	1,924	2,141	2,123
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	2,338	1,981	1,532	1,238	0,945	0,735	0,561	0,480	0,409
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	19,173	12,394	5,767	3,409	2,500	2,092	2,296	2,134	1,793
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,803	0,760	0,596	0,505	0,420	0,352	0,305	0,284	0,263
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	2,708	2,577	2,000	1,698	1,420	1,202	1,030	0,962	0,893
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	22,203	16,125	7,527	4,677	3,754	3,423	4,221	4,275	3,916
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,54	1,62	1,42	1,62	1,25	1,39	1,48	1,07	1,25

Ek.6.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine zamanın etkisi.

Parametre	Zaman (dk)								
	5	10	15	20	30	40	50	60	70
Başlangıç pH	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Son pH	6,54	6,82	6,86	7,4	7,37	7,34	7,39	7,78	7,93
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	32,85	31,83	38,8	20,02	36,69	36,39	34,12	33,1	33,96
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	276,9	150,42	80,25	61,35	56,52	53,7	47,1	47,94	49,5
R_{BOYA} (%)	7,7	49,86	73,25	79,55	81,16	82,1	84,3	84,02	83,5
Başlangıç KOI (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOI (mg/l)	176,67	123,57	106,54	101,61	98,29	96,25	97,01	97,27	106,72
R_{KOI} (%)	30,8	51,6	58,27	60,2	61,5	62,3	62	61,9	58,2
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	1,12	1,06	0,64	0,33	0,37	0,33	0,32	0,31	0,43
$R_{TURB.}$ (%)	72,28	73,87	84,16	91,97	90,97	91,88	92	92,33	89,39
Anodik Çözünme (g)	0,1247	0,1976	0,2352	0,2480	0,4409	0,5596	0,6702	0,7279	0,8423
Katodik Çözünme (g)	0,1163	0,1856	0,2461	0,1572	0,3016	0,3341	0,4112	0,5001	0,5612
Toplam Çözünme (g)	0,2410	0,3832	0,4813	0,4052	0,7425	0,8937	1,0814	1,2280	1,4035
Akım Verimliliği (%)	345,72	273,89	217,36	171,88	203,71	193,92	185,80	168,16	166,79
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,32	0,51	0,64	0,54	0,99	1,19	1,44	1,64	1,87
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	13,91	3,41	2,92	2,26	4,07	4,84	5,70	6,49	7,47

Ek.7.

EK.7.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOI)	4,09	3,88	4,31	3,51	6,30	7,49	9,11	10,36	12,59
Enerji Tüketimi (Wh)	3,53	6,84	10,9	8,61	23,66	31,29	36,68	42,7	51,11
kg Boya başına tüketilen kWh	152,81	45,73	49,60	36,08	97,17	127,04	145,04	169,40	204,03
kg KOI başına tüketilen kWh	44,89	51,92	73,27	56,02	150,69	196,73	231,73	270,20	343,98
Faraday, (F/m ³)	5,35	10,7	16,05	21,39	32,09	42,79	53,49	64,19	74,89
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,578	0,919	1,155	0,972	1,782	2,144	2,595	2,946	3,368
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,212	0,919	1,155	0,972	1,782	2,144	2,595	2,946	3,368
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	25,033	6,147	5,255	4,074	7,317	8,706	10,260	11,690	13,443
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOI)	7,354	0,410	0,654	0,517	1,420	1,877	2,201	2,562	3,067
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	9,169	2,744	2,976	2,165	5,830	7,622	8,702	10,164	12,242
Enerji Maliyeti (\$/kg KOI)	2,694	3,115	4,396	3,361	9,041	11,804	13,904	16,212	20,639
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,790	1,839	2,310	1,944	3,563	4,289	5,189	5,893	6,735
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	34,202	8,891	8,231	6,239	13,148	16,329	18,962	21,854	25,685
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOI)	10,047	3,526	5,050	3,878	10,461	13,681	16,105	18,774	23,705
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,34	1,05	1,16	2,22	2,17	2,28	2,75	3,07	3,82

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine zamanın etkisi.

Parametre	Zaman (dk)								
	5	10	15	20	30	40	50	60	70
Başlangıç pH	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Son pH	7,9	9,48	9,86	10,03	10,16	9,58	9,97	10,1	8,92
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	18,48	17,37	17,08	19,17	20,88	20,1	22,66	19,2	22,6
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (µS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	106,41	6,57	5,97	2,79	0,93	0,72	0,63	0,6	0,57
R _{BOYA} (%)	64,53	97,81	98,01	99,07	99,69	99,76	99,79	99,8	99,81
Başlangıç KOİ (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOİ (mg/l)	191,65	171,20	162,24	147,41	150,17	150,60	150,75	148,92	149,20
R _{KOİ} (%)	24,93	32,94	36,45	42,26	41,18	41,01	40,95	41,67	41,56
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	1,57	0,52	0,46	0,33	0,36	0,30	0,30	0,25	0,24
R _{TURB.} (%)	61,17	87,13	88,67	91,89	91,14	92,48	92,69	93,78	94,12
Anodik Çözünme (g)	0,1126	0,1848	0,2623	0,3364	0,5112	0,6837	0,8883	1,0046	1,1682
Katodik Çözünme (g)	0,0013	0,0025	0,005	0,0056	0,0051	0,0062	0,0064	0,0073	0,0085
Toplam Çözünme (g)	0,1139	0,1873	0,2673	0,3420	0,5163	0,6899	0,8947	1,0119	1,1767
Akım Verimliliği (%)	203,41	166,92	157,95	151,92	153,91	154,38	160,47	151,23	150,74
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,15	0,25	0,36	0,46	0,69	0,92	1,19	1,35	1,57
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,78	0,85	1,21	1,53	2,30	3,07	3,98	4,51	5,24

Ek.8.

EK.8.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	2,39	2,97	3,83	4,23	6,55	8,78	11,41	12,68	14,78
Enerji Tüketimi (Wh)	1,48	2,78	4,1	6,13	10,02	12,86	18,13	18,43	25,31
kg Boya başına tüketilen kWh	7,65	9,47	13,94	20,63	33,50	42,97	60,56	61,56	84,53
kg KOİ başına tüketilen kWh	23,25	33,06	44,06	56,82	95,31	122,83	173,42	173,24	238,54
Faraday, (F/m ³)	3,98	7,96	11,94	15,92	23,88	31,84	39,8	47,76	55,72
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,046	0,075	0,107	0,137	0,206	0,276	0,358	0,405	0,471
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,089	0,449	0,641	0,821	1,239	1,655	2,147	2,428	2,823
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,235	0,255	0,364	0,460	0,690	0,922	1,195	1,352	1,572
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,716	0,891	1,149	1,268	1,964	2,635	3,422	3,804	4,435
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,459	0,568	0,837	1,238	2,010	2,578	3,634	3,693	5,072
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,395	1,983	2,644	3,409	5,718	7,370	10,405	10,394	14,313
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,134	0,524	0,748	0,957	1,445	1,931	2,505	2,833	3,294
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	0,694	0,824	1,200	1,698	2,701	3,500	4,829	5,045	6,643
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	2,111	2,874	3,792	4,677	7,682	10,005	13,827	14,198	18,748
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,41	0,85	1,12	1,62	1,87	1,92	2,18	2,42	2,76

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine boya konsantrasyonunun etkisi.

Parametre	Boya konsantrasyonu (mg/l)								
	50	100	200	300	400	500	750	1000	1500
Başlangıç pH	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Son pH	7,95	8,01	8,3	7,4	7,71	7,68	7,55	7,45	7,15
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	33,29	31,84	34,35	20,02	31,39	34,47	34,48	34,2	34,33
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	0,84	5,74	30,52	61,35	105,28	154,15	271,80	418,30	776,55
R _{BOYA} (%)	98,31	94,26	84,74	79,55	73,68	69,17	63,76	58,17	48,23
Başlangıç KOI (mg/l)	42,55	85,1	170,2	255,3	340,4	425,5	638,2	851	1276,5
Çıkış KOI (mg/l)	13,24	28,74	58,77	101,61	162,10	234,96	390,83	539,87	838,92
R _{KOI} (%)	68,89	66,23	65,47	60,2	52,38	44,78	38,76	36,56	34,28
Başlangıç Türbidite (NTU)	0,88	1,33	2,56	4,05	6,47	11,28	11,12	12,61	17,66
Çıkış Türbidite (NTU)	0,03	0,05	0,12	0,33	0,81	1,50	1,69	1,99	3,12
R _{TURB.} (%)	97,13	96,17	95,28	91,97	87,45	86,67	84,79	84,24	82,33
Anodik Çözünme (g)	0,2499	0,2498	0,2201	0,2480	0,2533	0,2533	0,2169	0,2352	0,1923
Katodik Çözünme (g)	0,1199	0,1877	0,1876	0,1572	0,1798	0,1956	0,1775	0,1698	0,1745
Toplam Çözünme (g)	0,3698	0,4375	0,4077	0,4052	0,4331	0,4125	0,4127	0,3621	0,3668
Akım Verimliliği (%)	173,19	173,12	152,54	171,88	175,55	175,55	150,32	163,01	133,27
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,49	0,58	0,54	0,54	0,58	0,55	0,55	0,48	0,49
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	10,03	6,19	3,21	2,26	1,96	1,59	1,15	0,83	0,68

Ek.9.

EK.9.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOI)	16,82	10,35	4,88	3,51	3,24	2,89	2,22	1,55	1,12
Enerji Tüketimi (Wh) kg Boya başına tüketilen kWh	14,31	13,69	14,77	8,61	13,50	14,82	14,83	14,71	14,76
kg KOI başına tüketilen kWh	291,22	145,25	87,15	36,07	45,80	42,86	31,00	25,28	20,40
Faraday, (F/m ³)	488,34	242,92	132,55	56,01	75,70	77,79	59,94	47,27	33,73
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	64,19	64,19	64,19	21,39	64,19	64,19	64,19	64,19	64,19
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,887	1,050	0,978	0,972	1,039	0,990	0,990	0,869	0,880
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,859	0,821	0,886	0,517	0,810	0,889	0,890	0,882	0,886
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOI)	18,051	11,137	5,772	4,074	3,526	2,862	2,071	1,494	1,217
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	30,270	18,625	8,779	6,326	5,828	5,194	4,003	2,793	2,011
Enerji Maliyeti (\$/kg KOI)	17,473	8,715	5,229	2,164	2,748	2,571	1,860	1,517	1,224
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	29,301	14,575	7,953	3,361	4,542	4,667	3,596	2,836	2,024
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	1,746	1,871	1,864	1,489	1,849	1,879	1,880	1,751	1,766
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOI)	35,524	19,852	11,001	6,238	6,274	5,433	3,931	3,010	2,441
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	59,571	33,200	16,732	9,687	10,370	9,862	7,599	5,629	4,035
	1,19	1,27	1,43	2,22	2,34	2,67	2,82	2,93	3,02

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine boya konsantrasyonunun etkisi.

Parametre	Boya konsantrasyonu (mg/l)								
	50	100	200	300	400	500	750	1000	1500
Başlangıç pH	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Son pH	9,27	8,75	9,78	10,03	10,66	10,47	10,67	10,47	10,63
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	14,67	18,7	21,68	19,17	20,03	18,53	18,11	19,21	17,46
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	0,01	0,03	0,16	2,79	7	10	27,975	107,6	460,35
R _{BOYA} (%)	99,98	99,97	99,92	99,07	98,25	98	96,27	89,24	69,31
Başlangıç KOİ (mg/l)	42,55	85,1	170,2	255,3	340,4	425,5	638,2	851	1276,5
Çıkış KOİ (mg/l)	22,93	47,09	96,35	147,41	202,47	254,62	388,92	524,22	826,28
R _{KOİ} (%)	46,12	44,67	43,39	42,26	40,52	40,16	39,06	38,4	35,27
Başlangıç Türbidite (NTU)	0,88	1,33	2,56	4,05	6,47	11,28	11,12	12,61	17,66
Çıkış Türbidite (NTU)	0,01	0,01	0,07	0,33	0,69	1,38	1,49	1,85	4,91
R _{TURB.} (%)	99,17	98,89	97,28	91,89	89,34	87,76	86,56	85,35	72,18
Anodik Çözünme (g)	0,3526	0,3498	0,3468	0,3364	0,3529	0,343	0,3586	0,3578	0,3531
Katodik Çözünme (g)	0,0048	0,0055	0,0049	0,0056	0,0052	0,0046	0,0091	0,0085	0,0074
Toplam Çözünme (g)	0,3574	0,3553	0,3517	0,3420	0,3581	0,3476	0,3677	0,3663	0,3605
Akım Verimliliği (%)	159,24	157,97	156,62	151,92	159,37	154,90	161,95	161,59	159,46
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,48	0,47	0,47	0,46	0,48	0,46	0,49	0,49	0,48
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	9,53	4,74	2,35	1,53	1,21	0,95	0,68	0,55	0,46

Ek.10.

Ek.10.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	24,28	12,46	6,35	4,23	3,46	2,71	1,97	1,49	1,07
Enerji Tüketimi (Wh)	4,69	5,98	6,93	6,13	6,40	5,92	5,79	6,14	5,58
kg Boya başına tüketilen kWh	93,81	59,80	34,68	20,62	16,29	12,09	8,02	6,88	5,37
kg KOİ başına tüketilen kWh	238,98	157,26	93,85	56,80	46,42	34,67	23,22	18,79	12,40
Faraday, (F/m ³)	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,143	0,142	0,141	0,137	0,143	0,139	0,147	0,146	0,144
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,281	0,359	0,416	0,368	0,384	0,355	0,347	0,368	0,335
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	2,859	1,421	0,704	0,460	0,364	0,284	0,204	0,164	0,139
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	7,283	3,738	1,904	1,268	1,038	0,813	0,590	0,448	0,320
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	5,629	3,588	2,081	1,237	0,978	0,725	0,481	0,413	0,322
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	14,339	9,435	5,631	3,408	2,785	2,080	1,393	1,128	0,744
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,424	0,501	0,556	0,504	0,527	0,494	0,494	0,515	0,479
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	8,488	5,009	2,785	1,697	1,342	1,009	0,685	0,577	0,461
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	21,622	13,173	7,535	4,676	3,824	2,893	1,983	1,576	1,064
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,67	1,02	1,12	1,62	2,34	2,63	2,87	3,26	3,32

Ek.11.

Elektrokoagülasyon prosesinde Al elektrotları üzerine başlangıç pH'nın etkisi

Parametre	Başlangıç pH						
	3	4	5	6	7	8	9
Ölçülen son pH	7	8,54	8,61	8,7	8,87	8,81	8,83
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	19,31	19,13	20,1	18,91	18,68	18,92	18,86
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	133,62	185,73	189,51	200,52	198,54	194,61	192,54
R _{BOYA} (%)	55,46	38,09	36,83	33,16	33,82	35,13	35,82
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	129,20	147,81	150,42	166,99	173,36	169,56	168,05
R _{KOİ} (%)	41,6	33,19	32,01	24,52	21,64	23,36	24,04
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	0,77	0,68	0,76	1,17	1,90	1,96	2,06
R _{TURB.} (%)	86,33	87,87	86,48	79,14	66,13	65,15	63,34
Anodik Çözünme (g)	0,2518	0,2125	0,2133	0,1941	0,1944	0,1892	0,1975
Katodik Çözünme (g)	0,0781	0,0728	0,0752	0,0745	0,089	0,0648	0,712
Toplam Çözünme (g)	0,3299	0,2853	0,2885	0,2686	0,2834	0,2540	0,9095
Akım Verimliliği (%)	174,51	147,27	147,83	134,52	134,73	131,12	136,88
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,44	0,38	0,38	0,36	0,38	0,34	1,21
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	2,64	3,33	3,48	3,60	3,72	3,21	11,28
Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	4,78	5,18	5,43	6,60	7,89	6,55	22,79
Enerji Tüketimi (Wh)	8,3	8,23	8,64	7,82	8,03	8,14	8,81
kg Boya başına tüketilen kWh	49,89	72,02	78,20	78,61	79,14	77,24	81,98
kg KOİ başına tüketilen kWh	90,18	112,08	122,00	144,15	167,72	157,50	165,64
Faraday, (F/m ³)	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,29
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,792	0,685	0,692	0,644	0,680	0,609	2,182
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,498	0,494	0,518	0,469	0,482	0,488	0,529
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	4,758	5,991	6,265	6,478	6,702	5,783	20,308
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	8,601	9,323	9,775	11,880	14,203	11,792	41,031
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	2,993	4,321	4,692	4,717	4,749	4,634	4,919
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	5,411	6,725	7,320	8,649	10,063	9,450	9,939
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	1,290	1,178	1,211	1,114	1,162	1,098	2,711
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	7,751	10,312	10,957	11,195	11,451	10,417	25,227
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	14,012	16,047	17,095	20,529	24,266	21,242	50,969
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	2,17	2,24	2,14	2,67	2,57	2,85	2,1

Ek.12.

Elektrokoagülasyon prosesinde Fe elektrotları üzerine başlangıç pH'nın etkisi

Parametre	Başlangıç pH						
	3	4	5	6	7	8	9
Ölçülen pH	5,29	7	7,25	7,48	7,16	7,31	7,2
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	17,88	18,44	18,41	17,26	16,58	17,73	18,46
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	1,02	3,96	1,08	3,84	3,66	2,55	2,82
R _{BOYA} (%)	99,66	98,68	99,64	98,72	98,78	99,15	99,06
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	80,80	77,59	80,09	93,56	115,89	112,08	122,28
R _{KOİ} (%)	63,48	64,93	63,8	57,71	47,62	49,34	44,73
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	0,70	0,77	0,60	0,80	0,81	0,78	0,77
R _{TURB.} (%)	87,45	86,34	89,26	85,78	85,48	86,12	86,31
Anodik Çözünme (g)	0,4602	0,4998	0,4624	0,4506	0,459	0,4597	0,4716
Katodik Çözünme (g)	0,0016	0,0457	0,0142	0,0124	0,0114	0,3071	0,0089
Toplam Çözünme (g)	0,4618	0,5455	0,4766	0,4630	0,4704	0,7668	0,4805
Akım Verimliliği (%)	154,67	167,98	155,41	151,44	154,26	154,50	158,50
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,62	0,73	0,64	0,62	0,63	1,02	0,64
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	2,06	2,46	2,13	2,08	2,12	3,44	2,16
Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	4,38	5,06	4,50	4,83	5,95	9,36	6,47
Enerji Tüketimi (Wh)	7,89	7,93	7,92	7,42	7,13	7,62	7,94
kg Boya başına tüketilen kWh	26,39	26,79	26,50	25,05	24,06	25,62	26,72
kg KOİ başına tüketilen kWh	56,18	55,20	56,11	58,12	67,68	69,81	80,23
Faraday, (F/m ³)	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39	21,39
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,185	0,218	0,191	0,185	0,188	0,307	0,192
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,473	0,476	0,475	0,445	0,428	0,457	0,476
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,618	0,737	0,638	0,625	0,635	1,031	0,647
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,315	1,519	1,350	1,450	1,786	2,809	1,942
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	1,583	1,607	1,590	1,503	1,444	1,537	1,603
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	3,371	3,312	3,367	3,487	4,061	4,188	4,814
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,658	0,694	0,666	0,630	0,616	0,764	0,669
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	2,201	2,344	2,227	2,128	2,078	2,568	2,250
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	4,686	4,831	4,717	4,937	5,846	6,997	6,756
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	2,11	2,4	2,35	2,13	2,23	2,45	2,26

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine akım yoğunluğunun etkisi.

Parametre	Akım Yoğunluğu (A/m ²)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Başlangıç pH	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Son pH	6,52	6,71	6,96	7	8,25	8,53	8,6	8,46	8,12
Akım (A)	0,32	0,64	0,96	1,29	1,61	1,93	2,26	2,58	2,9
Voltaj (V)	5,4	10,21	14,65	19,31	23,31	26,26	29,98	30,85	32,23
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	160,44	104,58	131,28	133,62	129,78	132,81	136,65	138,72	141,09
R_{BOYA} (%)	46,52	65,14	56,24	55,46	56,74	55,73	54,45	53,76	52,97
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	109,51	90,35	115,91	129,20	131,95	136,13	144,62	147,81	150,07
$R_{KOİ}$ (%)	50,5	59,16	47,61	41,6	40,36	38,47	34,63	33,19	32,17
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	0,76	0,57	0,62	0,74	1,11	1,53	1,72	2,10	2,15
$R_{TURB.}$ (%)	86,45	89,84	88,93	86,83	80,21	72,73	69,34	62,57	61,67
Anodik Çözünme (g)	0,0181	0,1366	0,1548	0,2518	0,2609	0,2862	0,3248	0,3594	0,4136
Katodik Çözünme (g)	0,0089	0,0568	0,0669	0,0781	0,0892	0,1023	0,1133	0,1306	0,1578
Toplam Çözünme (g)	0,0270	0,1934	0,2217	0,3299	0,3501	0,3885	0,4381	0,4900	0,5714
Akım Verimliliği (%)	50,57	190,84	144,17	174,51	144,88	132,58	128,49	124,54	127,51
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,04	0,26	0,30	0,44	0,47	0,52	0,58	0,65	0,76
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,26	1,32	1,75	2,64	2,74	3,10	3,58	4,05	4,79

Ek.13.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	0,32	1,97	2,81	4,78	5,23	6,08	7,62	8,90	10,70
Enerji Tüketimi (Wh)	0,58	2,18	4,69	8,3	12,51	16,89	22,58	26,53	31,15
kg Boya başına tüketilen kWh	4,16	11,16	27,80	49,89	73,49	101,02	138,23	164,50	196,02
kg KOİ başına tüketilen kWh	5,19	16,66	44,53	90,18	140,10	198,45	294,72	361,30	437,67
Faraday, (F/m ³)	5,31	10,61	15,92	21,39	26,7	32	37,48	42,78	48,09
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,065	0,464	0,532	0,792	0,840	0,932	1,051	1,176	1,371
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,035	0,131	0,281	0,498	0,751	1,013	1,355	1,592	1,869
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,464	2,375	3,153	4,758	4,935	5,575	6,435	7,290	8,628
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,580	3,545	5,050	8,601	9,408	10,952	13,720	16,011	19,263
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,249	0,669	1,668	2,993	4,410	6,061	8,294	9,870	11,761
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,311	0,999	2,672	5,411	8,406	11,907	17,683	21,678	26,260
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,100	0,595	0,813	1,290	1,591	1,946	2,406	2,768	3,240
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	0,714	3,044	4,821	7,751	9,345	11,637	14,729	17,160	20,389
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,891	4,545	7,722	14,012	17,814	22,859	31,403	37,689	45,523
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,65	0,82	1,69	2,17	2,28	2,87	3,05	2,92	2,91

Ek.13.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine akım yoğunluğunun etkisi.

Parametre	Akım Yoğunluğu (A/m ²)								
	25	50	75	100	125	150	175	200	225
Başlangıç pH	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Son pH	6,7	8,14	8,48	7,25	7,6	8,56	9,34	9,14	8,56
Akım (A)	0,32	0,64	0,96	1,29	1,61	1,93	2,26	2,58	2,9
Voltaj (V)	5,11	9,91	13,12	18,41	21,34	21,58	28,46	30,88	33,42
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	33,33	2,34	1,86	10,08	1,29	1,23	1,29	1,32	1,62
R _{BOYA} (%)	88,89	99,22	99,38	96,64	99,57	99,59	99,57	99,56	99,46
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	154,91	99,93	80,42	80,09	90,35	93,54	103,41	107,41	109,56
R _{KOİ} (%)	29,98	54,83	63,65	63,8	59,16	57,72	53,26	51,45	50,48
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	1,90	0,72	0,61	0,60	0,82	0,89	0,92	1,50	1,65
R _{TURB.} (%)	66,12	87,17	89,21	89,26	85,38	84,14	83,6	73,26	70,5
Anodik Çözünme (g)	0,1246	0,2367	0,3454	0,4624	0,5658	0,7101	0,7903	0,9069	1,031
Katodik Çözünme (g)	0,0067	0,0107	0,0043	0,0142	0,0102	0,0065	0,0106	0,0073	0,0217
Toplam Çözünme (g)	0,1313	0,2474	0,3497	0,4766	0,5760	0,7166	0,8009	0,9142	1,0527
Akım Verimliliği (%)	168,81	160,34	155,97	155,41	152,37	159,52	151,61	152,40	154,14
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,18	0,33	0,47	0,64	0,77	0,96	1,07	1,22	1,40
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,66	1,11	1,56	2,19	2,57	3,20	3,57	4,08	4,70

Ek.14.

EK.14.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	2,64	2,72	3,31	4,50	5,87	7,48	9,06	10,71	12,56
Enerji Tüketimi (Wh)	0,55	2,11	4,2	7,91	11,45	13,88	21,44	26,55	32,31
kg Boya başına tüketilen kWh	2,06	7,09	14,09	27,28	38,33	46,46	71,78	88,89	108,28
kg KOİ başına tüketilen kWh	8,29	17,39	29,83	56,04	87,48	108,69	181,95	233,25	289,30
Faraday, (F/m ³)	5,31	10,61	15,92	21,39	26,7	32	37,48	42,78	48,09
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,053	0,099	0,140	0,191	0,230	0,287	0,320	0,366	0,421
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,033	0,127	0,252	0,475	0,687	0,833	1,286	1,593	1,939
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,197	0,332	0,469	0,657	0,771	0,959	1,072	1,224	1,411
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,792	0,816	0,993	1,350	1,760	2,244	2,718	3,212	3,769
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,124	0,425	0,845	1,637	2,300	2,787	4,307	5,333	6,497
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	0,498	1,044	1,790	3,362	5,249	6,522	10,917	13,995	17,358
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,086	0,226	0,392	0,665	0,917	1,119	1,607	1,959	2,360
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	0,321	0,758	1,314	2,294	3,071	3,747	5,379	6,557	7,908
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,289	1,859	2,783	4,713	7,009	8,766	13,635	17,207	21,128
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,39	0,98	1,62	2,35	2,49	2,63	2,76	2,93	3,32

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine iletkenliğin etkisi.

Parametre	İletkenlik (µS/cm)								
	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Başlangıç pH	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Son pH	6,99	6,55	6,73	6,71	6,67	6,58	6,33	6,73	6,55
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Akım (A)	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Voltaj (V)	28,83	16,51	13,8	10,21	8,04	6,14	5,26	4,96	4,21
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	13,53	43,89	84,69	104,58	132,18	160,02	164,97	181,17	183,27
R _{BOYA} (%)	95,49	85,37	71,77	65,14	55,94	46,66	45,01	39,61	38,91
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	23,58	61,64	87,17	90,35	109,51	135,04	147,81	163,78	167,52
R _{KOİ} (%)	89,34	72,14	60,6	59,16	50,5	38,96	33,19	25,97	24,28
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	0,44	0,55	0,57	0,57	0,71	0,74	0,81	0,91	1,19
R _{TURB.} (%)	92,18	90,12	89,78	89,84	87,34	86,73	85,49	83,78	78,79
Anodik Çözünme (g)	0,0797	0,1236	0,1051	0,1366	0,1045	0,0969	0,0932	0,0846	0,825
Katodik Çözünme (g)	0,0438	0,0574	0,056	0,0568	0,0548	0,1065	0,0661	0,0539	0,0533
Toplam Çözünme (g)	0,1235	0,1810	0,1611	0,1934	0,1593	0,2034	0,1593	0,1385	0,8783
Akım Verimliliği (%)	111,34	172,67	146,83	190,84	145,99	135,37	130,20	118,19	1152,56
Harcanan Al (kg) /m ³ atksu	0,16	0,24	0,21	0,26	0,21	0,27	0,21	0,18	1,17
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,57	0,94	1,00	1,32	1,27	1,94	1,57	1,55	10,03

Ek.15.

Ek.15.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	0,83	1,51	1,60	1,97	1,90	3,15	2,89	3,21	21,80
Enerji Tüketimi (Wh)	6,15	3,52	2,94	2,18	1,72	1,31	1,12	1,06	0,9
kg Boya başına tüketilen kWh	21,47	13,74	13,65	11,16	10,25	9,36	8,29	8,92	7,71
kg KOİ başına tüketilen kWh	31,11	22,05	21,93	16,66	15,39	15,20	15,25	18,45	16,75
Faraday, (F/m ³)	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,296	0,434	0,387	0,464	0,382	0,488	0,382	0,332	2,107
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,369	0,211	0,176	0,131	0,103	0,079	0,067	0,064	0,054
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	1,034	1,696	1,795	2,375	2,278	3,486	2,831	2,797	18,054
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,499	2,721	2,883	3,545	3,421	5,662	5,205	5,784	39,231
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	1,288	0,825	0,819	0,669	0,615	0,562	0,498	0,535	0,463
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,867	1,323	1,316	0,999	0,924	0,912	0,915	1,107	1,005
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,665	0,645	0,563	0,595	0,485	0,567	0,449	0,396	2,161
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	2,322	2,520	2,615	3,044	2,893	4,048	3,328	3,332	18,516
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	3,366	4,044	4,199	4,545	4,345	6,574	6,120	6,891	40,237
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,86	0,76	0,69	0,82	0,89	0,92	1,05	0,92	0,81

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine iletkenliğin etkisi.

Parametre	İletkenlik (µS/cm)								
	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500
Başlangıç pH	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Son pH	7,42	7,49	7,41	8,48	7,25	7,14	7,22	7,77	8,11
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	39,93	27,27	20,02	13,12	10,08	8,53	7,47	7,27	6,16
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	3,51	0,18	0,66	1,86	1,14	1,41	1,77	2,04	1,86
R _{BOYA} (%)	98,83	99,94	99,78	99,38	99,62	99,53	99,41	99,32	99,38
Başlangıç KOİ (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOİ (mg/l)	96,75	73,39	75,44	80,42	80,77	90,09	90,35	105,44	107,39
R _{KOİ} (%)	56,27	66,83	65,9	63,65	63,49	59,28	59,16	52,34	51,46
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	1,85	1,45	0,82	0,60	0,69	0,92	1,04	1,06	1,07
R _{TURB.} (%)	67,02	83,15	85,35	89,26	87,68	83,56	81,45	81,12	80,91
Anodik Çözünme (g)	0,3522	0,357	0,3159	0,3454	0,3507	0,3364	0,3561	0,2894	0,3333
Katodik Çözünme (g)	0,0121	0,0147	0,0049	0,0043	0,0136	0,0041	0,0339	0,0065	0,0059
Toplam Çözünme (g)	0,3643	0,3717	0,3208	0,3497	0,3643	0,3405	0,3900	0,2959	0,3392
Akım Verimliliği (%)	159,04	161,21	142,65	155,97	158,37	151,91	160,80	130,68	150,51
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,49	0,50	0,43	0,47	0,49	0,45	0,52	0,39	0,45
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	1,64	1,65	1,43	1,56	1,62	1,52	1,74	1,32	1,52

Ek.16.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	3,90	3,35	2,93	3,31	3,46	3,46	3,97	3,41	3,97
Enerji Tüketimi (Wh)	12,78	8,73	6,41	4,2	3,22	2,73	2,39	2,33	1,97
kg Boya başına tüketilen kWh	43,10	29,12	21,41	14,09	10,77	9,14	8,01	7,82	6,61
kg KOİ başına tüketilen kWh	102,66	59,04	43,97	29,83	22,92	20,82	18,26	20,12	17,30
Faraday, (F/m ³)	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,146	0,149	0,128	0,140	0,146	0,136	0,156	0,118	0,136
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,767	0,524	0,385	0,252	0,193	0,164	0,143	0,140	0,118
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,491	0,496	0,429	0,469	0,487	0,456	0,523	0,397	0,455
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	1,170	1,005	0,880	0,993	1,037	1,038	1,192	1,022	1,191
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	2,586	1,747	1,285	0,845	0,646	0,549	0,481	0,469	0,396
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	6,159	3,543	2,638	1,790	1,375	1,249	1,096	1,207	1,038
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,912	0,672	0,513	0,392	0,339	0,300	0,299	0,258	0,254
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	3,078	2,243	1,713	1,314	1,134	1,005	1,004	0,866	0,851
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	7,330	4,548	3,518	2,783	2,413	2,287	2,287	2,229	2,230
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,62	1,96	1,85	1,62	1,83	1,38	1,45	1,39	1,28

Ek.16.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine zamanın etkisi.

Parametre	Zaman (dk)								
	5	10	15	20	30	40	50	60	70
Başlangıç pH	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Son pH	6,54	6,82	6,86	7,4	7,37	7,34	7,39	7,78	7,93
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Akım (A)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
Voltaj (V)	32,85	31,83	38,8	20,02	36,69	36,39	34,12	33,1	33,96
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	276,9	150,42	80,25	61,35	56,52	53,7	47,1	47,94	49,5
R _{BOYA} (%)	7,7	49,86	73,25	79,55	81,16	82,1	84,3	84,02	83,5
Başlangıç KOI (mg/l)	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3	255,3
Çıkış KOI (mg/l)	176,67	123,57	106,54	101,61	98,29	96,25	97,01	97,27	106,72
R _{KOI} (%)	30,8	51,6	58,27	60,2	61,5	62,3	62	61,9	58,2
Başlangıç Türbidite (NTU)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
Çıkış Türbidite (NTU)	1,12	1,06	0,64	0,33	0,37	0,33	0,32	0,31	0,43
R _{TURB.} (%)	72,28	73,87	84,16	91,97	90,97	91,88	92	92,33	89,39
Anodik Çözünme (g)	0,1247	0,1976	0,2352	0,2480	0,4409	0,5596	0,6702	0,7279	0,8423
Katodik Çözünme (g)	0,1163	0,1856	0,2461	0,1572	0,3016	0,3341	0,4112	0,5001	0,5612
Toplam Çözünme (g)	0,2410	0,3832	0,4813	0,4052	0,7425	0,8937	1,0814	1,2280	1,4035
Akım Verimliliği (%)	345,72	273,89	217,36	171,88	203,71	193,92	185,80	168,16	166,79
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,32	0,51	0,64	0,54	0,99	1,19	1,44	1,64	1,87
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	13,91	3,41	2,92	2,26	4,07	4,84	5,70	6,49	7,47

Ek.17.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOI)	4,09	3,88	4,31	3,51	6,30	7,49	9,11	10,36	12,59
Enerji Tüketimi (Wh)	3,53	6,84	10,9	8,61	23,66	31,29	36,68	42,7	51,11
kg Boya başına tüketilen kWh	152,81	45,73	49,60	36,08	97,17	127,04	145,04	169,40	204,03
kg KOI başına tüketilen kWh	44,89	51,92	73,27	56,02	150,69	196,73	231,73	270,20	343,98
Faraday, (F/m ³)	5,35	10,7	16,05	21,39	32,09	42,79	53,49	64,19	74,89
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,578	0,919	1,155	0,972	1,782	2,144	2,595	2,946	3,368
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,212	0,919	1,155	0,972	1,782	2,144	2,595	2,946	3,368
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	25,033	6,147	5,255	4,074	7,317	8,706	10,260	11,690	13,443
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOI)	7,354	0,410	0,654	0,517	1,420	1,877	2,201	2,562	3,067
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	9,169	2,744	2,976	2,165	5,830	7,622	8,702	10,164	12,242
Enerji Maliyeti (\$/kg KOI)	2,694	3,115	4,396	3,361	9,041	11,804	13,904	16,212	20,639
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,790	1,839	2,310	1,944	3,563	4,289	5,189	5,893	6,735
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	34,202	8,891	8,231	6,239	13,148	16,329	18,962	21,854	25,685
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOI)	10,047	3,526	5,050	3,878	10,461	13,681	16,105	18,774	23,705
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,34	1,05	1,16	2,22	2,17	2,28	2,75	3,07	3,82

EK.17.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine zamanın etkisi.

Parametre	Zaman (dk)								
	5	10	15	20	30	40	50	60	70
Başlangıç pH	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Son pH	6,76	6,91	7,3	7,49	7,4	7,3	7,76	7,56	9,12
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	30,98	28,26	27,41	27,27	25,21	24,37	22,77	24,36	23,85
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (µS/cm)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Boya konsantrasyonu (mg/l)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	109,65	4,14	3,72	0,18	0,57	0,87	0,39	0,81	0,33
R _{BOYA} (%)	63,45	98,62	98,76	99,94	99,81	99,71	99,87	99,73	99,89
Başlangıç KOI (mg/l)	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24	221,24
Çıkış KOI (mg/l)	198,89	103,12	80,77	73,39	77,59	77,59	74,38	80,77	77,59
R _{KOI} (%)	10,1	53,39	63,49	66,83	64,93	64,93	66,38	63,49	64,93
Başlangıç Türbidite (NTU)	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61	5,61
Çıkış Türbidite (NTU)	3,07	1,75	1,28	0,76	0,83	0,83	1,45	1,30	1,39
R _{TURB} (%)	45,19	68,8	77,18	86,38	85,24	85,16	74,14	76,77	75,16
Anodik Çözünme (g)	0,0772	0,1677	0,2536	0,357	0,518	0,6945	0,8611	1,0182	1,1859
Katodik Çözünme (g)	0,0051	0,0036	0,0054	0,0147	0,0062	0,0127	0,0068	0,0071	0,0084
Toplam Çözünme (g)	0,0823	0,1713	0,2590	0,3717	0,5242	0,7072	0,8679	1,0253	1,1943
Akım Verimliliği (%)	139,46	151,48	152,71	161,22	155,96	156,82	155,55	153,28	153,02
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,11	0,23	0,35	0,50	0,70	0,94	1,16	1,37	1,59
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	0,58	0,77	1,17	1,65	2,33	3,15	3,86	4,57	5,31

Ek.18.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOI)	4,91	1,93	2,46	3,35	4,86	6,56	7,88	9,73	11,08
Enerji Tüketimi (Wh)	2,48	4,52	6,58	8,73	12,1	15,6	18,22	23,38	26,71
kg Boya başına tüketilen kWh	13,03	15,28	22,21	29,12	40,41	52,15	60,81	78,14	89,13
kg KOI başına tüketilen kWh	110,99	38,27	46,84	59,04	84,23	108,60	124,06	166,45	185,94
Faraday, (F/m ³)	3,98	7,96	11,94	15,92	23,88	31,84	39,8	47,76	55,72
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,033	0,069	0,104	0,149	0,210	0,283	0,347	0,410	0,478
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,149	0,411	0,621	0,892	1,258	1,697	2,082	2,460	2,866
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	0,173	0,232	0,350	0,496	0,700	0,945	1,158	1,370	1,594
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOI)	1,473	0,580	0,737	1,005	1,459	1,969	2,363	2,919	3,325
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	0,782	0,917	1,333	1,747	2,425	3,129	3,649	4,689	5,348
Enerji Maliyeti (\$/kg KOI)	6,659	2,296	2,811	3,543	5,054	6,516	7,444	9,987	11,156
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,182	0,480	0,725	1,040	1,467	1,980	2,430	2,870	3,343
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	0,955	1,148	1,682	2,243	3,125	4,075	4,807	6,059	6,942
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOI)	8,132	2,876	3,548	4,548	6,513	8,485	9,807	12,906	14,481
EC -Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,53	1,1	1,42	1,96	2,23	2,34	2,45	2,67	2,98

Ek.18.
(Devam ediyor)

Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrotları üzerine boya konsantrasyonunun etkisi.

Parametre	Boya konsantrasyonu (mg/l)								
	50	100	200	300	400	500	750	1000	1500
Başlangıç pH	3	3	3	3	3	6	3	3	3
Son pH	6,15	6,37	6,51	6,99	6,5	6,6	6,68	6,84	6,88
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Akım (A)	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Voltaj (V)	36,33	32,25	31,95	28,83	35,01	32,91	26,2	21,16	15,46
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	0,05	5,60	2,80	13,53	23,32	62,95	270,15	474,10	979,95
R _{BOYA} (%)	99,89	99,4	98,6	95,49	94,17	87,41	63,98	52,59	34,67
Başlangıç KOİ (mg/l)	36,87	73,74	147,48	221,24	294,96	368,7	553,05	734,40	1106,10
Çıkış KOİ (mg/l)	3,62	7,43	15,46	23,58	36,04	71,23	227,64	407,89	717,20
R _{KOİ} (%)	90,17	89,93	89,52	89,34	87,78	80,68	58,84	44,46	35,16
Başlangıç Türbidite (NTU)	1,21	1,83	3,42	5,61	6,39	9,38	15,58	17,41	22,63
Çıkış Türbidite (NTU)	0,05	0,08	0,23	0,44	1,01	1,63	3,24	5,37	8,33
R _{TURB.} (%)	96,26	95,87	93,28	92,18	84,27	82,65	79,2	69,16	63,19
Anodik Çözünme (g)	0,1836	0,1	0,091	0,0797	0,0969	0,0953	0,094	0,0925	0,0889
Katodik Çözünme (g)	0,0827	0,0529	0,0467	0,0438	0,0497	0,0455	0,05	0,0376	0,057
Toplam Çözünme (g)	0,2663	0,6290	0,1377	0,1235	0,1466	0,1408	0,1440	0,1301	0,1459
Akım Verimliliği (%)	256,50	139,70	127,13	111,34	135,37	133,14	131,32	129,23	124,20
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,35	0,84	0,18	0,16	0,20	0,19	0,19	0,17	0,19
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	7,11	8,88	0,93	0,57	0,52	0,43	0,40	0,33	0,37
Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	10,68	12,64	1,39	0,83	0,75	0,63	0,59	0,53	0,50

Ek.19.

Ek.19.
(Devam ediyor)

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	10,68	12,64	1,39	0,83	0,75	0,63	0,59	0,53	0,50
Enerji Tüketimi (Wh)	7,75	6,88	6,81	6,15	7,47	7,02	5,59	4,51	3,3
kg KOİ başına tüketilen kWh	155,17	72,88	34,53	21,47	19,83	16,06	11,65	8,58	6,35
kg Boya başına tüketilen kWh	233,11	103,75	51,58	31,11	28,85	23,60	17,18	13,81	8,49
Faraday, (F/m ³)	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61	10,61
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,639	1,509	0,330	0,296	0,352	0,338	0,346	0,312	0,350
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,465	0,413	0,409	0,369	0,448	0,421	0,335	0,271	0,198
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	12,793	15,988	1,675	1,034	0,934	0,773	0,720	0,594	0,673
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	19,219	22,759	2,503	1,499	1,359	1,136	1,062	0,956	0,900
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	9,310	4,373	2,072	1,288	1,190	0,964	0,699	0,515	0,381
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	13,987	6,225	3,095	1,867	1,731	1,416	1,031	0,829	0,509
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	1,104	1,922	0,739	0,665	0,800	0,759	0,681	0,583	0,548
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	22,104	20,360	3,747	2,322	2,124	1,737	1,419	1,108	1,054
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	33,206	28,983	5,597	3,366	3,090	2,552	2,092	1,785	1,409
EC –Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,67	0,73	0,81	0,86	1,34	1,67	1,99	2,42	2,7

Elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrotları üzerine boya konsantrasyonunun etkisi.

Parametre	Boya konsantrasyonu (mg/l)								
	50	100	200	300	400	500	750	1000	1500
Başlangıç pH	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Son pH	6,91	7	7,11	7,49	7,01	7,35	6,84	7,07	7,14
Akım Yoğunluğu (A/m ²)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Akım (A)	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Voltaj (V)	27,98	28,63	27,38	27,27	27,67	28	28,3	27,32	21,46
Karıştırma Devri (rpm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Başlangıç İletkenlik (μS/cm)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Çıkış Boya konsantrasyonu (mg/l)	0,00	0,01	0,10	0,18	1,84	3,75	128,85	196,70	422,85
R _{BOYA} (%)	99,96	99,85	99,83	99,94	99,54	99,25	82,82	80,33	71,81
Başlangıç KOİ (mg/l)	37,75	75,51	151,02	226,53	302,04	377,55	566,32	755,1	1132,65
Çıkış KOİ (mg/l)	10,80	22,70	48,01	75,14	113,39	148,11	392,46	572,59	932,62
R _{KOİ} (%)	71,39	69,94	68,21	66,83	62,46	60,77	30,7	24,17	17,66
Başlangıç Türbidite (NTU)	0,88	1,33	2,56	4,05	6,47	11,28	11,12	12,61	17,66
Çıkış Türbidite (NTU)	0,02	0,05	0,16	0,55	1,61	3,38	3,85	5,07	7,47
R _{TURB.} (%)	97,18	96,29	93,76	86,38	75,05	70,04	65,35	59,78	57,68
Anodik Çözünme (g)	0,3446	0,3415	0,3355	0,357	0,3458	0,3447	0,3387	0,3409	0,3371
Katodik Çözünme (g)	0,0064	0,0062	0,0038	0,0147	0,0044	0,0053	0,0029	0,0028	0,0025
Toplam Çözünme (g)	0,3510	0,3477	0,3393	0,3717	0,3502	0,3500	0,3416	0,3437	0,3396
Akım Verimliliği (%)	155,62	154,22	151,52	161,22	156,17	155,67	152,96	153,95	152,24
Harcanan Al (kg) /m ³ atıksu	0,47	0,46	0,45	0,50	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45
Toplam Çözünme (kg çöz./kg Boya)	9,36	4,64	2,26	1,65	1,17	0,94	0,73	0,57	0,42

Ek.20.

Toplam Çözünme (kg çöz./kg KOİ)	17,36	8,78	4,39	3,27	2,47	2,03	2,62	2,51	2,26
Enerji Tüketimi (Wh)	8,94	9,15	8,75	8,72	8,85	8,95	9,05	8,73	6,86
kg Boya başına tüketilen kWh	178,89	91,53	43,79	29,08	22,22	18,04	14,56	10,87	6,37
kg KOİ başına tüketilen kWh	331,90	173,30	84,97	57,58	46,89	39,01	52,04	47,85	34,30
Faraday, (F/m ³)	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92	15,92
Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	0,140	0,139	0,136	0,149	0,140	0,140	0,137	0,137	0,136
Enerji Maliyeti (\$/m ³)	0,537	0,549	0,525	0,523	0,531	0,537	0,543	0,524	0,412
Elektrot Maliyeti (\$/kg Boya)	2,807	1,391	0,679	0,496	0,352	0,282	0,220	0,171	0,126
Elektrot Maliyeti (\$/kg KOİ)	5,208	2,633	1,317	0,982	0,742	0,610	0,786	0,753	0,679
Enerji Maliyeti (\$/kg Boya)	10,734	5,492	2,627	1,745	1,333	1,082	0,874	0,652	0,382
Enerji Maliyeti (\$/kg KOİ)	19,914	10,398	5,098	3,455	2,813	2,341	3,122	2,871	2,058
Toplam İşletim Maliyeti (\$/m ³)	0,677	0,688	0,661	0,672	0,671	0,677	0,679	0,661	0,547
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg Boya)	13,541	6,883	3,306	2,240	1,685	1,364	1,094	0,823	0,508
Toplam İşletim Maliyeti (\$/kg KOİ)	25,122	13,031	6,415	4,437	3,556	2,951	3,908	3,624	2,737
EC –Çamur Oluşumu (kg/m ³)	0,67	0,75	1,52	1,96	2,23	2,64	2,88	3,12	3,75

EK.20.
(Devam ediyor)