

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOYAR MADDELERİN MOLEKÜL AĞIRLIĞININ ELEKTROOKSİDASYON
VE ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESLERİNDE RENK GİDERME
VERİMİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan KEYİKOĞLU

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2018

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BOYAR MADDELERİN MOLEKÜL AĞIRLIĞININ ELEKTROOKSİDASYON
VE ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESLERİNDE RENK GİDERME
VERİMİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ramazan KEYİKOĞLU
(172082101)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Orhan Taner CAN

ŞUBAT 2018

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172082101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ramazan KEYİKOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BOYAR MADDELERİN MOLEKÜL AĞIRLIĞININ ELEKTROOKSİDASYON VE ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESLERİNDE RENK GİDERME VERİMİNE ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Orhan Taner CAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Orhan Taner CAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet İŞLEYEN
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KOBYA
Gebze Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi : 5 Şubat 2018

FBE Müdürü : **Doç. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi /...../.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Çevre Müh. Ramazan KEYİKOĞLU

İmzası :

XXXXXX

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezimin hazırlanması sürecinde her türlü yardım ve fedakarlığı gösteren, değerli fikirleriyle beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım hocam Sayın Doç. Dr. Orhan Taner CAN'A sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2018

Çevre Müh. Ramazan KEYİKOĞLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN BOYAR MADDELER VE BOYAMA ATIKSULARININ ÖZELLİKLERİ	5
2.1 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyar maddeler ve Sınıflandırılması	5
2.1.1 Boyar maddeler	5
2.1.2 Boyar maddelerin sınıflandırılması	5
2.1.3 Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırılması	6
2.1.3.1 Suda çözünür boyar maddeler	6
2.1.3.2 Suda çözünmez boyar maddeler	6
2.1.4 Boyama özelliklerine göre sınıflandırılması	7
2.1.4.1 Direkt boyar maddeler	7
2.1.4.2 Vat boyar maddeler	7
2.1.4.3 Kükürt boyar maddeler	7
2.1.4.4 Asit boyar maddeler	8
2.1.4.5 Dispers boyar maddeler	8
2.1.4.6 Bazik (katyonik) boyar maddeler	8
2.1.4.7 Solvent boyar maddeler	9
2.1.4.8 Reaktif boyar maddeler	9
2.1.5 Kimyasal yapısına göre sınıflandırılması	10
2.2 Tekstil Endüstrisi Boyama Atıksularının Özellikleri	12
2.2.1 Tekstil boyama işlemi	12
2.2.2 Tekstil atıksuyunun karakterizasyonu	12
2.2.3 Çevresel etkisi	14
3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ BOYAMA ATIKSULARININ ARITIMI	15
3.1 Genel Arıtım Prosesleri	15
3.1.1 Biyolojik prosesler	15
3.1.1.1 Aerobik biyolojik prosesler	16
3.1.1.2 Anaerobik biyolojik prosesler	16
3.1.2 Fiziko-kimyasal prosesler	17
3.1.2.1 Kimyasal oksidasyon	17
3.1.2.2 Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon	19

3.1.2.3 Adsorption.....	19
3.1.2.4 İyon değişimi.....	20
3.1.2.5 Membran prosesler.....	20
3.2 Elektrokimyasal Arıtım Prosesleri	21
3.2.1 Elektrokoagülasyon (EC).....	21
3.2.1.1 Koagülasyon konsepti.....	22
3.2.1.2 Elektrokoagülasyon teorisi.....	22
3.2.1.3 Elektrokoagülasyon teknolojisi.....	23
3.2.1.4 Çeşitli parametrelerin Elektrokoagülasyon prosesine etkisi	26
3.2.2 Elektroflotasyon (EF).....	30
3.2.2.1 Elektroflotasyon reaktör tasarımı.....	32
3.2.2.2 Elektroflotasyonu etkileyen parametreler	32
3.2.3 Elektrokoksiasasyon (EO).....	34
3.2.3.1 Doğrudan oksiasasyon.....	36
3.2.3.2 Dolaylı oksiasasyon.....	36
3.2.3.3 Elektrot materyali seçimi ve elektrokimyasal oksiasasyon mekanizması	37
3.2.3.4 Hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) ve su arıtımındaki rolü.....	38
3.3 UV Görünür Bölge Absorbsiyon Spektroskopisi.....	39
3.3.1 Lambert-Beer kanunu	40
3.3.2 Spektroskopik enstrümanların temel bileşenleri	41
4. MATERYAL VE METOD.....	43
4.1 Kullanılan Boyar maddeler ve Özellikleri	43
4.2 Deney Düzeneği	45
4.2.1 Elektrokoagülasyon deney düzeneği.....	45
4.2.2 Elektrokoksiasasyon deney düzeneği.....	45
4.3 Deneyisel İşlem	46
4.3.1 Elektrokoagülasyon işlemi.....	46
4.3.2 Elektrokoksiasasyon işlemi	47
4.4 Analitik Yöntem.....	47
4.4.1 Kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması.....	47
4.4.2 Boya konsantrasyonlarının belirlenmesi	49
4.4.3 Kullanılan eşitlikler.....	50
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	52
5.1 Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi.....	52
5.1.1 Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi	52
5.1.2 Elektrokoksiasasyon prosesinde akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi	65
5.2 İşletme Maliyeti.....	76
5.2.1 Elektrokoagülasyon işletme maliyeti	76
5.2.2 Elektrokoksiasasyon işletme maliyeti	77
5.2.3 Elektrokoagülasyon ve elektrokoksiasasyon prosesleri işletme maliyetlerinin karşılaştırması	79
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
7. KAYNAKLAR	83

KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CI	: Colour İndex
DC	: Doğru Akım
EK	: Elektrokoagülasyon
EF	: Elektroflotasyon
EO	: Elektrooksidasyon
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TÇM	: Toplam Çözünmüş Madde
TOK	: Toplam Organik Karbon
MMO	: Karışık Metal Oksit Elektrotlar
DSA	: Boyutsal Olarak Kararlı Elektrotlar
BDD	: Boron Doped Diamond Elektrotlar

SEMBOLLER

A	: Aktif anot yüzey alanı
E	: Elektrik enerjisi
F	: Faraday sabiti
I	: Akım şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
M	: Teorik olarak çözünen metalin (mol olarak) miktarı
mact	: Pratikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı
MA	: Pratikte anotta elektrottaki çözünme miktarı
MAte	: Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı
MK	: Pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı
MT	: Toplam çözünen alüminyum miktarı
MA	: Molekül ağırlığı
N	: Çözünen metalin tesir değeri
pH	: Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonunun negatif logaritması
q	: Akımın miktarı (yük)
V	: Volt
V	: Elektrolit hacmi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Boyar maddelerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması (Heaton, 1994).	10
Çizelge 4.1 : Reactive Blue 198 boyar maddesinin özellikleri (Farias vd., 2017). ...	43
Çizelge 4.2 : Reactive yellow 145 boyar maddesi özellikleri.	44
Çizelge 4.3 : Reactive Blue 19 boyar maddesinin özellikleri (Fanchiang ve Tseng, 2009).	44
Çizelge 5.1 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	53
Çizelge 5.2 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	53
Çizelge 5.3 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	53
Çizelge 5.4 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	55
Çizelge 5.5 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	56
Çizelge 5.6 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	56
Çizelge 5.7 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	58
Çizelge 5.8 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	58
Çizelge 5.9 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	59
Çizelge 5.10 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	61
Çizelge 5.11 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	61
Çizelge 5.12 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	61
Çizelge 5.13 : Akım yoğunluğunun EK prosesine etkisi.	64
Çizelge 5.14 : 3,33 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	65
Çizelge 5.15 : 3,33 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	66
Çizelge 5.16 : 3,33 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	66
Çizelge 5.17 : 6,67 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	67

Çizelge 5.18 : 6,67 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	68
Çizelge 5.19 : 6,67 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	68
Çizelge 5.20 : 13,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	69
Çizelge 5.21 : 13,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	70
Çizelge 5.22 : 13,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	70
Çizelge 5.23 : 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	71
Çizelge 5.24 : 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	72
Çizelge 5.25: 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	72
Çizelge 5.26 : Akım yoğunluğunun EO prosesine etkisi.....	73
Çizelge 5.27 : Elektrokoagülasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti. ..	76
Çizelge 5.28 : Elektrokoksiasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti.....	78
Çizelge 5.29 : Elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon prosesleri boya giderme verimleri ve işletme maliyetleri karşılaştırması.	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Azo kromofor grubu.....	11
Şekil 2.2 : Antrakinon kromofor grubu.	11
Şekil 2.3 : İndigoid kromofor grubu.	11
Şekil 2.4 : Tekstil üretim tesisinin çeşitli aşamalarında başlıca kirletici bileşenleri (Verma vd., 2012).	13
Şekil 3.1 : Paralel olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi.	23
Şekil 3.2 : Seri olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi.	24
Şekil 3.3 : Bipolar (çift kutuplu) ve paralel bağlı elektrokoagülasyon hücresi.	24
Şekil 3.4 : Elektroflotasyon hücresi elektrotların geleneksel yerleşimi.	32
Şekil 3.5 : Elektrikoksidasyon reaktörü şematik gösterimi (Anglada vd., 2009).	35
Şekil 3.6 : a) doğrudan oksidasyon ve b) dolaylı oksidasyon işlemleri.....	35
Şekil 3.7 : Hidroksil radikalının bazı önemli özellikleri (Buthiyappan vd., 2016). ..	38
Şekil 3.8: Beer-Lambert kanunu parametreleri.	40
Şekil 3.9 : Tek ışık hüzmeli spektrofotometresi diyagramı.	41
Şekil 3.10 : Çif ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı.....	42
Şekil 4.1 : Elektrokoagülasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi (1: manyetik karıştırıcı, 2: elektrokoagülasyon reaktörü, 3: DC güç kaynağı, 4: anot elektrotları bağlantısı, 5: katot elektrotları bağlantısı).	45
Şekil 4.2 : Elektrooksidasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi (1: DC güç kaynağı, 2: elektroflotasyon reaktörü, 3: katot elektrotu bağlantısı, 4: anot elektrotu bağlantısı).....	46
Şekil 4.3 : Elektrokoagülasyon deney düzeneği.	47
Şekil 4.4 : Reactive Blue 198 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.	48
Şekil 4.5 : Reactive Blue 19 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.	48
Şekil 4.6 : Reactive Yellow 145 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.	49
Şekil 4.7 : Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer.	49
Şekil 5.1 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	54
Şekil 5.2 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).	54
Şekil 5.3 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	55
Şekil 5.4 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10mm, NaCl: 1000 mg/l).	57
Şekil 5.5 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).	57
Şekil 5.6 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	58

Şekil 5.7 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda olduğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	59
Şekil 5.8 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).	60
Şekil 5.9 : 0,417 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	60
Şekil 5.10 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	62
Şekil 5.11 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).	63
Şekil 5.12 : 1,042 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	63
Şekil 5.13 : RY145 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi.	63
Şekil 5.14 : RB19 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi.	64
Şekil 5.15 : Elektrokoagülasyon prosesinde flok oluşumu.	64
Şekil 5.16 : 3,33 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	67
Şekil 5.17 : 3,33 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	67
Şekil 5.18 : 6,67 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	69
Şekil 5.19 : 6,67 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	69
Şekil 5.20 : 13,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	71
Şekil 5.21 : 13,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	71
Şekil 5.22 : 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).	73
Şekil 5.23 : 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.	73
Şekil 5.24 : Boyar madde çözeltilerinden elektrooksidasyon prosesi ile süreye bağlı renk giderimleri.	74
Şekil 5.25 : 33,3 mA/cm ² akım yoğunluğunda elektrooksidasyon prosesi başlangıç ve deney süresi sonundaki renk durumu.	75
Şekil 5.26 : Akım yoğunluğunun toplam maliyet üzerine etkisi (a: (0,104 mA/cm ² , b: 0,208 mA/cm ² , c: 0,417 mA/cm ² , d: 1,042 mA/cm ²).	77
Şekil 5.27 : Akım yoğunluğunun toplam maliyet üzerine etkisi (a: (3,33 mA/cm ² , b: 6,67 mA/cm ² , c: 13,3 mA/cm ² , d: 33,3 mA/cm ²).	78

BOYAR MADDELERİN MOLEKÜL AĞIRLIĞININ ELEKTROOKSİDASYON VE ELEKTROKOAGÜLASYON PROSESLERİNDE RENK GİDERME VERİMİNE ETKİSİ

ÖZET

Boyar maddeler, çeşitli cisimleri (kumaş, elyaf vb.) renkli hale getirmek için kullanılan organik bileşiklerdir. Farklı kimyasal yapıya ve molekül ağırlığına sahip birçok farklı boyar madde endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle yüksek çözünürlüğe sahip reaktif boyalar zengin parlak renk gamları ve birçok şekilde uygulanabilme kolaylıkları nedeniyle tekstil boyamada çok tercih edilmektedir. Tekstil boyama endüstrisinde, üretimin çeşitli adımlarında çok miktarda su, sentetik boya ve çeşitli kimyasallar kullanılır ve bunun sonucunda farklı molekül yapılarında kompleks kirleticileri içeren atıksu meydana gelir. Özellikle suda çözünürlüğü yüksek ve sabitlenme oranları düşük olan boyar maddeler uygulama sırasında tamamen tutunmadan hidrolize olmaları nedeniyle çok miktarda tutunmamış boya atık haline gelir. Alıcı su ortamında atık boyanın oluşturacağı renk nedeniyle ışık geçirgenliği azalarak fotosentez faaliyetleri engellenir ve oksijen tükenmesi meydana gelir. Ayrıca toksik ve mutajenik boyar maddelerin su kütlelerinde bulunmaları sucul yaşamı olumsuz etkiler. Kanalizasyon sistemine arıtılmadan bırakılmaları kentsel atıksu arıtma tesislerinin biyolojik proseslerinde sorunlara yol açabilir. Bu nedenle boyar madde içeren atıksuların su sistemlerine bırakılmadan önce arıtılmaları için yenilikçi, uygun maliyetli ve etkili atıksu arıtım teknolojilerine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada boyar maddelerin elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon prosesleri ile giderilmelerinde molekül ağırlıklarının etkisi araştırıldı. Bu amaçla, molekül ağırlıkları sırasıyla 1304,80 g/mol, 1026, 25 g/mol ve 626 g/mol olan Reactive Blue 198 (RB198), Reactive Yellow (RY145) ve Reactive Blue 19 (RB19) boyar maddeleri seçildi. Deneylerde kullanılan sentetik boya solüsyonları her boyar maddeden 50 mg alınarak 1 L saf su içerisinde çözündürülmesi ile hazırlandı. Laboratuvar ölçekli deneyler 1000 mg/L NaCl içeren 500 mL boya çözeltileri kullanılarak kesikli sistem ile gerçekleştirildi. Elektrokoagülasyon (EC) deneyleri, 5 alüminyum elektrot içeren elektorkoagülasyon reaktörü (3 anot, 2 katot), güç kaynağı ve manyetik karıştırıcı kullanılarak yürütüldü. Elektrooksidasyon (EO) deneyleri, anot olarak bor katkılı elmas elektrot (BDD), katot olarak ise Ti/IrRuO₂ elektrotlarını içeren EO reaktörü ve DC güç kaynağı kullanılarak yürütüldü. Her iki prosesin giderim performanslarına molekül ağırlıkları ile birlikte akım yoğunluğunun etkisi de araştırıldı. Boya giderim verimleri UV/vis spektrofotometre ile ölçülen absorban değerlerinden konsantrasyonların hesaplanması ile bulundu.

Çalışma sonuçlarından; Boyar madde molekül ağırlığının büyüklüğü bunların elektrokimyasal yöntemlerle (elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon) sulardan gideriminde avantaj sağladığı görüldü. Elektrokimyasal proseslerden elektrokoagülasyon ise boyar madde gideriminde elektrooksidasyona göre daha kısa

sürede ve daha düşük işletme maliyeti ile giderim yapabilmektedir. Ancak elektrokoagülasyonda oluşan flok çamurlarının giderilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal arıtım, Elektrokoagülasyon, elektrooksidasyon, boyar madde, tekstil atıksuyu, molekül ağırlığı



THE EFFECT OF MOLECULAR WEIGHT OF DYES ON DECOLOURIZATION EFFICIENCY IN ELECTROOXIDATION AND ELECTROCOAGULATION PROCESSES

SUMMARY

Dyes are organic compounds that are used to impart color to substances (fabric, fiber etc.). Various kinds of dyes with different chemical structures and molecular weights are used in industrial applications. Particularly, highly soluble reactive dyes are much preferred in textile dyeing due to their wide bright color gamut and ease of application in different ways. Textile dyeing industry uses large amount of water, synthetic dyes and various chemicals in different steps of production line and this results in wastewater which contains complex pollutants with varying molecular structure. Especially dyes that have high water solubility and low fixation rate hydrolyze during application without a complete fixation resulting in large amount of waste dye. In receiving waters, photosynthetic activities may be prevented as a consequence of the color caused by the waste dyes and the depletion of oxygen will occur. Additionally, introduction of dyes that are toxic and mutagenic into the water bodies adversely affect aquatic life. If they enter sewage system without proper treatment, they may cause problems in biological processes in urban wastewater treatment plants. Therefore, new, cost-efficient and effective treatment technologies are needed for the treatment of dye containing wastewaters before they are discharged into the water systems.

In this study, the effect of molecular weights of dyes on removal efficiencies with electrocoagulation and electrooxidation processes were investigated. For this purpose, three different reactive dyes, Reactive Blue 198 (RB198), Reactive Yellow 145 (RY145) and Reactive Blue 19 (RB19) were chosen, which have molecular weights of 1304,80 g/mol, 1026,25 g/mol and 626,533 g/mol respectively. Synthetic dye solutions used in experiments was prepared dissolving 50 mg of each dye in 1 L distilled water. Laboratory scale experiments with 500 ml solutions containing 1000 mg/L NaCl were performed in batch mode. Electrocoagulation (EC) experiments performed in an electrochemical cell containing 5 aluminum electrodes (3 anodes, 2 cathode), a power source, and magnetic stirrer. Electrooxidation (EO) experiments performed in an EO reactor containing a boron doped diamond (BDD) anode and Ti/IrRuO₂ cathode. Along with molecular weight, the effect of current density over the performance of two processes were investigated. Dye removal efficiencies were found out by calculating concentration from absorbance values, which were measured using UV/Vis spectrophotometer.

Results of the study shows that the higher size of the molecular weights of dyes favors the removal of them from water by electrochemical methods (electrocoagulation and electrooxidation). Treatment of dyes by electrocoagulation took less time with lower cost of operation compared to the electrooxidation. However, it should be noted that the flocs formed after electrocoagulation needs further treatment.

Keywords: Electrochemical treatment, electrocoagulation, electrooxidation, dyestuff, textile effluent, molecular weight



1. GİRİŞ

Farklı kimyasal yapıya sahip birçok farklı boyar madde endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Dünya çapında 10 bin farklı boya ve pigment türünün endüstriyel olarak kullanıldığı ve yılda 700 bin ton sentetik boyanın üretildiği tahmin edilmektedir (Chequer vd., 2013). Boyar maddelerin önemli bir sınıfı olan reaktif boyalar dünya boyar madde pazarının %25'ini (yaklaşık 175 bin ton) oluşturur ve pamuk, ipek, yün ve selüloza geniş sıcaklık aralığı ve pH aralığında uygulanabilir. Zengin parlak renk gamı ve birçok şekilde uygulanabilme kolaylığı nedeniyle çok fazla tercih edilmektedirler (Khatri vd., 2015). Ancak reaktif boyaların sabitlenme verimleri çok değişken olup uygulanan kumaşa bağlıdır. Tipik reaktif boyama şartlarında (pH >10, sıcaklık >65 °C ve tuz: 60-100 g/L) başlangıç reaktif boyar madde kütlesinin %20-50'si hidrolize halde kumaşa afinitesini yitirmiş atık boyar madde haline geçmektedir (Kobya ve Demirbas, 2015).

Boyar maddelerin yoğun olarak kullanıldığı tekstil endüstrisinde, üretimin çeşitli adımlarında çok miktarlarda su, sentetik boya ve çeşitli kimyasallar kullanılır ve bunun sonucu olarak farklı molekül yapılarında ve ağırlıklarında kompleks kirleticileri içeren atıksu meydana gelir (Verma vd., 2012). Oluşan atıksu miktarı her yıl 200 bin tona ulaşmaktadır (Chequer vd., 2013). Boyar maddeler bilinçli olarak su, sabun, deterjan, ısı ve sıcaklık gibi etmenlere karşı dayanıklı olarak üretilmeleri nedeniyle çoğu geleneksel atıksu arıtma proseslerinden etkilenmeyerek çevrede varlıklarına devam edebilirler. Modern boyaların sentetik doğaları ve aromatik yapıları nedeniyle biyolojik bozunmaya dirençlidirler (Couto, 2009). Ayrıca sudaki çözünürlüklerinin fazla olması nedeniyle atıksudan giderilmeleri daha zordur.

Güçlü renge sahip ve biyolojik bozunurluğu az olan tekstil atıksularının TOK, KOİ, AKM, parametreleri yüksektir ve geniş aralıklarda değişiklik gösterebilir (dos Santos vd., 2007). Bu atıksuların, alıcı ortamlara doğrudan deşarjı su kaynaklarında kirliliğe neden olur ve sucul yaşamı olumsuz etkiler. Atıksudaki çok küçük miktarlarda bile (<1 mg/L) boya varlığı su kütlelerinin estetik açıdan kötü görünmesine neden olur. Kanalizasyon sistemine arıtılmadan bırakılmaları durumunda ise biyolojik proseslerde

aksaklıklara yol açabilir. Bazı boyar maddeler çok toksik ve mutojeniktir, ve ayrıca ışık geçirgenliğini dolayısıyla fotosentezi azaltarak oksijen eksikliğine neden olmaktadır (Chequer vd., 2013).

Son yıllarda boyar madde atıksularının arıtılması ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış ve çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin başlıcaları biyolojik arıtım, kimyasal koagülasyon, adsorpsiyon, ultrafiltrasyon ve kimyasal oksidasyon yöntemleridir. Bunlardan adsorpsiyon, ultrafiltrasyon, ozonlama gibi yöntemler yüksek maliyetleri ile öne çıkmaktadır. Kimyasal oksidasyonun düşük kapasitesinin yanı sıra, tehlikeli kimyasal maddelerin depolanması ve taşınması gerekmektedir. Kimyasal koagülasyon daha ucuz ancak kullanılan kimyasalın yüksek miktarı nedeniyle, çok miktarda çamur oluşmaktadır (Merzouk vd., 2010). Biyolojik prosesler ekonomik bir seçim olsa da reaktif boyar maddeler gibi biyolojik olarak bozunmayan boyar maddelerin gideriminde çok etkili olamazlar (Panakoulis vd., 2010; Sala ve Gutiérrez-Bouzán, 2012).

Endüstriyel atıksuların su sistemlerine bırakılmadan önce arıtılmaları için yenilikçi, uygun maliyetli ve etkili atıksu arıtım teknolojilerine ihtiyaç vardır. Günümüzde elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektrooksidasyon başta olmak üzere elektrokimyasal atıksu arıtma teknolojileri, işletme ve kurulum kolaylığı, yüksek giderim verimleri ve uygun maliyetleri nedeniyle çeşitli endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılabilir. Büyük hacimlerde havuzlar ve çok sayıda kimyasalın kullanıldığı geleneksel sofistike arıtma tesislerinin yerine geçebilecek potansiyele sahiptir.

Elektrokoagülasyon işleminde, ortama verilen elektrik akımı ile metal katyonları oluşturulması ile sudaki kolloidal kirleticilerin kararsız hale getirilerek giderilmesi sağlanır. Şengil ve Özacar (2009), demir elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi ile Reactive Black 5 boyar maddesi içeren boya solüsyonu arıtımında %98,8 verim elde etmişlerdir. Koby vd. (2006), alüminyum elektrotların kullanarak boya solüsyonundan levafix orange tekstil boyasının giderimini çalışmışlardır. Başlangıç pH değerinin 3, akım yoğunluğunun 100 A/m² olduğu işletme şartlarında 15 dk operasyon süresi ile %99,9 giderim verimi ile neredeyse tüm kirleticilerin giderimi sağlanmıştır.

Elektrokimyasal koagülasyonun, geleneksel koagülasyon yöntemine göre çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Can ve Bayramoglu (2014), kimyasal ve elektrokimyasal olarak koagüle olan alüminyum hidroksit floklarının yapısını ve performansını karşılaştırmıştır. Elektrokimyasal olarak koagüle olan flokların çapının daha büyük olduğunu ve çökelme hızlarının kimyasal olarak koagüle olan flokların neredeyse iki katı olduğunu bildirmişlerdir. Bayramoglu vd. (2007), tekstil atıksuyunun arıtımında elektrokoagülasyon prosesi ile kimyasal koagülasyonda tüketilen elektrot materyali ve oluşan çamur miktarını dikkate alarak yaptıkları karşılaştırmalarında kimyasal koagülasyonun işletme maliyetinin elektrokoagülasyondan 3,2 kat daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Bayramoglu vd. (2004), elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil atıksuyu arıtımında demir elektrotlar kullanıldığında, elektrot tüketiminin toplam maliyetin %50'si, alüminyum elektrotlar kullanıldığında ise elektrot maliyetinin toplam maliyetin %80'i olduğunu bildirmişlerdir.

Pt, TiO₂, IrO₂, PbO₂, çeşitli Ti bazlı metal alaşımları ve bor katkılı elmas elektrotların anot olarak kullanıldığı ve destekleyici olarak NaCl elektrolitinin kullanıldığı elektrooksidasyon prosesleri ile çok çeşitli endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılmaktadır. Rajkumar vd. (2007), titanyum bazlı boyutsal olarak kararlı anot (DSA) kullanarak Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimine işletme şartlarının etkisini araştırdılar. Vlyssides (1999), tekstil boyası atıksuyunun elektrokimyasal olarak arıtımında Ti/Pt anot kullanmışlardır. 40 dk elektroliz süresi sonunda %92 KOİ, %92,2 BOİ ve %94 renk giderimi elde etmişlerdir. Szpyrkowicz vd. (2000), elektrooksidasyon ile dispers boyar madde gideriminde yedi farklı elektrot materyalini karşılaştırdılar. En iyi sonucun klorür açısından zengin ortamda asidik pH şartlarında Ti/Pt-Ir anot ile elde ettiler.

Elektrokimyasal yöntemler ile boyar madde giderimi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda pH, başlangıç boya konsantrasyonu, akım yoğunluğu, iletkenlik, gibi parametrelerin giderim verimi üzerine etkisi ile ilgili birçok çalışma bulunmasına rağmen boyar madde molekül ağırlığının giderim üzerine etkisi üzerine çalışma yok denecek kadar azdır. Can ve Gazigil (2017), molekül ağırlıkları farklı olan iki reaktif boyar maddesinin elektrokoagülasyon ile gideriminde molekül ağırlıklarının etkisini incelemişlerdir. Alüminyum elektrotlar kullanılan çalışmada, alüminyum hidroksit floklarının optimum çökelme pH'ı 5,5-6 aralığında, molekül ağırlığı büyük olan (Reactive Black 39) boyar maddesinin giderimi daha yüksek olmuştur. Noonpui

ve Thiravetyan (2011), Sucul bir bitki türünün farklı molekül ağırlıklarındaki boyar maddeleri giderimini araştırmışlar ve boyar madde molekül yapısının ve boyutunun giderimlerini etkilediklerini belirtmişlerdir.

Boyar maddelerin molekül ağırlıklarının çok geniş aralıkta değiştiği bilinmektedir. Modern reaktif boyaların çoğu çift işlevli, aynı boya molekülünde aynı ya da farklı reaktif grupları içeren boyalardır. Reaktif gruplar kromoforik sistemin bir parçası olmadığı için, kromofora daha fazla reaktif grubun eklenmesi molekül ağırlığını arttırırken, birim boya başına renk miktarını azaltır. Ancak molekül ağırlığındaki bu artış boyar maddenin çözünürlük, agregasyon, kalıcılık ve migrasyon gibi özelliklerini geliştirir (Broadbent, 2001). Çok geniş aralıkta değişen boyar maddelerin boyutları ve büyüklükleri elektrokimyasal olarak arıtılmasında giderim verimlerini etkileyecektir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı boyar madde molekül ağırlıklarının elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesleri ile renk giderim verimlerine etkisini araştırmaktır. Bu amaçla üç farklı molekül ağırlığına sahip teksil boyar maddesinin, Reactive Blue 198 (1304,80 g/mol), Reactive Blue 19 (626,533 g/mol) ve Reactive Yellow 145 (1026,25 g/mol) farklı akım yoğunluklarında giderim davranışları incelenmiştir. Ek olarak elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon proseslerinin işletme maliyetleri analiz edilmiştir.

2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN BOYAR MADDELER VE BOYAMA ATIKSULARININ ÖZELLİKLERİ

2.1 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyar maddeler ve Sınıflandırılması

2.1.1 Boyar maddeler

Boyar maddeler, renkli organik bileşiklerdir ve genellikle içinde çözünebildikleri sıvı bir solüsyondan uygulanan ve uygulandıkları substrata afinite gösteren maddelerdir. Geçmişte boyar maddeler hayvan ya da bitki kaynaklarından elde edilse de günümüzde çoğu boyar madde sentetik olarak katrandan ya da petrolden elde edilen aromatik bileşikler kullanılarak üretilirler (Booth vd., 2000).

Boya molekülleri diğer yaygın organik bileşiklerle karşılaştırıldıklarında oldukça kompleksirler. Buna rağmen farklı boya moleküllerinin kimyasal yapılarının bir çok ortak noktası vardır. Birçoğu, tamamen konjuge bir sisteme bağlı benzen, naftalin gibi bir dizi aromatik halka içerir. Bir bileşiğin renklendirilmesi için moleküler yapıda en az beş ya da altı konjuge çift bağ gereklidir (Broadbent, 2001). Boyalar elektromanyetik spektrumun görünür dalga boyu aralığında (400-700 nm) ışığı absorbe ettikleri için renklidirler (Zollinger, 2003). Bunun nedeni boyaya renk veren kromofor gruplarının varlığıdır. Azo ($-N=N-$), karbonil ($-C=O$), metan ($-CH=$), nitro ($-NO_2$) ve kinoid grupları bazı önemli kromofor gruplarına örnek olarak gösterilebilir. Renkli bileşiklerin zincir uçlarında elektron alan ve veren atomlar (genellikle azot veya oksijen) bulunur. Kromofora ek olarak renk oluşumunu etkileyen oksokrom adı verilen karboksil ($-COOH$), sülfonat ($-SO_3H$) ve hidroksil ($-OH$) gibi yardımcı bileşenleri içerirler (Panakoulis vd., 2010).

2.1.2 Boyar maddelerin sınıflandırılması

Boyar maddeler kimyasal yapılarına, uygulama yöntemlerine, çözünürlüklerine vb., birçok şekilde sınıflandırılabilirler. Boyar maddelerin ve pigmentlerin sınıflandırılmasına ilişkin en önemli referans, Boyacılar Topluluğu tarafından İngiltere, Bradford'ta geliştirilen Colour Index'tir. Bilinen ticari boyar madde ve pigmentlerin kapsamlı bir listesini içerir ve her yıl düzenli olarak güncellenmektedir.

Her renk, uygulama sınıfını yansıtan C.I Genel İsmi ve rengin ticari olarak piyasaya sunulduğu kronolojik sırayı gösteren numara içerir (Christie, 2001). Bu çalışmada da yer alan boyar maddelerin Colour Index isimleri kullanılmıştır.

2.1.3 Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırılması

2.1.3.1 Suda çözünür boyar maddeler

Çoğu boyanın suda çözünebilme yeteneği içerdikleri en az bir tuz oluşturabilen grup sayesindedir. Bunların en yaygın olanı sülfonik asit grubudur; genellikle boyanın yapıldığı ara bileşiklerin birinde veya daha fazlasında bulunur, ancak bazı sülfonatlanmış boyalar da suda çözünmeyebilir. Karboksil asit grubu da benzer şekilde ilgili ara bileşikte yer alarak boyaya suda çözünme yeteneği kazandırır. Boyalar bu gruplardan herhangi birisinin sodyum tuzları olarak izole olması ile çözünür. Renkli olan iyon anyon ise anyonik boyalar olarak tanımlanırlar. Bunlara, azotlu life uygulanan asit boyalar ve selülozik liflere uygulanan direkt boyalar dahildir. Bazik grup içeren boyalar asitlerle suda çözünür tuzlar oluştururlar ve renkli iyon pozitif yüklü olduğu için katyonik boyalar olarak tanımlanırlar. Bazı durumlarda içsel bir tuz oluşması için hem asidik hem de bazik grup aynı anda bulunur (Stake ve Mido, 1995).

2.1.3.2 Suda çözünmez boyar maddeler

Çeşitli hallerde çözünmeyen boyar maddeler kumaş ya da diğer materyallere uygulanırlar ve aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

Substratta çözünen boyar maddeler: Bunlar, sentetik liflere uygulanan ve sıvı dispersiyon içinde ince halde dağılmış şekilde hazırlanan dispers boyaları ve aynı zamanda solventte çözünür boyaları içerir (Stake ve Mido, 1995).

Geçici çözünür boyar maddeler: Bunlar, kimyasal dönüşüm ile suda çözünür hale dönüştürülür ve sulu solüsyondan uygulandıktan sonra kumaşa tekrar çözünmez hale gelirler. Vat ve sülfür boyalar bu prensibe göre uygulanırlar, ikisi de selülozik liflere affinite gösteren alkali çözünür indirgenme ürünleri verirler. Boya, hava ile oksidasyon sonucunda orijinal çözünmez haline dönüşür (Stake ve Mido, 1995).

Pigmentler: Pigmentler, kumaşlara ya da herhangi diğer substratlara afinite göstermemeleri ve pigment partiküllerinin çok büyük sayıda molekül içermeleri

bakımından boyalardan farklılık gösterirler. Pigmentler uygulandıkları ortamda çözünmez halde küçük partiküller halinde bulunurlar. Substrata tutunabilmeleri polimer, plastik ya da eriyik gibi ilave bileşiklerin eklenmesi ile sağlanır (Allen, 1971).

2.1.4 Boyama özelliklerine göre sınıflandırılması

2.1.4.1 Direkt boyar maddeler

Anyonik, suda çözünür ve büyük moleküle sahip bu boyalar selüloza (pamuk, keten) kovalent olmayan güçler yardımıyla bağlanır (Kiernan, 2001). Direkt boyaların boyama işlemi basittir, isimlerinden de anlaşılacağı üzere renk sabitleyici kullanılmadan doğrudan uygulanırlar (Broadbent, 2001). Başlıca kromorik türleri şunlardır: azo, stilben, ftalosiyenin, dioksazin, formazan ve antraknon, kinolin ve tiyazol gibi diğer küçük kimyasal sınıflar. Bu boyalar, uygulama kolaylığı, geniş renk gamı ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle pamuğun boyanmasında hala yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak, yıkama haslıkları çok iyi değildir (Clark, 2011).

2.1.4.2 Vat boyar maddeler

Vat boyalar en eski boya türlerindendir. Başlıca, pamuğun boyanmasında kullanılırlar ve en bilinen vat boyası İndigodur. İndigo, mavi kot pantolonun popüleritesi nedeniyle günümüzde kullanılan en önemli boya türüdür. Doğal indigo yapraklarının tahta fiçılarda fermante edilmesi sonucu ekstrakte edilmesinden “Vat” ismini almıştır. Vat boyaları, çok yüksek ışık ve ıslaklık haslığı gerektiren durumlarda kullanılabilir. Temelde suda çözünmezler ancak alkali solüsyonda kimyasal indirgenme ile suda çözünen löko forma dönüşerek lif üzerinde kalıcılık kazanırlar. Boyama işleminden sonra boya molekülü oksitlenerek tekrar çözünmez hale gelmesi sayesinde yüksek yıkama haslıkları elde edilir (Broadbent, 2001).

2.1.4.3 Kükürt boyar maddeler

Kükürt çoğunlukla yapay ipek ve pamuk boyamada kullanılır. Boyama sırasında kimyasal olarak yün ve ipek kumaşlarına zarar vereceği için bu kumaşlara uygulanmazlar. Aromatik aminlerin ve fenollerin sülfür ya da sodyum polisülfür ile ısıtılması ile elde edilen ucuz polimerik boyalardır. Çözünür halde tekstile uygulanır ve çözünmez polimer oksidasyon ile yenilenir (Kiernan, 2001). Kükürt boyaları

yumuşak tonları boyamakta kullanılır ve sudaki çözünürlükleri düşük olması nedeniyle iyi yıkama haslığı ile birlikte orta-iyi ışık haslığı sunar (Clark, 2011).

2.1.4.4 Asit boyar maddeler

Asit boyar maddeler ismini, asidik bir boya banyosu kullanılmasından almaktadırlar. Asit ile kumaş lifi arasındaki kimyasal reaksiyon sonucu lif üzerinde çözünmez renk molekülleri oluşur. Asit boyalar genellikle sülfonik asitlerin sodyum tuzları veya bazen karboksilik asit tuzları oldukları için sulu solüsyonda anyoniktirler. Boyama, uygulanan lifteki bir amonyum iyonuna bağlı anyon ile boya banyosundaki boya anyonu ile yer değiştirmesi sonucu gerçekleşir. Asit boyaların molekül ağırlıkları 300-1000 g/mol aralığında değişmektedir (Broadbent, 2001). Bu boyalar 3.0-7.0 pH aralığında naylon, yün, ipek üzerine uygulanabilir. Yıkama haslıkları orta-iyi arasındadır. Bu görece moleküler ağırlığı düşük olan boyalar düşük pH değerlerinde uygulanarak lifteki boyanın kalıcılığında iyon-iyon elektrostatik kuvvetler etkili olur (Clark, 2011).

2.1.4.5 Dispers boyar maddeler

Selüloz, asetat, naylon polyester, yapay ipek gibi yarı sentetik ya da sentetik lifler hidrofobiktir. Bu nedenle boyar maddelerin sulu çözeltileri ile boyanamazlar. Dispers boyar maddeler suda çözünmeyen ya da az çözünen, iyonik olmayan karakterdedirler ve sulu bir dispersiyon halinde hidrofobik liflere uygulanırlar (Mock, 2004). Adından da anlaşılacağı üzere, bu boyalar, boya banyosunda, bir dağıtıcı ajan varlığında koloidal olarak bulunur. Dispers boyaların çoğunluğu düşük moleküler ağırlıklı, mono-azo ve antrakınon türevleridir. Yapılarında genellikle boyama için gerekli olan düşük çözünürlüğü sağlayan hidroksietilamino grupları yer alır (Broadbent, 2001).

Geleneksel olarak polyestere boyanın substrata nüfuzunu kolaylaştırmak için boya banyosuna taşıyıcı madde ilavesi ile uygulanmaktadırlar. Bakiye taşıyıcı maddeler kumaşta koku ve düşük ışık haslığı gibi sorunlara neden olabilir. Basınçlı boyama makinelerinin kullanılması ile birlikte, 130 °C sıcaklıkta taşıyıcı madde olmadan da uygulanabilirler (Clark, 2011).

2.1.4.6 Bazik (katyonik) boyar maddeler

Bazik boyar maddeler, -NH₂ ve -NR₂ gruplarını oksokromofor olarak içeren heterosiklik halka türevleridir. Kinoid sistemdeki heterosiklik halka koromofor olarak

davranır (Singh, 2002). Bu tür boyar maddeler genellikle akrilik, kağıt ve naylon substratlara uygulansa da bazı modifiye polyester substratlarda da kullanılmaktadır. Katyonik boyalar olarak da isimlendirilen bu boyalar anyonik yüzeye sahip liflere iyon değişimi ile bağlanır. Katyonik boyalarla boyanan doğal liflerde ışık haslığı düşük, akrilik elyaflarda ise daha iyi ışık ve yıkama haslığına sahiptir. Bunun nedeni daha hidrofobik olan akrilik liflerinde moleküllerin suya ve oksijene olan sınırlı erişimidir (Broadbent, 2001).

2.1.4.7 Solvent boyar maddeler

Solvent boyalar, sülfonik asit, karboksilik asit veya kuaterner amonyum gibi polar çözüldürücü gruplardan yoksundurlar. Bu nedenle suda çözünmezler ancak esterler, eterler, hidrokarbonlar gibi organik solventlerde çözünürler. Plastik, benzin, yap ve waksarı boyamak için kullanılırlar. Ağırlık olarak azo ve antrakinondirler ancak ftalosiyanın ve triarilmetan türleri de kullanılır (Hunger, 2008).

2.1.4.8 Reaktif boyar maddeler

Tekstil endüstrisinde en son teknolojik gelişme reaktif boyaların geliştirilmesi olmuştur. Reaktif boyalar tekstil kumaşıyla tam bir kimyasal bağ oluşturan tek boya sınıf olmaları nedeniyle eşsiz bir yapıya sahiptirler. Tüm reaktif boyalar selüloz lifindeki hidroksil (OH) gruplarına ya da protein liflerdeki amino (NH₂) gruplarına çekim gösteren kimyasal bir grup içerirler (Panda, 2013). Reaktif bir boyanın temel yapısında, kromoforik sistem, suda çözünürlük için sülfonat gurpları, reaktif grup ve reaktif grubu doğrudan kromofora veya boya molekülünün diğer bölümüne bağlayan köprü oluşturuucu grup bulunmaktadır (Broadbent, 2001). Moleküle renk veren kromofor grup, azo, antrakinon, trifenodioksazin veya bakır ftalosiyanın kromoforlarından olabilir.

Çözünebilir ve anyonik karakterdeki reaktif boyalar en çok pamukta, daha az miktarda yün ve naylonda kullanılırlar ve kumaş lifi ile kovalent bağ oluşturlar. Yüksek seviyede yıkama haslığı, geniş parlak renk gamı ve bir çok farklı şekilde uygulanabilmesi gibi nedenlerden dolayı en çok tercih edilen boya sınıflarındandır (Khatri vd., 2015).

2.1.5 Kimyasal yapısına göre sınıflandırılması

Boyar maddelerin sınıflandırılması için en uygun sistem birçok avantajı olan kimyasal yapılarına göre sınıflandırmadır. Bu sistem ilk olarak boyar maddeleri, azo boyalar (güçlü, uygun maliyetli) ve antrakinin gruplar (zayıf, pahalı) gibi bulunduğu gruba ait karakteristik özelliklerini açıkça tanımlar. İkincisi, makul ve belirli sayıda (yaklaşık bir düzine) kimyasal grup vardır (Çizelge 2.1). En önemlisi de bu sınıflandırmanın hem sentetik boya kimyacıları hem de boya teknoloji uzmanları tarafından en çok kullanılan sınıflandırma olması nedeniyle ortak terimlerle tanımlamalar daha kolay yapılabilmektedir (Hunger, 2008).

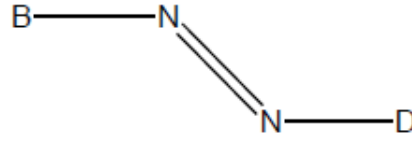
Çizelge 2.1 : Boyar maddelerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması (Heaton, 1994).

Azo boyalar
Antrakinin
Ftalosiyenin
Indigoit
Benzodifuranone
Oksazın
Polimetin ve türevleri
Di- ve tri aril karbonyum ve türevleri
Polisilik aromatik karbonil
Kinoftalon
Nitro ve nitrozo

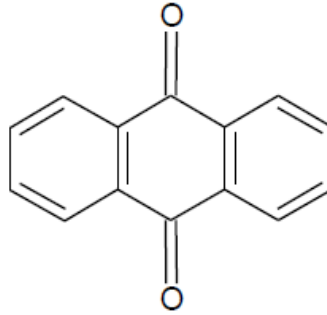
Boyar maddeler kimyasal yapılarına göre sınıflandırıldığında en önemli ve en büyük grubu azo boyalar temsil eder. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi iki aromatik halka arasında kromofor olarak bir azo ($-N=N-$) grubu içerirler. Sentetik boyalar arasındaki en büyük grupturlar ve ucuz elde edilir, renk gamları geniş ve renk verme kabiliyetleri güçlüdür. İçerdikleri azo grubu sayısına göre monoazo, diazo, triazo gibi alt gruplara ayrılırlar. Azo boyar maddeler diazonyum tuzu ile amin ya da fenol ile birleştirilmesi ile elde edilirler (Singh, 2002).

Azo boyalardan sonra en önemli kromofor grubu antrakinin boyalar gelmektedir. Elde edilmesi azo boyalara göre daha pahalı ve renk verme kabiliyetleri azo boyaların

yaklaşık yarısıdır. Antrakinon boyar maddeler, antrakinon yapısı etrafında şekillenmiştir (Şekil 2.2).



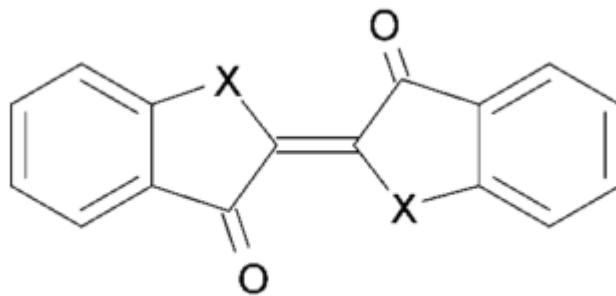
Şekil 2.1 : Azo kromofor grubu.



Şekil 2.2 : Antrakinon kromofor grubu.

En çok bilinen antrakinon boyalar vat boyalar, disperse boyalar ve pigmentlerdir. Antrakinon yapıya OH ve NH₂ gibi elektron veren grupların eklenmesi ile ticari öneme sahip boyalar elde edilir (Kiernan, 2001).

Bilinen en eski boya grubu olarak kabul edilen indigoid kromofor grubunun yapısı (Şekil 2.3)'te gösterildiği gibidir.



Şekil 2.3 : İndigoid kromofor grubu.

Burada X, indigo serilerinde (mavi) NH ve thioindigo serilerinde (kırmızı) —S— tir. Suda çözünmeyen indigo boyaları bazik ortamda indirgenmeleri sonucu suda çözünür hale gelirler. Lefe tutunduktan sonra indirgenmiş olan boya molekülleri hava oksijeni ile yükseltgenerek tekrar çözünmez hale geçerler. Böylece yüksek yıkama haslığı elde edilir (Hunger, 2008).

2.2 Tekstil Endüstrisi Boyama Atıksularının Özellikleri

2.2.1 Tekstil boyama işlemi

Tekstil boyaması sürekli ya da kesikli prosesler ile gerçekleştirilebilir. Kesikli proseslerde, belirli bir miktarı tekstil substratı boya solüsyonu içeren boyama makinesine konulur ve dengeye getirilir. Kullanılan boyanın ve kumaşın türüne bağlı olarak belirli bir süre sonra, kumaş liflerine afinitesi olan boya molekülleri solüsyondan ayrılarak kumaşa geçer. Yardımcı kimyasallar, boya banyosunda sıcaklık gibi şartları uygun hale getirerek prosesi optimum hale getiriler. Daha sonra boyanan kumaş, kimyasallarının ve sabitlenmeyen boyanın uzaklaştırılması için yıkanır. Her boyama işlemi, boyanacak birim kumaşın miktarına göre farklı miktarlarda boya gerektirir (US EPA, 1997).

2.2.2 Tekstil atıksuyunun karakterizasyonu

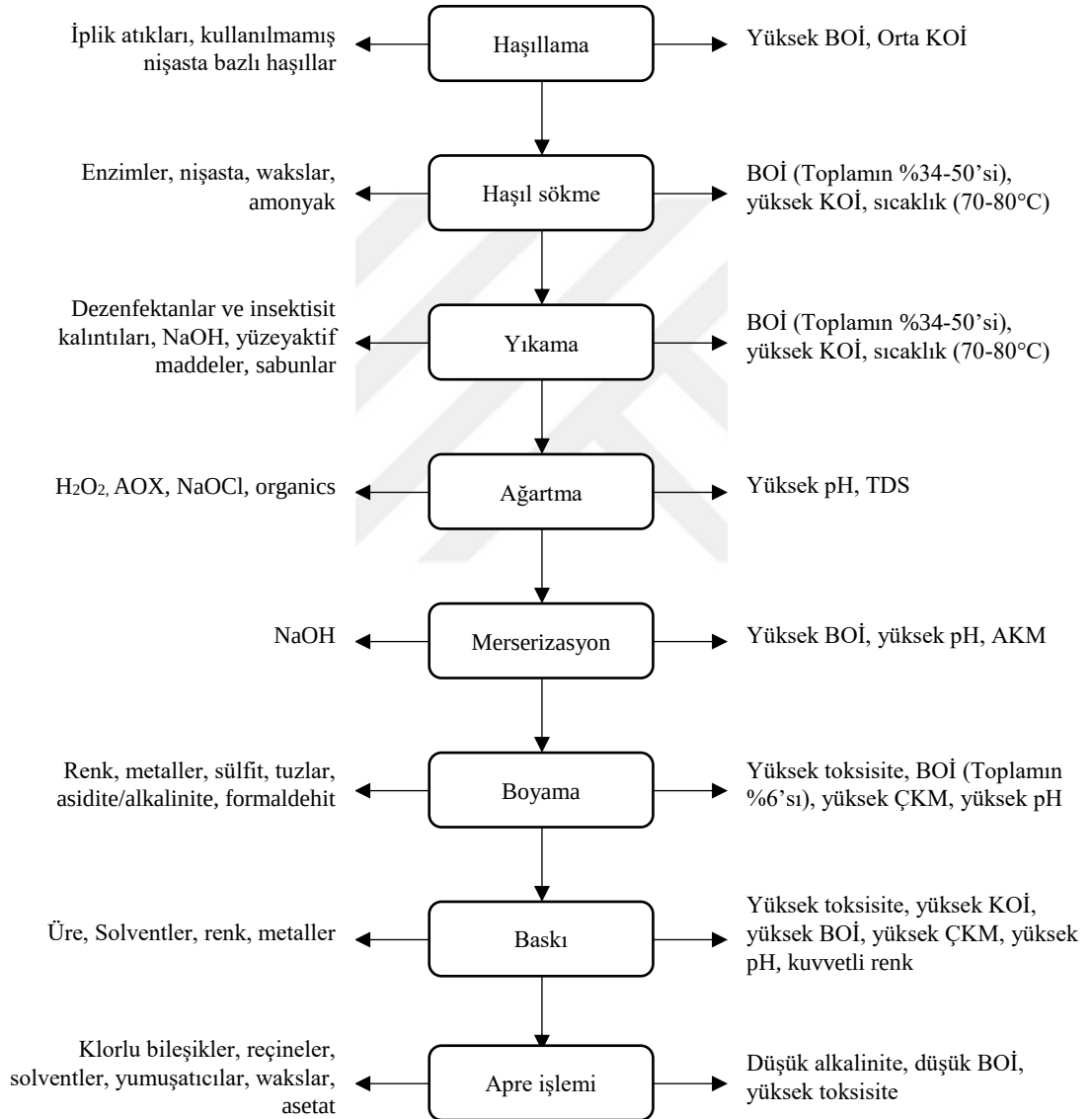
Tekstil endüstrisi, işletmenin çeşitli proseslerinde en çok suyun ve kompleks kimyasalların kullanıldığı endüstriler arasındadır. Bu atıksu farklı molekül ağırlıklarına ve kompleks yapılara ve düşük biyolojik bozunurluğa sahip olan farklı boya türlerini içerir (Verma vd., 2012).

Atık ve atıksu üretimi açısından tekstil imalathaneleri kuru üretim ve ıslak üretim yapan imalathaneler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilirler. Kuru üretim yapılan imalathanelerde, başlıca oluşan katı atık ıskarta pamuk nedeniyle oluşan atıklardır. Diğer grupta temel proses aşamaları haşıl sökme, pişirme, ağartma, merserize etme, boyama, emprime ve terbiye prosesleridir. Tekstil endüstrisinde oluşan atıksuyun başlıca kaynakları, proses suyu, temassız soğutma suyu ve yağmur suyudur. Şekil 2.4'te pamuk kullanarak ıslak üretim yapan tipik bir tekstil imalathanesinin farklı üretim aşamalarında oluşan başlıca kirleticilerin bileşenleri de gösterilmiştir (Verma vd., 2012).

Islak üretim prosesleri çok yüksek KOİ, BOİ, TÇM ve koyu renge sahip tekstil atıksuyunun büyük kısmını oluşturur. Alkali, asit, ağartıcı kimyasallar, enzimler, nişasta, boyalar, reçineler, solventler, mumlar, yağlar gibi çok sayıda kimyasal bileşen tekstil işlenmesi sırasında çeşitli aşamalarda kullanılır ve atık oluşumuna katkıda bulunurlar. Atıksudaki kirleticiler en çok kumaştan haşıl sökme ve haşıl kimyasalların giderilmesi aşamalarından kaynaklanır. Boyama işlemi sonucunda boya banyosu ve

yıkama suyu, endüstriden kaynaklanan toplam atıksuyun büyük bir bölümünden sorumludur (Verma vd., 2012). Oluşan atıksu tipik olarak bakiye boya, tuz gibi yan ürünleri ve yardımcı kimyasalları ya da oksalik asit gibi yıkama solventleri gibi ilave kimyasalları içerir.

Tekstil boyama işlemleri sonucunda estetik olarak hoş olmayan koyu kırmızımsı-kahverengi renkte atıksu oluşur.



Şekil 2.4 : Tekstil üretim tesisinin çeşitli aşamalarında başlıca kirletici bileşenleri (Verma vd., 2012).

Özellikle anyonik boyalarda olmak üzere iyonik boyaların kumaşa geçişine yardımcı olmak için tuz kullanılmaktadır. Yaygın olarak sodyum klorürün kullanıldığı durumlarda atıksudaki tuz konsantrasyonu 2-3 g/L dir (US EPA, 1997). Ham tekstil

atıksuyu BOİ, KOİ, renk, askıda katılar, çözünmüş katılar ve ağır metal gibi parametrelerin ölçülmesi ile karakterize edilebilir. Yüksek değişkenliğe sahip bu atıksuyun pH'ı 2-4, KOİ'si 50 mg/L – 18 000 mg/L, Çözünmüş katılar 50 mg/L-6000 mg/L arasında değişir ve çok kuvvetli renk içerebilir (Verma vd., 2012).

2.2.3 Çevresel etkisi

Tekstil atıksuları üretimin farklı aşamalarında ortaya çıkan yüksek miktarlardaki kirleticiler nedeniyle uygun arıtma yapılmadan deşarj edilmeleri çevrede olumsuz etkilere neden olur. Sülfür, naftol, vat boyaları, nitratlar, asetik asit, sabunlar, krom bileşikleri ve bakır, arsenik, kurşun, kadmiyum, civa, nikel, kobalt gibi ağır metaller ve bazı yardımcı kimyasalların varlığı atıksuyun çok toksik olmasına neden olur. Formaldehit bazlı boya sabitleme ajanları, karbon bazlı yumuşatıcılar ve biyolojik olarak bozunmayan boya kimyasalları atıksuda bulunan diğer zararlı kimyasallardır. Bunların yanında yüksek sıcaklık ve pH'a sahip olması ciddi sorunlara yol açabilir (Bhatt ve Rani, 2013).

Renkle beraber kolloidal madde ve yağlı atıkların varlığı bulanıklığı arttırarak suya kötü bir görünüm ve koku verir. Fotosentez için gerekli olan ışığın geçirimini engeller. Hava su ara yüzeyindeki oksijen transfer mekanizmasını engeller. Sucul yaşam için çok gerekli olan çözünmüş oksijenin tükenmesi tekstil atıksuyunun en ciddi etkilerinden birisidir. Bunun sonucu olarak suyun kendi kendini temizleme yeteneği de kaybolur. (Bhatt ve Rani, 2013). Son olarak doğrudan kanalizasyona bırakılmaları biyolojik arıtma proseslerinde sorunlara yol açar ve arıtılmış atıksuya uygulanan ultraviyole dezenfeksiyon prosesinin verimini etkiler (Körbahti, 2007).

3. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ BOYAMA ATIKSULARININ ARITIMI

Tekstil endüstrisi, küresel olarak çevre kirliliğine en çok katkıda bulunan sektörlerin başında gelmektedir. Bunun başlıca nedeni içerdiği, inorganik tuz, alkali ve asidik maddeler, yüzey aktif maddeler gibi yardımcı kimyasallar ve çeşitli boyar maddelerdir. Özellikle pamuğun boyanması için reaktif boyaların kullanıldığı faaliyetlerden oluşan atıksular yüksek oksijen ihtiyacı, renk ve tuz içeriği nedeniyle yüksek kirlilik yüküne sahiptir (Khatrı vd., 2015).

Tekstil endüstrisi atıksuyunda diğer kimyasalların konsantrasyonu genellikle boyar maddelerinkinden düşüktür ancak bu maddelerin düşük konsantrasyonlarda bile sahip oldukları kuvvetli renkleri deşarj edildikleri noktada ciddi estetik sorunlara yol açar (Chatzisyneon vd., 2006). Bu tür faaliyetlerden oluşan atıksu miktarları sürekli artmaktadır. Birçok boyar madde ve bunların yıkım ürünleri canlı yaşam için toksik ya da mutojenik olabilir. Yüksek kirlilik kapasiteleri nedeniyle bu tür atıksuların arıtılması son yıllarda önem kazanmıştır (Panakoulıas vd., 2010).

Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılması için çok çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerin yanı sıra elektrokimyasal yöntemler de kullanılmaktadır. Seçilecek yöntemin ekonomik ve teknik açıdan uygunluğuna boyar madde türü, atıksu kompozisyonu ve maliyet gibi birkaç faktör göz önünde bulundurularak karar verilebilir.

3.1 Genel Arıtım Prosesleri

Endüstriyel atıksu renk giderimi için çok sayıda yöntem uygulanabilir. Bunlar kimyasal, fiziksel ve biyolojik olarak kategorize edilebilirler.

3.1.1 Biyolojik prosesler

Aktif çamur gibi geleneksel biyolojik atıksu arıtma sistemleri, organik atıksu bileşenlerini parçalamak için çeşitli mikroorganizma topluluklarını kullanırlar. Atıksu arıtımı için biyolojik prosesler ekonomik bir seçim olsa da tekstil atıksuların doğaları

gereği biyobozunurluklarının az olması nedeniyle çok etkili olamazlar. (Panakoulis vd., 2010). Parçalanmaları için kullanılan en yaygın metotlarından birisi, aerobik mikroorganizmaların solunum prosesinde moleküler oksijeni eşdeğer indirgen elektron alıcısı olarak kullanılmasına dayanır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda ise bazı boyar maddelerin anoksik/anaerobik bozunmaya yatkın olduğuna dair veriler güçlenmektedir (Anjaneyulu vd., 2005). Mikroorganizmalar bu tür anoksik ve hipoksik ortamlarda elektron alıcısı olarak karbondioksit, sülfatları ve nitratları kullanırlar (Birch vd., 1989).

3.1.1.1 Aerobik biyolojik prosesler

Tan vd. (2000), sülfanotlu azo boyar maddelerin biyolojik olarak parçalanabilirliğini kesikli aerobik reaktörde yapılan deneylerle göstermişlerdir. Birbirini takip eden anaerobik ve aerobik biyoreaktörler maksimum yükleme oranı 210 mg/l/gün ile sisteme beslendiğinde sülfonatlı azo boyası MY10'un tamamıyla giderimi sağlanmıştır. Renk gideriminde, bazı çalışmalarda ise aktif çamur sistemine çeşitli adsorbentler ve kimyasallar direkt olarak eklenmiştir. Márquez ve Costa (1996), çalışmalarında havalandırma tankına aktif karbon eklenmesi ile asit turuncu 7 boyar maddesinin %90 oranında giderimini sağlamışlardır. Pala ve Tokat (2002), bazı materyallerin (Toz halinde aktif karbon, organik flokulant gibi) aktif çamura eklenmesi ile tekstil endüstrisi atıksuyundan etkin bir şekilde renk gideriminin gerçekleştiğini göstermiştir. Azo boyasını (RED RBN) hızlı bir şekilde renksizleştirme kapasitene sahip mikroorganizma konsorsiyumu fosforile polivinil alkol (PVA) ile immobilize hale getirildikten sonra yüksek konsantrasyonlardaki (500 mg/l) boyar madde solüsyonunda %75 giderim verimi sağlanmıştır (K. Chen vd., 2003).

3.1.1.2 Anaerobik biyolojik prosesler

Anaerobik biyolojik arıtma ile azo ve diğer suda çözünür boyar maddelerin arıtımı sağlanabilir. Renk giderim işlemi anerobik sistemde serbest moleküler oksijen yerine hidrojen ile oksidasyon-redüksiyon işlemleri ile gerçekleşir (Brás vd., 2005). Tipik olarak anaerobik parçalanma sonucu metan ve hidrojen sülfür oluşur. Azo-bazlı kromofora sahip boyar maddelerin giderilmesi azo bağlarının indirgenmesi ile gerçekleşir. Anaerobik arıtım, havalandırma işlemi olmaması nedeniyle aerobik sistemlerin daha uygun maliyetli alternatifidir.

Tekstil atıksularından anaerobik renk giderme yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmasa da başarılı pilot ölçekte ve tam ölçekli çalışmalar bulunmaktadır. Carliell-Marquet vd. (1996), detaylı bir çalışmada test ettiği çeşitli reaktif boyalarda %80 giderimin indirgenme mekanizması ile gerçekleştiğini öne sürmüştür. Benzer çalışmalarda da boyar maddelerin anerobik dönüşümünün kısmen sülfid ile kimyasal indirgenme ile gerçekleştiğini göstermiştir (Anjaneyulu vd., 2005). Nigam vd. (1996), anaerobik bakterilerden oluşan bakteri karışımını kullandıkları çalışmalarında birkaç bakteri kültürünün anaerobik sıvı fermantasyon şartlarında bazı boyar madde atık sularını kalıcı olarak tamamen renksizleştirildiğini bildirmişlerdir.

3.1.2 Fiziko-kimyasal prosesler

3.1.2.1 Kimyasal oksidasyon

Oksidasyonun uygulama kolaylığı nedeniyle kimyasal renk giderimi alanında en yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Modern boyar maddelerin biyolojik arıtma sistemlerinde gerçekleşen zayıf oksidasyon şartlarına karşı dayanıklı oldukları bilinmektedir. Bu nedenle yeterli renk giderimi için, klor, ozon, Fenton reaktifi, UV/peroksit, UV/ozon, gibi daha kuvvetli oksidasyon ajanlarının kullanılması gerekmektedir. Kimyasal oksidasyon proseslerinde boya moleküllerinin aromatik zincirin parçalanması ile boyar madde atıksularından boya giderimi gerçekleşir (Anjaneyulu vd., 2005).

Ozonlama

Oksidanlar arasında boyarlar ile yüksek reaktivitesi ve giderim veriminin yüksek olması nedeniyle, ozonlama en çok kullanılan yöntemler arasındadır. Kararsızlığının yüksek olması ile (oksidasyon potansiyeli = 2,07 V) diğer oksidasyon ajanları klor (1,36 V) ve H₂O₂ (1,78 V)'e göre çok daha iyi oksitleyicidir. Ozonun en önemli avantajlarından birisi, gaz formunda uygulanabilmesi ve böylece atıksuyun ve çamurun hacmini arttırmamasıdır. Ozonlama sonucunda atıksu, renksiz ve düşük KOİ içeriği ile çevreye bırakılması için uygun hale gelir (Robinson vd., 2001).

Ozonlamanın dezavantajı ise, 20 dk gibi kısa yarılanma ömrünün olmasıdır. Boyaların varlığı ile bu süre kısalabilir ve ph, sıcaklık ve tuz varlığından stabilitesi etkilenebilir. Alkali şartlarda ozonun parçalanması hızlanır ve atıksuyun pH'ının takibi gerekmektedir (Slokar & Marechal, 1998). Kısa ömrü nedeniyle sürekli ozonlama gerekli olduğu için maliyet diğer bir dezavantajıdır (Robinson vd., 2001).

H₂O₂ – Fe (II) (Fenton reaktifi)

Hidrojen peroksit (H₂O₂) birçok organik ve inorganik kirleticinin giderilmesi için kullanılmaktadır. Ancak tek başına hidrojen peroksit, yüksek konsantrasyonlardaki organik ve inorganik bileşiklerin giderilmesi için çok etkili değildir. Metal tuzları, ozon ve UV ışığı hidrojen peroksiti tetiklemesiyle, hidroksil radikalleri oluşur. Bu maddeler arasında Fe²⁺ ve hidrojen peroksit fenton reaktifi olarak adlandırılır. Bu ikisi düşük pH değerlerinde kompleks redoks reaksiyonlarını başlatarak oldukça reaktif hidroksil radikallerini oluşturur (Ahn vd., 1999). Fenton reaktifi (Fe(II) ile aktive edilmiş hidrojen peroksit), KOİ, renk ve toksisite gideriminde uygun bir yöntemdir. Diğer gelişmiş oksidasyon prosesleri arasında fenton reaktifinin, demir ve hidrojen peroksitin ucuz ve toksik olmaması, yürütülmesi ve kontrolününün kolay oluşu bu yöntemin avantajlarından. Ancak düşük pH gereksinimi ve aşırı demir iyonlarının bertaraf sorunları bu yöntemin dezavantajları arasındadır (Karatas vd., 2012).

Fotokimyasal (H₂O₂-UV)

Bu yöntemle boya molekülleri hidrojen peroksit varlığında UV ile muamele edilerek CO₂ and H₂O'ya dönüştürülürler. Parçalanma, yüksek konsantrasyonlarda hidroksil radikallerinin oluşması ile gerçekleşir. UV ışınları hidrojen peroksit gibi kimyasalları aktif etmek için kullanıldığından, giderim UV ışınlarının yoğunluğuna, pH'a, boya yapısına ve boya banyosu kompozisyonuna bağlıdır (Slokar ve Marechal, 1998).

Arıtım, kesikli ya da sürekli reaktörde gerçekleştirilebilir. Başlangıç maddelerine ve renk giderim işleminin uzunluğuna bağlı olarak, halidler, metaller, inorganik asitler, organik aldehytler ve organik asitler gibi yan ürünler üretilebilir. Çamur oluşumunun olmaması ve kötü kokuların ciddi miktarda azalması, boya içeren atıksuların fotokimyasal olarak arıtılmasının avantajlarından. UV ışınları hidrojen peroksidin iki hidroksil radikaline parçalanmasını aktive ederek organik maddenin kimyasal oksidasyonunu sağlar (Robinson vd., 2001).



Sodyum hipoklorit (NaOCl)

Bu yöntemde, boya molekülünün amino grubuna, Cl⁻ tarafından saldırmasıyla azo-bağının bölünmesi tetiklenir. Asit ve direkt boyaların giderilmesinde etkili olurken,

dispers boyaların giderilmesi için uygun değildir. Cl konsantrasyonunun arttırılması renk gideriminde de artışa neden olur. Ancak boya giderimi için Cl kullanılması, su kütlelerine ulaştıklarındaki olumsuz etkileri ve, kanserojen ve toksik moleküller olan aromatik aminlerin oluşması nedeniyle giderek azalmaktadır (Slokar ve Marechal, 1998).

3.1.2.2 Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon

Atıksu arıtımında kimyasal koagülasyon ve flokülasyon, çözünmüş ve askıda katıların fiziksel durumunu değiştirmek ve sedimentasyonla uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak için kimyasalların eklenmesi işlemidir. Koagülasyon tek başlarına çökelemeyen ya da çökelmeleri çok uzun zaman alacak olan askıda ya da kolloidal maddelerin giderilmesi için kullanılır (Verma vd., 2012).

Boyar madde içeren atıksuların koagülasyonu düşük maliyeti nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Ancak, bazı çözünür boyaların giderilmesinde etkisiz olması ve çok miktarda çamur oluşumu bu yöntemin kullanımını sınırlamaktadır (Anjaneyulu vd., 2005). Ayrıca, teknolojik gelişmeler sonucu çok sayıda kompleks yapıda yeni boyaların geliştiriliyor olması uygun koagülant seçimini zorlaştırmaktadır. Koagülasyon verimi uygun koagülant seçimi, flokülasyon yardımcılarının kullanılması, pH, kimyasal dozajı, karıştırma süresi, çökeltme süresi gibi proses parametrelerin seçilmesi ile optimize edilmektedir (Verma vd., 2012).

3.1.2.3 Adsorption

Adsorpsiyon, fiziko-kimyasal prosesler arasında en etkili ve çok kullanılan yöntemler arasındadır. Adsorpsiyon yönteminde boya giderimi çeşitli boyaların adsorbentlere afinitesine dayanarak gerçekleşmektedir. Boya-adsorbent etkileşimi, adsorbentin yüzey alanı, partikül boyutu, sıcaklık, pH ve temas süresi gibi fiziksel ve kimyasal faktörlerden etkilenmektedir (Himanshu ve Vashi, 2010). Adsorbanların seçiminde temel kriterler yüksek afinite, hedef bileşiğin kapasitesi ve adsorbent rejenerasyonu gibi özelliklere dayanmaktadır (Karcher vd., 2002).

Chitin gibi amino azotu içeren adsorbentlerin asit boyalarda önemli derecede daha fazla adsorpsiyon kapasitene sahiptir. Aktif karbon en sık kullanılan adsorbenttir ve çoğu boyada etkilidir. Ancak, etkinliği kullanılan karbon materyalinin türüne ve atıksu karakteristiği ile doğrudan bağlantılıdır (Robinson vd., 2001). Daha maliyetli olan

aktif karbona alternatif olarak çok çeşitli maddelerden üretilmiş düşük maliyetli adsorbent örnekleri (ağaç kabuğu, pirinç çeltiği, kömür, bentoksit, kil) bulunmaktadır. Bu konuda detaylı bir incelemeye Gupta vd. (2009) kaynağında ulaşılabilir. Kullanılan adsorbentlerin bertarafı, çok yüksek bakım maliyetleri ve arıtmadan önce askıda katıların giderilmesi için ön işlem yapılmasının gerekmesi bu yöntemin kullanımını sınırlayan etmenlerdir (Verma vd., 2012).

3.1.2.4 İyon değişimi

Standart iyon değişimi sistemleri boya içeren atıksuların arıtımında çok kullanılmamaktadır. Bunun nedeni iyon değiştiricilerin çok çeşitli boyaların varlığına uyum sağlayamamaları ve atıksudaki diğer katkı maddelerinin varlığından performanslarının kötü etkilenmesi olabilir (Slokar ve Marechal, 1998). Bu yöntemde atıksu, uygun iyon değişim alanlarının doygun hala gelene kadar iyon değişim reçinelerinden geçirilir. Bu yolla hem anyonik hem de katyonik boyaların atıksudan giderimi mümkündür. Avantajları, rejenerasyon esnasında adsorbant kaybı olmaması, kullanıldıktan sonra solventlerin geri kazanabilmesi ve çözünebilir boyaların uzaklaştırılabilmesidir. En büyük dezavantajı ise maliyettir. Organik solventlerin maliyeti yüksektir ve iyon değiştirme yöntemi dispers boyalarda çok etkili değildir (Robinson vd., 2001). Bununla birlikte, son yıllarda kullanım kazanan etkili anyon değiştiriciler, kuaternize selülozdur. Hidrolize reaktif boyalar aminler aracılığı ile ya da ilave etkileşimlerle (hidrojen bağlı, van der Waals kuvvetleri gibi) kuartenize selüloza bağlanır. Atıksudan boya giderim verimi, bu tür kuvvetlerin sayısı ve türüne bağlı olarak değişir (Slokar ve Marechal, 1998).

3.1.2.5 Membran prosesler

Ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmos gibi membran prosesler dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Atıksuyun spesifik sıcaklığı ve kimyasal kompozisyonuna göre kullanılacak filtrenin türü ve porozitesi belirlenir. Membran teknolojisi tekstil atıksularından etkili bir şekilde boya giderimi için kullanılabilir (Ledakowicz vd., 2001). Ancak yüksek maliyetleri, membranların çok sık tıkanması, atıksuyun türüne göre askıda katıların giderilmesi için farklı ön işlemlerin gerekliliği ve çevreye doğrudan bırakılması uygun olmayan konsantre boya banyosunun oluşumu gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenlerden dolayı bu yöntem eğer atıksu düşük

konsantrasyonlarda boya içeriyorsa suyun geri kazanımı için kullanılabilir ancak çözünmüş katı konsantrasyonu azaltmaz (Robinson vd., 2001).

3.2 Elektrokimyasal Arıtım Prosesleri

Genelde atıksu arıtımı, biyolojik, fiziksel ve kimyasal olmak üzere geleneksel yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak atıksuda bulunabilecek inatçı organik kirleticilerin biyolojik yöntemler kullanılarak parçalanması zordur. Ayrıca fiziksel-kimyasal yöntemler çamur oluşumu sorunu gibi nedenlerden dolayı her zaman uygun olmayabilir. Günümüzde elektrokimyasal teknolojiler yüksek giderim verimleri, kullanışlılığı ve uygun maliyetleri nedeniyle ilgi görmektedir.

3.2.1 Elektrokoagülasyon (EK)

Elektrokoagülasyonun temel prensibi elektrik kullanarak maddeleri parçalara ayırma anlamına gelen “elektroliz” işlemine dayanmaktadır. Elektroliz prensibini ilk olarak Michael Faraday 1820’de formüle etmiştir. Proses iki elektrot arasında iyonların transferini sağlayacak bir elektrolit, su ya da tuz eritici, solüsyonda gerçekleşir. Sisteme elektrik akımı uygulandığında, pozitif iyonlar katoda hareket ederken, negatif iyonlar anoda hareket eder. Elektrotlarda katyonlar indirgenir, anyonlar ise oksitlenir (Sahu vd., 2014).

Elektrokoagülasyon elektrotlar vasıtasıyla uygulanan elektrik akımı sonucu çözünebilir anot materyallerinin elektrolitik oksidasyonu ile ortamda koagulant türlerinin oluşturulmasından ibarettir. Tükenebilir anottan elektrokimyasal çözünme sonucu oluşan metal iyonları suda hidrolize uğrayarak hidroksit çökeltileri ve diğer metal iyon türleri dahil olmak üzere çeşitli koagulant türlerini oluştururlar. Bu türler koagulant olarak davranarak yük nötralizasyonu ile partikülleri kararsız hale getirir (Martínez-Huitle ve Brillas, 2009). Al ve Fe malzemeleri bol, ucuz ve kolay erişilebilmeleri, oluşan demir ve alüminyum hidroksitlerinin toksik olmayışı ve kirleticilerin etkili bir şekilde giderilmeleri için gerekli yüksek değeriğe sahip olmaları gibi çeşitli nedenlerden dolayı kullanılan en yaygın elektrot türleridir. Bununla birlikte, eş zamanlı gerçekleşen katodik reaksiyonlar sonucu kirleticilerin katotta birikmeleri ya da oluşan H_2 ile yüzdürülmesi de sağlanır. Elektriksel olarak çözünme sadece anotta gerçekleşse de genellikle anot ve katot materyali aynı malzemedendir (Hakizimana vd., 2017).

Elektrokoagülasyon yöntemi atıksulardan kirleticilerin giderilmesi için etkili bir yöntemdir. Kağıt hamuru ve kağıt sanayi atıksuları (Mahesh vd., 2006), maden ve metal işleme sanayi (Holt vd., 2002), içme suyu arıtımı (Matteson vd., 1995), nitrat içeren atıksular (Koparal ve Öğütveren, 2002), arsenik içeren döküm atıksuları (Balasubramanian ve Madhavan, 2001), tekstil atıksuları (Koby vd., 2003) gibi çeşitli endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılabilir.

3.2.1.1 Koagülasyon konsepti

Atıksuda kararlı halde bulunan kolloidal kirleticiler genellikle, flotasyon, genel filtrasyon, ya da sedimentasyon ile giderilemeyen partiküllerdir. Kolloidler, atıksu içerisinde dağınık halde bulunan ve boyutları 1nm ile 10 mikrometre arasında değişen mikroskopik partiküllerdir. Bu partiküllerin bulundukları solüsyondaki kararlılıkları yüzey yüklerine bağlıdır. Bu kararlılıkları, itici elektrostatik kuvvet ve çekici van der Waals kuvvetleri arasındaki dengenin sonucudur. Kalıcı dipol ve uyarılmış dipollerden kaynaklanan van der Waals kuvvetleri çok kısa mesafelerde etkilidir. İtici kuvvet ise elektriksel çift katmanların, Stern ve dağınık katmanlar, çakışmasından kaynaklanır. Stern ve dağınık katmanlardaki yük yoğunluğu nedeniyle kolloid yüzeyindeki yük miktarının ölçülmesi zordur. Bunun yerine, partikülün solüsyon içinde hareketi boyunca etkin yükünü ölçen zeta potansiyeli, partikül stabilitesinin doğrudan göstergesi olarak kullanılır (Naje vd., 2016). Koagülasyon ile kolloidal süspansiyondaki yüklü partiküller, karşıt iyonlar ile nötralize edilerek bir araya gelmeleri sağlanır. Zıt yüklü elektrolit varlığında elektriksel çift tabakanın itme potansiyelinin azalmasının sonucu olarak yüzey yükü düşer (Mollah vd., 2001).

3.2.1.2 Elektrokoagülasyon teorisi

Genellikle elektrokoagülasyon yönteminin üç aşamada gerçekleştiği kabul edilmektedir: (Mollah vd., 2001)

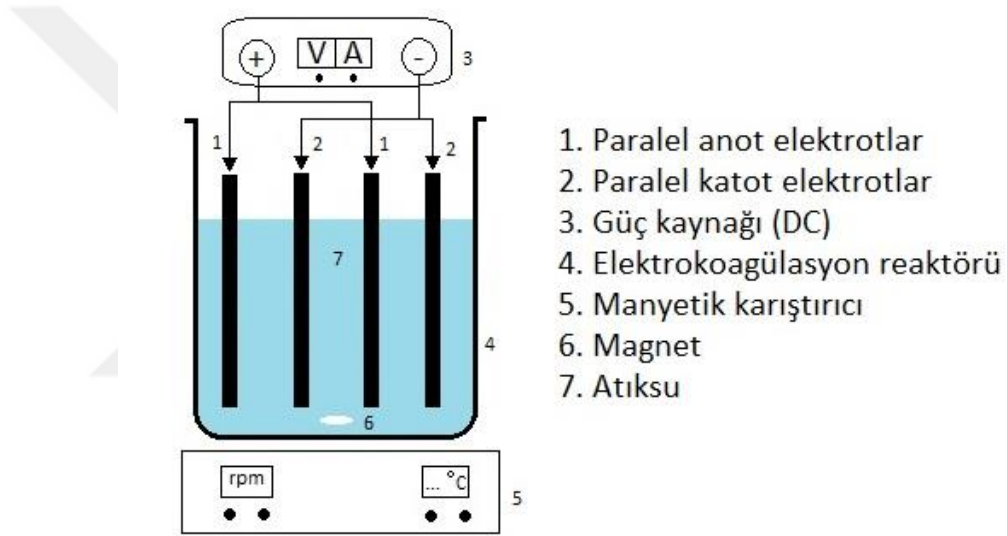
1. Çözeltiden akım geçişi nedeniyle çözünür elektrotlardan oluşan türler ile parçacıkların etkileşimleri sonucu parçacıklar etrafındaki dağınık çift tabaka sıkıştırılır.
2. Çözünür elektrotun elektrokimyasal çözünmesiyle üretilen, zıt iyonlar ile atıksuda bulunan iyonik türler nötralize olur. Bu zıt iyonlar, parçacıklar arası elektrostatik itme kuvvetini yeterince azaltarak van der Waals etkisinin baskın

hale gelmesini sağlar, böylece pıhtılaşma sağlanır. İşlem sonucunda net yük sıfır olur.

3. Flok oluşumu ve koagülasyon sonucunda oluşan floklar kompleks hale gelmemiş kolloidal partikülleri köprülediği ve hapsettiği çamur örtüsü oluştur.

3.2.1.3 Elektrokoagülasyon teknolojisi

En basit haliyle bir elektrokoagülasyon reaktörü, anot ve katodun bulunduğu elektrolitik bir hücreden oluşur. Bu hücre bir güç kaynağına bağlandığında anot materyali elektrokimyasal oksidasyon sonucu aşınırken katotta pasivizasyon gerçekleşir. Şekil 3.1’de bir EC hücresinde bir çift anot ve katodun paralel olarak basit bir şekilde yerleşimi görülmektedir (Mollah vd., 2001).



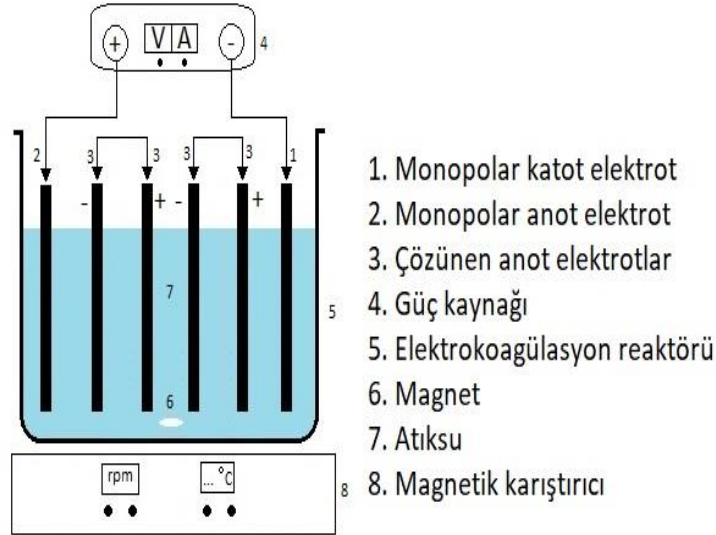
Şekil 3.1 : Paralel olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi.

Esas olarak iki paralel elektrotun arasına yerleştirilen iletken metal plaka çiftlerinden ve DC güç kaynağından meydana gelmektedir. İletken metal plakalar yaygın olarak “tükenen elektrotlar” olarak bilinmektedir. “Tükenen anot”, anodun çözünme potansiyelini düşürürken katodun da pasivasyonu en aza indirir. Anot ile katot aynı materyalden olabileceği gibi farklı materyallerden de olabilir (Mollah vd., 2001).

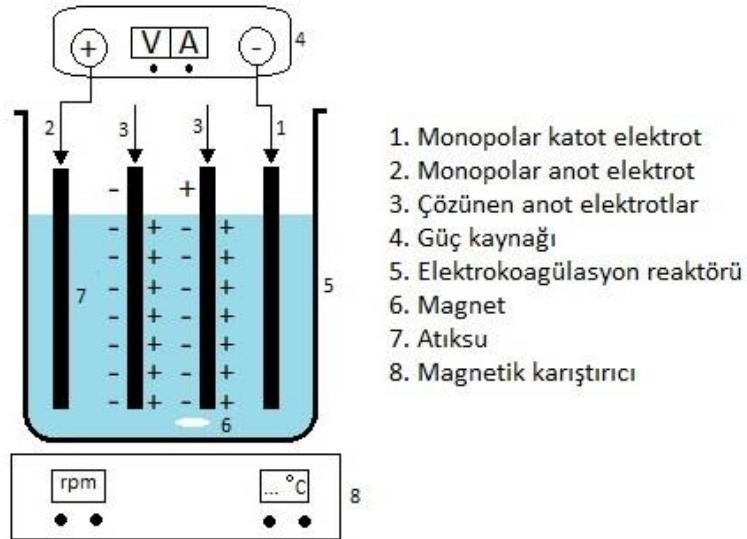
Şekil 3.2’de monopolar olarak bağlanmış elektrot serilerinin EC hücresinde yerleşimi görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere her bir çift “tükenir elektrot” içten birbirine bağlıdır ve dış elektrotlarla herhangi bir bağlantısı yoktur.

Böylece, elektroliz sırasında, pozitif kutupta anodik reaksiyonlar gerçekleşirken, negatif kutupta katodik reaksiyonlar gerçekleşir. Sistemde sürekli olarak iyonların üretilmesi için demir ya da alüminyum gibi metal plakalar genellikle “tükenir elektrot”

olarak kullanılır. Salınan iyonlar partiküllerin yüklerini nötralize ederek koagülasyon işlemini başlatır. Giderim verimini optimize etmek için, pH, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli ve iletkenlik gibi parametreler belirli kirleticiler için optimize edilebilir (Mollah vd., 2001).



Şekil 3.2 : Seri olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi.



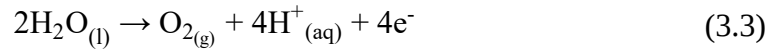
Şekil 3.3 : Bipolar (çift kutuplu) ve paralel bağlı elektrokoagülasyon hücresi.

Elektrotlar bipolar (çift kutuplu) ve paralel olarak ta yerleştirilebilir (Şekil 3.3). Bu durumda, tükenen elektrotlar elektriksel bağlantısı olmayan iki paralel elektrot arasına yerleştirilmiştir. Sadece iki monopolar elektrot tükenen elektrotlarla bağlantısı olmadan güç kaynağına bağlıdır. Böyle bir yerleştirmenin basit kurulumu kullanımı sırasında kolaylık sağlar. İki elektrottan elektrik akımı geçirildiğinde, iletken plakanın

nötr tarafları, yanındaki paralel tarafa kıyasla zıt yüke sahip yüklü taraflara dönüşeceklerdir. Bu durumda tükenen elektrotlar bipolar elektrotlar olarak da isimlendirilir (Mollah vd., 2004).

Elektrokoagülasyon prosesinde elektrotlarda aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir.

Anodik reaksiyonlar:

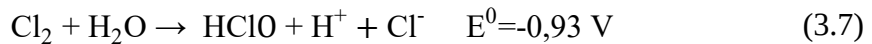
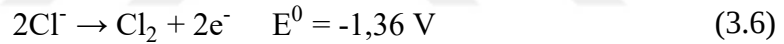


Katodik reaksiyonlar:



Eğer demir ya da alüminyum elektrotlar kullanılırsa, oluşturulan $Fe^{3+}_{(aq)}$ ya da $Al^{3+}_{(aq)}$ iyonları anlık olarak karşılık gelen hidroksi türlerini oluşturmak için reaksiyona girerler.

Ek olarak, eğer klorit mevcut ve anot potansiyeli yeteri kadar yüksekse, EC hücresinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşebilir (G. Chen, 2004):



Anot metallerinin çözünmesi Faraday kanununa göre gerçekleşir (Kuokkanen vd., 2013):

$$m_{\text{metal}} = \frac{I \times t_s \times M}{Z \times F} \quad (3.9)$$

m_{metal} : çözünen elektrot materyali miktarı (g)

I: uygulanan akım (A)

t_s : arıtma süresi (s)

M: elektrot materyalinin molar kütlesi ($M_{Al}=26,982 \text{ g/mol}$, $M_{Fe}=55,845 \text{ g/mol}$)

z: elektrot materyali iyonlarının valansı ($Z_{Al}=3$, $Z_{Fe}=2$)

F: Fraday sabiti (96485 C/mol)

Yapılan çalışmalar sonucu gerçek EC uygulamalarında anodik çözünmenin teorik değeri aşıldığı görülmüştür. Bunun nedeni özellikle klor iyonları varlığında paslanma sonucu çözünmenin de gerçekleşmesi olduğu düşünülmektedir (G. Chen, 2004).

Elektrokoagülasyon prosesi kirleticileri atıksudan tamamen yok etmez. Elektro-flotasyon, çöktürme, filtreleme vb. yöntemlerle ayırmayı kolaylaştırmak için yalnızca kirleticileri dönüştürür. Ayırma, reaktörde veya daha sonraki birimlerde gerçekleşebilir. Bazen, kirleticilerin başarılı bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için, elektrokoagülasyon prosesleri, kum filtrasyonu, elektro-flotasyon, mikro filtreleme gibi diğer birimlerle birleştirilebilir (Mickova, 2015). Örnek olarak, Narayanan ve Ganesan (2009), Cr(VI) giderimi için EC ile kombine olarak tanecikli aktif karbon prosesini pH: 8' de çalışmışlardır. Optimum ayrılma, 26,7 mA / cm² lik bir akım yoğunluğu ve 100 dk'lık bir çalışma süresinde elde edilmiştir. Diğer kombinasyon yöntemi olan EC-ultrafiltrasyon, Kumarasinghe vd. (2009), tarafından atıksudan Cu, Cd ve Pb'nin uzaklaştırılması için uygulanmıştır.

3.2.1.4 Çeşitli parametrelerin Elektrokoagülasyon prosesine etkisi

Yapılan çalışmalar elektrokoagülasyon prosesinin veriminin büyük ölçüde işletme parametrelerine bağlı olduğunu göstermektedir. En çok çalışılan değişkenler solüsyonun pH'ı ve akım yoğunluğudur.

Elektrotların yerleşimi

Monopolar ve bipolar konfigürasyonların kirletici giderim verimleri ve işletme maliyetleri daha önce birkaç çalışmada karşılaştırılmıştır (Al Aji vd., 2012; Emamjomeh ve Sivakumar, 2009; Golder vd., 2007).

Emamjomeh ve Sivakumar (2009), kesimhane atıksuyu arıtımında mild çelik ve alüminyum elektrotları monopolar ve bipolar yerleşimde incelemişlerdir. En iyi performansın, mild çelik elektrotlarla bipolar yerleşimde elde edildiğini bulmuşlardır. Aksine, Golder vd. (2007) Cr³⁺ giderimi için mild steel elektrot kullandılar sonuçta, akım verimliliğinin elektrotlar bipolar konfigürasyonda (%64,6) iken monolardakinden (%91,7) daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ghosh vd. (2008), bipolar ve monopolar elektrot konfigürasyonlarında elektrokoagülasyon prosesi ile içme suyundan florür uzaklaştırılmasını çalışmışlardır. Bipolar elektrot konfigürasyonunun daha verimli olduğunu ancak işletme maliyetlerinin monopolar

konfigürasyona göre daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Asselin vd. (2008), yağlı sintine suyu; Bayramoglu vd. (2007), tekstil atıksuyu; Wang vd. (2009), çamaşır atıksuyu arıtımında monopolar elektrot konfigürasyonunun daha etkili olduğunu bildirmişlerdir. Asselin vd. (2008) , labaratuvar ölçeğinde petrol sintine suyunun giderimi için Al ve demir elektrotları monopolar ve bipolar konfigürasyonda çalışmışlardır. Optimum koşullarda elektrokoagülasyonun uzaklaştırma verimlerini: %93 BOD, % 95,6 yağ ve gres, % 99,8 TTS ve% 98,4 bulanıklık olarak bildirmişlerdir.

Solüsyon pH'nın performansa etkisi

pH, elektrokimyasal proseslerin performansını etkileyen önemli bir parametredir. Solüsyonun iletkenliği, hidroksit türlerine, elektrotların çözünmesine, kolloidal partiküllerin zeta potansiyeline etkisi vardır. Alüminyum, demir katyonlar ve hidroksitler kolloidlerin kararsız hale gelmesini sağladıkları için etkin koagülant türleri asidik, nötr ve zayıf alkali şartlarda oluşur. Yüksek alkali pH'ta, $Al(OH)_4^-$ ve $Fe(OH)_4^-$ iyonları oluşur, bu iyonlar Fe(III) gibi zayıf koagülasyon performansı gösterirler. Fe(III), Al(III)'e göre daha geniş pH aralığında etkilidir ve aynı zamanda zayıf alkali pH şartlarında da etkili olur (Sahu vd., 2014). Elektrokoagülasyon prosesinde maksimum kirlilik giderimi kirleticilerin doğasına bağlı olarak optimum pH değerinde elde edilir. Kirlilik giderim verimi optimum pH 'tan uzaklaştıkça azalır (Feng vd., 2016).

Elektroliz sırasında sabit akımda hacim başına alüminyum salınımının pH'ın 3'ten düşük olması durumunda 3'ten yüksek olması durumuna göre daha az olduğu bildirilmiştir (Mouedhen vd., 2008). Alüminyum katottan kimyasal olarak çözünme, pH'ın alüminat oluşacak seviyeye kadar yükselmesi sonucu gerçekleşir. Asidik pH'ta, elektrik olmadan bile önemli derecede demir elektrotları çözündüğü bulunmuştur. Sasson vd. (2009), 5-9 arası pH ve 0,05- 0,4 A çalışma şartlarında bir elektrokoagülasyon hücresinde demir oksidasyonunu araştırdılar. Demir anodun Fe^{2+} olarak çözünmekte olduğu ve Fe^{2+} 'nin Fe^{3+} 'e oksidasyon hızlarının pH'ya bağlı olduğunu göstermişlerdir. Demirin alkali şartlarda korozyonu azalacağı için yüksek pH'ta çözünme hızı azalır. Aynı zamanda oksijen varlığında yüzeyde korozyon hızını azaltacak pasif bir katman oluştuğu bilinmektedir. Dolayısıyla hem kimyasal hem de elektrokimyasal koagülasyonda başlangıç pH'ı su arıtımı için önemi bir parametredir.

(Hanay ve Hasar, 2011) tarafından, alüminyum elektrotlarla Cu(II), Mn(II), ve Zn(II) giderimi çalışılmıştır ve atıksuyun başlangıç pH'ının artması ile giderim veriminin arttığı sonucuna varmışlardır. Benzer çalışmalar başlangıç pH'ının COD ve bulanıklık (Koby vd., 2003), Co(II) (Shafaei vd., 2011), As(V) (Balasubramanian ve Madhavan, 2001), Cr³⁺ (Golder vd., 2007) giderimi üzerine yapılmıştır.

Akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğu proses sırasında doğrudan olarak kontrol edilebildiği için önemli bir parametredir. Akım yoğunluğu direkt olarak hem koagulant dozunu hem de kabarcık gelişimini belirler, aynı zamanda solüsyonun karışımını ve elektrotlardaki kütle transferini kuvvetli şekilde etkiler. Sonuçta elektrotlardan çözünen ya da biriken metal miktarı elektrolitik solüsyondan geçen elektrik miktarına bağlıdır. Yüksek akım yoğunluğunda, anodik çözünme artar ve bunun sonucunda renk ve KOİ gideriminin artmasını sağlayacak hidroksi-kasyonik komplekslerin miktarı da artar. Optimum akım yoğunluğu her zaman işletme maliyetleri ile solüsyon pH 'ı, sıcaklık ve debi gibi parametrelerin etkili yönetimini arasındaki dengeye göre belirlenir (Sahu vd., 2014).

Sisteme sağlanan elektrik, ilgili elektrotlardan salınan Al³⁺ ve Fe²⁺ iyonlarının miktarlarını belirler (Feng vd., 2016). Alüminyum için eşdeğer elektrokimyasal kütle 335,6 mg/(A h) iken, demir için bu değer 1041 mg/(A h) dir. Bir elektrokimyasal sistemin, elektrotların periyodik olarak temizlenmesi hariç bakım gerektirmeden uzun süre işleyebilmesi için akım yoğunluğunun 20-25 A/m² aralığında olması tavsiye edilmektedir (Sahu vd., 2014).

İletkenliğin etkisi

Daha büyük iyonik güç, sabit voltajda akım yoğunluğunda bir artışa neden olur veya sabit akım yoğunluğunda atıksuyun iletkenliğinin artmasıyla hücre voltajı düşer. Bu nedenle kirleticilerin etkin bir şekilde giderilmesi için atıksuyun iletkenliğinin bilinmesi gereklidir (Koby vd., 2003). Solüsyonun iletkenliği elektrolitin türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır. NaCl, BaCl₂, KCl, Na₂SO₄ ve KI gibi farklı elektrolit türleri bulunur. Genellikle, iletkenliği arttırmak için NaCl ilave edilir (Ghosh vd., 2008).

Solüsyonda klorürlerin varlığında anottaki ürünler Cl² ve OCl⁻ olur. OCl⁻ tek başına solüsyonda bulunan boya moleküllerini oksidize edebilecek güçlü bir oksidandır. Elektroliz sırasında aktif klorür Cl⁻ iyonları oluşur ve buda suyun dezenfeksiyonunu

sağlar. Cl^- ilavesi aynı zamanda CO_3^{2-} ve SO_4^{2-} nin olumsuz etkilerini azaltır. CO_3^{2-} ve SO_4^{2-} varlığı Ca^{2+} ve Mg^{2+} birikimine ve akım verimini hızlı bir şekilde düşürecek oksit tabakasının oluşmasına neden olur (Sahu vd., 2014). Koby vd. (2003) çalışmalarında demir ve alüminyum elektrotların çözünme derecelerinin iletkenliğin fonksiyonu olduğunu bildirmişlerdir. Alüminyum için enerji tüketimi daha fazla iken elektrot tüketimi daha fazla olduğunu ve her iki elektrot için de enerji ve elektrot tüketimi atıksu iletkenliğinin artması ile azaldığını bildirmişlerdir.

Elektrot materyalinin etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde maksimum verim elde edebilmek için ilk adım elektrot materyalinin seçimidir. Al, Ag, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cs, Fe, Mg, Na, Si, ve Zn olmak üzere çok çeşitli elektrot materyali kullanılmaktadır. Genelde, alüminyum ve demir gibi çok değerlikli metal elektrotlar tercih edilmektedir (Mickley, 2009). Doğru elektrotun seçilmesi elektrokimyasal reaktörün performansı üzerine önemli etkisi vardır. Anot materyali sadece solüsyonda üretilen katyondan sorumlu değil aynı zamanda akım veriminden de sorumludur. Zayıf akım verimine sahip materyaller daha zayıf arıtma verimine sahiptir (Sahu vd., 2014).

Elektrotlar arası mesafe

İki elektrot arası mesafe de aynı zamanda reaktördeki reaksiyonları etkiler. Elektroliz sırasında, katoda yakın solüsyon mevcut iyonların farklı mobiliteleri nedeniyle daha konsantre hale gelir. Elektrotlar arası boşluk elektroliz sırasında gazlar ile dolar, bu da elektriksel direnci artırır. Reaktör içeriğinin karıştırılması ve elektrotların dik yerleşimi gazların yükselmesi nedeniyle sirkülasyonu geliştirir (Sahu vd., 2014).

Elektrotlar arası mesafe reaktörün boyutunu ve enerji tüketimini etkileyen aynı zamanda toplam arıtma maliyeti üzerine önemi etkisi olan bir parametredir (Ghosh vd., 2008). Omik potansiyel düşmesi elektrotlar arası mesafe ile orantılı olduğundan elektroliz enerji tüketiminin azaltılmasında mesafenin azaltılması çok önemlidir (Wang vd., 2009). Daha dar boşluklar kütle transfer özelliklerini artırır ve omik kaybı azaltır. Sentetik atıksuların giderilmesinde minimum 3 mm, atıksularda ise minimum 8 mm mesafe yeterlidir. Yüksek elektrot yüzey alanı/hacim oranı istenilen reaktörlerde, elektrotlar arası mesafe reaktör içinde kütle transferini başlatacak olan yeterli türbülansı sağlayacak kadar olmalıdır (Sahu vd., 2014).

Omik potansiyel düşmesi elektrokimyasal ölçümler üzerinde önemli etkisi olabilir. Omik potansiyel düşmesi solüsyondaki direnç nedeniyle potansiyel düşmesidir. Aynı zamanda solüsyon içinde iyonların hareketi için potansiyel farkı olarak da tanımlanabilir. Omik potansiyel düşmesi aşağıdaki eşitlik tarafından açıklanır (Vasudevan vd., 2011).

$$\eta = I \cdot d / A \cdot k \quad (3.10)$$

Burada,

I: Akım (amper)

d: katot ve anot arası mesafe (m)

A: aktif anot yüzey alanı (m²)

k: spesifik iletkenlik (10³ mS/m)

Eşitliğe göre, elektrotlar arası mesafenin artırılması ile omik potansiyel düşmesi artar. Arıtma prosesi esnasında, akım belirli bir zaman sonra aniden düşebilir, bu nedenle sisteme sabit bir akım sağlanabilmesi için voltajın arttırılması gereklidir. Bunun nedeni anodik oksidasyonu azaltabilecek olan omik kaybın artması olabilir. Bu nedenle anot ve katot arasındaki mesafenin arttırılması sonucu artan omik potansiyel düşmesi EC prosesinde istenilen bir şey değildir (Sahu vd., 2014).

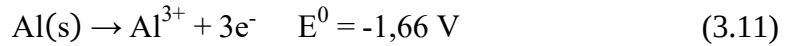
3.2.2 Elektroflotasyon (EF)

Elektroflotasyon, elektrolitik olarak oluşturulan kabarcıklar ile kirleticilerin su yüzeyinde yüzdürülmesi işlemidir (G. Chen, 2004). EC teknolojisinde sadece katotlarda hidrojen kabarcığı üretilirken, EF teknolojisinde hidrojen kabarcıkları katotlarda, oksijen kabarcıkları anotlarda üretilir. Oksijen gazı anotlarda sadece daha yüksek akım yoğunluğunda üretilir. Katotta aynı zamanda elektrolitlerin pH'nın korunmasına yardımcı olan hidroksil iyonlarının gelişimi söz konusudur. Akım yoğunluğu, anot ve katot arasında uygulanan voltajı ve elektrotların yüzey alanını kontrol ederek kolayca ayarlanabilir. Gaz kabarcıklarının gelişiminde üç temel adım vardır; Elektrot yüzeyinde çekirdeklenme, büyüme ve ayrılma. Elektrot yüzeylerinin ideal bir şekilde düz değildir ve mikropürüzlülüklerde küçük çukur ve çizikler gibi alanlar mevcuttur. Çukurların ve çiziklerin, elektrot yüzeyinin geri kalanından daha yüksek bir akım yoğunluğuna sahip olduğu için, çekirdeklenme bu yerlerde başlar (Mickova, 2015).

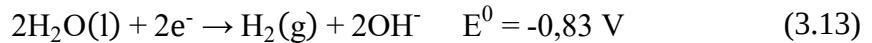
Kabarcık gelişimi iki mekanizma ile başlar; aşırı doygunluk ve yüksek iç basınç sonucu çözünmüş gaz birleşmesi. Birleşim iki veya daha fazla gaz kabarcığı birbirine dokunduğunda ve tek bir gaz kabarcığı haline geldiğinde gerçekleşir. Aynı zamanda bir kaz kabarcığının katot yüzeyine doğru sürüklenip, yolunda karşısına gelen her gaz kabarcığı ile birleşmesi ile de gerçekleşebilir. Gaz kabarcıklarının birleşmesi flotasyonda istenilen bir şey değildir, çünkü daha büyük bir çapa sahip olan gaz kabarcığı, daha küçük bir çapa sahip olan gaz kabarcıklarına göre daha az etkilidir. Son adım, kabarcıkların boyutuna ve kabarcık temas açısına bağlı olarak gaz kabarcıklarının elektrot yüzeyinden ayrılmasıdır. Bu adım, elektrolit, elektrot yüzeyi ve gaz kabarcıkları arasındaki yüzey gerilimini azaltmak için elektrolite yüzey aktif madde eklenmesi ile hızlandırılabilir (Mickova, 2015).

Temelde, EF' de üretilen hidrojen ve oksijen kabarcıklarının çapı 17 ila 50 μm aralığında değişir. Kimyasal flotasyon teknolojilerinde tipik ortalama çap 48 ila 60 μm arasındadır. Eğer titanyum esaslı anot kullanılırsa genellikle EF tarafından üretilen kabarcıkların çapı 15'inden 45 μm ' ye kadar değişen oranlarda log-normal dağılımına uymaktadır (X. Chen vd., 2002). Elektrokimyasal olarak üretilen kabarcıklar geleneksel yöntemle göre daha küçüktür, bu da flotasyon metodunu daha etkin kılar. Al elektrot üzerinde, elektriksel olarak çözünür Al anotlarla elektro-flotasyon sırasında aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir (Mickova, 2015).

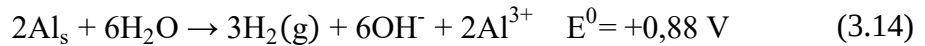
Anot:



Katot:



Toplamda:

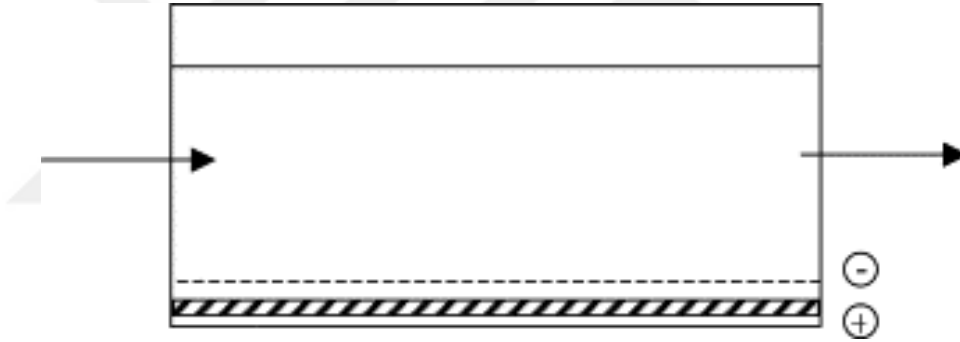


Endüstriyel uygulamalarda elektroflotasyon sıklıkla, yüzey sularının arıtılması (Ricordel vd., 2010), tekstil endüstrisi atıksuyu ağır metal giderimi (Belkacem vd., 2008), sentetik solüsyonlar ve tekstil atıksuları arıtımı (Merzouk vd., 2010), galvanoplastik endüstrisi atıktusunda bakır iyonları konsantrasyonunun azaltılmasında (Oussedik ve Khelifa, 2001), çinko giderimi (Casqueira vd., 2006) ve içme suyundan florür giderimi alanlarında kullanılmıştır (Zuo vd., 2008). Bu yöntem

aynı zamanda yağlı maddelerin uzaklaştırılması (Bande vd., 2008), kirleticilerin tabakhane atıklarından ayrılması (Murugananthan vd., 2004), KOİ'nin çamaşır atık suyundan uzaklaştırılmasında kullanılır (Wang vd., 2009).

3.2.2.1 Elektroflotasyon reaktör tasarımı

Tipik bir elektroflotasyon reaktörü iki elektrot, bir güç kaynağı ve çamur sıyırma ünitesinden oluşmaktadır. Reaktör tasarımı, flotasyon verimini, flok oluşumu, sıvı akış rejimini, kabarcık hareket yönü ve karıştırma / çökelme özellikleri de dahil olmak üzere operasyonel parametreleri etkiler. Elektroflotasyonda elektrotlar reaktörün geometrisine bağlı olarak dikey ya da yatay olarak yerleştirilebilir. Geleneksel reaktördeki elektrotlar genellikle yatay olarak monte edilmektedir. Anotlar reaktörün tabanına yerleştirilirken, katotlar anotlardan 10-50 mm yukarıda yerleştirilir (Şekil 3.4) (G. Chen, 2004). Ohmik potansiyel düşmesinin elektrotlar arası mesafeyle orantılı olduğu göz önüne alındığında, bu mesafenin azaltılması enerji tüketimini azaltacaktır.



Şekil 3.4 : Elektroflotasyon hücresi elektrotların geleneksel yerleşimi.

3.2.2.2 Elektroflotasyonu etkileyen parametreler

Elektroflotasyon prosesinde, iki zıt elektrik ile yüklenmiş elektrot arasında solüsyon içerisinde gaz kabarcıkları oluşur. Elektrotlar, inert, çözünmeyen, boyutları stabil ve dayanıklı malzemeden yapılmıştır ve reaksiyon vermezler. Elektroflotasyonun verimliliğini etkileyen üç temel faktör: kirletici giderimi, elektrot materyalinin tükenmesi ve güç tüketimidir. Elektrot malzemesi, akım yoğunluğu ve pH, kabarcık boyutunu ve dolayısıyla elektro-flotasyon verimliliğini etkiler. Daha küçük gaz kabarcıklarına suyun kaldırma kuvveti daha azdır ve elektrolitte daha uzun bekleme süresine sahiptirler. Bu durum kabarcıklar ve askıda parçacıklar arasında çarpışma ihtimalini arttırır. Daha küçük boyutlu gaz kabarcıkları elde etmek için pH, sıcaklık, reaktif konsantrasyonunu kontrol etmek ve en uygun elektrot malzemelerini seçmek gereklidir (Mickova, 2015).

Elektrot materyalinin etkisi

Elektrokoagülasyon ve flokülasyona benzer şekilde, EF elektrotları genelde Al, Fe ve paslanmaz çelikten yapılır. En küçük gaz kabarcıklarının paslanmaz çelik elektrotlarda üretildiği bulunmuştur (X. Chen ve Chen, 2010). Bu olgu paslanmaz çeliğin korozyon direnci ve elektrolitik işlemler sırasındaki elektrot yüzey pürüzlülüğü ile açıklanabilir (Mickova, 2015). Paslanmaz çelik elektrot üzerinde mekanik parlatma ile ayna benzeri bir yüzey oluşturulması ile en küçük kabarcıkları üretilebilmektedir (Sarkar vd., 2010). Günümüzde, Ti, Ta₂O₅, IrO₂, RuO₂, Sb₂O₅, SnO₂ vb. baz alınarak güvenilirlikli kararlı elektrotlar ticari olarak üretilmektedir. Demir, alüminyum ve paslanmaz çelik elektrotlar kolay ulaşılabilir, aynı anda hem EF hem de EC proseslerini gerçekleştirebilmelerine rağmen anodik olarak tükenen materyallerdir. İşin daha kötüsü kısmen tükenmiş elektrotlarda, elektrot yüzey alanındaki kusurlar nedeniyle daha büyük kabarcıklar oluşur (G. Chen, 2004). Grafit ve kurşun oksit elektrotlar en yaygın çözünmez elektrot türlerindendir (Burns vd., 1997). Aynı zamanda ucuz ve kolay ulaşılabilirler ancak yüksek O₂ gelişim aşırı gerilimine sahip ve dayanıklılıkları düşüktür. Ayrıca PbO₂ kullanılması durumunda ikinci bir kirliliğe neden olabilecek toksik Pb²⁺ oluşabilir. Birkaç çalışmada da anot olarak Pt ve Pt kaplı kafes elektrotların kullanımı bildirilmiştir (Ketkar vd., 1991). Grafit ve kurşun oksite göre çok daha kararlıdır ancak yüksek maliyetleri nedeniyle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda pratik değildir. Son on yıla baktığımızda ise, elektrot polarizasyon prosesi sırasında otomatik olarak tersinme (kendi kendini yıkama efekti) yeteneği olan uzun hizmet ömrü sunan elektrotların üretimine odaklanılmıştır (Mráz ve Krýsa, 1994).

Solüsyon pH'nın etkisi

pH oluşan gaz kabarcıklarının boyutunu önemli derecede etkiler. En küçük hidrojen kabarcıkları nötr veya hafif asidik koşullarda oluştuğu bildirilmiştir (G. Chen, 2004; Mickova, 2015). Rojas vd. (2016), hidrojen gazı kabarcık boyutunun sıcaklığın artmasıyla arttığını ve en küçük olanları pH 7'de oluştuğunu ve oksijen kabarcıklarının boyutunun ise pH'daki artışla birlikte arttığını bildirmişlerdir. pH 2 'de hidrojen kabarcıkları yaklaşık 23 µm iken, pH 6' da yaklaşık 27 µm civarındadır. Katot materyalinin hidrojen kabarcıkları boyutuna etkisi, alkali ortamda daha azdır ve kabarcık ortalama çapı 15 ila 30 mikron arasındadır. Nötr ortamda, hidrojen kabarcıklarının boyutu, katot maddesinden pratik olarak bağımsızdır; kabarcık

ortalama çapı, 15 ila 20 mikron aralığı ile sınırlıdır. Asidik ortamda, katot materyalinin kabarcığın büyüklüğü üzerindeki etkisi son derece belirgindir. (Mickova, 2015).

Akım yoğunluğunun etkisi

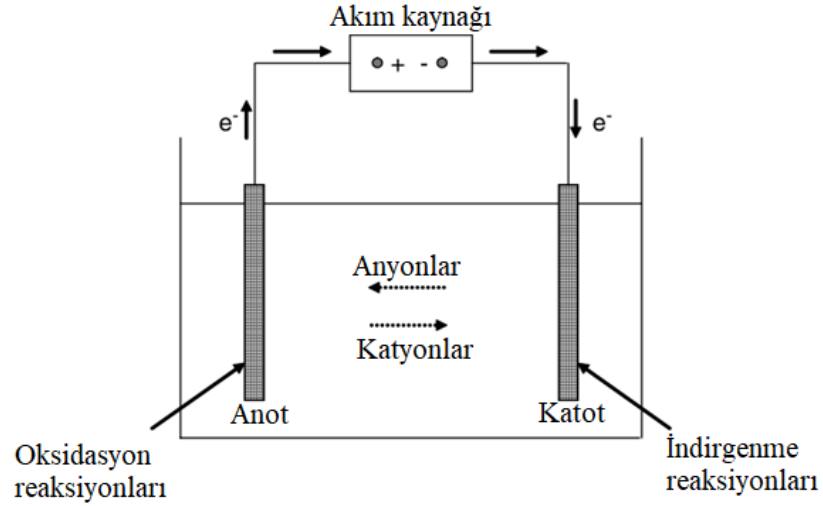
Akım yoğunluğu, sürekli kontrol edilebilen bir işletme parametresidir. Bu parametre doğrudan kabarcıkların üretim hızını, çözeltinin karışımını ve elektrotlardaki kütle transferini belirler (Mickova, 2015). Literatürde akım yoğunluğunun katotta oluşan kabarcıkların boyutuna etkisiyle ilgili farklı görüşler vardır. Sarkar vd., (2010), katotta oluşan hidrojenin önemli bir miktarının, akım yoğunluğuna bağlı olarak, elektrolit çözeltisinde çözündüğünü bildirmişlerdir. Yazarlar, kabarcık çapının, hidrojen üretim hızı, kabarcık çekirdeklenme hızı ve çözünmüş gaz konsantrasyonunun fonksiyonu olduğunun sonucuna varmışlardır. Diğer yandan Burns vd. (1997) ve Khosla vd. (1991), akım yoğunluğunun artmasıyla kabarcıkların boyutlarının azaldığını bulmuşlardır. 200 A / m²'den daha yüksek akım yoğunluğu değerleri için kabarcıkların boyutu 20 - 38 µm arasında değişmektedir.

3.2.3 Elektrooksidasyon (EO)

Kompleks ve tehlikeli atıklar, kararlı ve düşük değerlikli metal iyonlarının reaktif ve yüksek değerlikli duruma geçtikleri elektro-oksidasyon yöntemi ile arıtılabilirler (Farmer vd., 1992). Elektrokimyasal oksidasyon ilk olarak biyolojik olarak bozunmayan ve toksik bileşikler içeren sentetik atıksuların arıtılmasında kullanılmıştır. Ancak günümüzde gerçek atıksularda kullanımı da giderek artmaktadır. Ayrıca, oksidasyonda reaktif madde olarak elektron kullanıldığı ve başka kimyasal maddeler eklenmediği için ilave kirliliğe yol açılmaz.

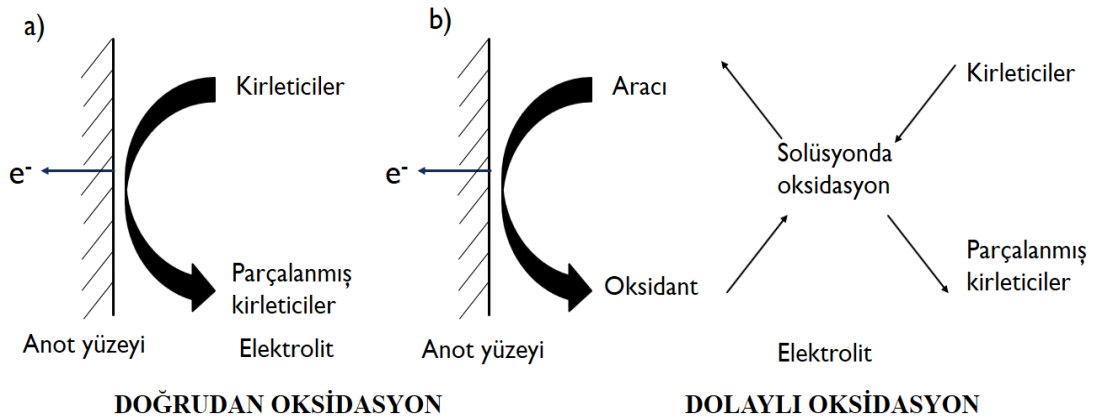
Elektrooksidasyon prosesleri basit ekipmanlar ile işletimi kolaydır ve işletme süreleri kısadır. Bu prosesinin en önemli dezavantajı ise yüksek enerji tüketimi nedeniyle yüksek enerji tüketimi maliyetidir. Buna ek olarak bütün atıksular elektriği iletecek yeterli iletkenliğe sahip olmayabilir, bu durumda iletkenliği arttırmak için ilave elektrolit eklenmesi gerekmektedir. Son olarak yüzeyinde maddelerin birikmesi sonucu elektrotların düzgün çalışmamasına neden olur. Elektrooksidasyon prosesinde, elektroliz verimi elektrot kompozisyonuna bağlıdır. Verim aynı zamanda, ana reaksiyonların gerçekleştiği elektrot yüzeyindeki kütle transferini yüksek tutacak şekilde reaktör dizaynının değiştirilmesi ile de arttırılabilir (Anglada vd., 2009).

Elektrooksidasyon reaktörleri de elektrokimyasal arıtmada kullanılan reaktörlere benzerdir. En basit elektrooksidasyon reaktör dizaynı bipolar hücredir. Düz elektrotlar yerine silindirik elektrotlar kullanılabilir. EO için tipik reaktör tasarımı, bölünmüş ya da bölünmemiş hücre, 2 ya da 3 boyutlu elektrotlar ve tıpa akışlı ya da tam karışımli olarak yapılabilir. Şekil 3.5’de bir güç kaynağı, bir katot, bir anot ve elektrolitten oluşan bir elektrooksidasyon prosesi için elektrokimyasal reaktör düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Elektrioksidasyon reaktörü şematik gösterimi (Anglada vd., 2009).

Kirleticilerin elektrokimyasal olarak oksidasyonu iki farklı şekilde gerçekleşebilir. Doğrudan anodik oksidasyonda, kirleticiler anot yüzeyinde parçalanır (Şekil 3.6a), dolaylı oksidasyonda ise oksidasyonu gerçekleştirmek için aracılar (HClO , $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ vb.) kimyasal olarak oluşturulur (Şekil 3.6b). Sulu atıksuların elektrooksidasyonunda her iki oksidasyon mekanizması da aynı anda gerçekleşebilir (Anglada vd., 2009).



Şekil 3.6 : a) doğrudan oksidasyon ve b) dolaylı oksidasyon işlemleri.

3.2.3.1 Doğrudan oksidasyon

Doğrudan oksidasyonda, hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) gibi fiziksel olarak bağlı “aktif oksijen” ya da kimyasal olarak bağlı “aktif oksijen” (MO_{x+1}), organik bileşiklerle (R) anotta reaksiyona girer. Organik bileşikler fiziksel bağlı hidroksil radikalleri tarafından tamamen yakılır. Organik kirleticilerin kimyasal olarak bağlı oksijen ile oksidasyonu sonucu selektif oksidasyon ürünleri oluşur (Farmer vd., 1992).

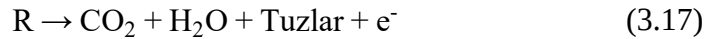


Kirleticilerin direkt oksidasyonu iki adımda gerçekleşir: (1) kirleticilerin solüsyondan anot yüzeyine difüzyonu ve (2) kirleticilerin anot yüzeyinde oksidasyonu. Nihai olarak elektrokimyasal prosesin verimi, elektrot yüzeyinde kütle transferi ve elektron transferi arasındaki ilişkiye bağlıdır. Elektrotun aktivitesi ve akım yoğunluğu elektron transferinin hızını belirler. Organik kirleticilerin anodik oksidasyonunda iki farklı yol takip edilebilir. (Martinez-Huitle ve Ferro, 2006).

- Elektrokimyasal dönüşüm. Organik kirleticiler sadece kısmi olarak okside olur. Bu nedenle ileri bir artırım gerekli olabilir.



- Elektrokimyasal yanma. Organik kirleticiler su, karbondiyoksit ve diğer inorganik bileşenlere dönüştürülürler.

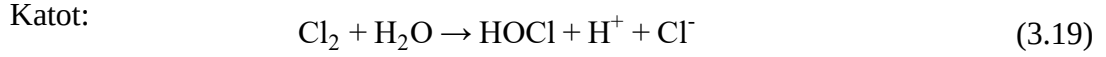


Anodik oksidasyonda çok miktarda kimyasalların eklenmemesi ya da ikincil bir kirlenmeye neden olmaması nedeniyle tercih edilmektedir. Anodik oksidasyonda en önemli kısım anot materyalidir. Ti/Pt-Ir, karbon fiber, MnO_2 , gözenekli karbon peçesi, paslanmaz çelik, gibi materyaller kullanılmaktadır. Ancak bunlardan hiçbiri yeteri kadar etkinliğe sahip değil ve ayın zamanda kararlı değildir. En çok tercih edilen anot materyalleri ise Pt, PbO_2 , IrO_2 , TiO_2 , SnO_2 ve BDD dir (G. Chen, 2004).

3.2.3.2 Dolaylı oksidasyon

Dolaylı elektrokimyasal oksidasyonda, güçlü bir oksitleyici ajan anot yüzeyinde oluşturulur ve atıksu içindeki kirleticileri parçalar. En yaygın elektrokimyasal oksidanlardan birisi klorürün anotta oksidasyonu ile oluşan klordur. Klorun çok kullanılmasının nedeni atıksularda klorür varlığı ve oldukça etkili bir oksitleyici olmasıdır. Klor ile dolaylı oksidasyonda, çözeltiye elektrik akımı verilmesi ile klorür

iyonlarının klor ya da hipoklorit iyonlarına dönüşür. Solüsyonda klor/hipoklorit iyonlarının oluşumu aşağıdaki reaksiyonlar ile gösterilmiştir (G. Chen, 2004).



Elektrokimyasal olarak üretilen diğer yaygın oksidanlar, hidrojen peroksit, perokso di sülfürik asit ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$) ve ozondur. Metal katalitik araçlar (Ag^{+2} , Co^{+3} , Fe^{+3} , vb.) da, elektro-Fenton işleminde olduğu gibi hidroksil radikallerinin oluşumu için kullanılabilir. Ancak, metal iyonlarının kullanılması arıtılmış atıksuyun ilk halinkinden daha yüksek toksisiteye sahip olmasında neden olabilir. Bu nedenle, bu yaklaşım metalik türlerin geri kazanılması için ilave bir ayırma adımı gerektirebilir (Martinez-Huitle ve Ferro, 2006).

3.2.3.3 Elektrot materyali seçimi ve elektrokimyasal oksidasyon mekanizması

Elektrot materyalinin seçimi elektrokimyasal arıtım prosesinin verimini ve aynı zamanda toksik yan ürünlerin oluşabilme potansiyelini etkilemektedir. Karışık metal oksit elektrotlar (MMO), boyutsal olarak kararlı (DSA) ticari isim ile bilinmekte ve 30 yıldır piyasa bulunmaktadır. Titanyum, tantalum gibi korozyona dirençli ana materyal ve metal oksit (RuO_2 , IrO_2 , PbO_2 , SnO_2 gibi) kaplamalardan oluşurlar. Comninellis (1994), elektriksel oluşan hidroksil radikallerinin elektrot yüzeyinde güçlü etkileşimi olan elektrotları aktif, zayıf etkileşimi olanları ise aktif olmayan elektrotlar olarak sınıflandırmıştır. Aktif anotların (IrO_2 , RuO_2 gibi) O_2 gelişimi için aşırı gerilim değeri düşüktür ve sonuç olarak inatçı organik bileşiklerini dönüştürebilme kapasitesi düşüktür. Aktif olmayan anotlar (PbO_2 , SnO_2 gibi) O_2 oluşumu için düşük elektrokimyasal aktivite gösterirler ve bu nedenle inatçı organik bileşiklerin oksidasyonunda daha yüksek etkinliğe sahiptirler. MMO elektrotların organikleri okside ve mineralize etme kabiliyetleri sınırlı olduğu için klorür varlığında kirleticilerin arıtımı için uygulanırlar (Radjenovic ve Sedlak, 2015).

Bor katkılı elmas (BDD) elektrotlar son yıllarda yoğun olarak çalışılmaktadır. BDD elektrotların, yüksek O_2 gelişimi aşırı gerilimine sahip olmaları gibi, belirgin özellikleri nedeniyle metal oksitlere kıyasla kirleticilerin doğrudan oksidasyonu için daha uygundur. BDD elektrotlarının organikleri okside etmedeki yüksek etkinliği suda elektroliz ile oluşan anot yüzeyine zayıf bağlanmış hidroksil radikallerinin varlığı

ile açıklanmaktadır (Comninellis, 1994). BDD elektrotlarının geniş-ölçek uygulamalarını kısıtlayan en önemli neden MMO elektrotlardan 10 kat daha fazla olan maliyetleridir. (Radjenovic ve Sedlak, 2015). BDD film elektrotları, amonyak, siyanür, fenoller, anilin, boyar maddeler, yüzey aktif maddeler gibi dayanıklı kirleticilerin gideriminde en aktif anot materyalidir (Panizza vd., 2001).

3.2.3.4 Hidroksil radikali ($\bullet OH$) ve su arıtımındaki rolü

Bir hidrojen atomu ve bir oksijen atomlarının birbirine bağlanması ile meydana gelen $\bullet OH$ radikalleri, su molekülünü oluşturmak için diğer moleküllerin atomlarından H atomu çalma isteği nedeniyle oldukça reaktiflerdir. $\bullet OH$ radikallerinin organik, inorganik bileşikler ve bakteriler gibi çeşitli su kirleticileri ile reaktivitesi, atıksu arıtımı alanında yaygın kullanıma sahiptir (Gligorovski vd., 2015). Şekil 3.7' de hidroksil radikalının önemli özellikleri verilmiştir. Oksidasyon prosesleri için oksidant seçiminde oksidasyon kuvveti en önemli parametrelerden birisidir. $\bullet OH$ radikali oksidasyon kuvveti (2.8 eV) bakımından en kuvvetli ikinci oksitleyicidir. Yüksek elektrokimyasal oksidasyon kapasitesi ile ayırım gözetmeksizin neredeyse tüm inatçı organik kirleticileri parçalayarak karbondiyoksit ve suya dönüştürür. Kısa ömrü nedeniyle, arıtma sistemlerinden kendiliğinden yok olabilirler, ancak sadece akım uygulandığında varlıklarını sürdürürler (Buthiyappan vd., 2016).



Şekil 3.7 : Hidroksil radikalının bazı önemli özellikleri (Buthiyappan vd., 2016).

Hidroksil radikalleri organik molekülleri üç muhtemel yol ile hedef alır.

- 1) H_2O oluşturmak için hidrojen atomunun dehidrojenerasyonu
- 2) Doymamış bağların hidroksilasyonu
- 3) Redoks reaksiyonları

3.3 UV Görünür Bölge Absorpsiyon Spektroskopisi

Spektroskopi, madde ile ışın arasında etkileşim sonucu bir örnekteki elektronların bir enerji düzeyinden diğerine geçişleri sırasında absorplanan ya da yayılan elektromanyetik ışımayı inceleyen bilim dalıdır. Bu amaçla kullanılan cihazlara spektrofotometre adı verilir. Elektromanyetik spektrum genellikle yakın UV (185-400 nm), görünür (400-700 nm) ve çok yakın kızılötesi (700-1100 nm) olmak üzere 3 ana bölgeye bölünebilir. Çoğu ticari spektrofotometreler 185 -900 nm aralığında çalışırlar (Rouessac ve Rouessac, 2007). UV/Vis spektrofotometreler ise ultraviyole ve görünür ışık dalga boylarında ölçüm yapabilirler.

Işın (elektromanyetik dalga) uzayda çok yüksek hızla hareket eden bir enerji şeklidir. Işının elektriksel alanı ile maddenin bağ elektronları etkileşir. Bir örnek elektromanyetik ışıma maruz kaldığında enerjisi değişir. Elektromanyetik ışıma foton denilen enerjik partiküllerden oluşmaktadır. Bir fotonun enerjisi frekansı ve dalga boyunun fonksiyonudur. Eğer bu fotonlar bir örnek tarafından absorbe edilirse enerjileri örneğe geçerek yok olurlar. Böylece örnekteki analit daha düşük enerji düzeyinden daha yüksek, ya da daha uyarılmış, düzeye geçer. Bir örnekten geçen fotonların şiddetinin absorpsiyon sonucu zayıflamasın ölçülmesi ile absorbens değeri elde edilir. Yüksek enerji düzeyinde analitin düşük enerji düzeyine geri dönmesi sonucu ise emisyon meydana gelir. Geçirgenlik, örnekten çıkan elektromanyetik ışımının gücünün, P_T , kaynaktan çıkana, P_0 , oranıdır (Harvey, 2000).

$$T = \frac{P_T}{P_0} \quad (3.21)$$

Absorbans, analit konsantrasyonunun lineer bir fonksiyonu olmasından dolayı ışımının zayıflamasını ifadesinde daha çok kullanılan birimdir.

$$A = -\log T = -\log \frac{P_T}{P_0} = \frac{P_0}{P_T} \quad (3.22)$$

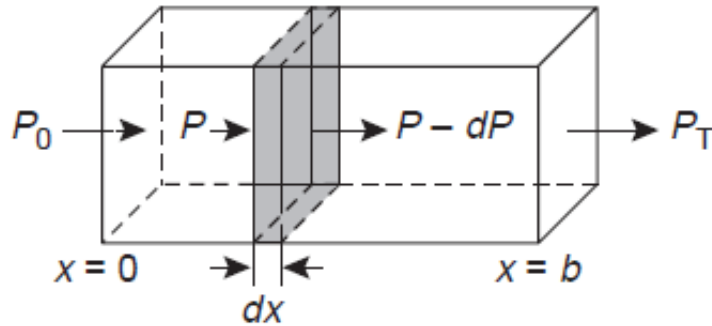
Ultraviyole ve görünür bölgedeki absorpsiyona neden olan bağlara ve fonksiyonel gruplara kromofor adı verilir. Bu nedenle boyar maddeler kimyasal yapıları gereği bir absorpsiyon spektrumu sergilerler ve bu spektrum dalga boyuna karşılık absorpsiyon şiddetinin grafiksel olarak ifade edilmesi ile gösterilir. Bu grafik renkli maddeler için

karakteristik bir özelliktir ve tanımlama amaçları ile kullanılabilir (Stake ve Mido, 1995).

Elektromanyetik spektrumun Ultraviyole/Görünür ışık bölgesi, insan gözünün de algıladığı bölümü içine alır ve yapısal olarak az bilgi verse de sayısal ölçümlerde çok kullanışlıdır. Bir solüsyondaki analitin konsantrasyonu belirli bir dalga boyundaki absorbans değeri ölçülerek Lambert-Beer kanununun uygulanması ile belirlenebilir. Bu metot aynı zamanda kolorimetri olarak da bilinmektedir. (Rouessac ve Rouessac, 2007).

3.3.1 Lambert-Beer kanunu

UV/Görünür bölge spektroskopisi kantitatif analizlerde uzun süredir kullanılmaktadır. Bu analizler, bir solüsyondaki bileşiğin konsantrasyonunun ışığın absorpsiyonu ile ilişkisini gösteren Lambert-Beer kanununa dayanarak yapılmaktadır. Monokromatik elektromanyetik ışımaya son derece ince, dx kalınlığında, bir örnekten geçerse, gücünde dP şiddetinde bir azalma meydana gelir (Harvey, 2000). Şekil 3.8’ de Beer-Lambert kanununda kullanılan parametreler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Beer-Lambert kanunu parametreleri.

$$\frac{-dP}{P} = \alpha C dx \quad (3.23)$$

P , örneğin ince tabakasına gelen güç; α orantı sabiti. Denklemin sol tarafı $P=P_0$ dan $P=P_T$ ye ve eşitliğin sağ tarafı $x=0$ dan $x=b$ (b : örneğin toplam kalınlığı) ye integrasyonu alınır

$$- \int_{P=P_0}^{P=P_T} \frac{dP}{P} = \alpha C \int_{x=0}^{x=b} dx \quad (3.24)$$

Buradan

$$\ln\left(\frac{P_0}{P_T}\right) = \alpha bC \quad (3.25)$$

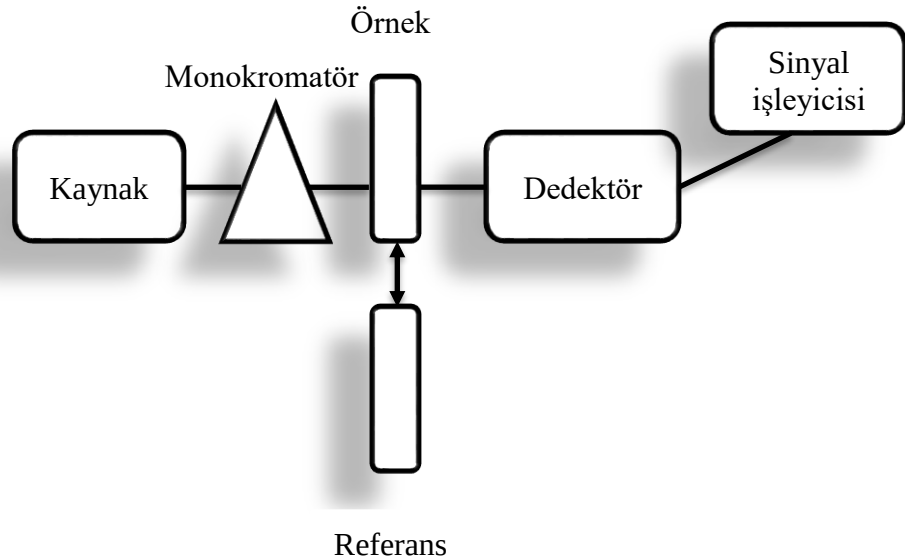
ln, loga çevrilirse ve yukardaki 3.22 denklemi yerine yazılırsa

$$A = \epsilon_\lambda lC \quad (3.26)$$

Elde edilir. A: Absorpsiyon, spektrofotometre ile elde edilen birimsiz bir optik parametredir. l: ışığın içinden geçtiği solüsyonun cm olarak kalınlığı, C: molar konsantrasyon, ϵ_λ : ölçümün yapıldığı λ dalga boyundaki molar absorpsiyon katsayısı ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) dir. Bu parametre analiz edilen bileşiğin karakteristik özelliğidir ve maksimum absorpsiyondaki dalga boyu değeridir (Harvey, 2000).

3.3.2 Spektroskopik enstrümanların temel bileşenleri

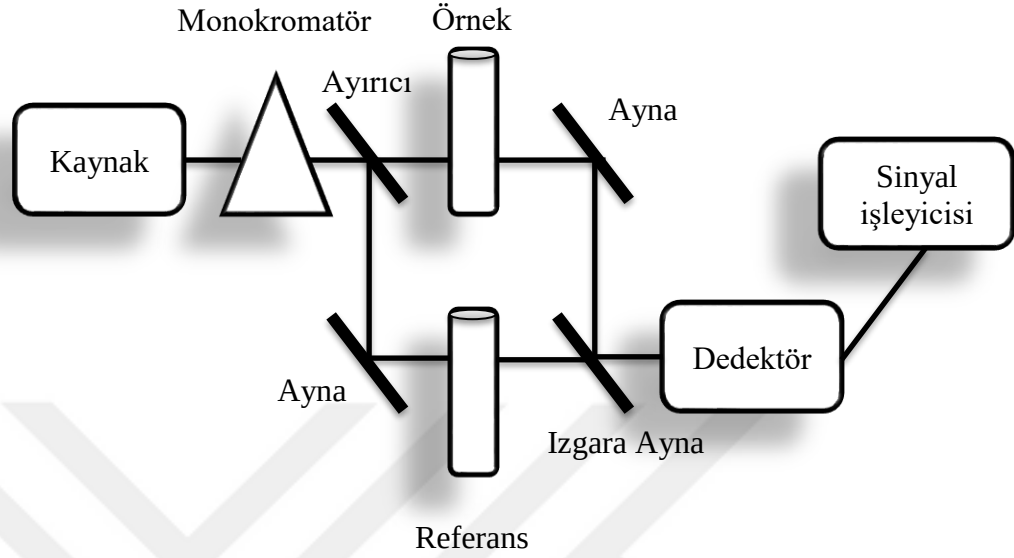
Dalga boyu seçimi için monokromatör kullanan cihazlara spektrometre adı verilir. Geçirgenliğin iki ışık kuvvetinin oranına eşit olduğu absorpsiyon spektroskopisinde kullanılan cihazlar da spektrofotometre olarak adlandırılır. En basit spektrofotometre, sabit dalga boylu monokromatör ile donatılmış tek ışık hüzmeli cihazlardır.



Şekil 3.9 : Tek ışık hüzmeli spektrofotometresi diyagramı.

Modern tek ışık hüzmeli cihazlar ilk olarak referans standardın daha sonra örneğin spektrumunu kaydeder. Dahili mikroişlemci aynı zamanda Lambert-Beer kanuna göre

absorbansı hesaplar. Böyle bir cihazın şeması şekilde verilmiştir (Şekil 3.9). Çift ışık hüzmeli cihaza göre daha az optik bileşen içerdiği için daha az komplekstir (Günzler ve Williams, 2008).



Şekil 3.10 : Çift ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı.

Çift ışık hüzmeli cihazlarda, bir tanesi örnekten bir tanesi de referanstan geçecek şekilde iki ışık yolu bulunur ve dalga boyu taraması sırasında sürekli halde otomatik olarak ikisi arasında geçiş yapar (Şekil 3.10).

4.1 Kullanılan Boyar maddeler ve Özellikleri

Çizelge 4.1 : Reactive Blue 198 boyar maddesinin özellikleri (Farias vd., 2017).

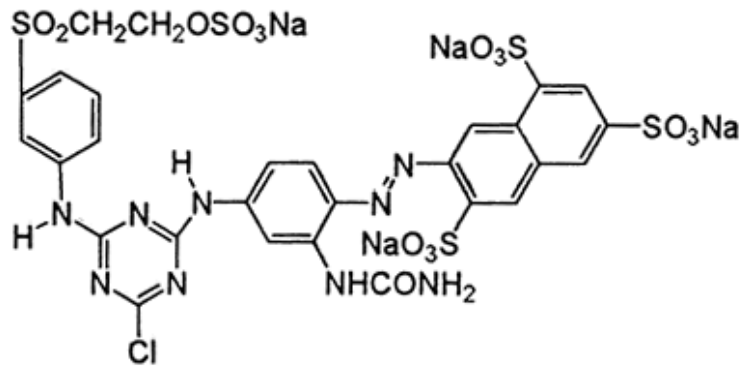
Yapısal formül



Çizelge 4.2 : Reactive yellow 145 boyar maddesi özellikleri.

Ticari İsmi	Sunactive Yellow 3RF %150
Color Index İsmi	Reactive yellow 145 (RY145)
Moleküler Yapısı	Tekli azo sınıfı
Kimyasal Formül	$C_{28}H_{20}ClN_9Na_4O_{16}S_5$
Molekül kütlesi g/mol	1026,25
λ max (nm)	421
CAS numarası	93050-80-7

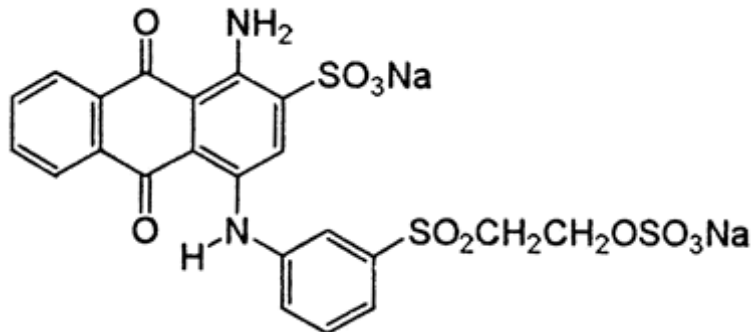
Yapısal formül



Çizelge 4.3 : Reactive Blue 19 boyar maddesinin özellikleri (Fanchiang ve Tseng, 2009).

Ticari İsmi	Sunactive Blue RS %150
Color Index İsmi	Reactive Blue 19 (RB19)
Moleküler Yapısı	Anthraquinones
Kimyasal Formül	$C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$
Molekül kütlesi g/mol	626,533
λ max (nm)	592
CAS numarası	2580-78-1

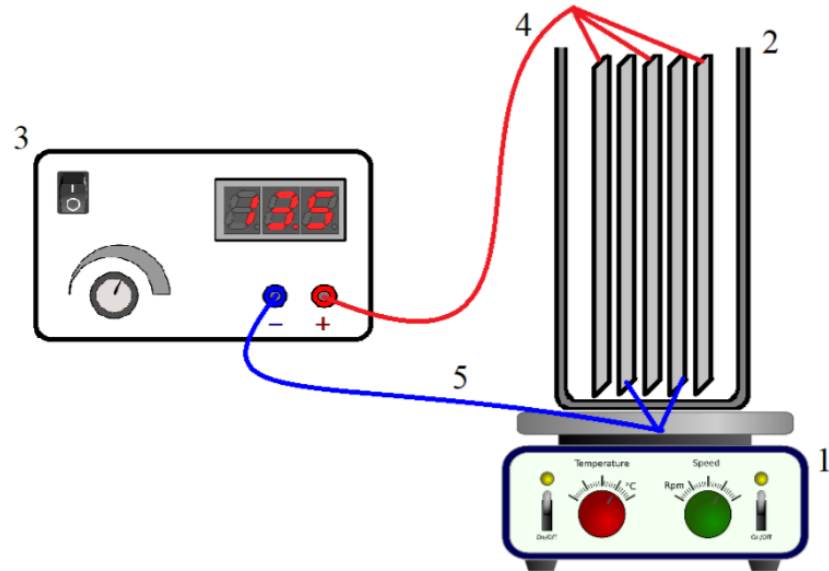
Yapısal formül



4.2 Deney Düzenegi

4.2.1 Elektrokoagülasyon deney düzenegi

Elektrokoagülasyon deneyleri Şekil 4.1’de gösterilen plexiglas malzemeden yapılan 29 x 7,5 cm boyutlarında reaktörler kullanıldı. Elektrot materyali olarak 200 x 60 mm boyutlarında 120 cm² yüzey alanlı alüminyum elektrotlar kullanıldı. Reaktör içersine 3 adet anot ve 2 adet katot elektrot monopolar düzeninde paralel bağlantılı yerleştirildi. Aktif yüzey alanı sayısı 4 olan anot elektrotların toplam aktif yüzey alanı (4 x 120) 480 cm² dir. Elektrotlar arası mesafe 10 mm olup elektrotlar reaktör içersine tamamen batmış haldedir. Akım ve voltaj, Keysight U8031A DC marka güç kaynağı kullanılarak kontrol edildi. Reaktör içersindeki karışım manyetik karıştırıcı kullanılarak sağlandı.

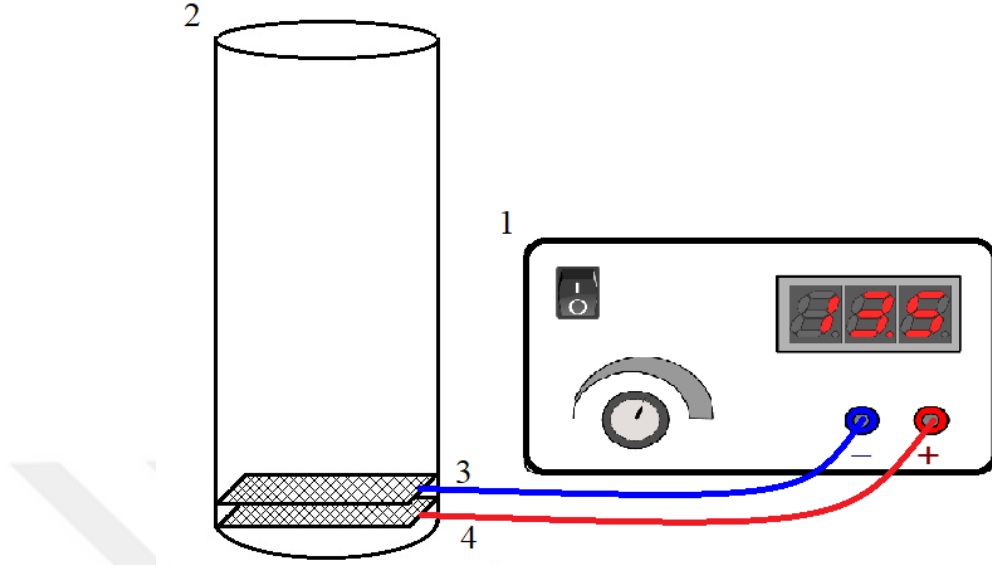


Şekil 4.1 : Elektrokoagülasyon deney düzeneginin şematik gösterimi (1: manyetik karıştırıcı, 2: elektrokoagülasyon reaktörü, 3: DC güç kaynağı, 4: anot elektrotları bağlantısı, 5: katot elektrotları bağlantısı).

4.2.2 Elektrooksidasyon deney düzenegi

Elektrooksidasyon deneyleri Şekil 4.2’ de gösterilen deney düzeneginde gerçekleştirildi. Deneylerde plexiglass malzemeden yapılan 60 mm iç çapa ve 250 mm yüksekliğe sahip silindir reaktörler kullanıldı. Her biri 60 mm çapa sahip 1 anot ve 1 katot elektrot, reaktör tabanına yatay olarak yerleştirildi. Anot olarak gözlü (mesh) ve toplam 15 cm² aktif yüzey alanına sahip bor katkılı elmas (BDD) elektrot, katot olarak

ise ağ gözlü (mesh) ve toplam 10 cm² aktif yüzey alanına sahip Ti/IrRuO₂ elektrot kullanıldı.



Şekil 4.2 : Elektrooksidasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi (1: DC güç kaynağı, 2: elektroflotasyon reaktörü, 3: katot elektrotu bağlantısı, 4: anot elektrotu bağlantısı).

4.3 Deneysel İşlem

4.3.1 Elektrokoagülasyon işlemi

Elektrokoagülasyon prosesinde laboratuvar ölçekli reaktörler kesikli sistemde çalıştırıldı (Şekil 4.3). Çalışmalarda kullanılmak üzere 50 mg/L stok sentetik boya atıksuyu hazırlandı. Her deney setinde reaktör içerisine konulan boya çözeltisi hacmi 500 ml dir. Reaktör içerisinde iletkenliği arttırmak için 1000 mg/l NaCl çözeltisi eklendi. Elektrolit çözeltisine tamamen batmış haldeki elektrotlar anot ve katot olarak güç kaynağındaki (+) ve (-) kutuplara bağlandıktan sonra istenilen akım ve voltaj ayarlamaları yapıldı. Deney süresince reaktör içerisinde karışımı sağlamak için 100 rpm hızında çalışan manyetik karıştırıcı kullanıldı. Toplam 20 dk'lık deney süresi boyunca 2,5 dk'lık aralıklarla reaktör üzerindeki musluk yardımı ile alınan numuneler kaba filtreden geçirilerek UV-Spektrofotometrede her bir boyanın minimum pik verdiği kendi dalga boyunda analiz edildi. Deneyler 0,05; 0,1; 0,2 ve 0,5 Amper olmak üzere farklı akım değerlerinde tekrar edildi ve elektrotların akım yoğunlukları sırasıyla, 0,104; 0,208; 0,417; 1,042 mA/cm² dir.



Şekil 4.3 : Elektrokoagülasyon deney düzeneği.

4.3.2 Elektrooksidasyon işlemi

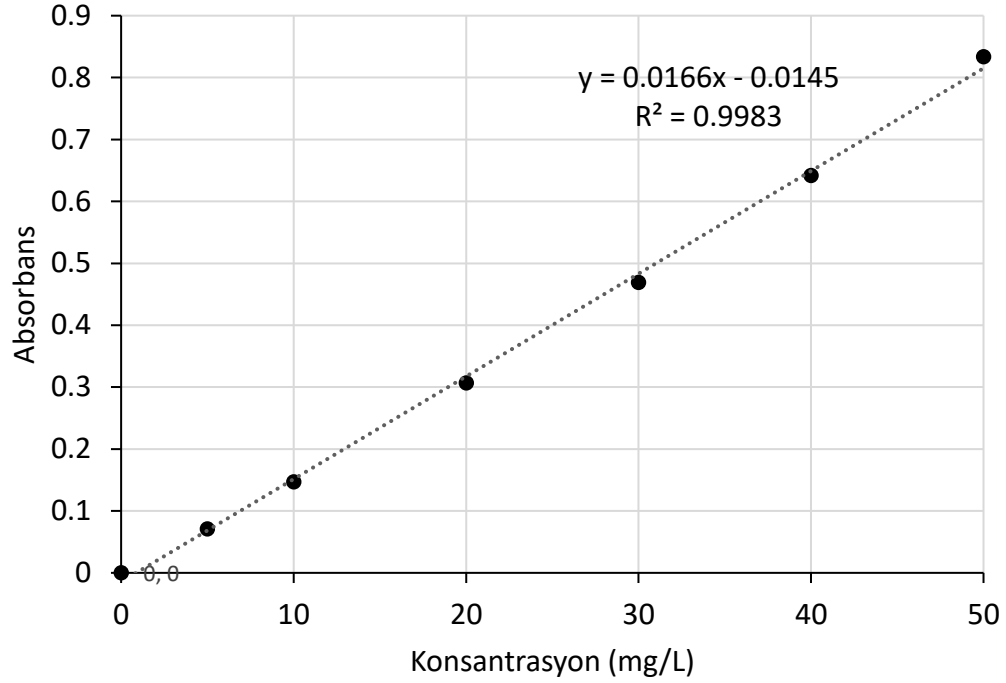
Elektrooksidasyon işleminde 50 mg/l boyar madde ile hazırlanan sentetik boya atıksuyunun reaktör içerisine konulan hacmi 500 ml dir. Reaktör içerisinde iletkenliği arttırmak için 1000 mg/l NaCl çözeltisi eklenmiştir. Elektrotlar güç kaynağında karşılık geldikleri (+) ya da (-) kutuplara bağlandıktan sonra gerekli akım ve voltaj ayarları yapıldı. Toplam 40 dk'lık deney süresi boyunca 5'er dk'lık aralıklarla alınan numuneler kaba filtreden geçirilerek UV/Vis spektrofotometresinde her bir boyanın maksimum pik verdiği kendi dalga boylarında analiz edildi. Deneyler 0,05; 0,1; 0,2 ve 0,5 Amper olmak üzere farklı akım değerlerinde tekrar edildi ve elektrotların akım yoğunlukları sırasıyla, 3,33; 6,67; 13,3 ve 33,3 mA/cm² dir.

4.4 Analitik Yöntem

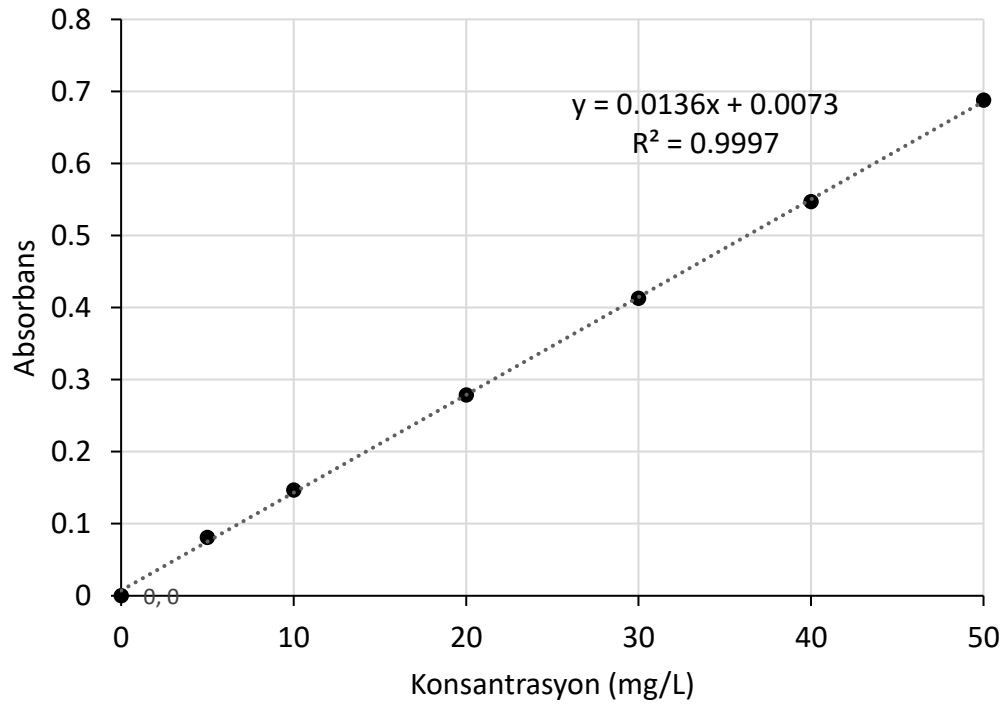
4.4.1 Kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması

Çalışmalarda öncelikle boyar maddelerin sepektrofotometrede dalga boyu taraması yapılarak λ max değerleri bulundu. Kalibrasyon eğrilerini oluşturmak için her boyar maddeden 10, 20, 30, 40 ve 50 mg/l standart çözeltiler hazırlandı. Hazırlanan standart çözeltilerden Reactive Blue 198 boyar maddesi 625 nm, Reactive Blue 19 boyar

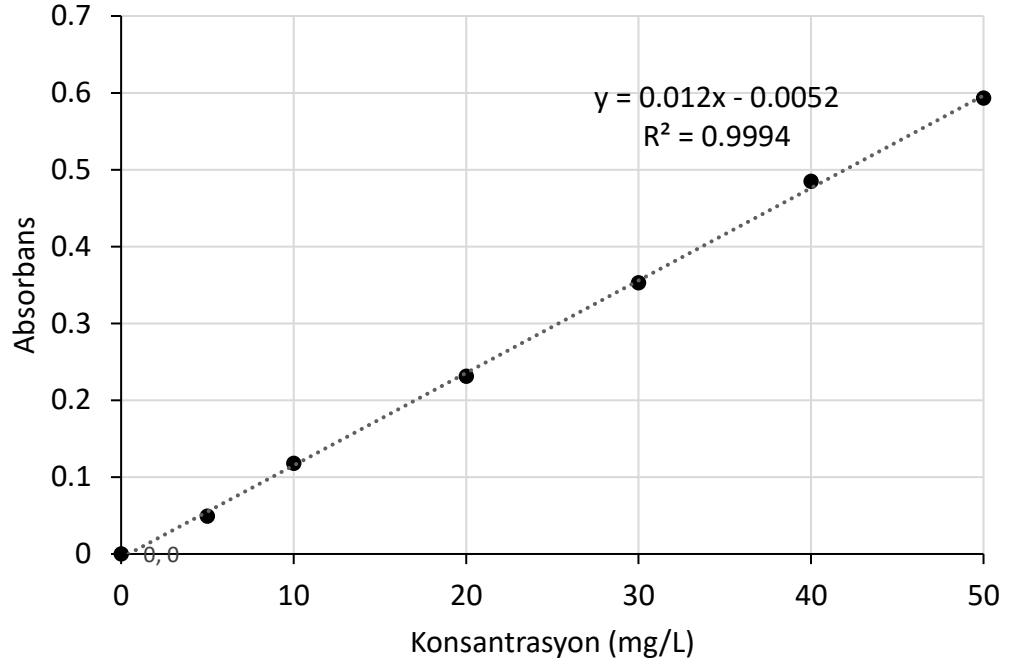
maddesi 592 nm ve Reactive yellow 145 boyar maddesi de 421 nm dalga boyunda UV/Vis spektrofotometrede analiz edildikten sonra Konsantrasyon-Absorbans grafikleri oluşturuldu.



Şekil 4.4 : Reactive Blue 198 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.



Şekil 4.5 : Reactive Blue 19 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.



Şekil 4.6 : Reactive Yellow 145 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.

4.4.2 Boya konsantrasyonlarının belirlenmesi

Boyar maddelerin bilinen konsantrasyonlarından oluşan solüsyonlarının analiz edilmesi ile kalibrasyon eğrileri oluşturuldu. Beer kanuna göre analitin standart seri solüsyonlarına karşılık absorbans eğrileri 0 'dan geçen ve eğimi ϵb olan bir doğru olmalıdır. Bu eğri yardımı ile örneğin bilinmeyen konsantrasyonları belirlenebilir.



Şekil 4.7 : Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer.

Absorbans değerleri Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer cihazı kullanılarak yapıldı (Şekil 4.7). Giderim verimi aşağıdaki eşitlik yardımı ile belirlendi.

$$\text{Giderim (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada, C_0 : boyar madde başlangıç konsantrasyonu, C_t : t anındaki boyar madde konsantrasyonu

4.4.3 Kullanılan eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (4.2)$$

Burada, J: Akım yoğunluğu, mA/cm², I: Akım şiddeti, mAmper, A: Aktif anot alanı, cm² dir.

Akım verimi: Anotta çözünecek maddenin mol miktarı elektrolizin faraday kanunuyla hesaplanır ve m ile gösterilir.

$$m = \frac{I \times t}{n \times F} \quad (4.3)$$

Burada, I: Akım şiddeti, Amper, t: Zaman, sn., n: İyon yükü (Alüminyum için 3+), F. Faraday sabiti (96485 C mol⁻¹) olarak tanımlanır.

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

$$M_{ATe} = m \times MA \quad (4.4)$$

MA: Molekül ağırlığı (Alüminyum için 26, 982 g)'dır.

$$E = \frac{M_A}{M_{ATe}} \quad (4.5)$$

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

Toplam Çözünen alüminyum miktarı, M_T : Toplam çözünen Al miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$M_T = M_A + M_K \quad (4.6)$$

M_K : pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı (g)'dir.

Enerji tüketimi: Harcanan elektrik enerjisini Watt saat (Wh) cinsinden hesaplıarsak,

$$E = V \times I \times t \quad (4.7)$$

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

Faraday/ m^3 : Faraday aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$(\text{Faraday}/m^3) = \frac{I \times t}{F \times v} \quad (4.8)$$

Burada, I: akım şiddeti (Amper), t: zaman (sn), v: Elektrolit hacmi, m^3



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elektrokimyasal prosesleri oldukça karmaşıktır ve kirletici konsantrasyonu, akım yoğunluğu, pH gibi çok sayıda işletme parametresinden etkilenebilir. Çalışmada boyar madde molekül ağırlıklarının giderim verimine etkisini araştırmak amacıyla farklı molekül ağırlıklarına sahip üç tane reaktif tekstil boyasının elektrokogülasyon ve elektrooksidasyon proseslerinde renk giderimi incelenmiştir. Aynı zamanda proseslerin işletme maliyetleri hesaplanmış ve aralarında mukayese yapılmıştır.

5.1 Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi

Tüm elektrokimyasal proseslerde, akım yoğunluğu elektrokimyasal reaktörde reaksiyon hızını etkileyen en önemli parametredir. Akım yoğunluğunun koagulant oluşum hızını, kabarcık oluşumunu ve flokların gelişimi etkilediği bilinmektedir (Mollah vd., 2001). Farklı molekül ağırlıklarına sahip boyar maddelerin elektrokoagülasyon ile giderilmelerinde akım yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır.

5.1.1 Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde 4 farklı akım yoğunluğunda (0,104; 0,208; 0,417; 1,042 mA/cm²) alüminyum elektrotlar kullanılarak farklı molekül ağırlıklarına sahip boyaların sudan giderimi incelenmiştir. 20 dk deney süresi boyunca Faraday kanunu kullanılarak her akım yoğunluğu için çözünen deneysel ve teorik alüminyum miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca farklı akım yoğunluklarında solüsyondan boyar madde gidermek için gerekli enerji tüketimi Wh/g olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3' de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğu için RB198, RB19 ve RY145 boyar maddelerinin elektrokoagülasyon prosesi deney şartları ve sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.1 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB198								
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,003	0,006	0,009	0,012	0,016	0,019	0,022	0,025
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
Boya giderme verimi (%)	19,20	43,28	80,16	94,47	96,80	97,15	97,50	97,61
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,011	0,020	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,204	0,181	0,147	0,166	0,202	0,242	0,281	0,321
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,647	0,574	0,465	0,526	0,641	0,767	0,891	1,018

Çizelge 5.2 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

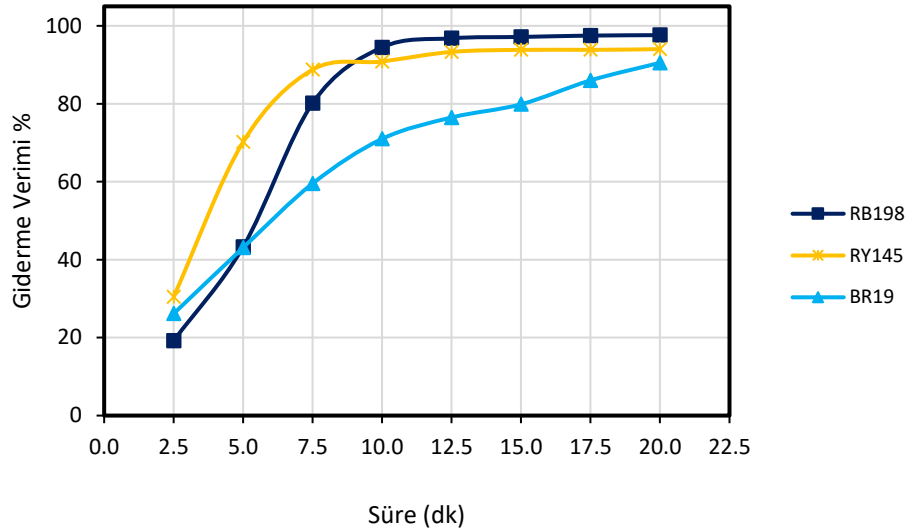
RY145								
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,003	0,006	0,009	0,012	0,016	0,019	0,022	0,025
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
Boya giderme verimi (%)	30,46	70,20	88,76	90,86	93,31	93,84	93,84	94,01
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,008	0,018	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,129	0,112	0,132	0,172	0,210	0,250	0,292	0,333
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya Wh/g)	0,408	0,354	0,420	0,547	0,665	0,794	0,926	1,057

Çizelge 5.3 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

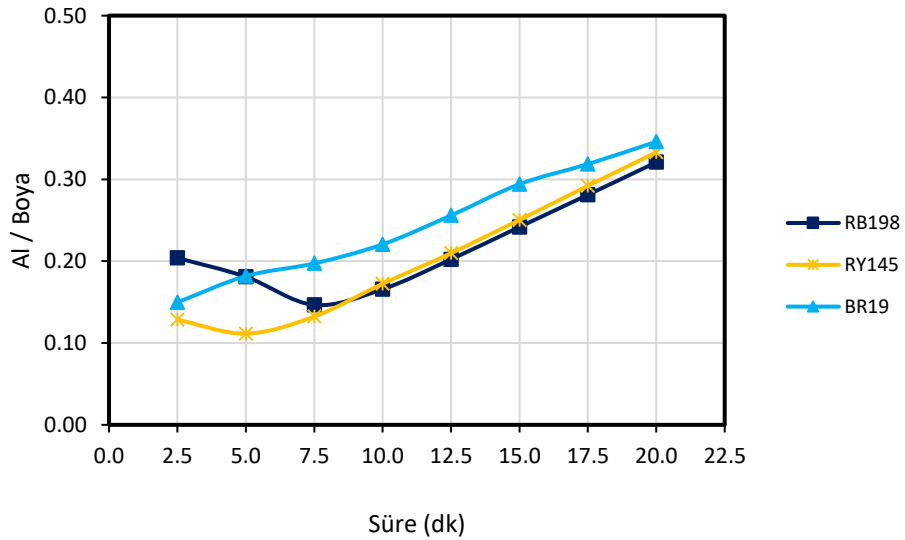
RB19								
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,003	0,006	0,009	0,012	0,016	0,019	0,022	0,025
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
Boya giderme verimi (%)	26,14	43,09	59,54	71,00	76,49	79,88	86,01	90,53
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,007	0,011	0,015	0,018	0,019	0,020	0,022	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,150	0,182	0,197	0,221	0,256	0,294	0,319	0,346
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya Wh/g)	0,475	0,576	0,626	0,700	0,812	0,933	1,011	1,097

Şekil 5.1’de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 10’uncu dk’ya kadar renk giderme veriminde hızlı bir artış meydana gelirken, bu dakikadan sonra giderme veriminin artışında bir yavaşlama görülmektedir. RB198 boyar maddesi ilk 10 dakikada %94 giderim verimine ulaşırken

RB19 boyar maddesi 20 dk deney süresi sonunda %90 giderim verimine ulaşabilmiştir. 10 ve 20 dakikalar arasında renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 94-98 > RY145 (1026,25 g/mol) % 91-94 > BR19 (625,53 g/mol) % 71-91 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.1 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).

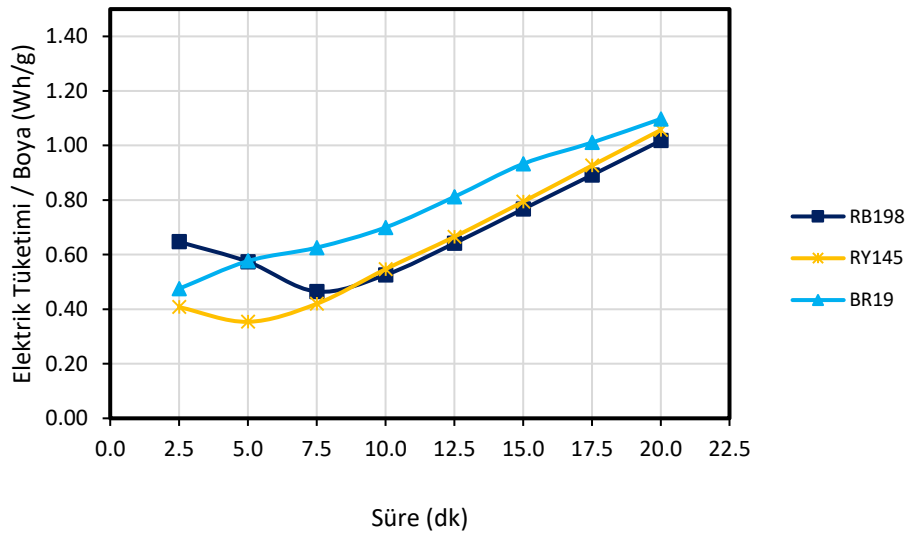


Şekil 5.2 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).

Şekil 5.2' de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim verimi en düşük olan RB19 boyar maddesi

için harcanan alüminyum miktarı en fazla iken giderim verimi en yüksek olan RB198 boyar maddesi için harcanan alüminyum miktarı en az olmuştur. Sonuçlardan görüleceği üzere 10 ve 20 dakikalar arasında gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,166-0,321 g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,172-0,333 g < BR19 (625,53 g/mol) 0,221-0,346 g olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.3'te 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 10 ve 20 dakikalar arasında gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,526-1,018 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,547-1,057 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 0,700-1,097 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.3 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.4 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB198							
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,007	0,015	0,022	0,029	0,037	0,044	0,051	0,059
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,011
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
Boya giderme verimi (%)	38,00	81,16	96,81	97,37	97,48	97,93	97,93	98,16
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,010	0,020	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,025
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,206	0,193	0,243	0,322	0,402	0,480	0,560	0,638
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,772	0,723	0,909	1,205	1,505	1,797	2,097	2,391

Çizelge 5.5 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RY145								
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,007	0,015	0,022	0,029	0,037	0,044	0,051	0,059
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,011
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
Boya giderme verimi (%)	60,00	88,80	92,34	93,58	93,94	94,10	94,30	94,47
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,015	0,022	0,023	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,130	0,176	0,254	0,335	0,417	0,499	0,581	0,663
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,489	0,661	0,953	1,254	1,561	1,870	2,177	2,484

Çizelge 5.6 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

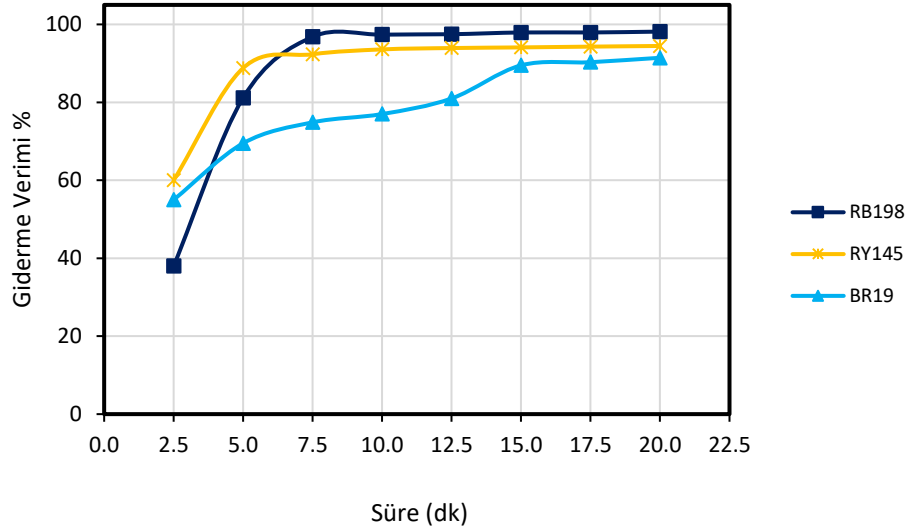
RB19								
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760	1,760
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,007	0,015	0,022	0,029	0,037	0,044	0,051	0,059
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,001	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,010	0,011
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,014	0,016
Boya giderme verimi (%)	55,00	69,50	74,87	77,00	81,00	89,49	90,30	91,44
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,014	0,017	0,019	0,019	0,020	0,022	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,142	0,225	0,314	0,407	0,483	0,525	0,607	0,685
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,533	0,844	1,175	1,524	1,811	1,967	2,274	2,566

Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6' da 0,208 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçları verilmiştir.

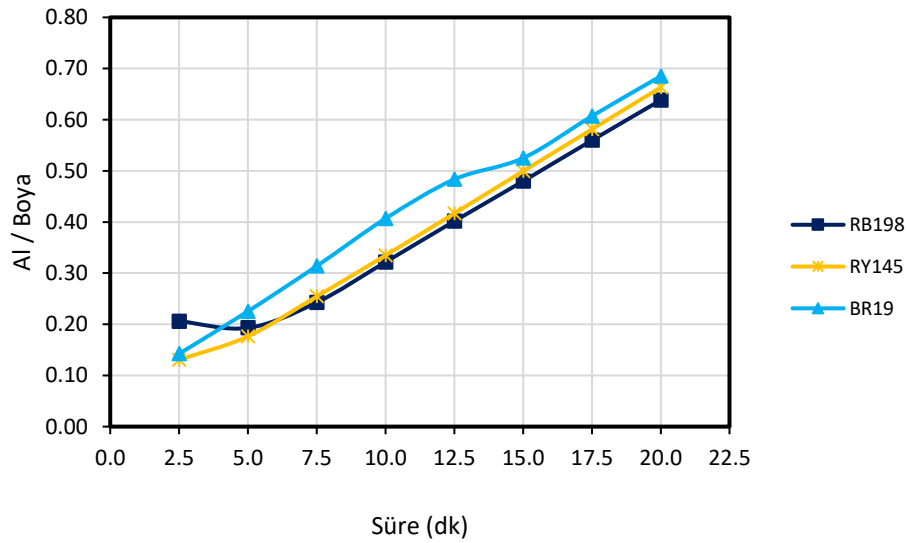
Şekil 5.4' de 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda renk giderme verimleri gösterilmiştir. RY145 ve RB198 boyar maddeleri giderimi 7,5. dakikaya kadar giderim verimleri artmış daha sonra yatay seyir göstermiştir. RB19 boyar maddesi ise 15. dakikaya kadar giderim verimi artmaya devam ettiği görülmektedir. 10. ve 20. dakikalar arasında renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 97-98 > RY145 (1026,25 g/mol) % 92-94 > BR19 (625,53 g/mol) % 75-91 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.5' de 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 5. Dakikadan deney sonuna kadar gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı deney sonuna kadar doğrusal olarak artmış ve sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,193-0,683 g <

RY145 (1026,25 g/mol) 0,176-0,663 g < BR19 (625,53 g/mol) 0,225-0,685 g olarak gerçekleşmiştir.

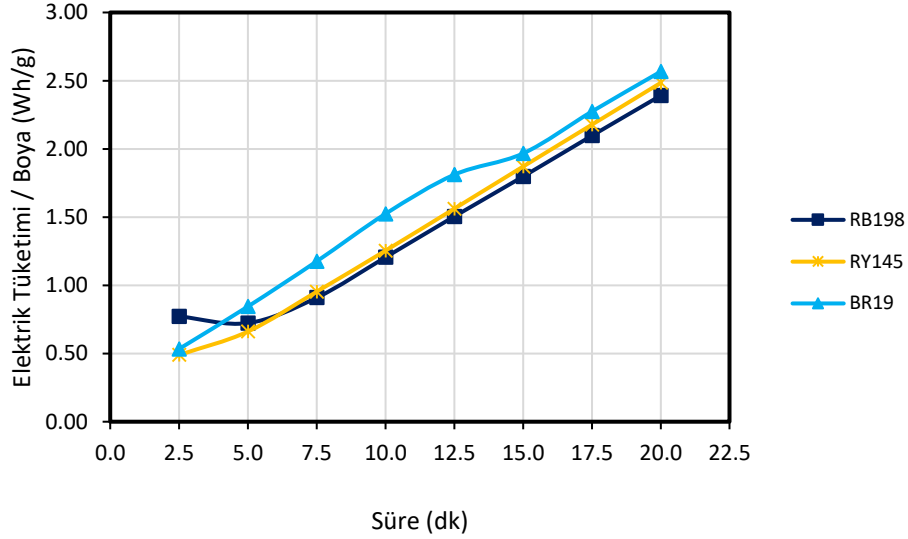


Şekil 5.4 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10mm, NaCl: 1000 mg/l).



Şekil 5.5 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).

Şekil 5.6'da 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 5. Dakikadan sonra üç boyar madde için de boyar madde başına tüketilen elektrik miktarı artmıştır ve sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,723-2,391 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,661-2,484 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 0,844-2,566 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.6 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.7, Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’ da 0,417 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.7: 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB198							
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,019	0,038	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,003	0,006	0,008	0,011	0,014	0,017	0,020	0,022
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,004	0,008	0,012	0,016	0,020	0,023	0,027	0,031
Boya giderme verimi (%)	60,00	89,13	96,38	97,76	97,99	98,10	98,33	98,56
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,015	0,022	0,024	0,024	0,024	0,025	0,025	0,025
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,261	0,351	0,487	0,641	0,799	0,958	1,115	1,271
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,278	1,720	2,386	3,137	3,912	4,689	5,458	6,223

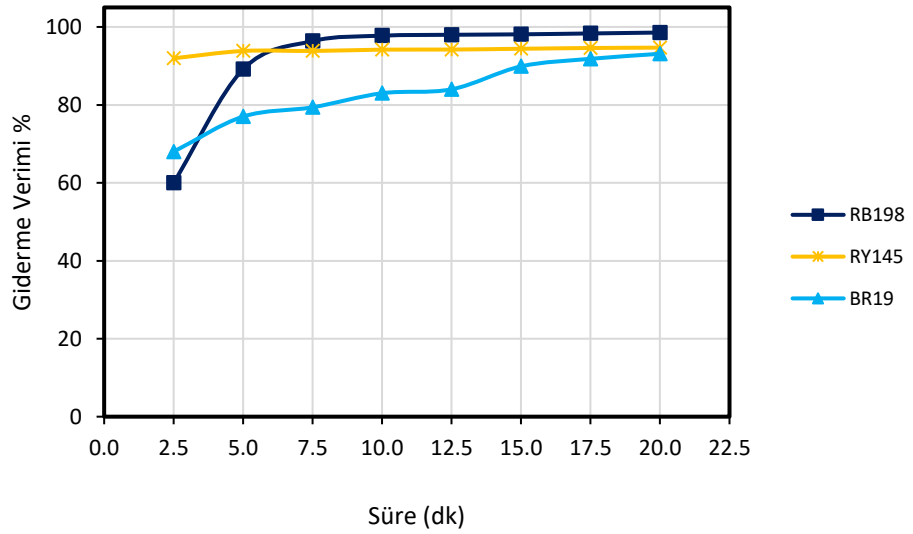
Çizelge 5.8 : 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RY145							
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,019	0,038	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,003	0,006	0,008	0,011	0,014	0,017	0,020	0,022
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,004	0,008	0,012	0,016	0,020	0,023	0,027	0,031
Boya giderme verimi (%)	91,96	93,84	93,84	94,18	94,20	94,40	94,60	94,69
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,023	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,170	0,334	0,501	0,665	0,831	0,995	1,159	1,323
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,834	1,634	2,451	3,256	4,069	4,873	5,673	6,478

Çizelge 5.9 : 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB19							
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300	2,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,019	0,038	0,058	0,077	0,096	0,115	0,134	0,153
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,004	0,008	0,012	0,016	0,020	0,023	0,027	0,031
Boya giderme verimi (%)	68,00	77,00	79,39	83,00	84,00	89,88	91,82	93,11
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,017	0,019	0,020	0,021	0,021	0,022	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,230	0,407	0,592	0,755	0,932	1,045	1,194	1,345
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,127	1,991	2,897	3,695	4,563	5,118	5,845	6,587

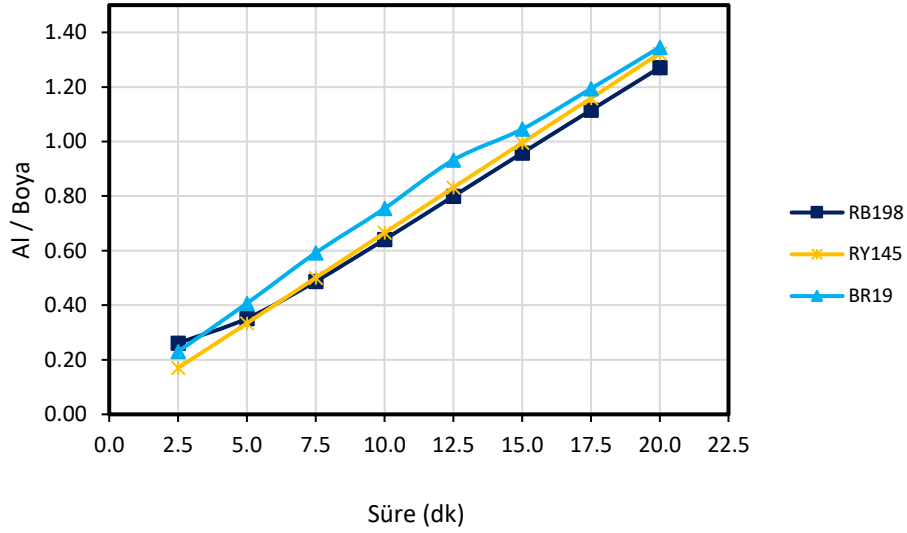
Şekil 5.7’de 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. RY145 giderimi ilk 2,5 dakikada nihai giderim verimine ulaşmış ve kalan sürede çok değişim göstermemiştir. 7,5 dakikadan sonra ise renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 96-99 > RY145 (1026,25 g/mol) % 94-95 > BR19 (625,53 g/mol) % 79-93 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.7 : 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda olduğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).

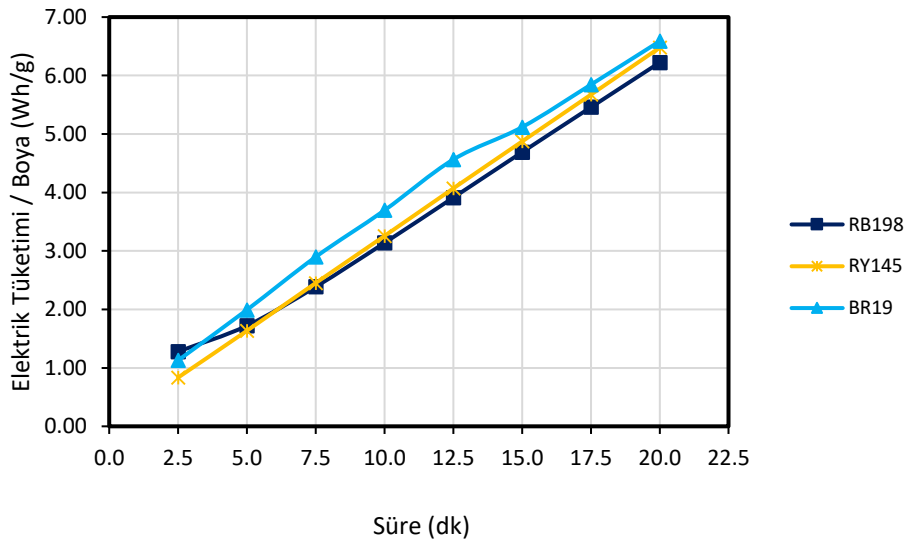
Şekil 5.8’de 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Her üç boyar madde giderimi için tükenen alüminyum miktarı deney sonuna kadar zamanla neredeyse doğrusal olarak artış

göstermiştir. Giderilen gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,261-1,271 g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,170-1,323 g < BR19 (625,53 g/mol) 0,230-1,345 g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.8 : 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).

Şekil 5.9’da 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına tüketilen elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 1,244-6,223 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,834-6,478 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 1,278-6,223 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9 : 0,417 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.10, Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’ de 1,042 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.10 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB198							
Akım (A)	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Voltaj (V)	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,090	0,179	0,269	0,358	0,448	0,538	0,627	0,717
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,010	0,020	0,029	0,039	0,049	0,059	0,069	0,078
Boya giderme verimi (%)	61,64	90,97	96,72	97,64	98,10	98,33	98,33	98,80
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,015	0,023	0,024	0,024	0,025	0,025	0,025	0,025
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,635	0,861	1,214	1,604	1,995	2,389	2,787	3,170
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	5,813	7,878	11,114	14,679	18,263	21,865	25,509	29,015

Çizelge 5.11 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

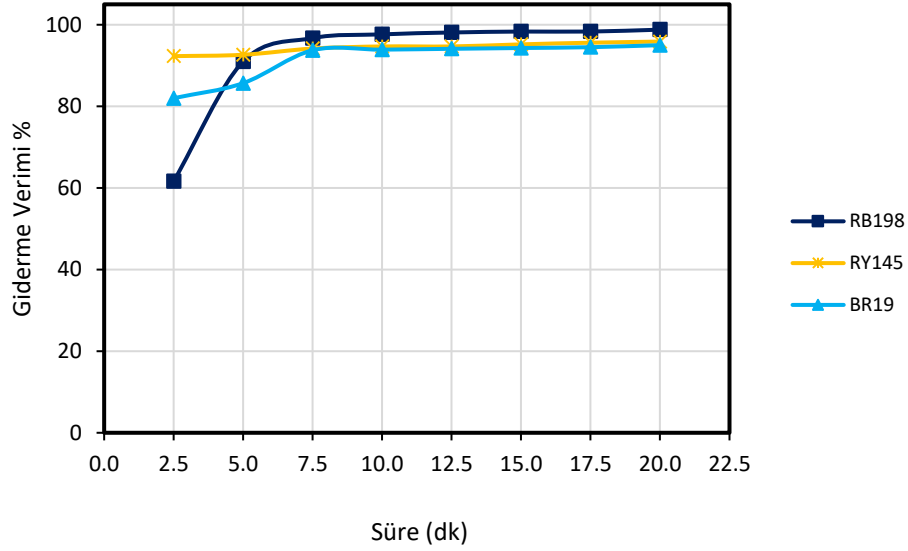
	RY145							
Akım (A)	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Voltaj (V)	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,090	0,179	0,269	0,358	0,448	0,538	0,627	0,717
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,010	0,020	0,029	0,039	0,049	0,059	0,069	0,078
Boya giderme verimi (%)	92,30	92,64	94,18	94,69	94,69	95,20	95,60	95,88
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,424	0,845	1,247	1,654	2,067	2,467	2,866	3,266
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	3,882	7,736	11,415	15,138	18,922	22,585	26,238	29,899

Çizelge 5.12 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB19							
Akım (A)	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Voltaj (V)	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,090	0,179	0,269	0,358	0,448	0,538	0,627	0,717
Deney Süresi (dk)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,007	0,014	0,021	0,028	0,035	0,042	0,049	0,056
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,010	0,020	0,029	0,039	0,049	0,059	0,069	0,078
Boya giderme verimi (%)	82,00	85,69	93,76	93,90	94,10	94,30	94,50	95,00
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,021	0,021	0,023	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,477	0,914	1,253	1,668	2,080	2,491	2,900	3,297
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	4,370	8,364	11,466	15,264	19,040	22,800	26,543	30,175

Şekil 5.10’ da 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. RY145 gideriminin

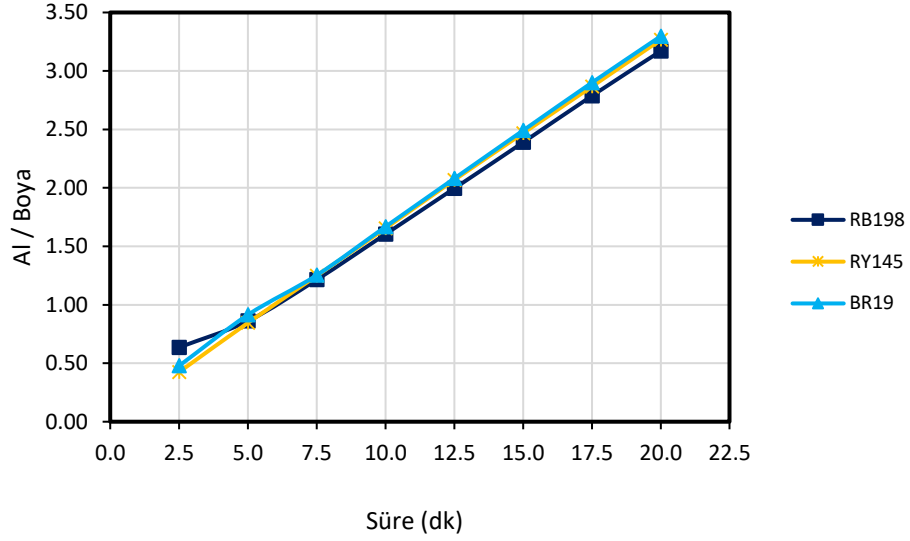
büyük bir kısmı ilk 2,5 dakikada, RB198 ve RB19 ise 7,5 dakikada gerçekleşmiştir. Kalan sürede renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 97-99 > RY145 (1026,25 g/mol) % 94-96 > BR19 (625,53 g/mol) % 94-95 olarak gerçekleşmiştir.



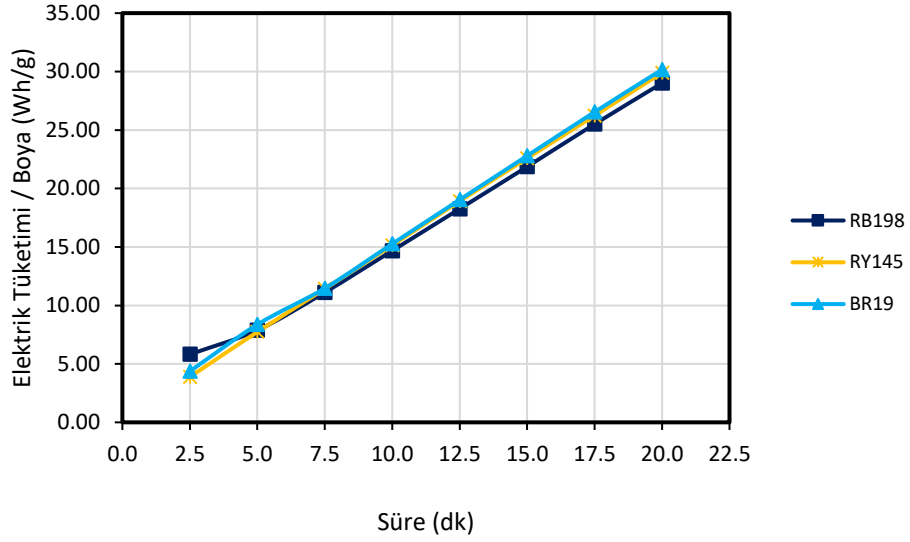
Şekil 5.10 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, Karıştırma hızı: 100 rpm, elektrotlar arası mesafe 10 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).

Şekil 5.11’de 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 5. Dakikadan deney sonuna kadar giderilen gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarları sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 0,861-3,170 g < RY145 (1026,25 g/mol) 0,845-3,266 g < BR19 (625,53 g/mol) 0,914-3,297 g olmakla birlikte üç boya içinde yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.12’ de 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına tüketilen elektrik miktarı üç boyar madde için birbirine yakın olmuştur. Enerji tüketim miktarı ise 5. dakikadan deney sonuna kadar sırasıyla RB198 (1304,08 g/mol) 7,878-29,015 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 7,736-29,899 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 8,364-30,175 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).



Şekil 5.12 : 1,042 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.



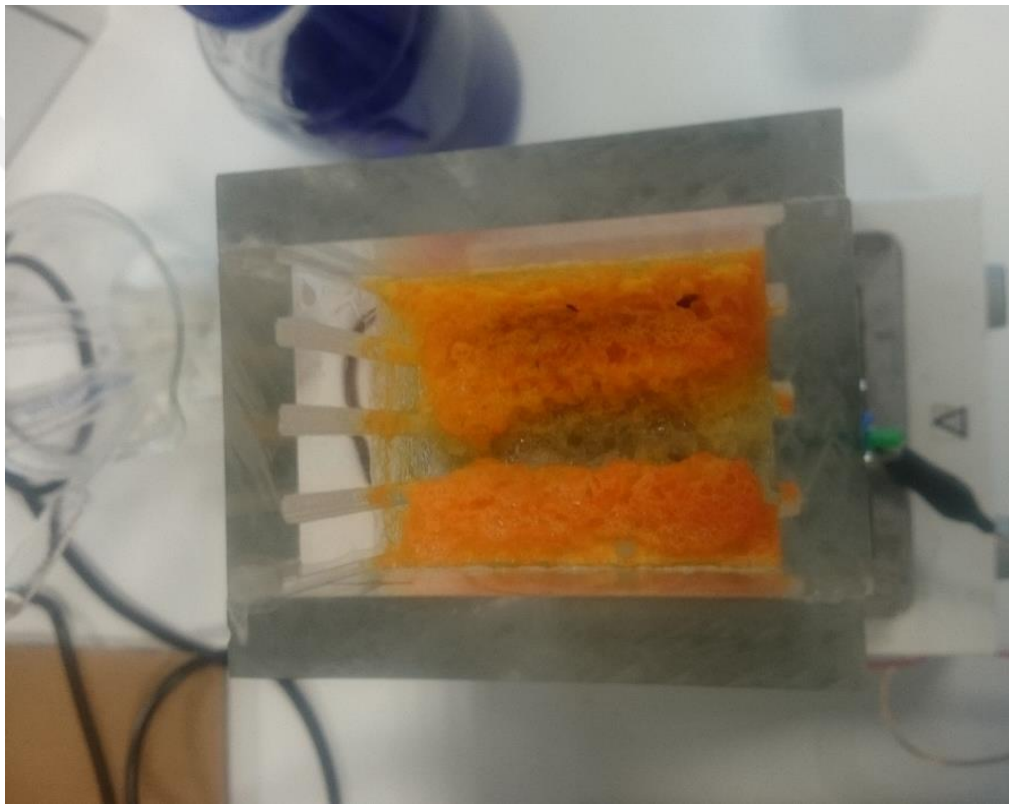
Şekil 5.13 : RY145 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’ de RY145 ve RB198 boyar maddelerinin elektrokoagülasyon prosesi ile deney süresine bağlı boyar madde çözeltilerinden renk giderimi görülmektedir.



Şekil 5.14 : RB19 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi.

Şekil 5.15’ de elektrokoagülasyon prosesi ile renk gideriminde oluşan flokların reaktör yüzeyine birikimi görülmektedir.



Şekil 5.15 : Elektrokoagülasyon prosesinde flok oluşumu.

Çizelge 5.13 : Akım yoğunluğunun EK prosesine etkisi.

Akım yoğunluğu mA/cm ²	RB198		RY145		RB19	
	Giderim Verimi (%)	Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	Giderim Verimi (%)	Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	Giderim Verimi (%)	Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)
0,104	97,61	0,321	94,01	0,333	90,53	0,346
0,208	98,16	0,638	94,47	0,663	91,44	0,685
0,417	98,56	1,271	94,69	1,323	93,11	1,345
1,042	98,80	3,170	95,88	3,266	98,27	3,187

Çizelge 5.13'ten görüleceği üzere her üç boyar madde için de akım yoğunluğunun 0,104'den 1,042 mA/cm² artırılması ile renk giderim verimlerinde artış gözlenmiştir. 0,104; 0,208 ve 0,417 mA/cm² akım yoğunluklarında molekül ağırlığı en büyük olan RB198 boyar maddesinin giderim verimi en yüksek, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Akım yoğunluğunun artması daha fazla elektrot çözünmesine neden olur. Bununla beraber giderilen boyar madde başına kullanılan alüminyum miktarı da artmıştır. 0,104; 0,208; 0,417 ve 1,042 mA/cm² akım yoğunluklarında molekül ağırlığı en büyük RB198 boyar maddesi için kullanılan alüminyum en az, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesi için en çok olmuştur. Diğer taraftan akım yoğunluğunun artışı anodik çözünmenin arttığı ve bunun sonucu olarak kirletici giderimi için gerekli flok miktarının arttığı bilinmektedir. Üstelik akım yoğunluğu arttıkça, hava kabarcıklarının oluşum oranı artmakta, kabarcıkların boyutu küçülmektedir ki bu durum H₂ flotasyonu ile kirletici gideriminde daha faydalıdır (Adhoum vd., 2004).

Deney sürelerinin ilk dakikalarında molekül ağırlığı-boya giderme ilişkisi ağırlık artışı ile giderme verimi artışı şeklinde olmamıştır. Bu durum deneyin ilk dakikalarında yük dengesini bozacak miktarda Al³⁺ ve flok oluşmamış olmasına bağlanmaktadır.

5.1.2 Elektrooksidasyon prosesinde akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi

Elektroflotasyon prosesinde 4 farklı akım yoğunluğunda (3,33; 6,67; 13,3; 33.3 mA/cm²) BDD ve Ti/IrRuO₂ elektrotlar kullanılarak farklı molekül ağırlıklarına sahip boyaların sudan giderimi incelenmiştir. Ayrıca farklı akım yoğunluklarında solüsyondan boyar madde gidermek için gerekli enerji tüketimi Wh/g olarak hesaplanmıştır. 3,33 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçlar, Çizelge 5.14, Çizelge 5.15 ve Çizelge 5.16'de görülmektedir.

Çizelge 5.14: 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB198							
Akım (A)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Voltaj (V)	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,021	0,042	0,063	0,084	0,105	0,126	0,147	0,168
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümleri Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	8,00	12,00	20,00	26,00	32,00	38,00	41,00	45,00
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,002	0,003	0,005	0,007	0,008	0,010	0,010	0,011
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	10,52	14,03	12,63	12,95	13,15	13,29	14,37	14,96

Çizelge 5.15 : 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

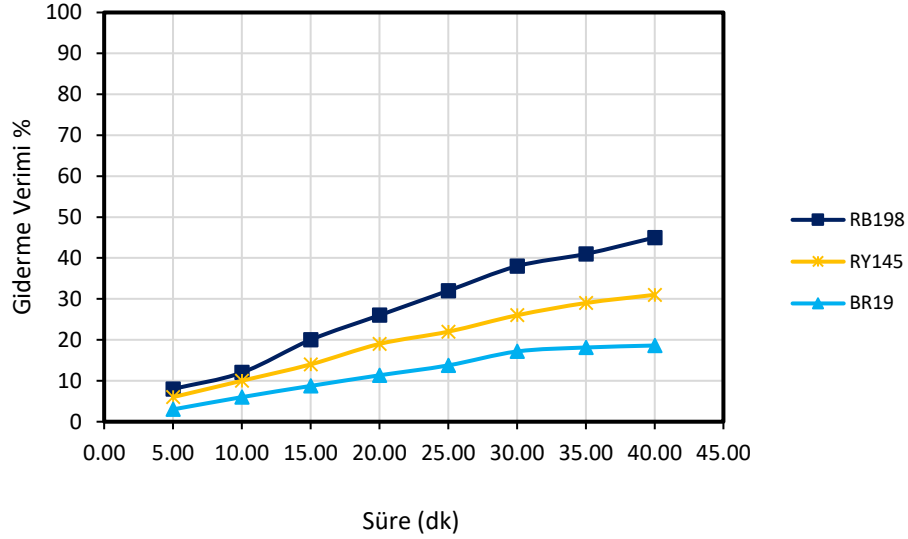
	RY145							
Akım (A)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Voltaj (V)	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,021	0,042	0,063	0,084	0,105	0,126	0,147	0,168
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	6,00	10,00	14,00	19,00	22,00	26,00	29,00	31,00
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,007	0,008
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	14,03	16,83	18,04	17,72	19,13	19,42	20,32	21,72

Çizelge 5.16: 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

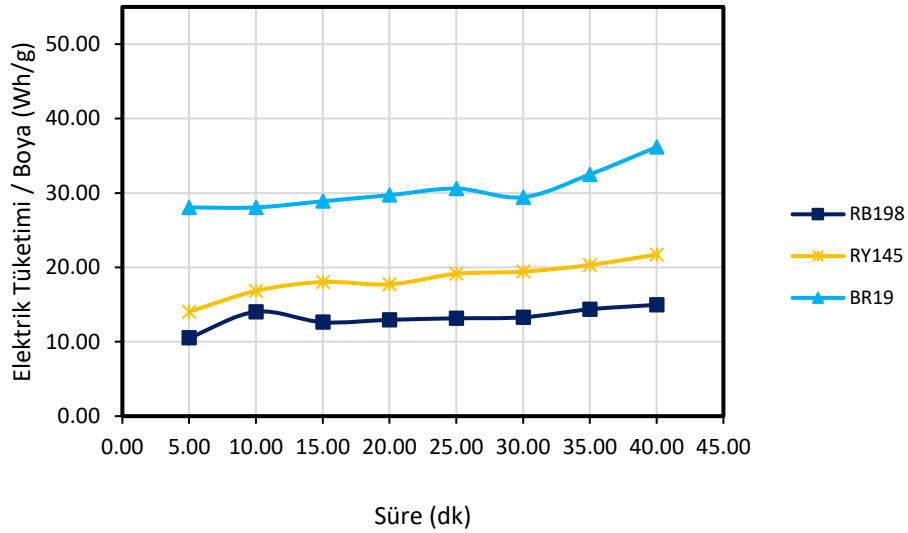
	RB19							
Akım (A)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Voltaj (V)	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,021	0,042	0,063	0,084	0,105	0,126	0,147	0,168
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	3,00	6,00	8,74	11,33	13,76	17,16	18,13	18,62
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	28,06	28,06	28,88	29,71	30,58	29,43	32,49	36,17

Şekil 5.16’de 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi deney süresi boyunca molekül ağırlığı en büyük olan RB198 boyar maddesinin giderim veriminin en yüksek, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 8-45 > RY145 (1026,25 g/mol) % 6-31 > BR19 (625,53 g/mol) % 3-19 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.17’ de 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim verimi ile harcanan elektrik miktarı ters ilişkili olduğu görülmektedir. Giderim verimi en yüksek olan (RB198) boyar madde için harcanan elektrik en düşük, en düşük olan (RB19) boyar maddesi için ise en yüksek olmuştur. Gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 10,52-14,96 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 14,03-21,72 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 28,06-36,17 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.16 : 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).



Şekil 5.17 : 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.17 : 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

	RB198							
Akım (A)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Voltaj (V)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,36	0,41
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	10,22	17,52	27,06	32,90	38,29	41,21	45,82	49,64
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,003	0,004	0,007	0,008	0,010	0,010	0,011	0,012
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	19,90	23,21	22,54	24,72	26,55	29,60	31,07	32,77

Çizelge 5.18 : 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RY145								
Akım (A)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Voltaj (V)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,36	0,41
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	9,00	15,00	20,49	24,00	29,14	36,38	39,03	44,33
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,002	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009	0,010	0,011
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	22,59	27,11	29,77	33,89	34,89	33,53	36,47	36,69

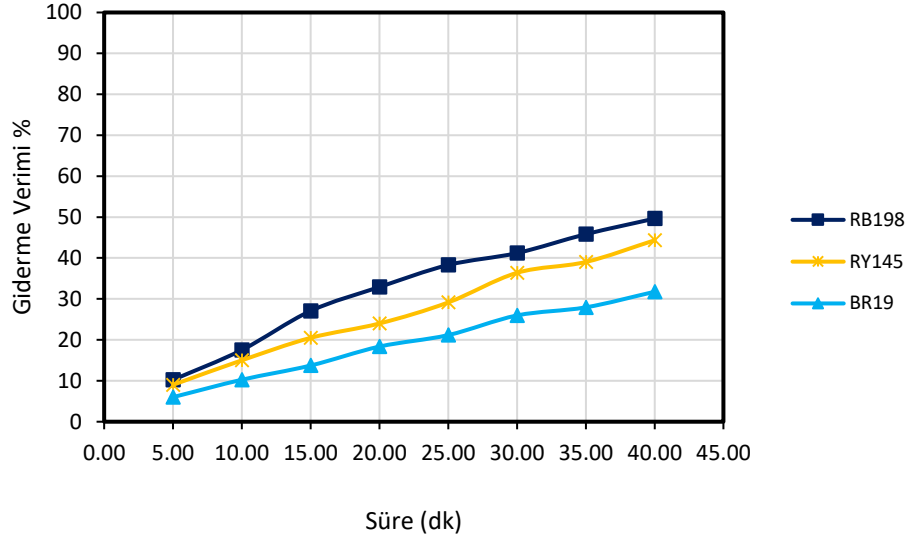
Çizelge 5.19 : 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB19								
Akım (A)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Voltaj (V)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,31	0,36	0,41
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	6,00	10,25	13,73	18,36	21,17	25,96	27,95	31,75
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,002	0,003	0,003	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	33,89	39,66	44,44	44,31	48,03	46,99	50,93	51,23

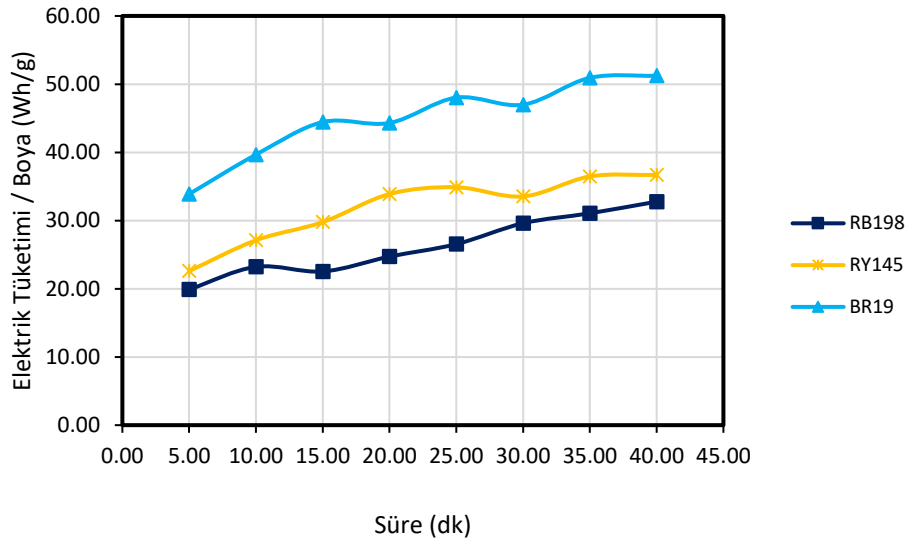
6,67 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçlar, Çizelge 5.17, Çizelge 5.18 ve Çizelge 5.19’de görülmektedir.

Şekil 5.18’de 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi deney süresi boyunca üç boyar maddenin de giderimi artış göstermiştir. Molekül ağırlığı en büyük olan RB198 boyar maddesinin giderim veriminin en yüksek, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 10-50 > RY145 (1026,25 g/mol) % 9-44 > BR19 (625,53 g/mol) % 6-32 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.19’ da 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim verimi ile harcanan elektrik miktarı ters ilişkili olduğu görülmektedir. Giderim verimi en yüksek olan (RB198) boyar madde için harcanan elektrik en düşük, en düşük olan (RB19) boyar maddesi için ise en yüksek olmuştur. Gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 19,9-32,77 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 22,59-33,69 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 33,89-51,23 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.18 : 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).



Şekil 5.19 : 6,67 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.20 : 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB198								
Akım (A)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Voltaj (V)	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,16	0,33	0,49	0,65	0,82	0,98	1,14	1,31
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	29,00	40,00	51,00	59,52	68,39	75,13	80,29	84,11
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,007	0,010	0,013	0,015	0,017	0,019	0,020	0,021
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	22,51	32,63	38,39	43,86	47,72	52,13	56,90	62,08

Çizelge 5.21 : 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RY145								
Akım (A)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Voltaj (V)	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,16	0,33	0,49	0,65	0,82	0,98	1,14	1,31
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	24,74	36,17	46,86	56,04	64,47	69,35	73,09	77,22
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,006	0,009	0,012	0,014	0,016	0,017	0,018	0,019
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	26,38	36,09	41,79	46,59	50,62	56,47	62,50	67,62

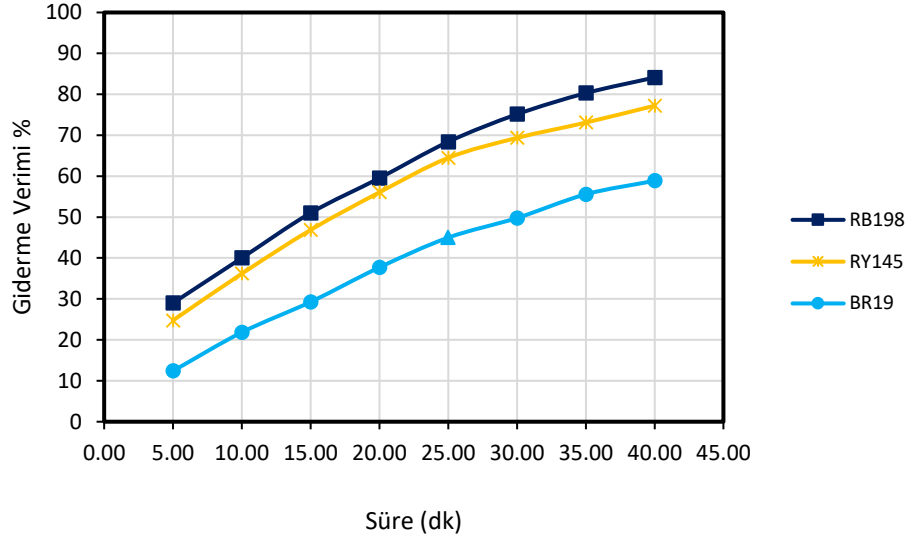
Çizelge 5.22 : 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB19								
Akım (A)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Voltaj (V)	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79	9,79
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,16	0,33	0,49	0,65	0,82	0,98	1,14	1,31
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	12,40	21,83	29,27	37,70	44,98	49,78	55,56	58,87
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011	0,012	0,014	0,015
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	52,62	59,80	66,89	69,24	72,55	78,67	82,22	88,69

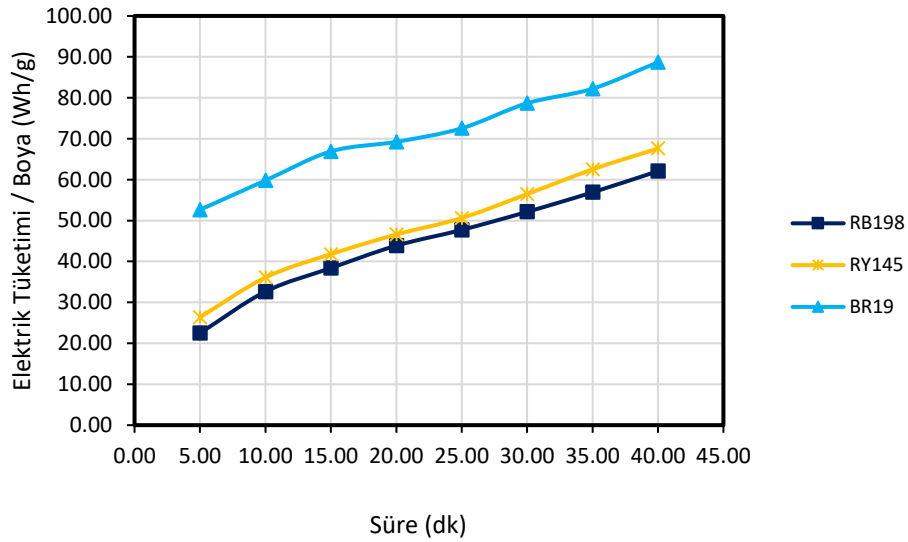
13,3 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçlar, Çizelge 5.20, Çizelge 5.21 ve Çizelge 5.22’ de görülmektedir.

Şekil 5.20’de 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Boyar madde giderimi süre ile artış göstermiştir. Molekül ağırlığı en düşük olan boyar maddenin (RB19) giderim verimi en düşük olmuştur. Boyar madde renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 29-84 > RY145 (1026,25 g/mol) % 25-77 > BR19 (625,53 g/mol) % 12,4-59 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.21’ de 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim en düşük olan RB19 boyar maddesinin giderimi için tüketilen elektrik miktarı en fazla, giderim verimi en yüksek olan RB198 boyar maddesinin giderimi için tüketilen elektrik miktarı en az olmuştur. Gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 22,51-62,08 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 26,38-67,62 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 52,62-88,69 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.20 : 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).



Şekil 5.21 : 13,3 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.23 : 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 198 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB198								
Akım (A)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Voltaj (V)	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,77	1,54	2,31	3,08	3,85	4,63	5,40	6,17
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	41,82	63,41	74,10	82,14	88,68	92,71	95,12	96,27
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,010	0,016	0,019	0,021	0,022	0,023	0,024	0,024
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	73,74	97,25	124,84	150,16	173,84	199,56	226,91	256,23

Çizelge 5.24 : 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Yellow 145 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RY145								
Akım (A)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Voltaj (V)	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,77	1,54	2,31	3,08	3,85	4,63	5,40	6,17
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	39,19	55,96	66,26	72,90	77,38	80,37	83,03	85,69
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,010	0,014	0,017	0,018	0,019	0,020	0,021	0,021
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	78,68	110,19	139,61	169,18	199,23	230,18	259,95	287,87

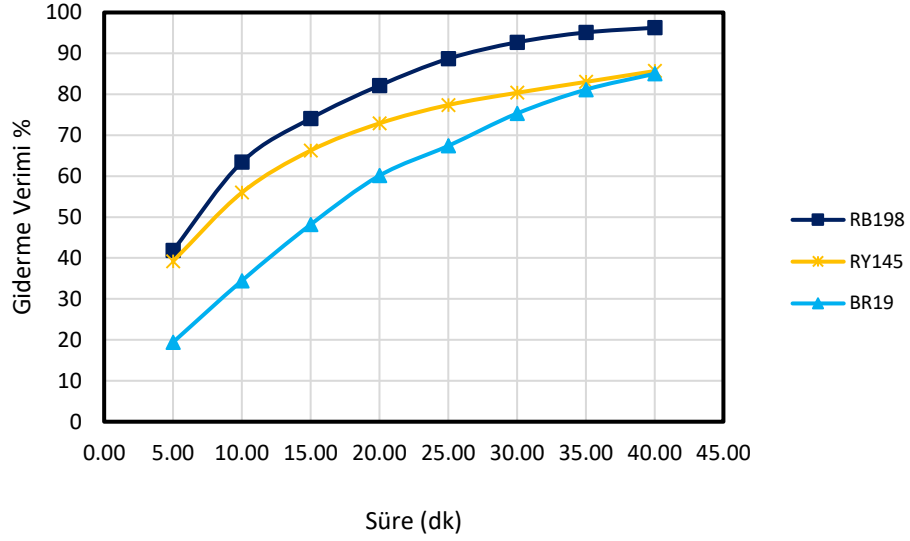
Çizelge 5.25: 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda Reactive Blue 19 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

RB19								
Akım (A)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Voltaj (V)	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,77	1,54	2,31	3,08	3,85	4,63	5,40	6,17
Deney Süresi (dk)	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00
Başlangıç Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Başlangıç Boya Miktarı (mg)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Boya giderme verimi (%)	19,40	34,43	48,17	60,13	67,40	75,32	81,14	85,02
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,009	0,012	0,015	0,017	0,019	0,020	0,021
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	158,97	179,12	192,05	205,12	228,74	245,62	266,01	290,14

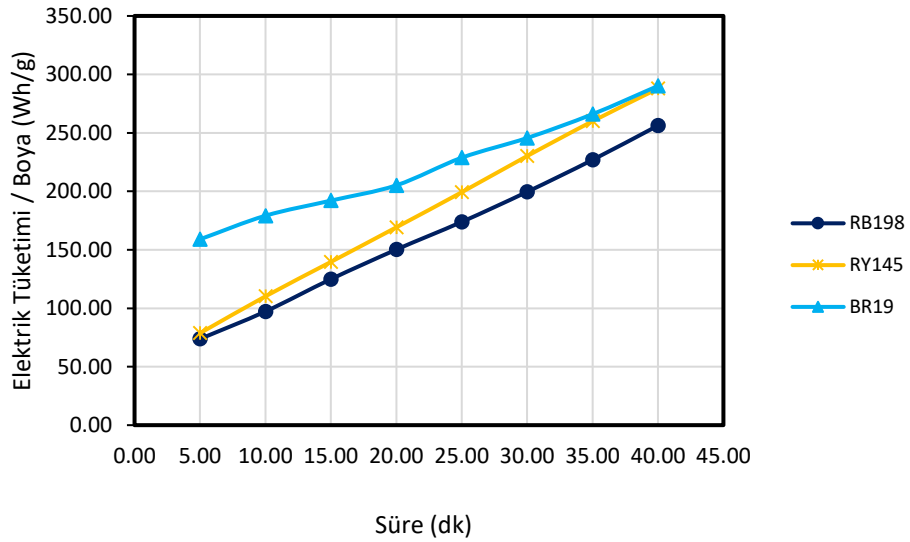
33,3 mA/cm² akım yoğunluğu için deney şartları ve sonuçlar Çizelge 5.23, Çizelge 5.24 ve Çizelge 5.25’ te görülmektedir.

Şekil 5.22’da 3,33 mA/cm² akım yoğunluğunda RB198, RY145 ve BR19 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi deney süresi boyunca molekül ağırlığı en büyük olan RB198 boyar maddesinin giderim veriminin en yüksek, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Renk giderme verimleri sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) % 42-96 > RY145 (1026,25 g/mol) % 39-86 > BR19 (625,53 g/mol) % 19-85 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.23’ de 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim verimi ile harcanan elektrik miktarı ters ilişkili olduğu görülmektedir. Giderim verimi en yüksek olan (RB198) boyar madde için harcanan elektrik en düşük, en düşük olan (RB19) boyar maddesi için ise en yüksek olmuştur. Gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; RB198 (1304,08 g/mol) 73,74- 256,23 Wh/g < RY145 (1026,25 g/mol) 78,68-287,87 Wh/g < BR19 (625,53 g/mol) 158,97-290,14 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.22 : 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi (Deney şartları: boyar madde başlangıç konsantrasyonu: 50 mg/L, elektrotlar arası mesafe 15 mm, NaCl konsantrasyonu: 1000 mg/l).



Şekil 5.23 : 33,3 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.

Çizelge 5.26 : Akım yoğunluğunun EO prosesine etkisi.

Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	Giderim Verimi (%)		
	RB198	RY145	RB19
3,33	45,00	31,00	18,62
6,67	49,64	44,33	31,75
13,3	84,11	77,22	58,87
33,3	96,27	85,69	85,02

* 40. Dakikaya ait giderme verimleri



RB198



RY145



RB19

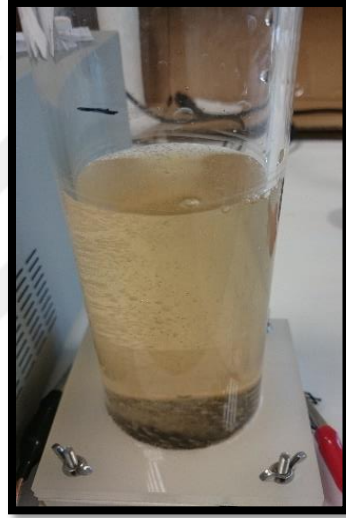
Şekil 5.24 : Boyar madde çözeltilerinden elektrooksidasyon prosesi ile süreye bağlı renk giderimleri.

Her üç boyar madde için de akım yoğunluğunun $3,33$ 'den $33,3 \text{ mA/cm}^2$ 'ye artırılması ile renk giderim verimlerinde artış gözlenmiştir. $3,33$; $6,67$; $13,3$ ve $33,3 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluklarında molekül ağırlığı en büyük olan RB198 boyar maddesinin giderim verimi en yüksek, molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Çizelge 5.26' da akım yoğunluğuna bağlı olarak herbir boyanın giderme verimleri görülmektedir. BDD gibi yüksek elektrokatalitik aktiviteye sahip elektrotların anot materyali olarak kullanılması ile doğrudan oksidasyon gerçekleşir. BDD elektrotlarının organikleri okside etmedeki yüksek etkinliği suda elektroliz ile oluşan anot yüzeyine zayıf bağlanmış $\bullet\text{OH}$ 'ların varlığı ile açıklanmaktadır (Comninellis, 1994). Akım yoğunluğunun artması daha fazla $\bullet\text{OH}$ üretilmesine neden olmakta ve boyar maddenin daha fazla oksitlenerek parçalanıp sudan giderimini arttırmaktadır. Deney sırasında elektrolit olarak kullanılan NaCl den gelen Cl indirekt oksidasyona neden olmaktadır. Artan akım yoğunluğu ile birlikte ortamda bulunan klorür iyonlarının kloröz asit (ClOH) ve hipoklorit iyonu (ClO^-) oluşturma potansiyeli artarak boya moleküllerinin oksidasyonu artmaktadır. Bununla birlikte giderilen boyar madde başına kullanılan elektrik miktrada daha fazla olmaktadır.

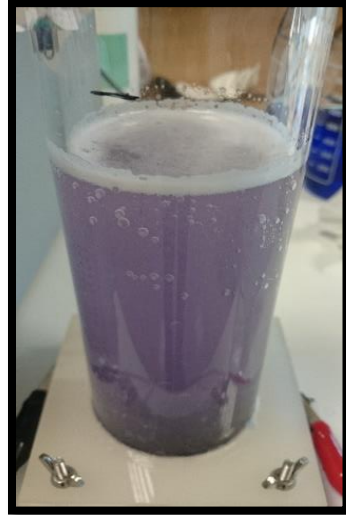
RB198



RY145



RB19



Şekil 5.25 : $33,3 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda elektrooksidasyon prosesi başlangıç ve deney süresi sonundaki renk durumu.

Şekil 5.25’ de $33,3 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda elektrooksidasyon prosesi ile boyar madde çözeltilerinin başlangıç ve deney sonundaki durumları gösterilmiştir.

5.2 İşletme Maliyeti

Herhangi bir atıksu arıtma teknolojisinin uygulanabilirliğini belirleyen en önemli parametrelerden birisi maliyettir. Bu çalışmada EC ve EO prosesleri ile arıtmada, toplam arıtma maliyeti, elektrot materyali maliyeti ve enerji maliyeti olmak üzere iki ana başlıkta incelendi.

$$\text{Toplam İşletme Maliyeti} = aC_{\text{enerji}} + bC_{\text{elektrot}} \quad (5.1)$$

Burada, C_{enerji} (kWh/kg giderilen boya) ve C_{elektrot} (kg Alüminyum /kg giderilen boya), giderilen boya miktarı başına tüketim miktarları. a ve b, birim fiyatlarıdır. Alüminyum elektrot birim fiyatı (b) 1,8 \$/kg, elektrik enerjisi birim fiyatı (a), 0,1 \$/kWh olarak alındı.

5.2.1 Elektrokoagülasyon işletme maliyeti

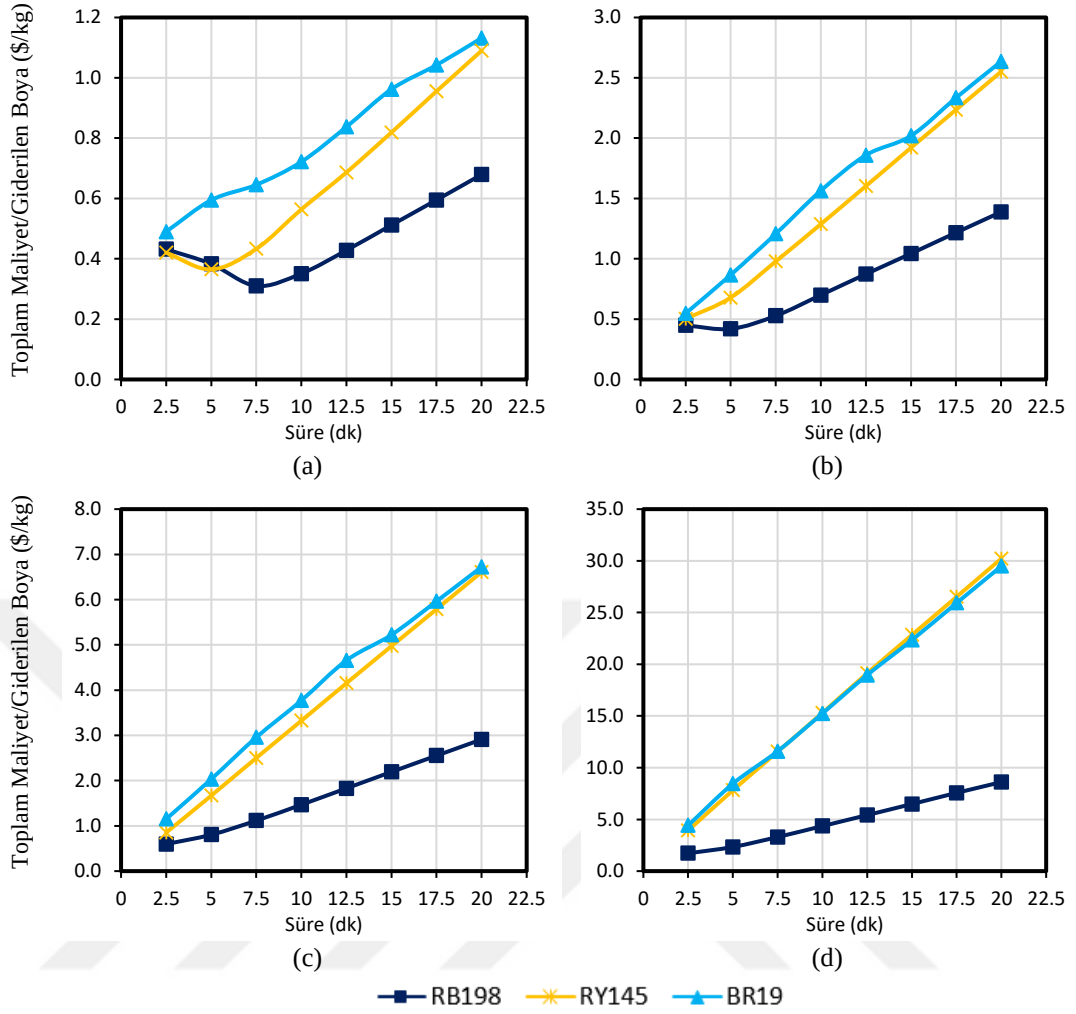
Çizelge 5.27’ de farklı akım yoğunluklarında elektrokoagülasyon ile giderilen boyar maddelere ait işletme maliyetleri verilmiştir. Harcanan enerji ve tükenen elektrot miktarları hesaplanarak toplam işletme maliyeti Eşitlik 5.1 yardımı ile hesaplandı.

Çizelge 5.27 : Elektrokoagülasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti.

Akım yoğunluğu mA/cm ²	RB198		RY145		RB19	
	\$/kg giderilen boya	Giderim verimi (%)	\$/kg giderilen boya	Giderim verimi (%)	\$/kg giderilen boya	Giderim verimi (%)
0,104	0,679	97,61	1,09	94,01	1,13	90,53
0,208	1,39	98,16	2,55	94,47	2,63	91,44
0,417	2,91	98,56	6,61	94,69	6,72	93,11
1,042	8,607	98,80	30,23	95,88	29,49	98,27

*20 dk deney süresine ait değerler

Akım yoğunluğunun artması ile birlikte tüketilen elektrik miktarı, daha fazla elektrot tükenecektir. Bununla birlikte işletme maliyeti artış gösterecektir. Akım yoğunluğu- işletme maliyeti incelendiğinde üç boyar madde için de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 dk deney süresi sonunda %90 üzerinde renk giderim verimi elde edilmiştir. Akım yoğunluğunun daha fazla arttırılmasının renk giderimi üzerinde ilave etkisi çok olmamış ancak işletme maliyetlerinin dramatik şekilde artmasına neden olmuştur.



Şekil 5.26 : Akım yoğunluğunun toplam maliyet üzerine etkisi (a: $0,104 \text{ mA/cm}^2$, b: $0,208 \text{ mA/cm}^2$, c: $0,417 \text{ mA/cm}^2$, d: $1,042 \text{ mA/cm}^2$).

Şekil 5.26’ de RB198, RY145 ve RB19 boyar maddelerinin elektrokoagülasyon ile giderilmelerinde akım yoğunluğunun toplam işletme maliyeti üzerine etkisi gösterilmiştir. $0,104$; $0,208$; $0,417 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluklarında molekül ağırlığı en düşük olan RB19 boyar maddesinin giderim maliyeti en fazla olmuştur. Molekül ağırlığı en yüksek olan RB198 boyar maddesinin giderim maliyeti ise en az olmuştur.

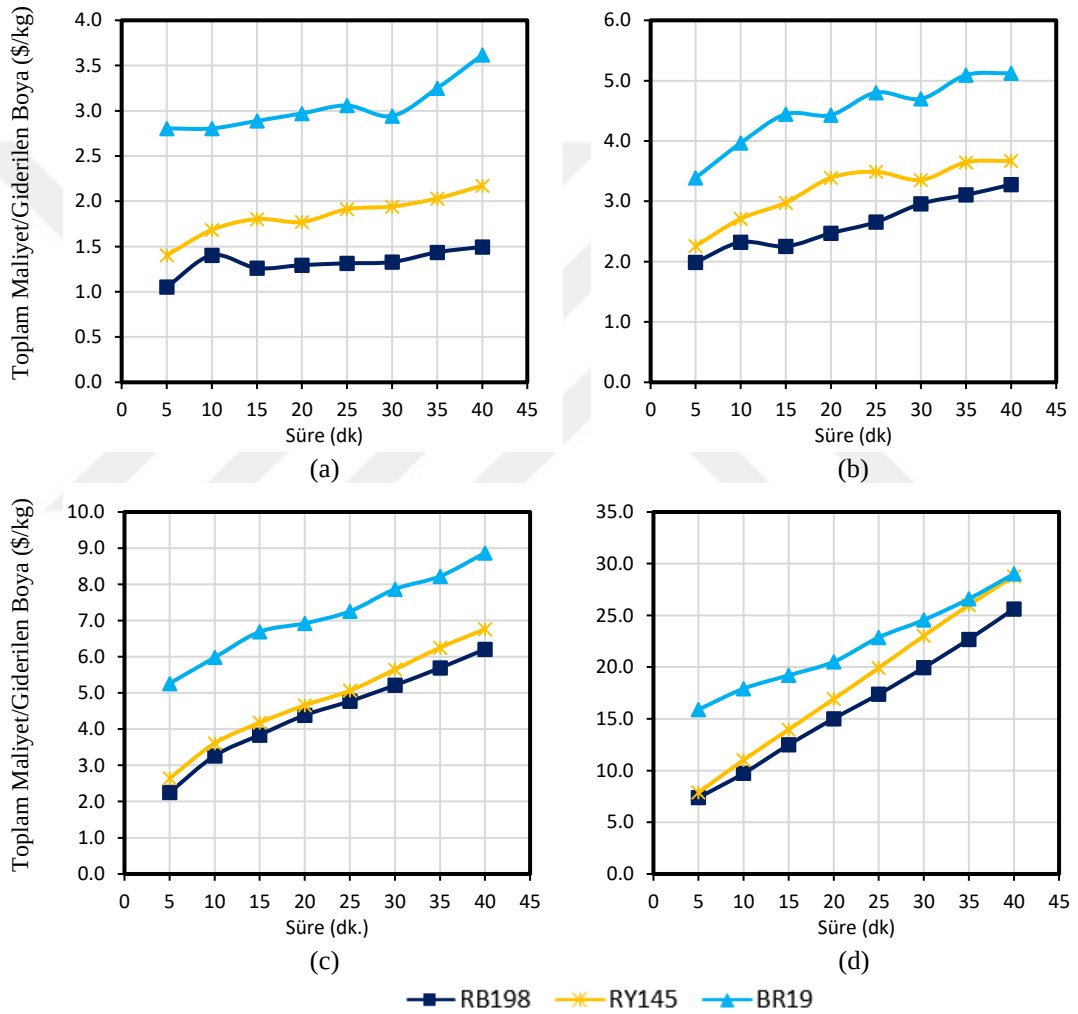
5.2.2 Elektrooksidasyon işletme maliyeti

Elektrooksidasyon prosesinde elektrot tükenmesi söz konusu olmadığı için tek işletme maliyeti hesaplanırken elektrik enerjisi dikkate alınmıştır. Çizelge 5.28’ de farklı akım yoğunluklarında elektrooksidasyon prosesi ile giderilen boyar maddelere ait işletme maliyetleri verilmiştir. Akım yoğunluğu ile harcanan elektrik enerjisi miktarı doğrudan ilişkilidir. Artan akım yoğunluğu ile birlikte giderim verimleri artmıştır. Bununla birlikte giderilen boya başına işletme maliyeti de artış göstermiştir.

Çizelge 5.28 : Elektrooksidasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti.

Akım yoğunluğu mA/cm ²	RB198		RY145		RB19	
	\$/kg giderilen boya	Giderim verimi (%)	\$/kg giderile n boya	Giderim verimi (%)	\$/kg giderilen boya	Giderim verimi (%)
3,33	1,50	45,00	2,17	31,00	3,62	18,62
6,67	3,28	49,64	3,67	44,33	5,12	31,75
13,3	6,21	84,11	6,76	77,22	8,87	58,87
33,3	25,62	96,27	28,79	85,69	29,01	85,02

*40 dk deney süresine ait değerler



Şekil 5.27 : Akım yoğunluğunun toplam maliyet üzerine etkisi (a: (3,33 mA/cm², b: 6,67 mA/cm², c: 13,3 mA/cm², d: 33,3 mA/cm²).

Şekil 5.27' de RB198, RY145 ve RB19 boyar maddelerinin elektrooksidasyon prosesi ile giderilmelerinde akım yoğunluğunun toplam işletme maliyeti üzerine etkisi gösterilmiştir. 3,33; 6,67; 13,3; 33,3 mA/cm² akım yoğunluklarında molekül ağırlığı en

düşük olan RB19 boyar maddesinin giderim maliyeti en fazla olmuştur. Molekül ağırlığı en yüksek olan RB198 boyar maddesinin giderim maliyeti ise en az olmuştur.

5.2.3 Elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon prosesleri işletme maliyetlerinin karşılaştırması

Çizelge 5.29’da elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon için boyar madde giderme verimi ve işletme maliyetleri kıyaslanmıştır. RB198 boyar maddesi için yaklaşık eşit giderme verimleri için elektrooksidasyon işletme maliyeti elektrokoagülasyondan sırasıyla; 0,05 A için 2,5 kat, 0,1 A için 3 kat, 0,2 A için 7,5 kat, 0,5 A için 7,75 kat daha fazladır. Bununla birlikte elektrokoagülasyon yönteminin çamur ürettiği ve bu çamuru bertaraf etmeninde bir maliyeti olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 5.29 : Elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon prosesleri boya giderme verimleri ve işletme maliyetleri karşılaştırması.

		0,05 A								
EK	RB198	Deney Süresi (dk)	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
		Boya giderme verimi (%)	19,2	43,3	80,16	94,5	96,8	97,2	97,5	97,6
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,43	0,38	0,31	0,35	0,43	0,51	0,60	0,68
	RY145	Boya giderme verimi (%)	30,5	70,2	88,76	90,9	93,3	93,8	93,8	94,0
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,42	0,36	0,43	0,56	0,69	0,82	0,96	1,09
	BR19	Boya giderme verimi (%)	26,1	43,1	59,54	71,0	76,5	79,9	86,0	90,5
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		0,49	0,59	0,65	0,72	0,84	0,96	1,04	1,13	
EO	RB198	Deney Süresi (dk)	5	10	15	20	25	30	35	40
		Boya giderme verimi (%)	8,00	12,0	20,00	26,0	32,0	38,0	41,0	45,0
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	1,05	1,40	1,26	1,29	1,32	1,33	1,44	1,50
	RY145	Boya giderme verimi (%)	6,00	10,0	14,00	19,0	22,0	26,0	29,0	31,0
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	1,40	1,68	1,80	1,77	1,91	1,94	2,03	2,17
	BR19	Boya giderme verimi (%)	3,00	6,00	8,74	11,3	13,8	17,2	18,1	18,6
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	2,81	2,81	2,89	2,97	3,06	2,94	3,25	3,62
			0,1 A							
EK	RB198	Deney Süresi (dk)	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
		Boya giderme verimi (%)	38,0	81,2	96,81	97,4	97,5	97,9	97,9	98,7
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,45	0,42	0,53	0,70	0,87	1,04	1,22	1,39
	RY145	Boya giderme verimi (%)	60,0	88,8	92,34	93,6	93,9	94,1	94,3	94,8
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,50	0,68	0,98	1,29	1,60	1,92	2,24	2,55
	BR19	Boya giderme verimi (%)	55,0	69,5	74,87	77,0	81,0	89,5	90,3	91,4
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		0,55	0,87	1,21	1,56	1,86	2,02	2,33	2,63	
EO	RB198	Deney Süresi (dk)	5	10	15	20	25	30	35	40
		Boya giderme verimi (%)	10.	17,5	27,06	32,9	38,6	41,2	45,8	49,6
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	1,99	2,32	2,25	2,47	2,65	2,96	3,11	3,28
	RY145	Boya giderme verimi (%)	9,00	15,0	20,49	24,0	29,1	36,4	39,0	44,3
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	2,26	2,71	2,98	3,39	3,49	3,35	3,65	3,67
	BR19	Boya giderme verimi (%)	6,00	10,2	13,73	18,36	21,17	25,96	27,95	31,75
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	3,39	3,97	4,44	4,43	4,80	4,70	5,09	5,12

Çizelge 5.29’deki elektrokoagülasyon verileri kendi içinde değerlendirildiğinde, akımı arttırmanın giderme veriminde çok büyük değişiklikler oluşturmadığı halde işletme maliyeti katlanarak artmakta olduğu görülmektedir. Elektrooksidasyon prosesinde ise

akımı artırmak giderme veriminde belirgin artışları getirirken işletme maliyeti de katlanarak artmaktadır.

Çizelge 5.29 (Devam). : Elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon prosesleri boya giderme verimleri ve işletme maliyetleri karşılaştırması.

0,2 A										
EK	RB198	Deney Süresi (Dk)	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
		Boya giderme verimi (%)	60,0	89,1	96,4	97,8	97,9	98,1	98,3	98,5
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,60	0,80	1,12	1,47	1,83	2,19	2,55	2,91
	RY145	Boya giderme verimi (%)	91,9	93,8	93,8	94,2	94,2	94,40	94,6	94,7
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	0,85	1,67	2,50	3,32	4,15	4,97	5,79	6,61
	BR19	Boya giderme verimi (%)	68,0	77,0	79,4	83,0	84,0	89,88	91,8	93,1
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		1,15	2,03	2,96	3,77	4,66	5,22	5,96	6,72	
EO	RB198	Deney Süresi (dk)	5	10	15	20	25	30	35	40
		Boya giderme verimi (%)	29,0	40,0	51,0	59,5	68,4	75,13	80,3	84,1
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	2,25	3,26	3,84	4,39	4,77	5,21	5,69	6,21
	RY145	Boya giderme verimi (%)	24,7	36,2	46,9	56,0	64,5	69,35	73,1	77,2
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	2,64	3,61	4,18	4,66	5,06	5,65	6,25	6,76
	BR19	Boya giderme verimi (%)	12,4	21,8	29,3	37,7	44,9	49,78	55,6	58,9
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		5,26	5,98	6,69	6,92	7,25	7,87	8,22	8,87	
0,5 A										
EK	RB198	Deney Süresi (dk)	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
		Boya giderme verimi (%)	61,6	90,9	96,7	97,6	98,1	98,33	98,3	98,8
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	1,72	2,34	3,30	4,35	5,42	6,49	7,57	8,61
	RY145	Boya giderme verimi (%)	92,3	92,6	94,2	94,7	94,7	95,20	95,6	95,9
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	3,92	7,82	11,5	15,3	19,1	22,83	26,5	30,2
	BR19	Boya giderme verimi (%)	82,0	85,7	93,8	95,1	95,5	97,31	97,8	98,3
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		4,42	8,46	11,6	15,3	18,9	22,34	25,4	29,5	
EO	RB198	Deney Süresi (dk)	5	10	15	20	25	30	35	40
		Boya giderme verimi (%)	41,8	63,4	74,1	82,1	88,7	92,71	95,1	96,3
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	7,37	9,72	12,5	15,0	17,4	19,96	22,7	25,6
	RY145	Boya giderme verimi (%)	39,2	55,9	66,3	72,9	77,4	80,37	83,0	85,7
		Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)	7,87	11,0	13,9	16,9	19,9	23,02	25,9	28,7
	BR19	Boya giderme verimi (%)	19,4	34,4	48,2	60,1	67,4	75,32	81,1	85,0
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (Kg)		15,9	17,9	19,2	20,5	22,9	24,56	26,6	29,0	

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Boyar maddeler tekstil endüstrisi atıksularında oldukça fazla miktarlarda bulunurlar. Bunlar alıcı su ortamları için sorun teşkil ettiklerinden, atıksulardan giderilmeleri gerekmektedir. Elektrokimyasal atıksu arıtma prosesleri boyar maddelerin gideriminde sıklıkla kullanılmakta ve bu alanda pek çok çalışma yapılmaktadır. Elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon elektrokimyasal atıksu arıtımının önemli iki prosesi olmakla beraber, elektrokoagülasyon çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elektrokoagülasyonda anodun çözünmesi ile açığa çıkan çamur prosesin en büyük ve bertaraf edilmesi gereken sorunu durumundadır. Elektrooksidasyonda ise anot çözünmediğinden böyle bir sorun söz konusu değildir. Kirleticilerin molekül ağırlığı bunların sulardan gideriminde etkili olmaktadır. Özellikle membran proseslerde giderim kirleticilerin bu özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada boyar madde molekül ağırlığının hem elektrokoagülasyonda hemde elektrooksidasyonda giderme verimini ne şekilde etkilediği araştırıldı. Araştırmada 3 farklı molekül boyutuna sahip reaktif tekstil boyar maddesi kullanıldı. Çalışma sonuçlarından;

- Hem elektrokoagülasyonda hem elektrooksidasyonda boyar madde molekül ağırlığının giderme veriminde etkili olduğu
- Daha büyük molekül ağırlığına sahip boyar maddenin daha iyi giderildiği
- Aynı akım ve sürede boyar madde gideriminde elektrokoagülasyonun elektrooksidasyondan çok daha başarılı olduğu görüldü.

Çalışmada ayrıca işletme maliyeti analiz edildi. Elektrokoagülasyonda işletme gideri olarak çözünen anot (alüminyum) ve elektrik maliyeti hesaba katılırken. Elektrooksidasyonda anot çözünmediğinden sadece elektrik maliyeti hesaba katılmıştır. Hesaplama sonuçlarından;

- Hem elektrokoagülasyonda hem elektrooksidasyonda boyar madde molekül ağırlığının işletme maliyetinde etkili olduğu

- Daha büyük molekül ağırlığına sahip boyar maddenin daha ekonomik giderildiği
- Aynı büyüklükteki boyar maddenin gideriminde elektrokoagülasyonun elektrooksidasyondan çok daha ekonomik olduğu görüldü.

Boyar madde molekül ağırlığının büyüklüğü bunların elektrokimyasal yöntemlerle (elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon) sulardan gideriminde avantaj sağlamaktadır. Elektrokimyasal proseslerden elektrokoagülasyon ise boyar madde gideriminde elektrooksidasyona göre daha kısa sürede ve daha düşük işletme maliyeti ile giderim yapabilmektedir. Ancak elektrokoagülasyonda oluşan flok çamurlarının giderilmesi gerekmektedir. Bu tezin konusu olmayan flok çamurlarının giderme maliyeti ve neden olacağı çevresel problemler araştırılmalıdır. Araştırılması gereken bir diğer konu ise benzer bir çalışmanın dispers, asidik, bazik, vat vb diğer boyar maddeler için yapılmasıdır.

7. KAYNAKLAR

Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal, N. ve Belgaied, J. E. (2004). Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 112(3), 207–213.

Ahn, D., Chang, W. ve Yoon, T. (1999). Dyestuff wastewater treatment using chemical oxidation, physical adsorption and fixed bed biofilm process, *Process Biochemistry*, 34(5), 429–439.

Al Aji, B., Yavuz, Y. ve Koparal, A. S. (2012). Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes, *Separation and Purification Technology*, 86, 248–254.

Allen, R. L. M. (1971). *Colour Chemistry*. New York: Springer New York LLC.

Anglada, A., Urtiaga, A. ve Ortiz, I. (2009). Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(12), 1747–1755.

Anjaneyulu, Y., Sreedhara Chary, N. ve Samuel Suman Raj, D. (2005). Decolourization of industrial effluents - Available methods and emerging technologies - A review, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 4(4), 245–273.

Asselin, M., Drogui, P., Brar, S. K., Benmoussa, H. ve Blais, J.-F. (2008). Organics removal in oily bilgewater by electrocoagulation process, *Journal of Hazardous Materials*, 151(2–3), 446–455.

Balasubramanian, N. ve Madhavan, K. (2001). Arsenic removal from industrial effluent through electrocoagulation, *Chemical Engineering and Technology*, 24(5), 519–521.

Bande, R. M., Prasad, B., Mishra, I. M. ve Wasewar, K. L. (2008). Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation, *Chemical Engineering Journal*, 137(3), 503–509.

Bayramoglu, M., Eyvaz, M. ve Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation. Economical evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 128(2–3), 155–161.

Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O. T. ve Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electroagulation of textile dye wastewater, *Separation and Purification Technology*, 37(2), 117–125.

Belkacem, M., Khodir, M. ve Abdelkrim, S. (2008). Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique, *Desalination*, 228(1–3), 245–254.

- Bhatt, P. ve Rani, A.** (2013). Textile dyeing and printing industry: An environmental hazard, *Asian Dyer*, 10(6), 51–54.
- Birch, R. R., Biver, C., Campagna, R., Gledhill, W. E., Pagga, U., Steber, J., Bontinck, W. J.** (1989). Screening of chemicals for anaerobic biodegradability, *Chemosphere*, 19(10–11), 1527–1550.
- Booth, G., Zollinger, H., McLaren, K., Sharples, W. G. ve Westwell, A.** (2000). *Dyes, General Survey*. New Jersey, ABD: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Brás, R., Gomes, A., Ferra, M. I. A., Pinheiro, H. M. ve Gonçalves, I. C.** (2005). Monoazo and diazo dye decolourisation studies in a methanogenic UASB reactor, *Journal of Biotechnology*, 115(1), 57–66.
- Broadbent, A. D.** (2001). *Basic Principles of Textile Coloration*. Bradford, UK: Society of Dyers and Colourists.
- Burns, S. E., Yiacoumi, S. ve Tsouris, C.** (1997). Microbubble generation for environmental and industrial separations, *Separation and Purification Technology*, 11(3), 221–232.
- Buthiyappan, A., Raman, A., Aziz, A., Mohd, W. ve Wan, A.** (2016). Recent advances and prospects of catalytic advanced oxidation process in treating textile effluents, *Reviews in Chemical Engineering*, 32(1), 1–47.
- Can, O. T. ve Bayramoglu, M.** (2014). A comparative study on the structure-performance relationships of chemically and electrochemically coagulated Al(OH)₃ flocs, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(9), 3528–3538.
- Can, O. T. ve Gazigil, L.** (2017). Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Sulardan Boyarmadde Gideriminde Molekül Büyüklüğü ve pH etkisi, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 3(109–118).
- Carliell-Marquet, C., Barclay, S. J. ve Buckley, C.** (1996). Treatment of exhausted reactive dyebath effluent using anaerobic digestion: Laboratory and full-scale trials, *WATER SA*, 22, 225–233.
- Casqueira, R. G., Torem, M. L. ve Kohler, H. M.** (2006). The removal of zinc from liquid streams by electroflotation, *Minerals Engineering*, 19(13), 1388–1392.
- Chatzisyneon, E., Xekoukoulotakis, N. P., Coz, A., Kalogerakis, N. ve Mantzavinos, D.** (2006). Electrochemical treatment of textile dyes and dyehouse effluents, *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 998–1007.
- Chen, G.** (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41.
- Chen, K., Wu, J., Huang, C., Liang, Y. ve Hwang, S. J.** (2003). Decolorization of azo dye using PVA-immobilized microorganisms, *Journal of Biotechnology*, 101(3), 241–252.
- Chen, X. ve Chen, G.** (2010). *Electroflotation BT - Electrochemistry for the Environment*. C. Comninellis & G. Chen (Ed.) (ss. 263–277). New York, NY: Springer New York.
- Chen, X., Chen, G. ve Yue, P. L.** (2002). Novel electrode system for electroflotation of wastewater, *Environmental Science and Technology*, 36(4), 778–783.

Chequer, F. M. D., Oliveira, G. A. R. de, Ferraz, E. R. A., Cardoso, J. C., Zanoni, M. V. B. ve Oliveira, D. P. de. (2013). *Textile Dyes: Dyeing Process and Environmental Impact*. Rijeka: InTech.

Christie, R. M. (2001). *Colour Chemistry*. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.

Clark, M. (2011). *Handbook of Textile and Industrial Dyeing: Principles, Processes and Types of Dyes*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited.

Comninellis, C. (1994). Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochimica Acta*, 39(11–12), 1857–1862.

Couto, S. R. (2009). Dye removal by immobilised fungi. *Biotechnology Advances*, 27(3), 227–235.

dos Santos, A. B., Cervantes, F. J. ve van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology, *Bioresource Technology*, 98(12), 2369–2385.

Emamjomeh, M. M. ve Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes, *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663–1679.

Fanchiang, J. -M. ve Tseng, D. -H. (2009). Decolorization and transformation of anthraquinone dye Reactive Blue 19 by ozonation, *Environmental Technology*, 30(2), 161–172.

Farias, S., Mayer, D. A., de Oliveira, D., de Souza, S. M. A. G. U. ve de Souza, A. A. U. (2017). Free and Ca-Alginate Beads Immobilized Horseradish Peroxidase for the Removal of Reactive Dyes: an Experimental and Modeling Study, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 182(4), 1290–1306.

Farmer, J. C., Wang, F. T., Hawley-Fedder, R. A., Lewis, P. R., Summers, L. J. ve Foiles, L. (1992). Electrochemical Treatment of Mixed and Hazardous Wastes: Oxidation of Ethylene Glycol and Benzene by Silver (II), *Journal of The Electrochemical Society*, 139(3), 654–662.

Feng, Y., Yang, L., Liu, J. ve Logan, B. (2016). Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment and Resource Reclamation, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2, 800–831.

Ghosh, D., Medhi, C. R. ve Purkait, M. K. (2008). Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections, *Chemosphere*, 73(9), 1393–1400.

Gligorovski, S., Strekowski, R., Barbati, S., Vione, D., Universite, A. ve Umr, L. C. E. (2015). Environmental Implications of Hydroxyl Radicals ($\bullet\text{OH}$), *Chem. Rev.*, 115 (24), 13051–13092.

Golder, A., Samanta, A. ve Ray, S. (2007). Removal of Cr^{3+} by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations, *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 653–661.

Günzler, H. ve Williams, A. (2008). *Handbook of Analytical Techniques*. New Jersey, ABD: Wiley-VCH Verlag GmbH.

Gupta, V. K., Carrott, P. J. M., Carrott, M. M. L. R. ve Suhas. (2009). Low-Cost Adsorbents: Growing Approach to Wastewater Treatment—a Review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(10), 783–842.

Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. ve Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches, *Desalination*, 404, 1–21.

Hanay, Ö. ve Hasar, H. (2011). Effect of anions on removing Cu²⁺, Mn²⁺ and Zn²⁺ in electrocoagulation process using aluminum electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 189(1–2), 572–576.

Harvey, D. (2000). *Chemistry modern analytical chemistry*. Cambridge, UK: McGraw-Hill Higher Companies, Inc.

Heaton, A. (1994). *The Chemical Industry* (2.). Netherlands: Springer Science Business Media, B.V.

Himanshu, P. ve Vashi, R. T. (2010). Treatment of Textile Wastewater by Adsorption and Coagulation, *E-Journal of Chemistry*, 7(4), 1468–1476.

Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M. ve Mitchell, C. A. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(2–3), 233–248.

Hunger, K. (2008). *Industrial Dyes Chemistry, Porperties, Applicaitons*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Karatas, M., Argun, Y. A. ve Argun, M. E. (2012). Decolorization of antraquinonic dye, Reactive Blue 114 from synthetic wastewater by Fenton process: Kinetics and thermodynamics, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(3), 1058–1062.

Karcher, S., Kornmüller, A. ve Jekel, M. (2002). Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters, *Water Research*, 36(19), 4717–4724.

Ketkar, D. R., Mallikarjunan, R. ve Venkatachalam, S. (1991). Electroflotation of quartz fines, *International Journal of Mineral Processing*, 31(1–2), 127–138.

Khatri, A., Peerzada, M. H., Mohsin, M. ve White, M. (2015). A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution, *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 50–57.

Khosla, N. K., Venkatachalam, S. ve Somasundaran, P. (1991). Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation, *Journal of Applied Electrochemistry*, 21(11), 986–990.

Kiernan, J. (2001). Classification and naming of dyes, stains and fluorochromes, *Biotechnic & Histochemistry*, 76(5–6), 261–278.

Koby, M., Can, O. T. ve Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 100(1–3), 163–178.

Koby, M. ve Demirbas, E. (2015). Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation, *Journal of Water Process Engineering*, 8, 64–74.

Koby, M., Demirbas, E., Can, O. T. ve Bayramoglu, M. (2006). Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 132(2–3), 183–188.

Koparal, A. S. ve Ögütveren, Ü. B. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 89(1), 83–94.

Körbahti, B. K. (2007). Response surface optimization of electrochemical treatment of textile dye wastewater, *Journal of Hazardous Materials*, 145(1–2), 277–286.

Kumarasinghe, D., Pettigrew, L. ve Nghiem, L. D. (2009). Removal of heavy metals from mining impacted water by an electrocoagulation-ultrafiltration hybrid process, *Desalination and Water Treatment*, 11(1–3), 66–72.

Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J. ve Lassi, U. (2013). Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater—A Review, *Green and Sustainable Chemistry*, 3(2), 89–121.

Ledakowicz, S., Solecka, M. ve Zylla, R. (2001). Biodegradation, decolourisation and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes, *Journal of Biotechnology*, 89(2–3), 175–184.

Mahesh, S., Prasad, B., Mall, I. D. ve Mishra, I. M. (2006). Electrochemical Degradation of Pulp and Paper Mill Wastewater. Part 1. COD and Color Removal, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(8), 2830–2839.

Márquez, M. C. ve Costa, C. (1996). Biomass concentration in PACT process, *Water Research*, 30(9), 2079–2085.

Martínez-Huitle, C. A. ve Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review, *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3–4), 105–145.

Martinez-Huitle, C. A. ve Ferro, S. (2006). Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes, *Chemical Society reviews*, 35(12), 1324–1340.

Matteson, M. J., Dobson, R. L., Glenn, R. W., Kukunoor, N. S., Waits, W. H. ve Clayfield, E. J. (1995). Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 104(1), 101–109.

Merzouk, B., Madani, K. ve Sekki, A. (2010). Using electrocoagulation-electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies, *Desalination*, 250(2), 573–577.

Mickley, M. C. (2009). Treatment of Concentrate. U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Report No.(155).

Mickova, I. (2015). Advanced Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. Part II: Electro-Flocculation and ElectroFlotation. American Scientific

Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), 14(2), 273–294.

Mock, G. (2004). *Synthetic Fibre Dying*. (C. Hawkyard, Ed.). Bradford, UK: Society of Dyers and Colorists.

Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J. ve Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 114(1–3), 199–210.

Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R. ve Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)--Science and Applications, *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41.

Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M. D. P. ve Ayedi, H. F. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process, *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 124–135.

Mráz, R. ve Krýsa, J. (1994). Long service life IrO₂/Ta₂O₅ electrodes for electroflotation, *Journal of Applied Electrochemistry*, 24(12), 1262–1266.

Murugananthan, M., Bhaskar Raju, G. ve Prabhakar, S. (2004). Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation, *Separation and Purification Technology*, 40(1), 69–75.

Naje, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z., Ajeel, M. A. ve Alaba, P. A. (2016). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater, *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3), 263–292.

Nigam, P., Banat, I. M., Singh, D. ve Marchant, R. (1996). Microbial process for the decolorization of textile effluent containing azo, diazo and reactive dyes, *Process Biochemistry*, 31(5), 435–442.

Noonpui, S. ve Thiravetyan, P. (2011). Treatment of reactive azo dye from textile wastewater by burhead (*Echinodorus cordifolius* L.) in constructed wetland: Effect of molecular size. *Journal of Environmental Science and Health - Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 46(7), 709–714.

Oussedik, S. M. ve Khelifa, A. (2001). Reduction of copper ions concentration in wastewaters of galvanoplastic industry by electroflotation, *Desalination*, 139(1–3), 383.

Pala, A. ve Tokat, E. (2002). Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives, *Water Research*, 36(11), 2920–2925.

Panakoulis, T., Kalatzis, P., Kalderis, D. ve Katsaounis, A. (2010). Electrochemical degradation of Reactive Red 120 using DSA and BDD anodes, *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(10), 1759–1765.

Panda, H. (2013). *A Concise Guide on Textile Dyes, Pigments and Dye Intermediates with Textile Printing Technology*. India: NIIR Project Consultancy Services.

Panizza, M., Michaud, P. A., Cerisola, G. ve Comninellis, C. (2001). Electrochemical treatment of wastewaters containing organic pollutants on boron-

doped diamond electrodes: Prediction of specific energy consumption and required electrode area, *Electrochemistry Communications*, 3(7), 336–339.

Radjenovic, J. ve Sedlak, D. L. (2015). Challenges and Opportunities for Electrochemical Processes as Next-Generation Technologies for the Treatment of Contaminated Water, *Environmental Science and Technology*, 49(19), 11292–11302.

Rajkumar, D., Song, B. J. ve Kim, J. G. (2007). Electrochemical degradation of Reactive Blue 19 in chloride medium for the treatment of textile dyeing wastewater with identification of intermediate compounds, *Dyes and Pigments*, 72, 1–7.

Ricordel, C., Darchen, A. ve Hadjiev, D. (2010). Electrocoagulation-electroflotation as a surface water treatment for industrial uses, *Separation and Purification Technology*, 74(3), 342–347.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. ve Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative, *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255.

Rojas, R. H., Torem, M. L., Merma, A. G., Puelles, J. G. S., Janeiro, R. De, ve Janeiro-rj, R. De. (2016). Main Factors Affecting the Size of Hydrogen and Oxygen Bubbles. *IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings* (ss. 1–10).

Rouessac, F. ve Rouessac, A. (2007). *Chemical Analysis : Modern Instrumentation Methods and Techniques*. England: John Wiley and Sons Ltd.

Sahu, O., Mazumdar, B. ve Chaudhari, P. K. (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: A review, *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413.

Sala, M. ve Gutiérrez-Bouzán, M. C. (2012). Electrochemical techniques in textile processes and wastewater treatment, *International Journal of Photoenergy*, 2012(2012), 12.

Sarkar, M. S. K. A., Evans, G. M. ve Donne, S. W. (2010). Bubble size measurement in electroflotation, *Minerals Engineering*, 23(11–13), 1058–1065.

Sasson, M. Ben, Calmano, W. ve Adin, A. (2009). Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell, *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 704–709.

Şengil, I. A. ve Özacar, M. (2009). The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes, *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 1369–1376.

Shafaei, A., Pajootan, E., Nikazar, M. ve Arami, M. (2011). Removal of Co (II) from aqueous solution by electrocoagulation process using aluminum electrodes, *Desalination*, 279(1–3), 121–126.

Singh, R. (2002). *Synthetic Dyes (1. baskı)*. New Delhi: Mittal Publications.

Slokar, Y. M. ve Marechal, A. M. Le. (1998). Methods of decoloration of textile wastewaters, *Dyes and Pigments*, 37(4), 335–356.

Stake, M. ve Mido, Y. (1995). *Chemistry of Colour*. (M. S. Sethi & S. A. IQBAL, Ed.). New Delhi: Discovery Publishing House..

Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C., Kaul, S. N., Daniele, S. ve Faveri, M. D. De. (2000). Electrochemical Oxidation of Dyeing Baths Bearing Disperse Dyes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, 39(9), p 3241–3248.

Tan, N. C. G., Borger, A., Slenders, P., Svitelskaya, A., Lettinga, G. ve Field, J. A. (2000). Degradation of azo dye Mordant Yellow 10 in a sequential anaerobic and bioaugmented aerobic bioreactor, *Water Science and Technology* 42(5-6), 337-344.

US EPA. (1997). *EPA Office of Compliance Sector Notebook Project: Profile Of The Textile Industry.* USA: Environmental Protection Agency.

Vasudevan, S., Kannan, B. S., Lakshmi, J., Mohanraj, S. ve Sozhan, G. (2011). Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of fluoride from water, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(3), 428–436.

Verma, A. K., Dash, R. R. ve Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters, *Journal of Environmental Management*, 93(1), 154–168.

Vivek Narayanan, N. ve Ganesan, M. (2009). Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 575–580.

Vlyssides, A. G., Loizidou, M., Karlis, P. K., Zorpas, A. A. ve D, P. (1999). Electrochemical oxidation of a textile dye wastewater using a Pt /Ti electrode, *Journal of Hazardous Materials*, 70(1–2), 41–52.

Wang, C.-T., Chou, W.-L. ve Kuo, Y.-M. (2009). Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electroflotation, *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 81–86.

Zollinger, H. (2003). *Color Chemistry Syntheses, Properties, and Applications of Organic Dyes and Pigments (Third).* Switzerland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Zuo, Q., Chen, X., Li, W. ve Chen, G. (2008). Combined electrocoagulation and electroflotation for removal of fluoride from drinking water, *Journal of Hazardous Materials*, 159(2–3), 452–457.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ramazan KEYİKOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 09.09.1990/ Korkuteli
E-posta : ramazankeyikoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği