

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**REAKTİF BLUE 222 BOYARMADDESİNİN SULU
ÇÖZELTİLERDEN ELEKTROKOAGÜLASYON VE ULTRASES-
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK
GİDERİMİNİN İNCELENMESİ**

CANSU ÖZMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet GÜNAY (Tez Danışmanı)
Dr. Öğr. Üyesi Züriye GÜNDÜZ (Eş Danışman)
Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZMETİN
Dr. Öğr. Üyesi Aydın TÜRKYILMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Atilla MUTLU

BALIKESİR, EYLÜL - 2020

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon Ve Ultrases-Elektrokoagülasyon Yöntemlerini Kullanarak Gideriminin İncelenmesi” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Cansu ÖZMEZ



ÖZET

REAKTİF BLUE 222 BOYARMADDESİNİN SULU ÇÖZELTİLERDEN ELEKTROKOAGÜLASYON VE ULTRASES-ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK GİDERİMİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANSU ÖZMEZ

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. AHMET GÜNAY)

(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ZÜRRİYE GÜNDÜZ)

BALIKESİR, EYLÜL - 2020

Bu tez çalışmasında, demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon (EC) ve ultrases destekli elektrokoagülasyon (US/EC) prosesi ile Reaktif Blue 222 (RB222) boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi incelenmiştir. Birinci bölümde elektrokoagülasyon çalışmaları, ikinci bölümde ise ultrases destekli elektrokoagülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda başlangıçtaki boyarmadde derişimi (50, 100 ve 250 mg/L), pH (5, 7 ve 9), akım yoğunluğundan (2, 10, 20 ve 40 mA/cm²) ve elektroliz süresinden (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 ve 30 dakika) oluşan işletme parametrelerinin renk giderim verimine etkileri incelenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesi ile RB222'nin sulu çözeltilerden gideriminde %99'un üzerinde verim elde edebilmek için optimum çalışma koşulları; başlangıç derişimi 50 mg/L, akım yoğunluğu 2 mA/cm², pH 5 ve elektroliz süresi 9 dakikadır. Ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi için optimum çalışma koşulları ise; başlangıç derişimi 50 mg/L, sistemin akım yoğunluğu 2 mA/cm², pH 5 ve elektroliz süresi 25 dakikadır. Aynı verime (>%99) ulaşmak için ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesine (11.29 kWh/g) kıyasla elektrokoagülasyon prosesi (0.021 kWh/g) oldukça düşük maliyetle işletilmiştir. Sonuç olarak sulu çözeltilerden Reaktif Blue 222 boyarmaddesinin giderimi prosesini uygun işletme maliyetiyle gerçekleştirebilmek için ultrases desteğine gerek olmadığı ve elektrokoagülasyon prosesinin tek başına yeterli ve ekonomik olduğu anlaşılmıştır. Kısa proses zamanı gerektirmesi, basit ekipman ihtiva etmesi, daha az çamur oluşumu ile sonuçlanması ve tehlikeli reaktant/ürün ortaya çıkarmaması gibi avantajları ile elektrokoagülasyon prosesi, Reaktif Blue 222'nin gideriminde oldukça etkili sonuçlar ortaya koymuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Elektrokoagülasyon, ultrases/elektrokoagülasyon, demir elektrot, renk giderimi, Reaktif Blue 222.

Bilim Kod / Kodları : 90319

Sayfa Sayısı : 92

ABSTRACT

INVESTIGATION OF REACTIVE BLUE 222 PAINT MATERIAL BY USING ELECTROCOAGULATION AND ULTRASES-ELECTROCOAGULATION METHODS FROM WATER SOLUTIONS

MSC THESIS

CANSU ÖZMEZ

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. AHMET GÜNAY)

(CO-SUPERVISOR: ASSIST PROF. DR. ZÜRRİYE GÜNDÜZ)

BALIKESİR, SEPTEMBER - 2020

In this thesis, the removal of Reactive Blue 222 (RB222) dye from aqueous solutions were investigated by electrocoagulation (EC) and ultrasound assisted electrocoagulation (US/EC) processes using iron electrodes. Electrocoagulation tests were carried out first, followed by ultrasound assisted electrocoagulation tests. In this context, the effects of operating parameters consisting of initial dyestuff concentration (50, 100 and 250 mg /L), pH (5, 7 and 9), current density (2, 10, 20 and 40 mA/cm²) and electrolysis time (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 and 30 min.) on color removal efficiency were examined. Optimum working conditions to achieve over 99% efficiency in RB222 removal from aqueous solutions with electrocoagulation process were; initial concentration was 50 mg/L, current density was 2 mA/cm², pH was 5 and electrolysis time was 9 minutes. The optimum working conditions for the ultrasases assisted electrocoagulation process were; initial concentration was 50 mg/L, current density was 2 mA/cm², pH was 5 and electrolysis time was 25 minutes. Electrocoagulation process (0.021 kWh/g) was operated at a very low cost compared to the ultrasound assisted electrocoagulation process (11.29 kWh/g) in order to achieve the same efficiency (> 99%). As a result, it is concluded that ultrasound support is not required and the electrocoagulation process alone is sufficient and economical in order to perform the removal process of Reactive Blue 222 dyestuff from aqueous solutions at an affordable operating cost. The electrocoagulation process produced very effective results in the removal of Reactive Blue 222 exhibiting the advantages such as requiring short process time, containing simple equipment, resulting in less sludge formation and no hazardous reactants/products.

KEYWORDS: Electrocoagulation, ultrasound/electrocoagulation, iron electrode, color removal, Reactive Blue 222.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Önemi	1
1.2 Türkiye’de Tekstil Endüstrisi.....	2
1.3 Tekstil Boyarmaddeleri.....	3
1.3.1 Çözünürlüklerine Göre Boyarmaddeler	3
1.3.1.1 Suda Çözünen Boyarmaddeler.....	3
1.3.1.2 Suda Çözünmeyen Boyarmaddeler	3
1.3.2 Boyama Özelliklerine Göre Boyarmaddeler	4
1.3.2.1 Bazik (Katyonik) Boyarmaddeler	5
1.3.2.2 Asit Boyarmaddeler.....	5
1.3.2.3 Direkt Boyarmaddeler	5
1.3.2.4 Mordan Boyarmaddeler.....	5
1.3.2.5 Reaktif Boyarmaddeler.....	5
1.3.2.6 Küpe Boyarmaddeler.....	6
1.3.2.7 Dispers Boyarmaddeler	6
1.3.2.8 Sülfür Boyarmaddeler	6
1.3.2.9 Geliştirilmiş Boyarmaddeler.....	6
1.3.2.10 Anilin Siyahı	6
1.3.3 Kimyasal Yapılarına Göre Boyarmaddeler	6
1.4 Tekstil Boyarmaddelerinin Giderim Yöntemleri	7
1.4.1 Biyolojik Yöntemler	7
1.4.1.1 Anaerobik Yöntem	7
1.4.1.2 Aerobik Yöntem.....	8
1.4.2 Fiziksel Yöntemler.....	8
1.4.2.1 Membran Filtrasyonu	8
1.4.2.2 İyon Değişimi.....	9
1.4.2.3 Adsorpsiyon	9
1.4.3 Kimyasal Giderim Yöntemleri	10
1.4.3.1 Kimyasal Floklaştırma ve Çöktürme.....	10
1.4.3.2 Oksidasyon.....	10
1.4.3.3 Ozonifikasyon	11
1.5 Elektrokimyasal Giderim Yöntemleri	11
1.5.1 Elektrokimyasal Giderim Yöntemleri.....	12
1.5.2 Elektroflotasyon.....	12
1.5.3 Elektrokoagülasyon	13
1.5.3.1 Elektrokoagülasyonu Etkileyen Faktörler	16

1.6 Ultrases	21
1.6.1 Ses ve Ultrases Nedir?	21
1.6.2 Ultrasesin Kullanım Alanları.....	22
1.6.3 Ultrasesin Kimyasal Tepkimeler Üzerindeki Etkileri.....	23
1.6.4 Ultrases Prosesi ve Kaviteasyon	23
1.6.5 Ultrasonik Prob ve Ultrasonik Banyo	27
1.6.6 Sonokimyasal Reaksiyonların Temelleri	29
1.7 Literatür Taraması	30
2. MATERYAL METOD	36
2.1 Materyal ve Deneysel İşlemler.....	36
2.2 Deneysel Değişkenler	39
2.3 Analiz.....	39
3. BULGULAR	42
3.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon Prosesi ile Giderimi	42
3.1.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi	42
3.1.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine Akım Yoğunluğunun Etkisi	44
3.1.3 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç pH'ının Etkisi	45
3.1.4 Elektroliz Süresinin Etkisi.....	48
3.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Ultrases/Elektrokoagülasyon Prosesi ile Giderimi	49
3.2.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi	50
3.2.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Giderimine Akım Yoğunluğunun Etkisi.....	53
3.2.3 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç pH'ının Etkisi	56
3.3 FT-IR Karakterizasyonu	59
3.4 SEM Analizi.....	63
3.5 EDX Analizi.....	67
3.6 Elektrokoagülasyon ve Ultrases Destekli Elektrokoagülasyon İçin Enerji Tüketimi ...	70
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
5. KAYNAKLAR.....	75
EKLER.....	84
EK A: Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri	84
EK B: Ultrases/Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri	88
ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kavitasyon balonlarının davranışları a)negatif basınç yüklü, yüksek genlikli kabarcık, b) pozitif basınç yüklü, düşük genlikli kabarcık.	24
Şekil 1.2: Ultrasonik Prob.....	28
Şekil 1.3: Ultrasonik Banyo.	28
Şekil 2.1: Reaktif Blue 222'nin molekül yapısı.	36
Şekil 2.2: Elektrokoagülasyon deney sisteminin şematik gösterimi.	37
Şekil 2.3: Ultrases destekli elektrokoagülasyon deney sisteminin şematik gösterimi.	37
Şekil 2.4: RB222 boyarmaddesi için lineer kalibrasyon grafiği.	40
Şekil 3.1: RB222 Boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine derişim etkisi.	43
Şekil 3.2: RB222 Boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine akım yoğunluğunun etkisi.	45
Şekil 3.3: Ağırlıklı türler bölgesi diyagramı.	46
Şekil 3.4: RB222 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine pH etkisi. ..	48
Şekil 3.5: RB222 boyarmaddesinin ultrases-elektrokoagülasyon ile giderim verimine başlangıç derişimi etkisi.	51
Şekil 3.6: 50 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması.	52
Şekil 3.7: 100 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması.	52
Şekil 3.8: 250 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması.	52
Şekil 3.9: RB222 boyarmaddesinin ultrases/elektrokoagülasyon ile giderim verimine akım yoğunluğunun etkisi.	54
Şekil 3.10: 2 mA/cm ² için EC ile US/EC karşılaştırması.	55
Şekil 3.11: 10 mA/cm ² için EC ile US/EC karşılaştırması.	55
Şekil 3.12: 20 mA/cm ² için EC ile US/EC karşılaştırması.	56
Şekil 3.13: 40 mA/cm ² için EC ile US/EC karşılaştırması.	56
Şekil 3.14: RB222 boyarmaddesinin ultrases/elektrokoagülasyon ile giderim verimine pH etkisi.	57
Şekil 3.15: pH:5'te EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm ² ,C ₀ : 50 mg/L).....	58
Şekil 3.16: pH:7'de EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm ² ,C ₀ : 50 mg/L).....	58
Şekil 3.17: pH:9'da EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm ² ,C ₀ : 50 mg/L).....	59
Şekil 3.18: Çalışmada kullanılan RB222 boyarmaddesinin IR spektrumu.	60
Şekil 3.19: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin EC üst faz IR spektrumu.	61
Şekil 3.20: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin EC alt faz IR spektrumu.....	61
Şekil 3.21: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin US/EC üst faz IR spektrumu.	62
Şekil 3.22: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin US/EC alt faz IR spektrumu.....	62
Şekil 3.23: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin, üst ve alt fazlarının IR spektrumları. ...	63
Şekil 3.24: RB222 Boyarmaddesine ait SEM görüntüsü.....	64
Şekil 3.25: Elektrokoagülasyon prosesinde elde edilen (a): üst faz, (b): alt faza ait SEM görüntüleri.	65
Şekil 3.26: Ultrases destekli lektrokoagülasyon prosesinde elde edilen (a): üst faz, (b): alt faza ait SEM görüntüleri.....	66
Şekil 3.27: Elektrokoagülasyonda üst faz EDX spektrumu.....	68
Şekil 3.28: Elektrokoagülasyonda alt fazın EDX spektrumu.	68

Şekil 3.29: Ultrases destekli elektrokoagülasyonda üst fazın EDX spektrumu.....	69
Şekil 3.30: Ultrases destekli elektrokoagülasyonda alt fazın EDX spektrumu.....	69
Şekil 3.31: EC ile US/EC enerji tüketimi karşılaştırılması (J: 2 mA/cm ² , C ₀ : 50 ppm, pH: 5).....	70
Şekil 3.32: Farklı akım yoğunluklarında EC ve US/EC için enerji tüketimi karşılaştırma grafığı (pH 5, 50 mg/L).....	71

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Çeşitli tipteki boyarmaddelerin içerikleri.	4
Tablo 1.2: Elektrokoagülasyon Prosesi ile Yapılan Çalışmalar.	33
Tablo 1.3: Elektrokogülasyon ve Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Yapılan Çalışmalar. ...	35

SEMBOL LİSTESİ

N	: Azot
S	: Kükürt
Al	: Alüminyum
Fe	: Demir
Sn	: Kalay
Cr	: Krom
EC	: Elektrokoagülasyon
US/EC	: Ultrases destekli elektrokoagülasyon
C₀	: Başlangıç boyarmadde derişimi
pH₀	: Başlangıç pH değeri
J	: Akım yoğunluğu (mA/cm ²)
I	: Elektrik Akımı (Amper)
A	: Elektrot yüzey alanı (m ²)
E	: Renk giderimi için tüketilen enerji (kWh/gL)
V	: Hücre voltajı (Volt)
t_{ec}	: Elektrokoagülasyon prosesinin süresi
t_{us/ec}	: Ultrases prosesinin süresi
W	: Sisteme sağlanan ultrases gücü (watt)
v	: Çalışılan boyarmadde çözeltisinin hacmi (L)
R_b	: Giderilen RB222 miktarı (mg/L)
RB222	: Reaktif Blue 222

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitime başlamamda etkisi çok büyük olan, çalışmalarım boyunca gerek bilgi gerek motivasyon, her konuda desteğini gördüğüm çok kıymetli ve saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Züriye GÜNDÜZ'e teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarımı gerçekleştirebilmem adına desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, değerli bilgilerini benimle paylaşan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ahmet GÜNAY'a şükranlarımı sunuyorum ve teşekkür ediyorum. Güzel bir çalışma ortamında yardımlaşmanın, güler yüzle çalışmanın ne demek olduğunu öğreten bilgi ve desteklerini her zaman yılmadan gösteren çok değerli hocalarım Arş. Gör. Elif ÇALGAN, Arş. Gör. Yeliz SÜZEN ve Dr. Öğr. Üyesi Elif ÖZMETİN'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Elbette bu günlere gelmemde asıl emeği geçen ve başarılarımı borçlu olduğum canımdan değerli aileme teşekkür ediyorum. Ayrıca tez aşamam süresince yardım ve desteğini benden esirgemeyen her zaman yanımda hissettiğim değerli arkadaşım Fadime Songül ÖZÇELİK'e çok teşekkür ediyorum.

Balıkesir, 2020

Cansu Özmez

1. GİRİŞ

İlk çağlardan bu yana boyarmaddeler insanların yaşamında kullanılmıştır. Birçok boya ve boyarmaddeler eski zamanlarda doğadan elde edilmiştir. Genel olarak boyalar anorganik, boyarmaddeler ise organik formdadır. Günümüzdeki boyarmaddelerin büyük bir kısmı sentetiktir. Kağıt, boya, baskı ve tekstil endüstrilerinde sentetik boyalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan sentetik boyalar 100.000'in üzerindedir ve 700.000 ton boya üretilmektedir (Kapdan & Kargı, 2000).

En büyük organik bileşikleri oluşturan tekstil boya ve boyarmaddelerden kaynaklı oluşan tekstil atıksuları çevresel sorunlar meydana getirmektedir. Dünya genelinde boyaların yaklaşık %15'i boyama esnasında kaybolmakta ve tekstil atıksuyu olarak salınmaktadır (Ràfols & Barceló, 1997).

Endüstriyel işlemler sonucunda meydana gelen atıksular için alıcı ortama deşarj edilmeden önce Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde belirtilen standartlara getirilecek şekilde arıtım yapılmalıdır. İçerisinde çok düşük konsantrasyonda bile olsa boyarmadde bulunan tekstil atıksularının, arıtılmadan alıcı ortama deşarj edilmesi durumunda hem estetik hem de insan sağlığı açısından istenmeyen etkiler meydana gelir. Boyarmadde, güneş ışınlarını absorbe eder ve bunun sonucunda alıcı ortamdaki fotosentez olayına engel olarak ortamdaki çözünmüş oksijenin azalmasına neden olur. (Eyvaz, Kırlaroğlu, Aktaş, & Yüksel, 2009). Bu durum atıksuyun deşarj edildiği alıcı ortamdaki canlıların neslinin tükenmesine ve türlerinin mutasyona uğramasına sebep olmak ile birlikte suyun tekrar kullanımını da sınırlamaktadır. Ayrıca sucul canlılarda birikim oluşturarak toksik ve kanserojenik maddelerin meydana gelme riskini de çoğaltır (Özden, 2016).

1.1 Çalışmanın Önemi

Tekstil sanayisinde sentetik boyalar çok fazla kullanılmaktadır. Tekstil atıksuları, endüstriyel kirlilik açısından renk, sıcaklık, pH, yüksek KOİ ve toksik katı madde bulundurmakta ve toksik özelliği sebebiyle çevresel açıdan kritik sorunlar oluşturmaktadır. (Sangyong, Chulhwan, Tak-hyun, Jinwon, & Seung-Wook, 2003). Literatürde reaktif boyarmaddelerin sonokimyasal yöntemlerle arıtılması ile ilgili birçok araştırmacı farklı kombine prosesler tasarlamışlardır (Zhang, Duan, Zhang, & Wu, 2005) (Ge & Qu, 2004) (Voncina & Majcen-Le-Marechal, 2003) (Okitsu, Iwasaki, Yobiko, Bandow, Nishimura, & Maeda, 2005).

Bu çalışmada ilk önce RB222'nin (Reaktif Blue 222) sulu çözeltileri hazırlanarak elektrokoagülasyon ile giderimi incelenmiş ve daha sonra elektrokoagülasyon ile ultrases aynı anda ve kombine bir şekilde uygulanarak renk giderimi üzerindeki sonokimyasal etki çalışılmıştır.

1.2 Türkiye'de Tekstil Endüstrisi

Dünya'da olduğu gibi tekstil sanayisi, Türkiye'de de çok önemli bir sektördür. Giderek artan Dünya nüfusu tekstil sanayisini oldukça etkilemektedir. Doğal ihtiyaçlardan olan tekstil ürünleri günümüzde sadece bir ihtiyaç olmaktan çıkmış ve insanların giyime karşı duyduğu ilgi haline gelmiştir. Bu sebeple tekstil sanayisi hızla artmakta ve gelişmektedir.

Durmadan artan tekstil sanayisinde su kaynakları çok fazla kullanılmaktadır. Yer altı kaynaklarımızın hızla azaldığı göz önünde bulundurularak, tekstil sanayisinde oluşan yüksek hacimdeki atıksuların geri kazanılması büyük önem arz etmektedir.

Tekstil sektörü, imalat sanayisinin Türkiye'de ki değeri toplamının %8,8'ini ve bu imalat sanayide oluşmakta olan katma değerın %9,9'unu sağlamaktadır. ABD ve AB ülkelerine yapmakta olan ağırlıklı olarak ihracat amaçlı üretimle tekstil sektörü günümüzdeki seviyesine ulaşmıştır. AB ile 1996 yılında yapılan Gümrük Birliği Anlaşması ile AB ülkeleri ile bir sınır olmaksızın ihracat yapma imkanı sağlanmıştır. Tekstil sektörü, en yüksek dış ticaret fazlası veren sektör olup 2015 yılında dünya üzerinde tekstil ihracatından elde edilen %3,5 pay ile Türkiye ülkeler arası sıralama yapıldığında yedinci olmuştur. Türkiye'de tekstil ürünleri ve hazır giyim beraber değerlendirmeye alındığında GSYH'nin %10'undan fazlasını sağlamaktadır (Uyanık & Çelikel, 2019).

Türkiye'de yüksek oranda tekstil ürünü ihraç edilmesine rağmen bunları üretmek için kullanılan kimyasal maddeler ve makineler için ülkemiz dışa bağımlıdır. Bu dışa bağımlılığın en büyük sebepleri üretime yönelik yaklaşımlar ve Ar-Ge çalışmalarının yetersiz ve geç kalınmış olmasından kaynaklıdır (Uyanık & Çelikel, 2019).

Boyarmadde; pamuk, elyaf, yün, kumaş gibi maddelere kendi kendine ya da kimyasal tepkime yapacak malzemeler aracılığıyla çekim oluşturan, uygulanan ürünlere renk verebilen kimyasal maddelerdir. Boyarmadde olarak değerlendirebilmek için bir kimyasal maddenin;

- Elektronlarda rezonans sergilemesi
- Elektromanyetik spektrumun görünür bölgede absorplama/yansıtma özelliğini göstermesi

- Yapısında bir veya daha fazla kromofor grubu bulundurması (R.NO₂, N₂O, -N=N-, C=O, -C=O-, -C=S-)
- Çift bağlara sahip olması
- Oksokrom gruplarına sahip olması (-OH, -OCH₃, -SO₃H, -COOH, -NH₂, -NHR-NR₂) gerekmektedir (Yakartepe, 1997), (Ferda, 2006).

1.3 Tekstil Boyarmaddeleri

Tekstil boyarmaddeleri çözünürlüklerine, boyama özelliklerine ve kimyasal yapılarına göre boyarmaddeler olmak üzere üç ana başlıkta incelenebilir (Başer & İnanıcı, 1990).

1.3.1 Çözünürlüklerine Göre Boyarmaddeler

1.3.1.1 Suda Çözünen Boyarmaddeler

Boyarmadde molekülü yapısında tuz oluşturabilen en az bir grup bulundurur. Boyarmadde sentezinde kullanılan başlangıç maddelerinde eğer suda çözüldürücü bir grup bulunmuyorsa, bu çözüldürücü grubu boyarmadde molekülüne ekleyerek çözünürlük sağlanabilir. Ancak bu başlangıç maddelerinin iyonik grup içermesi tercih edilen yöntemdir. Suda çözünme özelliği olan boyar maddeler tuz bulunduran grubun karakterine göre üçe ayrılır,

- I. Anyonik suda çözünen boyarmaddeler
- II. Katyonik suda çözünen boyarmaddeler
- III. Zwitter iyon karakterli boyarmaddeler (Başer & İnanıcı, 1990).

1.3.1.2 Suda Çözünmeyen Boyarmaddeler

Tekstilde ve diğer alanlarda kullanılan ve suda çözünmeyen boyarmaddeleri çeşitli gruplara ayırmak mümkündür,

- ❖ Geçici çözünürlüğü olan boyarmaddeler
- ❖ Substratta çözünen boyarmaddeler
- ❖ Elyaf İçinde oluşturulan boyarmaddeler
- ❖ Organik çözücülerde çözünen boyarmaddeler
- ❖ Polikondensasyon boyarmaddeler
- ❖ Pigmentler (Başer & İnanıcı, 1990).

1.3.2 Boyama Özelliklerine Göre Boyarmaddeler

Boyama özelliklerine göre sınıflandırmada, boyarmaddenin kimyasal yapısına bakılmadan elyafı hangi yöntem ile boyadığına bakılır ve buna göre de boyama özelliğine göre bir sınıflandırma yapılır (Dikmen, 1998).

Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar madde sınıfları;

- I. Bazik (Katyonik) Boyarmaddeler
- II. Asit Boyarmaddeler
- III. Direkt Boyarmaddeler
- IV. Mordan Boyarmaddeler
- V. Reaktif Boyarmaddeler
- VI. Küpe Boyarmaddeler
- VII. Dispers Boyarmaddeler
- VIII. Sülfür Boyaları
- IX. Geliştirilmiş Boyarmaddeler
- X. Anilin Siyahı şeklinde sınıflandırılabilir.

Farklı tipteki boyarmaddelerin bileşimleri Tablo 1.1’de verilmektedir (Watanabe & and Ushiyama, 2000) (Birgül, 2006).

Tablo 1.1: Çeşitli tipteki boyarmaddelerin içerikleri.

Boya Tipi	Atksu İçerisindeki Bileşimi
Direkt Boya	Boya, mirabilite, tuz, sodyum karbonat, yüzey aktif madde
Reaktif Boya	Boya, sodyum hidroksit, sodyum fosfat, sodyum hidrokarbonat, mirabilite, üre, yüzey aktif madde
Asidik Boya	Boya, mirabilite, amonyum sülfat, asetik asit, sülfirik asit, yüzey aktif madde
Asidik Mordan Boya	Boya, asetik asit, mirabilite, sodyum bikromat, yüzey aktif madde
Metal Kompleks Tuz Boya	Boya, sülfirik asit, sodyum asetat, amonyum sülfat, mirabilite, yüzey aktif madde
Katyonik Boya	Boya, sodyum asetat, sodyum karbonat, amonyum asetat, yüzey aktif madde
Sülfür Boyaları	Boya, sodyum sülfid, sodyum asetat, mirabilite
Vat Boya	Boya, sodyum hidroksit, sodyum hidrosülfid, mirabilite, turkey kırmızı yağı
Naphtol Boya	Boya, sodyum hidroksit, hidroklorik asit, sodyum nitrit, sodyum asetat, yüzey aktif madde
Dispers Boya	Boya, taşıyıcı (çeşitli), hidrosülfid, yüzey aktif madde
Pigment	Pigment, amonyum, sodyum alginat, reçine, mineral yağlar

1.3.2.1 Bazik (Katyonik) Boyarmaddeler

Katyonik boyarmaddeler bazların hidroklorürleri ya da asetat tuzları şeklindedir. Renkli bölüm katyondur. N ve S atomlarını pozitif yük taşıyıcı olarak bulundurlar. Bazik etki yaptıklarından dolayı elyafın anyonik grupları, boyarmadde katyonuyla; elyaf-boyarmadde tuzunu oluşturur. Renk şiddetleri ve parlaklıkları bazik boyarmaddelerin en karakteristik özelliklerindedir. Genel olarak tannik asit ve asetik asit yardımıyla boyama işlemi yapılır. Polyakrilik elyafını 80-90°C' de hızlı bir biçimde boyarlar ve kumaştan ayrılmazlar (Dikmen, 1998).

1.3.2.2 Asit Boyarmaddeler

Asit boyarmaddelerin molekül yapısına bakıldığından bir veya birden fazla karbonil asit ve sülfonil grubu bulundurlar. Boyarmadde anyonu renkli bileşendir ve anyonik sınıfta yer alırlar. Özellikle protein ve poliamid elyafın boyanmasında kullanılırlar (Dikmen, 1998).

1.3.2.3 Direkt Boyarmaddeler

Direkt boyarmaddeler bazen korboksilli asitlerin ve genellikle de sülfonik asitlerin sodyum tuzlarıdır. Buradan anlaşılacağı gibi renkli bölümün oluşmasını sağlayan iyon anyon biçimindedir. Direkt boyarmaddelerin büyük bir kısmı azo-boyarmaddeler sınıfına girmektedir. Maliyetlerinin uygun olması, boyama işlemlerinin basit gerçekleşmesi ve boyama sırasında elyafı yıpratmaması özellikleri sebebiyle tercih edilirler. Genel olarak selülozik elyafın boyanmasında tercih edilirler. Bazıları ise deri, ipek, kağıt ve naylon boyamada kullanılırlar (Dikmen, 1998).

1.3.2.4 Mordan Boyarmaddeler

Bu boyarmaddeler bazik ya da asidik fonksiyonel gruplar içerirler. Hayvansal ve bitkisel elyaf ile kararsız bileşikler meydana getirirler. Al, Fe, Sn ve Cr tuzları ile boyama yapılmadan önce mordanlama yapılır. Bu işlem sonrasında krom bileşikleri katılarak boyama işlemi gerçekleştirilir (Dikmen, 1998).

1.3.2.5 Reaktif Boyarmaddeler

Kimyasal kovalent bağ ile elyafa bağlanan bu boyarmaddeler yün, selülozik elyaf, ipek, poliamid boyama işleminde kullanılırlar. Boyama yarı sürekli ya da sürekli yapılabilir (Dikmen, 1998).

1.3.2.6 Küpe Boyarmaddeler

Molekül yapılarında en az iki tane oksijen atomu bulunduran bileşiklerdir. Çok ince, ince ve iri toz halinde bulunabilirler. Küpe boyarmaddeler su içerisinde çözünmezler; ancak sodyum hidrosülfid ve hidroksit gibi indirgenlerin yardımıyla suda çözünebilen formdaki leuko bileşiklerine dönüşürler. Protein elyafın boyanmasında kullanılsa da daha çok selülozik elyafın boyanmasında kullanılır. Yıkamaya, ışığa ve sürtünmeye karşı dirençleri çok yüksektir (Dikmen, 1998).

1.3.2.7 Dispers Boyarmaddeler

Düşük molekül ağırlıklı, hidroksil ve amino gruplarını içeren bileşiklerdir. Denge halindeyken elyaf üzerine çekilmesi iyi fakat difüzyon yavaştır. Bu sebeple boyama süresi uzun olduğundan pratik değildir (Dikmen, 1998).

1.3.2.8 Sülfür Boyarmaddeler

Amino ve nitro gruplarını yapısında bulunduran amino bileşiklerin sodyum sülfid veya sülfür ile yüksek sıcaklıkta reaksiyona girmesi sonucu elde edilirler. Genellikle siyah, koyu mavi, kahverengi gibi koyu renkleri kullanılır (Dikmen, 1998).

1.3.2.9 Geliştirilmiş Boyarmaddeler

Geliştirilmiş boyarmaddeler pamuk ve poliamid elyafların boyama işleminde kullanılır. Işığa dirençleri az olsa da boyanmış elyafın çabuk yıkanması sebebiyle tercih edilirler (Dikmen, 1998).

1.3.2.10 Anilin Siyahı

Oksitleyici boya olan anilin siyahı, anilinin oksitlenmesiyle oluşur ve çözülmez bir pigmenttir. Pamuk ve poliamid elyafının boyama işleminde kullanılır. Yüksek parlaklık şiddetinden ve maliyet açısından ekonomik olması sebebiyle tercih edilir (Dikmen, 1998).

1.3.3 Kimyasal Yapılarına Göre Boyarmaddeler

Kimyasal yapılarına göre boyarmadde sınıflandırmasında molekül yapısı esas kabul edilebilirken molekülün renk verici ve kromojen özellikteki bölümü de esas alınabilir. Boyarmaddelerin pratik ve sentez uygulamalarının kimyasal sınıflandırması aşağıda verilmiştir.

- ❖ Azo boyarmaddeleri

- ❖ Polimetin boyarmaddeleri
- ❖ Karbonil boyarmaddeleri
- ❖ Nitro ve nitrozo boyarmaddeleri
- ❖ Arilmetin boyarmaddeleri
- ❖ Aza (18) annulen boyarmaddeleri
- ❖ Kükürt boyarmaddeleri (Başer & İnanıcı, 1990).

1.4 Tekstil Boyarmaddelerinin Giderim Yöntemleri

1.4.1 Biyolojik Yöntemler

1.4.1.1 Anaerobik Yöntem

Oksijensiz ortamda gerçekleşen biyolojik arıtma yöntemidir. Oksijensiz ortamda organik maddelerin karbondioksit, metan ve suya dönüştürüldüğü bir arıtım sürecidir. Aerobik ortamda parçalanması mümkün olmayan suda çözünebilen reaktif azo boyarmaddeler üzerinde anaerobik parçalanma çalışmalarına yoğunlaşmıştır. Çift bağlı azot halkasına bağlanan bu boyaların arıtılabilirliği aerobik proseslerle mümkün olmadığından anaerobik prosesin ön arıtma işlemi olarak kullanılmasını gerektirmektedir. Anaerobik sistemlerde renk gideriminin yapılabilmesi için karbon ilavesine ihtiyaç vardır (O'Neill, Hawkes, Hawkes, Esteves, & Wilcox, 2000). İlave edilen karbon karbondioksit ve metana dönüştürülürken elektron açığa çıkmaktadır. Bu elektronlar taşıma zincirinden azo reaktif boyaya taşınarak tepkimeye girmektedir ve azo bağına indirgemektedir. Böylelikle anaerobik parçalanma gerçekleşmiş olur ve azo boyarmaddesindeki rengi tutan azo bağı kırılarak renk giderilmektedir. Oksijen bu olaya engel olmaktadır. Bundan dolayı boya atıksularının rengini gidermek için ilk adım anaerobik şartlar altında azo köprüsünün indirgenerek parçalandığı bir arıtım olmalıdır (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

Anaerobik sistemlerin en büyük avantajlarından biri ise biyogaz üretimidir. Açığa çıkan biyogaz ısı ve güç kaynağı olarak tekrar kullanılarak enerji maliyetini düşürür. Anaerobik sistemin enerji gerektirmemesi, pek çok atıksu için uygulanabilir olması, fazladan enerji üretebilmesi, maliyetinin düşük olması ve düşük teknolojiyle çalışabilir olması gibi birçok avantajı vardır (O'Neill, Hawkes, Hawkes, Esteves, & Wilcox, 2000).

1.4.1.2 Aerobik Yöntem

Konvansiyonel aktif çamur sistemi olan aerobik yöntem, endüstriyel kaynaklı atıksuların arıtılmasında yaygın olarak kullanılır. Aktif çamur olarak adlandırılan sistem dengeleme, havalandırma, çöktürme ve son olarak dezenfeksiyon süreçlerinden oluşur. Aktif çamur, mikroorganizmaların havalandırma havuzunda askıda tutulması esasına dayanarak buradaki mikroorganizmalar ile kolloidal çözülmüş maddelerin çökebilir formdaki floklara dönüştürüldüğü bir süreçtir. Biyolojik arıtım ünitesinin çalışma prensibi, organik maddelerin havalandırma işlemi sonucu askıda mikroorganizmalar tarafından parçalanmasıdır. Tekstil endüstrisinde kullanılan bazı boya bileşikleri biyolojik olarak zor indirgenemekte veya inert kalmaktadır. Atıksuyun içerisinde iyi çözünen direkt, bazik ve azo boyarmaddelerinin bulunması durumunda mikroorganizmalar biyolojik olarak bu bileşikleri indirgeyememekte ve bir kısmını adsorbe ederek rengini almakta böylelikle atıksuyun renk giderimi sağlanabilmektedir (O'Neill, Hawkes, Hawkes, Esteves, & Wilcox, 2000). Sentetik boya olan azo boyar maddelerin aerobik şartlar altında mikrobiyal parçalanmaya karşı dirençli olmasının sebebi boya malzemelerinin, kimyasal ve ışıktan kaynaklı oksidatif etkiler sonucunda renklerinin solmasını engelleyecek şekilde oluşturulmalarıdır. Aerobik parçalanmayı zorlaştıran bir diğer faktör ise moleküler ağırlıklarının yüksekliği nedeniyle biyolojik hücre zarından boyarmaddelerin geçişlerinin zor olmasıdır (Kocaer & Alkan, 2002). Bunların yanı sıra boyarmaddelerin aerobik parçalanabileceğine ilişkin çalışmalar da bulunmaktadır (Coughlin, K, Tepper, & Bishop, 1997). Odunsu bitkilerin yapısında bulunan, yapısal polimer lignini parçalayabilen ve ksenobiyotik maddelerin parçalanmasını hedefleyen çalışmalarda çok yaygın olarak tercih edilen beyaz çürükçül küf *Phanerochaete chrysosporium*' un, manganzeze bağlı peroksidaz, lignin peroksidaz gibi enzimler yardımıyla boyarmaddeleri parçalayabilmektedir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001). Fakat beyaz küflerin, atıksularda bulunma olasılığı düşük olan veratril ve tiamin maddelerine ihtiyaç duyması ve ligninolitik enzimlerinin düşük pH değerlerinde (pH 4.5-5) aktif olması gibi dezavantajları mevcuttur (Kapdan & Kargı, 2000).

1.4.2 Fiziksel Yöntemler

1.4.2.1 Membran Filtrasyonu

Membranların, taşınmanın ve ayırmanın seçici bir şekilde gerçekleştirildiği yarı geçirgen bir bariyer olarak tanımı yapılabilir. Ayırma işlemi membranların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır ve bir veya birkaç sürücü kuvvet (kimyasal potansiyel farkı,

elektiriksel potansiyel farkı, basınç farkı, sıcaklık) ile gerçekleşmektedir. Ayırma işlemi membranlarda yük ayrımı, boyut ve şekile göre, gözeneksiz membranlarda sorpsiyon ve difüzyon modeline göre kontrol edilmektedir. Membran performansı akı ve seçicilik parametreleriyle belirlenir (Aslan, 2016). Membran filtrasyonu sayesinde boyanın konsantre hale getirilmesi, sürekli arıtılması ve daha da önemlisi atıksudan giderilmesi sağlanmaktadır. Negatif yüzeysel yükleri nedeniyle nanofiltrasyon membranları iyon seçicidirler. Yani tek valanslı anyonlara göre çok valanslı anyonlar daha sıkı tutulmaktadır. Membranların bu özelliğinden dolayı boya içeren atıksularda mevcut olan bazı kimyasal maddeler membran filtreden geçebilmektedir (Kocaer & Alkan, 2002). Diğer yöntemlerle kıyaslandığında bazı özelliklere sahiptir; sıcaklığa dayanıklıdır, mikrobiyal girişim ve olumsuz kimyasal ortam engellenmektedir. Bunun yanı sıra membran filtrasyonu, atık suyun tekrardan kullanılmasında önemli bir parametre olan çözünmüş katı maddeyi azaltmaz. Yöntemin dezavantajları ise arıtım sonrasında kalan konsantre kalıntıların bertaraf edilmesi, temizleme, tıkanma sorunu ve fazla maliyettir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001). Membran filtrasyonu ile gerçekleşen çalışmaların çıkış suyunda az miktarda boyarmadde barındıran tekstil endüstrilerinde atıksuyun tesise geri kazandırılabilirdiği gözlemlenmiştir (Rozzi, Antonelli, & Arcari, 1999).

1.4.2.2 İyon Değişimi

İyon değiştiriciler boya bulunduran atıksuların arıtımında çok yaygın olarak tercih edilmeyen bir arıtım yöntemidir. Bunun nedeni, iyon değiştiricilerle gerçekleştirilen giderimde iyi ve yüksek oranda verim sağlayabilecek boya sınıflarının sınırlı olmasıdır. Bu arıtım yönteminde, kullanılan değişim kolonları doygunluk seviyesine ulaşıncaya kadar atıksu iyon değiştirici reçinelerden geçirilir ve boyarmadde içerikli atıksuların anyonik ve katyonik içerikli boyaların arıtımı sağlanabilmektedir. İyon değişimi yönteminin avantajları, kullanım sonrasında solventin yeniden kazanılabilir olması, rejenerasyonda adsorban kaybının bulunmaması ve çözünebilir yapıdaki boyaların uzaklaştırılmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı ise yüksek maliyetli olmasıdır. Kullanılan organik çözücüler maliyet açısından bakıldığında pahalıdır ve dispers boyalar için iyon değiştirme yöntemi çok fazla etkili değildir (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

1.4.2.3 Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, boyarmaddeler gibi çözünmüş haldeki organik kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılmasında yüksek kalitede çıkış suyu sağlaması nedeniyle önem kazanmıştır

(Walker & Weatherley, 1997). Adsorpsiyon ile renk gideriminde en sık tercih edilen aktif karbon yöntemidir. Aktif karbon ile renk giderimi mordant, katyonik ve asit boyalar için fazlasıyla etkiliyken, direkt, dispers, pigment, vat ve reaktif boyalar için daha az etkilidir. Metodun verimliliği kullanılan karbonun tipine ve gelen atıksuyun karakteristiğine bağlıdır. Rejenerasyon ve yeniden kullanım adsorpsiyon performansında azalmaya neden olurken oluşan bu dezavantaj yüksek miktarda aktif karbon kullanımıyla giderilebilir. Fakat aktif karbon maliyeti yüksek bir malzemedir (Kocaer & Alkan, 2002). Atıksudan renk giderimi için doğal killer, pirinç kabukları, mısır koçanları gibi substratların kullanımı, kolay ulaşılabilirlik ve maliyet uygunluğundan dolayı avantajlıdır. Bu malzemeler rejenerasyona gerek kalmadan atıksu içerisindeki boyayı adsorplama potansiyeline sahip ve ucuzdur (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

1.4.3 Kimyasal Giderim Yöntemleri

1.4.3.1 Kimyasal Floklaştırma ve Çöktürme

Kimyasal çöktürme su ve atıksu arıtımında, yükseltgenme-indirgenme tepkimesi sonucunda, çözülmüş iyonların uzaklaştırılması amacıyla kullanılmaktadır (Peker, 2007).

Kimyasal olarak floklaştırma ve çöktürme olayları kimyasal madde takviyesi ile sağlanmaktadır. Bu kimyasalların reaksiyona girmesi sonucunda oluşan floklaşma ile kolloidler ve çözülmüş maddeler giderilir. En çok kireç, $FeCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeSO_4$ kimyasal olarak kullanılır. Kimyasal olarak yapılan çöktürme çalışmalarında ayarlanan kimyasal dozu ile renk giderimi sağlanmış olup kullanılan kimyasallardan alumun daha etkili olduğu belirlenmiştir. Kimyasal olarak yapılan çöktürme işleminde ilk yatırım maliyetinin yanı sıra işletme masrafları önemlidir. Floklaştırıcı maddeler ve proseste meydana gelen çamurun bertaraf edilmesi, işletme giderlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Kocaer & Alkan, 2002).

1.4.3.2 Oksidasyon

Kimyasal oksidasyon etkili bir renk giderim yöntemidir. Bunun en büyük sebebi ise uygulanabilirliğinin kolay oluşudur. Kimyasal oksidasyon sonucunda boya molekülünün yapısındaki aromatik halka kırılarak boyarmadde giderimi sağlanır. Hidrojen peroksit oksitleyici olarak kullanılır. Hidrojen peroksit UV ile aktif duruma getirilerek serbest OH radikallerinin oluşumunu sağlar. OH radikalleri ise organik maddeleri oksitleyerek parçalanmasını sağlar (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001). Özellikle çöktürme işlemi gerçekleştirildikten sonra oluşan atıksularda uygulanmaktadır. Atıksulardan

renk giderilmesi yöntemlerinden en çok uygulanmakta olan yöntemdir. Çünkü düşük miktarlarda etkilidir ve tepkime süreleri de oldukça kısadır. Bunlar boyayı önemli ölçüde parçayabilirler. Tam gerçekleşen bir boya oksidasyonu, teoride karmaşık bir yapıda olan molekülleri karbondioksit ve suya indirgeyebilmektedir. pH ve katalizörün de oksidasyon prosesinde önemli faktörler arasında olduğu göz ardı edilemez (Kocaer & Alkan, 2002).

Kimyasal oksidasyon için kullanılan oksidant maddeler: Hidrojen Peroksit (H_2O_2), Klor (Cl_2 , NaOCl), Oksijen (O_2), Ozon (O_3), Potasyum Bikromat ($K_2Cr_2O_7$), Potasyum Permanganat ($KMnO_4$) vb. gibidir (Samsunlu, 2011).

1.4.3.3 Ozonifikasyon

Kuvvetli oksitleyici özelliğinden dolayı ozon organik maddelerin toksik ve renk gideriminde kullanılır. Ozonifikasyonun en önemli avantajı; ozonun gaz durumunda uygulanabilmesi ve diğer bazı giderim yöntemlerinin aksine atık çamur meydana getirmemesidir. Dezavantajı ise kısa yarı ömürlüdür ve buna bağlı olarak ozonlamanın sürekli gerekli olması ve yüksek maliyetli olmasıdır (Robinson, McMullan, Marchant, & Nigam, 2001).

Suda çözünmeyen disperse boyalar haricinde ozonlama yöntemi ile bütün boyaların renk giderimi sağlanabilmektedir. Henüz herhangi bir işleme tabi tutulmamış tekstil atıksuyunun renk gideriminde ozonlama yöntemi kullanılarak yüksek verime ulaşamamaktadır. Bu nedenden dolayı ozonlama, arıtımın son aşamasında ya da kimyasal koagülasyon işleminin uygulanmasından sonra yapılırsa daha yüksek bir verim elde edilecektir. Ozonlama işlemi sonrası BOİ miktarı artarken KOİ çok fazla miktarda azalmaktadır (Mercimek, 2007). Ozonlama işlemi çıkış sularında uygulandıktan sonra suların yeniden kullanılması tesiste su tasarrufu sağlamakta olup ayrıca kimyasal madde sağlamaktadır. Bunun yanı sıra atıksu arıtım tesisinin yükünü hafifletmektedir. Ozon çok iyi bir yükseltgen madde olup, tekstil yaş proseslerinin oluşturduğu atıksuların barındırdığı taşıyıcılar ve yüzey aktif maddeler gibi çeşitli kirleticilerin gideriminde de kullanımı tercih edilmektedir (Kocaer & Alkan, 2002).

1.5 Elektrokimyasal Giderim Yöntemleri

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri 3 ana yöntemden oluşmaktadır. Bu arıtım sistemleri tek başına çalışabildiği gibi bazı elektrokimyasal proseslerle aynı anda kombine olarak da kullanılabilir (Chmielewski A. G., 1977).

1.5.1 Elektrokoksidasyon

Elektrokoksidasyon ile arıtma yönteminde Ti, Pt, Ru, paslanmaz çelik gibi çözünemeyen malzemelerden yapılmış elektrotların aracılığıyla ortaya çıkan gazlar (H₂ ve O₂) ile oksidasyonun sağlanması amaçlanmaktadır. Elektrokoksidasyon prosesi uygulandığında atıksu içerisinde bulunan birçok madde oksidasyona maruz kalırken biyolojik parçalanabilirliği zor olan bileşikler, biyolojik olarak kolay parçalanabilir organik bileşiklere ya da H₂O ve CO₂ gibi son ürünlere dönüşmektedir.

Bu proseste kullanılan anot elektrot, katot elektrota göre daha aktif olarak işlev gösterir. Bu sebeple prosesi etkileyen parametrelerin en üst sıralarında anot elektrodun katalitik aktivitesi gelmektedir. Bunun yanı sıra akım, pH, sıcaklık ve organik bileşikler ile diğer oksidantların difüzyon hızları da elektrokoksidasyonu etkileyen önemli parametrelerdendir. Eğer anot elektrot yeterli yüksek potansiyele sahip ise, eşitlik (1.1)'de verildiği gibi atıksuyun içerisinde barındırdığı klorür iyonları klora dönüşür veya organik bileşiklerin direkt olarak oksidasyonu gerçekleşerek ikincil tepkimeler de meydana gelebilir (İlhan, Kurt, Apaydın, Arslankaya, & Gönüllü, 2007).



Kuvvetli oksidant yapısı nedeniyle klor, bazı organik bileşikleri oksitleyebilmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda atıksu karakteriyle bağlantılı olarak farklılık göstermiş bile olsa bu proseste ortalama olarak %90 oranında KOİ giderimi sağlanabilmektedir.

Elektrokoksidasyon prosesiyle yapılmış çalışmalarda çoğunlukla Ti/Pt-Ir, Ti/Pt, Ti/RhOx-TiO₂, TiO₂/TiRuO₂, Ti/PdO-CO₃O₄, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD ve buna benzer anot elektrotların kullanılması tercih edilmiştir (Andrade, et al., 2007). Elektrokoksidasyon prosesi etkili bir giderim sağlaması ve oluşan çamur miktarının az olması nedeniyle elektrokimyasal arıtım yöntemleri arasında tercih edilen bir yöntemdir.

1.5.2 Elektroflotasyon

Elektroflotasyon, çözüldüden ayrılması istenen maddelerin, proses süresince reaktör içerisinde oluşturulan hidrojen ve oksijen gaz kabarcıklarının yardımıyla su yüzeyine taşınmasını sağlayan bir prosestir. Bu proses ilk olarak Elmore tarafından 1904 yılında cevherlerden, değerli minerallerin ayrılması amacıyla kullanılmıştır. Elektroflotasyon prosesinin başarılı olup olmadığı, atıksuda bulunan kirleticinin giderim verimi, enerji ve

kimyasal madde ihtiyacı ile belirlenmektedir. Üretilen kabarcıkların boyutu ve kirletici giderim verimi arasında kuvvetli bir bağ vardır. Elektroflotasyon prosesi, boyutları küçük olduğu halde yüksek dispersiyon kapasitesi olan gaz kabarcıklarına bağlı bir şekilde ilerler. Oluşan gaz kabarcıkları prosenin temel amacını oluşturmaktadır. Yüzey alanı ve elektrot cinsi ile birlikte kullanılan reaktör tipi ve akım yoğunluğu da önem taşıyan parametrelerdendir. Genellikle elektroflotasyon prosesinin işletme koşulları, elektrot tipi, pH, sıcaklık ve akım gibi parametreler üzerinde değişiklik yaparak gerekli olan optimum şartlar belirlenmektedir. Elektroflotasyon arıtım yöntemiyle atıksulardaki düşük yoğunluklu yağ ve emülsiyonlar gibi maddelerin haricinde atıksu içerisinde askıda bulunan katı maddelerin giderimi de yapılabilmektedir. Bazı tesislerde problemlere yol açan KOİ'nin bir miktarı da elektroflotasyon yöntemi ile giderilebilmektedir. Bu yöntem ile tekstil endüstrisi, kimya ve boya sanayi, metal kaplama sanayilerinin atıksu arıtımı sağlanabilmektedir (İlhan, Kurt, Apaydın, Arslankaya, & Gönüllü, 2007).

1.5.3 Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon, yağ atıkları, organik madde, gıda maddesi atıkları, asılı katı parçacıklar, boyalar, sentetik deterjan atığı, kimyasal ve mekanik cilalama atığı, maden atıkları, organik madde, ağır metal bulunduran çözeltiler gibi endüstri kaynaklı atıksuların arıtımında uygulanmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesine etkili olan temel işletim parametrelerini tanımlamak üzere deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu teknoloji atıksu arıtım verimini maksimum düzeye çıkarmak ve kullanılan elektrik enerjisini en aza indirmek için optimize edilir (Mollah, Schennach, Torres, & Cocke, 2001). Elektrokoagülasyon verimli ve etkili bir arıtım prosesidir. Diğer arıtım teknolojileri ile karşılaştırıldığında yatırım maliyeti yüksektir. Bu yöntem kullanım suyu, mayalı atıksu, besin ve protein atıksuyu, katran kumu atıksuyu, restoran atıksuyu, kentsel atıksu, nitrat barındıran atıksu çözeltileri ve arsenik barındıran atıksu arıtımında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Koby, Can, & Bayramoğlu, 2003). Elektrokoagülasyon prosesi kolay işletim, basit ekipman, kısa reaktif alıkonma süresi, hızlı bir şekilde çöken çamur miktarının azalması, ingirgenme ve ekipman için ilave bir kimyasal kullanılmaması gibi özelliklere sahiptir (Koby, Bayramoğlu, & Eyvaz, 2007).

Elektrokoagülasyon prosesinde:

- Ekipman basit yapıdadır ve işletimi kolaydır.
- İşlem yapılan atıksu renksiz, berrak ve kokusuzdur.

- Az miktarda çamur üreten bir sistemdir ve oluşan çamur süzülerek kolaylıkla ayrılabilir.
- Oluşan yığınlar kimyasal yığınlara benzese de elektrokoagülasyonun oluşturduğu yığınlar daha büyüktür ve daha az bağlanmış su içerir, asit dirençli ve kararlıdır. Filtrasyon yardımıyla hızla ayrılır. Kimyasal arıtıma oranla daha az çözünmüş katı madde içeren sıvı atık üretir. Suyun tekrar kullanımı durumunda çözünmüş katı maddesi daha az oranda olduğundan tekrar kazanım maliyeti uygun olur.
- Küçük kolloidal taneciklerin giderilmesinde avantajlıdır. Uygulama yapılan elektrik alanı küçük parçacıkları hızlandırır ve koagüle olmalarını kolaylaştırır.
- İlave kimyasal gerektirmez. Böylelikle ayrı bir kimyasal nötralizasyonu yoktur ve ikinci bir kirlenmeye sebep olmaz.
- Elektroliz esnasında meydana gelen gaz kabarcıkları, giderilmek istenen kirleticiyi çözeltinin yüzeyine taşır ve böylelikle kirleticiler kolaylıkla toplanıp uzaklaştırılır.
- Hücrede bulunan elektrolitik prosesler hareketli parçaya gerek duymadan elektriksel olarak kontrol edilir.
- Elektriğin olmadığı yerlerde de kullanılabilir. Güneş paneli bu prosesi çalıştırmak için yeterlidir (Mollah, Schennach, Torres, & Cocke, 2001).

Elektrokoagülasyonun Temel İlkeleri

Elektrokoagülasyon prosesi birbirini takip eden üç aşamadan oluşur (Mollah, Schennach, Torres, & Cocke, 2001).

- I. Anodun (kurban elektrot) elektrolitik okside olmasıyla koagülantların oluşumu
- II. Kirleticiler maddelerin destabilizasyonu, emülsiyonların kırılması ve partikül süspansiyonu
- III. Destabil fazların agregasyonu ile grupların oluşması

Kirleticilerin destabilizasyonu, emülsiyonların kırılması ve partikül süspansiyonu aşağıdaki biçimde açıklanabilir:

1. Çözelti üzerinden akım geçirilmesiyle anodun çözünmesi ve iyonların etkileşmesiyle oluşan yüklü türlerin çevresinde oluşan çift katman difüzyonu.
2. Atıksu içerisinde mevcut olan iyonik türdeki maddelerin yük nötralizasyonu. Nötralizasyon anodun elektrokimyasal olarak çözünmesiyle zıt yüklü iyonların oluşmasının sonucudur. Zıt yüklü iyonlar, partiküllerin arasındaki elektrostatik itmeyle azaltılır. Van der Waals kuvvetleri sonucunda koagülasyon meydana gelir. Prosesin net yükü sıfır ile sonuçlanır.

3. Koagülasyon sonucunda floklar oluşur. Karmaşık olmayan kolloidal partiküllerin birbirine bağlanmasıyla çamur yatağı oluşturulur.
4. Koagülasyon, kolloidal süspansiyon içerisinde bulunan yüklü parçacıkların çöktürülmesi işlemidir. Zıt iyonlar çarpışarak nötralleşir ve çöker. Koagülasyon, daha önceden elektrostatik itme kuvvetiyle stabil hale getirilmiş kolloidal parçacıkların net yüzey yüklerinin indirgenmesiyle, gerektiği kadar Van der Waals kuvveti ile birlikte tutulması ve çökme olayına engel olmaması olarak kabul edilmektedir. Yüzey yükü indirgenmesi, elektriksel çift katmanın itici potansiyelinin zıt yüklü elektrolitin varlığı ile düşürülmesidir. Elektrokogülasyon prosesindeki koagülant uygun anot malzemesinin elektrolitik oksidasyonu sayesinde oluşturulur. Elektrokoagülasyon prosesinde, iyonik yüklü türler atıksudan zıt yüke sahip iyonlarla reaksiyona girerek oluşan metal hidroksitlerin floklaşması ile atıksudan uzaklaştırılır. Bu metaller, partikülleri, kolloidal katıları ve çözünür inorganik kirleticileri yüksek yüklü polimerik metal hidroksite çevirerek sulu ortamdan uzaklaştırır. Bu türler askıda katılar ve yağ damlaları üzerindeki elektrostatik yükleri nötralleştirir, koagülasyonun ayrılmasını ve yığılmasını kolaylaştırır. Bu arıtım metallerin ve bazı tuzların çökmesiyle sonuçlanır.
5. Elektrokogülasyon yapılacak reaktör, harici bir güç kaynağına bağlanırsa anot okside olup elektrokimyasal olarak aşınırken, katot pasivasyona uğramaktadır. Ancak bu değişim atıksuların arıtımı için uygun değildir. Çünkü geniş yüzey alanında bu proses elektrota ihtiyaç duyacaktır. Bu sorun, monopolar yapıdaki elektrotların seri ve paralel olarak bağlanıp hücrede kullanılması ile çözülebilir. Hücrede bir çift katot ve bir çift anot paralel olarak bağlanır. Anotlar mevcut olan çözünme potansiyelini düşürür ve katotun pasivasyonunu en az seviyeye indirir. Anotlar (kurban elektrotlar) aynı veya değişik malzemelerden yapılabilir.
6. Monopolar seri bağlı elektrokogülasyon reaktöründe kullanılan her çift anot birbiriyle içten bağlı olup, dış elektrotlarla bağlantısı bulunmamaktadır. Seri bağlı hücrelerde direnç yüksek olduğundan sisteme verilen akım için yüksek potansiyel farkına gereksinim duyulur. Paralel bağlı da ise elektrik akımı, hücrelerin dirençleriyle orantılı olarak bütün elektrotlara bölünür. Paralel hücrelerde bipolar yapıdaki elektrotlar kullanılır ve bu durumda anotlar paralel haldeki iki elektrotun arasına yerleştirilir. Yalnızca monopolar elektrot güç kaynağına bağlanır ve kullanılan anotlar arasında bir iç bağlantı bulunmaz. Bu hücrelerin düzenlenmesi kolay kurulum sağlamak ve kullanım esnasında bakımı kolaylaştırmaktadır.

7. Bipolar paralel bağı elektrokoagülasyon reaktöründen geçen elektrik akımı iki elektrot arasında olduğunda iletken plakaların nötr kısımları yüklü kısma dönüşür. Bu yüklü kısım paralel kısımdaki zıt yüke sahiptir. Anot elektrotlar bu durumda bipolar elektrotlardır. Böylelikle elektroliz esnasında pozitif yüklü taraf anodik reaksiyona uğrarken negatif yüklü taraf katodik reaksiyona uğrar (Mollah, Schennach, Torres, & Cocke, 2001).

1.5.3.1 Elektrokoagülasyonu Etkileyen Faktörler

- Akım Yoğunluğu
- pH
- Sıcaklık
- Elektrot Malzemesi
- Elektrotlar Arası Mesafe
- Elektrot Türü
- Arıtım Süresi

Akım Yoğunluğu

Elektrokoagülasyon prosesinde sadece ortamda çözülmüş elektrot miktarı değil bununla beraber elektrokoagülasyonun renk giderim verimini etkileyecek gaz kabarcıklarının meydana gelme hızı, oluşan flokların boyutu ve büyüklükleri de akım yoğunluğuyla bağlantılıdır. Akım yoğunluğu artarken gaz kabarcıklarının yoğunluğunu artırıp, boyutunu da azaltmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda üstlere doğru daha büyük bir akış, daha hızlı bir kirletici giderimi ve çamur flotasyonu gözlenir. Faraday Yasası; elektrokoagülasyon prosesinde anotun çözünüp çözeltiye iyonlarının geçişini ifade eder (Mollah, Morkovsky, Gomes, Kesmez, Parga, & Cocke, 2004).

Bütün elektrokimyasal prosesler Faraday Kanunları ile açıklanabilmektedir. 1.Faraday Yasası'na göre uygulanan akım ile kullanılan elektrotlardan koparılan metal miktarı doğru orantılıdır. Akım, metal iyonlarıyla bağlantılı olarak koagülant üretim hızını, gerçekleşen reaksiyon hızını ve üretilen gaz kabarcıklarının boyutunu belirlemektedir. Böylece elektrokoagülasyonun renk giderim verimi üzerinde doğrudan etkili olmakta, prosesin gidişatını yönlendirmektedir. Ancak akım arttığında, enerji tüketimi ve bununla beraber arıtım maliyeti artmaktadır. Bu sebeple her bir elektrokoagülasyon sistemi için en uygun

şartlardaki akım ya da bu akım ve anotların toplam alanına göre hesaplanan akım yoğunluğunu belirlemek önem kazanmaktadır (Yılmaz, Boncukcuoğlu, Kocakerim, & Keskinler, 2005).

pH

Elektrokoagülasyon prosesinde reaksiyon süresi boyunca elektrokimyasal ortamın pH'ı değişir. pH, proseste kullanılan elektrotların cinsine ve ortamın başlangıç pH'ına bağlı olarak değişir. Geniş pH aralıklarında oldukça yüksek verimin elde edildiği bazı çalışmalar literatürde verilmektedir. Bu bakımdan başlangıç pH'ının ayarlanması elektrokoagülasyonda bir ön koşul olarak kabul edilmemektedir. (Koby M. , Can, Demirbaş, & Bayramoğlu, 2006). Ayrıca yapılan bazı diğer çalışmalarda uygun pH değerlerinin belirlenebilmesi ve planlanan giderimin sağlanması amaçlandığından başlangıç pH değerinin düzenlenmesi gerekir (Koby M. , Can, Demirbaş, & Bayramoğlu, 2006). Bazı çalışmalarda başlangıç pH'ı önemli bir parametre olarak kabul edilip, yüksek verim elde etmek için belli bir değere ayarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bazılarında ise oldukça geniş bir pH aralığının elektrokoagülasyon için başlangıç pH'ı olarak ayarlanabildiği ve prosesin yüksek verimle sonuçlandığı görülmüştür (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi, & Tizpar, 2003). Başlangıç pH'ı, elektrokoagülasyon işlemi sırasında oluşan metal hidroksitlerinin çözünürlüğünü belirleyici bir parametredir (Vardar, 2006). Elektrot olarak alüminyumun tercih edildiği proseslerde başlangıç sırasında pH 8'den küçük ise çıkış suyunun pH'ı başlangıç pH değerinden daha fazla, pH değeri 8'den büyük olduğunda ise sistemin çıkış suyunun pH'ı başlangıçtaki pH değerinden daha küçük değerlere ulaşmaktadır. Proseste demir elektrot tercih edilir ise çıkış suyunun pH değeri her koşulda başlangıçtaki pH değerinden daha büyük değere ulaşır. Elektrokoagülasyon prosesi için bu sonuçlara bakılarak alkali ortamlarda belirli oranda tamponlama kapasitesi olduğu görülmektedir. Ulaşılan bu sonuç, elektrokoagülasyon prosesinin sağladığı avantajlardan biri olarak görülmüştür (Daneshvar, Ashassi-Sorkhabi, & Tizpar, 2003).

Elektrokoagülasyonda verimi artırmak, atıksuyun iletkenliğini istenen düzeye getirebilmek adına sodyum sülfat gibi inert tuzların yanı sıra sodyum nitrat, potasyum bromür ve sodyum klorür gibi halojenli tuzlar da kullanılmaktadır. Klorür, ortamda mevcut olan HCO_3^- , SO_4^{2-} gibi anyonların olumsuz etkilerini en aza indirmektedir. Karbonat ve sülfat iyonları, elektrotların yüzeyinde izole bir tabaka oluşturacak biçimde kalsiyum (Ca^{2+}) veya magnezyum (Mg^{2+}) iyonlarının çökmesine sebep olmaktadır. Oluşan bu izole tabaka elektrotlar arasındaki potansiyeli artırır ve akım verimini azaltır. Arıtımda

elektrokoagülasyon prosesinin verimli bir biçimde işletilebilmesi için ortamdaki anyonların %20'sinin klorür iyonu olması tavsiye edilmektedir (Chen, 2004) .

Sıcaklık

Bütün kimyasal proseslerde olduğu gibi elektrokoagülasyon prosesinde de sıcaklığın artması reaksiyon hızını arttırmaktadır. Fakat sıcaklığın çok yüksek derecelere ulaşması sonucu iyon hareketinin artması yumak ve metal hidroksit floklarının yeniden çözünmesine bağlı olarak da verimin azalmasına sebep olmaktadır (Türkoğlu, 2007).

Akım veriminin sıcaklığı 60°C'ye kadar artırması elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit filmin bozunmasıyla artmakta olan aktiviteye bağlanmaktadır. Sıcaklığın çok daha fazla sıcaklıklara ulaşması elektrotların yüzeyinde birikmeye daha elverişli olan flokların oluşmasına yol açmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte iletkenlik de artmaktadır dolayısıyla enerji tüketimi de azalmaktadır (Chen, 2004).

Elektrot Malzemesi

Elektrokoagülasyon prosesinde elektrot tipi sonucu etkileyen en önemli parametrelerdendir. Elektrokimyasal arıtımın türünü belirler ve atıksudaki kirleticilerin giderim verimini de direkt etkilediği görülür. Elektrot tipinin önemli olmasının sebebi farklı tür prosesler için farklı oluşumlar gerçekleşmesidir. Örneklendirilecek olursa; elektrokoagülasyon işlemi için seçilen elektrot türleri akım ile beraber ortamda çözünür, ancak elektrokoagülasyonda OH⁻ radikalleri oluşturulup herhangi bir çözünme gerçekleşmez. Elektrokoagülasyon yöntemi için genel olarak alüminyum ve demir elektrotlar kullanılır, fakat elektrooksidasyon yönteminden bunların yerine platin, titan, rutenyum vb. elektrotlar kullanılır (Chen, 2004).

Elektrotlar Arası Mesafe

Elektrotlar arasında bulunan mesafe arttıkça ohmik potansiyel düşüşü artmaktadır. Bu sebeple, elektrotlar arası boşluk azaltılarak enerji tüketimi düşürülebilir. Elektrotlar arası mesafe azaltıldıkça, elektrokimyasal olarak üretilen gaz kabarcıkları daha fazla türbülanslı hidrodinamik oluşturur, bu pıhtılaştırıcılar ve kirleticiler arasında yüksek kütle transferinin yanında yüksek reaksiyon hızına da yol açar. Buna ek olarak elektrotlar arasındaki mesafe, sürekli sistemler için anot ve katodun arasında kalma süresini ve kesikli reaktörler için istenilen elektrokoagülasyon verimine ulaşabilmek için arıtım süresini tanımlar. Karmaşık düzenlenecek elektrotlar için elektrolar arasındaki mesafe, reaktör hacmi belirlendikten sonra, elektrokoagülasyon ünitesine yerleştirilecek elektrot sayısını belirler (Martínez-Villafañe, Montero-Ocampo, & García-Lara, 2009).

Elektrotlar arasındaki mesafenin, elektrokoagülasyonun giderim verimine etkisi, diğer parametreler göz önünde bulundurulduğunda ihmal edilebilecek düzeydedir. Elektrotlar arasındaki mesafeyi arttırmak potansiyel farkı da artıracığından elektrik tüketimini de arttırır. Elektrotlar arasındaki mesafenin ne çok ne de çok fazla olması istenmeyen bir durumdur. Optimum mesafenin ayarlanması ile elektrokoagülasyon prosesinin beklenen performansta çalışması sağlanmaktadır. Elektrotlar birbirlerine çok yakın olduklarında flokların oluşum hızı ve adsorplama özelliği azalmaktadır. Çok uzak olduklarında ise potansiyel fark artacağından elektrokoagülasyon prosesinin ekonomik bir yöntem olmasından bahsedilemez (Aygün, 2012).

Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu

Elektrot tüketimini, arıtma verimini, elektrik sarfiyatını etkileyen en önemli faktörlerden biri de elektrolit türü ve konsantrasyonudur. Elektrokoagülasyon prosesinde iletkenliği sağlamak amacıyla genel olarak NaCl ve Na₂SO₄ kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra KCl, NaNO₃, K₂SO₄ ilavesi ile de iletkenlik sağlanabilmektedir (İrdemez, Yıldız, & Tosunoğlu, 2006).

Elektrolit olarak potasyum klorür kullanıldığında boyarmadde molekülleri çok hızlı biçimde parçalanabilmektedir. Ancak hipoklorit nedeniyle gerçekleşen reaksiyonda klorlu organik bileşiklerin yan ürün formunda meydana gelme ihtimali oluşmaktadır. Bu yan ürünlerin oluşması proste istenmeyen bir olay olup bu oluşumu engelleyebilmek adına organik bileşiklerin tamamının mineralizasyonu sağlanmalı ve mineralizasyonun tamamlanması için uygun elektroliz süresi gerekir. İndigo boyalarının atıksulardan gideriminde sodyum sülfat, sodyum nitrat ve mangan sülfat gibi inert tuzlar kullanıldığında renk giderim verimi düşük ve çok yüksek miktarda enerji tüketimi olacağından tercih edilmemektedir (Fernandes, Morão, Magrinho, Lopes, & Gonçalves, 2004), (Cameselle, Pazos, & Sanromán, 2005).

İyonikliğin elektrolit ilavesi ile artırılması sonucunda, hücre potansiyel farkı korunduğundan daha yüksek akım yoğunluğu oluşmaktadır, bunun ile beraber akım yoğunluğu sabitlendiğinde ise hücre potansiyel farkında azalma görülür. Elektrokoagülasyon prosesinde metal iyonlarının çözünen miktarı akım yoğunluğu ile kontrol edilebilmektedir. Elektrolit ilavesi yapıp istenen akım yoğunluğu sabitlendiğinde daha düşük potansiyel fark elde edilecektir. Dolayısıyla elektrik tüketiminde azalma olmaktadır. Elektrolit konsantrasyonunun düşük olması durumunda, akım oluşturmak için iyonların yeterli teması sağlanamamaktadır. Bu durum su ve atıksuyun direncini arttırmaktadır ve proses verimini düşürmektedir. Bununla beraber yüksek tuz

konsantrasyonu ortamın iyonik kuvvetini artırır. Elektrokoagülasyon prosesinde oluşan yüklü iyonlarla olan reaksiyon kinetiği ve denge reaksiyonları iyonik kuvvet tarafından etkilenmektedir. Bu durum da elektrokoagülasyon prosesinin verimini olumsuz yönde etkiler (Song, Yao, He, Qiu, & Chen, 2008).

Na₂SO₄ elektrolit olarak kullanılabilir fakat, NaCl kullanıldığında daha iyi bir renk ve organik madde giderimi elde edilebilir (Vardar, 2006). Bunun yanı sıra NaCl tekstil endüstrilerinde boyama işleme esnasında kullanıldığından dolayı tekstil endüstrisinden kaynaklı atıksularda zaten bulunan bir elektrolittir. NaCl genel olarak arıtım yapılacak olan atıksuyun iletkenliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik yükünü iyi iletebilmesi haricinde HCO³⁻, SO₄²⁻ gibi anyonların meydana getirdiği olumsuz etkileri de önemli ölçüde azaltmaktadır. Buna ilaveten elektrokimyasal yöntemle oluşturulan klor dezenfeksiyonu olayını da gerçekleştirmektedir (Chen, 2004), (Cameselle, Pazos, & Sanromán, 2005).

Elektrolit olarak NaCl kullanılırsa, elektrokoagülasyon prosesinde işlem boyunca aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelir.



Asidik pH değerlerinde daha kuvvetli bir oksidan olan HOCl oluşmaktadır. Nötr veya düşük alkali pH değerlerinde ise OCl⁻ baskın tür oluşur. Aşırı yüksek pH değerlerinde (pH>11) OCl₃⁻ ve OCl₄⁻ oluşumu gerçekleşir ve oksidasyon gücünde azalma meydana gelir. NaCl elektrokoagülasyon prosesi için gerekli olan akımı sağlamak amacıyla ihtiyaç duyulan iletkenliği artırmakla beraber ortam şartları asidik olduğunda oksidan oluşumuna sebep olmaktadır. Bu oksidan oluşumu sebebiyle proseste hem koagülasyon hem de oksidasyon-redüksiyon mekanizmalarının her ikisi de organik madde gideriminde aktif olarak rol alır. Ancak oksidasyon mekanizmasının aktif olabilmesi için elektrokoagülasyon prosesinin pH'ı 11'den küçük değerlerde işletilmesi gerekir (Vardar, 2006).

Arıtım Süresi

Bütün arıtım proseslerinde olduğu gibi arıtım süresi elektrokoagülasyon prosesinde de önemli parametrelerdendir. Eğer arıtım prosesi süresinin optimizasyonu sağlanmazsa,

olması gerekenden az bir süre elektrokoagülasyon işlemi uygulandığında istenen verime ulaşamaz ve uzun süreli arıtım işlemlerinde maliyet yönünden, çamur ve köpük oluşumu açısından uygun olmaz (Chen, 2004).

1.6 Ultrases

Ultrasesin geçmişi röntgen ışınlarının on iki yıl öncesine dayanmaktadır. Ultrases ile alakalı ilk çalışmalar 1920'li yıllarda başlamış ve günümüze kadar gelmiştir. Ultrases doğada uygun enerjiye bağlı olarak üretilip, ekolu bir biçimde yarası, yunus balığı gibi hayvanlar tarafından da kullanılmaktadır. Bu konudaki ilk çalışmalar biyolojik sistemler üzerinde Wood ve Looms'a aittir. Ultrases mevcut olan özellikleri sebebiyle birçok alanda kullanılmaktadır (Büyüktanır, 2010).

1.6.1 Ses ve Ultrases Nedir?

Denge durumunda olan bir ortamda taneciklerin mekanik titreşimlerine ses adı verilir. Ses üretebilen herhangi bir sisteme ses kaynağı, ses verirken ses kaynaklarının yaptığı hareketlere ses titreşimleri, bu hareketlerin tam bir titreşim süresine ses titreşim periyodu ve saniyede yaptığı devir sayısına ise sesin frekansı adı verilir. Ses titreşim hareketinden oluşur. Ancak her titreşim hareketi kesinlikle bir ses oluşturmaz. 20-20.000 Hz aralığındaki dalgasal enerjiyi insan kulağı ses olarak algılamaktadır. Elektromanyetik dalgalar boşlukta iletilebilirken bunun aksine ses dalgaları boşlukta iletilemez. Ses dalgaları yalnızca moleküler ortamlarda iletilebilmektedir. Sesin yayılabilirliği ile ortamların sıkışabilirliği ters orantılıdır. Bu sebeple gaz ortamlarda ses hızı en yavaş, katı ortamlarda ise en hızlıdır. Ayrıca ses hızı sıvı ve gazlarda sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Havadaki ses hızı ortalama olarak 331 m/s'dir (Halliday & Resnick, 1992), (Büyüktanır, 2010).

Ses dalgaları 3 temel başlıkta sınıflandırılabilir:

İşitilebilir dalgalar: İnsan kulağının duyarlı olduğu sınır içerisinde bulunan ses dalgalarıdır. 20-20.000 Hz frekansları aralığındadır.

Ses altı dalgalar (infrasonic) dalgalar: İşitilebilir seviyenin altındaki frekanslarda boyuna dalgalarıdır. Bu dalgalara örnek olarak deprem dalgaları verilebilir.

Ses ötesi dalgalar (Ultrasonic) dalgalar: İşitilebilir seviyenin üstünde frekansları olan boyuna ses dalgalarıdır. Bu dalgalara örnek verilecek olursa, kuartz kristaline uygulanacak alternatif elektrik alanı ile elde edilebilirler. Bu yöntem ile 6×10^8 Hz (=600 MHz) gibi yüksek ultrasonik frekansları elde etmek mümkündür. Hava ortamı içerisinde bu frekansa denk olan dalga boyu 5×10^{-5} cm'dir. Görünür ışık dalgalarının boyu ile bu değer aynı büyüklüktedir (Halliday & Resnick, 1992).

Geniş bir frekans aralığı bulunan ultrases kullanım şekline bağlı olarak düşük genlikli (yüksek frekans) ses ve yüksek genlikli (düşük frekans) ses olarak iki gruba ayrılabilir. Düşük genlikli ses, ortamdaki dalgaların fiziksel değişimleri üzerinde etkilidir, düşük genlikli veya yüksek frekanslı ultrases olarak adlandırılır. Bu dalgalar 2-10 MHz aralığındadır. Akışkanın hareketi nedeniyle kimyasal uygulamalarda karıştırma işlemlerinde kullanılır ve akustik karıştırıcı olarak bilinmektedir. Yüksek genlikli ses ise “power ultrasound” olarak bilinmekte ve 20-100 kHz aralığındadır. Temizleme ve sonokimya alanlarında yüksek genlikli dalgalar kullanılmaktadır (Mamadiev & Yılmaz, 2011).

1.6.2 Ultrasesin Kullanım Alanları

Ultrasesin endüstrisindeki uygulama alanlarını başlıca üç grup altında toplanabilmektedir:

- ***Sıvı ortamdaki uygulamaları*** (Thompson & Doraiswamy, 1999).
 - Temizleme
 - Katı maddelerin ayrıştırılması
 - Lehimleme
 - Sterilize etme
 - Zımparalama
 - Filtreleme
 - Aşındırma testi
 - Atomizasyon
 - Hücre ayrımı
 - Kristal büyümesi
 - Bitkilerden çıkarma
 - Eritme kristalleşmesi
 - Emülsiyonlaştırma
 - Gaz alma
- ***Katı ortamdaki uygulamaları*** (Thompson & Doraiswamy, 1999).
 - Plastik kaynak
 - Metal kesme

- Metal kaynatma
 - Dayanıklılık testi
 - Metal formlandırılması
 - Sert, zayıf malzemelerin işlenmesi
- *Hava ortamındaki uygulamaları* (Thompson & Doraiswamy, 1999).
- Pıhtılaşma
 - Köpük giderme Kurutma

1.6.3 Ultrasesin Kimyasal Tepkimeler Üzerindeki Etkileri

Ultrases dalgalarının uygulandığı tepkimelere “Sonokimyasal Tepkimeler” adı verilmektedir. Sonokimyanın amacı, ultrases dalgaları kullanılarak kimyasal tepkimelerin gerçekleştirildiği koşulların iyileştirilmesi, tepkime mekanizmasının değiştirilmesi ve tepkimeyi hızlandıracak olan radikal oluşumunu arttırmaktır. Ultrases dalgalarının gerçekleşen kimyasal tepkimelere etkisi çok fazladır. Bu etkileri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

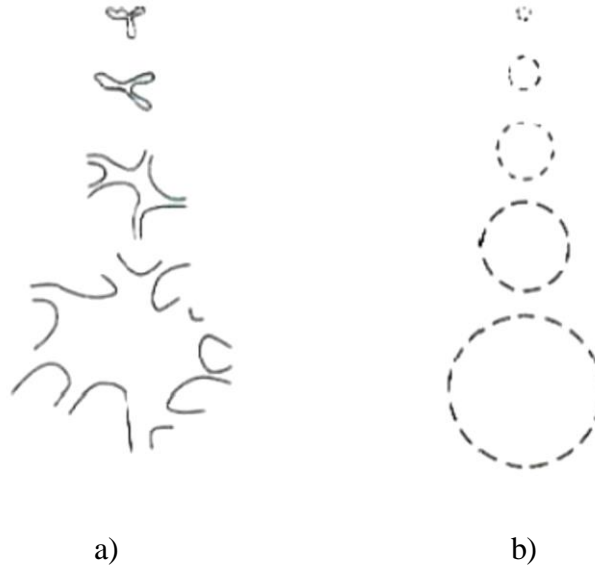
- Tepkime hızını artırır.
- Serbest radikal oluşumunu sağlayarak başlatıcı veya katalizör olarak görev yapar.
- Mekanik etkileri sayesinde yüzey alanını artırarak, kütle aktarımını hızlandırır.
- Yan ürünlerin oluşmasını engeller.
- Tepkimenin verimini arttırmakla birlikte tepkime süresini kısaltır.
- Tepkime yol izini değiştirir.
- Yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleşen tepkimenin koşullarını değiştirerek, elverişli koşullarda gerçekleşmesini sağlayabilmektedir (Suslick, 1988).

1.6.4 Ultrases Prosesi ve Kaviteasyon

Sıvıların özellikle suyun, yüksek frekansta çok iyi karıştırılarak, çok kuvvetli kimyasal reaksiyonlar üretilip fiziksel işlemleri gerçekleştirmek için çok yüksek bir sesle tahrip edilmesi olayına ultrases prosesi denir. Milisaniye gibi çok dar zaman aralığında mikrokabarcıkların oluşup, büyüyüp, parçalanmasıyla büyük bir enerji açığa çıkarması kaviteasyon olarak tanımlanır (Gogate & Pandit, 2004). Kaviteasyon aynı zamanda soğuk kaynama olarak da tanımlanmaktadır (Edecan, 2006). Ultrases dalgalarının mekanik ve

kimyasal etkilerini kavitasyon kabarcıkları meydana getirmektedir. Kavitasyon kabarcıklarının genleşme esnasında büyümeleri, büzüşme esnasındaki daralmalarıyla karşılaştırıldığında daha fazladır. Bu durum sıvı fazda meydana gelen kabarcıkların gaz ya da buhar formda eşit olmayan dağılımına bağlıdır. Sıvı fazda bulunan bu kabarcıklar içerisinde yüksek sıcaklık ve basınç oluşmaktadır (Suslick, 1990).

Kavitasyon olayı; pervanelerin aşınması sonucu bu aşınmanın sebepleri araştırılırken keşfedilen bir olaydır. Ani dalgalanmalar birbirleri ile çarpıştıklarında, daha fazla miktarda buhar kabarcığının oluşması ve daha fazla kavitasyonun oluşmasına neden olabilmektedir. Yani negatif basınç uygulandığında mikrokabarcıkların ürünü kavitasyon olayıdır.



Şekil 1.1: Kavitasyon balonlarının davranışları

a)negatif basınç yüklü, yüksek genlikli kabarcık, b) pozitif basınç yüklü, düşük genlikli kabarcık.

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere, basınç sıvı fazın buhar basıncının altına düştüğü zaman baloncuklar oluşur ve basınç dalgalarına paralel olarak kavitasyon olayı ortaya çıkar (Mason, Lorimer, Plattes, & Phull, 2000), (Patist & Bates, 2008), (T.G.Leighton, 1998). Yüksek güçte, düşük frekansta ultrases enerjisi kullanılarak, akustik karıştırıcı etkisi ile oluşturulan kavitasyon sayesinde kimyasal değişimler sağlanabilmektedir. Kavitasyon kabarcıklarının iç patlamaları, oluştuğu alanda enerji birikmesine sebep olmaktadır. Böylelikle oluşan yüksek sıcaklık (5000 K) ve basınç (1000 atm) sebebiyle kavitasyonun oluştuğu bölgede yüksek genlikli, türbülans dalgalar meydana gelmektedir (Soria & Villamiel, 2010). Yüksek frekanslı ultrases çalışmalarında kavitasyon baloncuklarının oluşumu için daha fazla zamana gerek duyulmaktadır. Frekans arttıkça kavitasyon balonu

oluşumu da zorlaşmaktadır. Yüksek ses şiddeti (büyük genlik) ise kavitasyon baloncuklarının hızlı bir biçimde oluşmasını sağlamaktadır. Aynı kavitasyon etkisini sağlayabilmek için 50 kHz'de 20 kHz'e oranla daha fazla enerji uygulanması gerekmektedir. Fakat 16 kHz'in altında kalan frekansların duyma eşiğinde bulunması nedeniyle bu şartlarda çalışmak mümkün değildir. Şiddet, oluşturulan ses dalgasının enerjisini tanımlamak için kullanılır, sonotrod alanına uygulanan gücün oranı ($W_{cm^{-2}}$) şeklinde ifade edilir. Şiddet, sisteme verilmekte olan güç (W) ve etki süresi ile alakalıdır. Şiddet arttığında ultrason etkiliği de artmaktadır (Patist & Bates, 2008). Verilen güç P, şiddet I ve sonotrod yarıçapı r olmak üzere aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$I = \frac{P}{\pi r^2} \quad (1.5)$$

Ses ötesi dalgaların kavitasyondan kaynaklı etkilerinin yalnızca tek bir kabarcık ile değil; kabarcık yığını içindeki kavitasyonel olaylarla da ilgisi olduğu bazı araştırmacılar tarafından savunulmaktadır (Adewuyi, 2001).

1. **Bölge (Gaz Bölge):** Buharlaşmış reaksiyon karışımları ve gazları bulundurur. 1.Bölgede yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşılmış olup böylece serbest radikal oluşumu gerçekleşmiştir. Bunlar kendi aralarında reaksiyona girebilir ya da sıvı bölgeye geçebilmektedir.
2. **Bölge (Ara Bölge):** Daha az uçucu olan reaksiyon bileşenleri ve sürfaktantlar mevcuttur.
3. **Bölge (Yığın Çözelti Ortamı):** Yalnızca sıvı bulunur.

Kavitasyonu Etkileyen Faktörler

Kavitasyonu etkileyen faktörlerin anlaşılabilmesi için, dış parametrelerin kavitasyon olayı üstündeki büyük etkisi ve sonokimyasal reaksiyonların gerçekleşebilmesi için kavitasyonun gerekliliği önemlidir. Kavitasyon olayına etki eden parametreler şunlardır (Thompson & Doraiswamy, 1999), (Edecan, 2006):

Frekans: Yayınımın frekansı arttığında gerilme fazının kısalması ile;

- sistemdeki kavitasyon kabarcıklarının miktarının eşitliğini devam ettirebilmesi adına yayınımın gücünün artırılması gerekir. Yine aynı etkinin devamlılığını sürdürebilmesi için yüksek güç ve frekans gerekir.
- ultrasonic frekans MHz alanına yükseltildiğinde sıvıdaki kavitasyon ürünleri azalır.

Çözücü Viskozitesi: Buhar dolu mikrokabarcıklar ve sıvıdaki boşlukların şekilleri sıvıyı etkileyen korozif kuvvetleri yine gerilme alanında negatif yüklü basınç gerektirirler.

Kuvvetlerin büyük olması söz konusu olduğunda viskoz sıvılarda kaviteasyon oluşması zorlaşır.

Çözücü Yüzey Gerilimi: Kullanılan çözücüler düşük yüzey gerilimli olduğunda kaviteasyon eşiğinde azalmaya neden olurlar.

Çözücü Buhar Basıncı: Çözücü düşük buhar basınçlı olduğunda kaviteasyon oluşturmak çok zordur. Bu sebeple daha uçucu formdaki çözücülerde oluşan kaviteasyonu kolaylaştırmak gerekir.

Sıcaklık: Atmosfer sıcaklığı arttırıldığında buhar basıncı artar böylece kolay kaviteasyon ancak daha düşük şiddette bir çökme sağlanır. Başka bir etki ise yüksek sıcaklıklarda çözücünün kaynama noktasına yaklaşıldığında çok miktarda kaviteasyon kabarcığı oluşur ve bu oluşan kabarcıklar ses dalgalarının iletilmesine bir engel gibi davranarak sıvı ortama giren ultrasonik enerjinin etkisini azaltır.

Dış Basınç: Dış basınç arttırıldığında kaviteasyon kabarcıklarının oluşması için çok daha fazla ultrasonik enerjiye gerek duyulur. Yani dış basınç arttığında kaviteasyonel yığının yoğunluğu da artar ve sonucunda sonokimyasal etki de artar.

Yoğunluk: Sonikasyonun yoğunluğu doğrudan ultrasonik kaynağın titreşiminin genişliğine bağlıdır. Genel olarak, yoğunluğun artışı sonokimyasal etkilerin artışını sağlar, ancak sistemdeki ultrasonik enerji girişi belirsiz olarak üç nedenden dolayı artmaz. Bunlar;

- Boyutsal değişimlerin artışı ile sonikatörde kullanılan transducer bozulacak ve maddeyi kıracaktır.
- Yüksek titreşimsel genişlikte sıvı ile ultrases kaynağının tam devir süresince teması sürdürülemez ve bu durum kaynaktan ortama yapılan güç transferinin veriminde büyük düşüğe neden olur.
- Büyük miktarda ultrasonik güç sisteme verildiğinde çözültide çok sayıda kaviteasyon kabarcıkları oluşur. Bunların birçoğu birleşerek büyürler ve daha kararlı kabarcıklar meydana getirirler. Bu durum da sıvının içindeki ses enerjisinin yolunu nemlendirerek sonokimyasal etkileri oluşturmak üzere çöken birçok kabarcık meydana getirir.

Sesin Azalması: Ortam içinde çeşitli nedenlerden ötürü sesin yoğunluğu azaltılmaktadır. Azalma boyu ile frekans ters orantılıdır. Bu olay saf su içinde ses azalma örneği ile açıklanabilmektedir. 118 kHz'deki ses yoğunluğu suyun 1 km uzağındaki mesafede yarı değerine düşer. 20 kHz seste aynı yoğunluk azalmasını sağlayabilmek için daha uzak mesafeye ihtiyaç vardır. Kaviteasyon oluşum şekillerine göre üçe ayrılır (Gogate & Pandit, 2004).

Akustik kavitasyon: Ses ötesi dalgaların; sıvı helyum, su, organik çözücü gibi akışkanlara verilmesiyle (Suslick, 1988) ortamda meydana gelen kabarcıkların büyümesi ve ani olarak parçalanması (Adewuyi, 2001) ve büyük miktarlarda enerjinin açığa çıkması olayıdır (Gogate & Pandit, 2004).Yıgın çözeltiler içerisinde kimyasal değişimlerin gerçekleşmesini sağlayan kavitasyondur olayıdır. Akustik kavitasyonu sağlamak için kullanılmakta olan ekipmanlar tek frekanslı ve çok frekanslı/çok dönüştürücülü olarak sınıflandırılabilir. Tek frekanslı ekipmanlara göre çok frekanslı/ çok dönüştürücülü ekipmanlar daha yararlı olmaktadır. Ultrasonik prob ise radyal titreşim sağladığından dolayı daha geniş alanlara etki edebilmekte ve gelecekte daha büyük ölçekli çalışmalarda kullanılma potansiyeli sağlamaktadır (Gogate & Pandit, 2004).

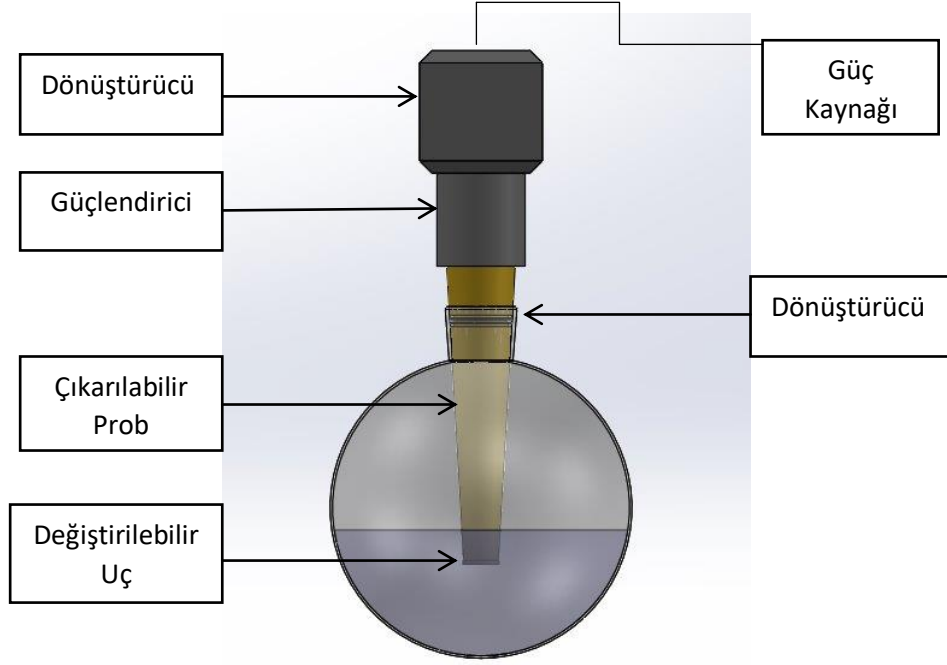
Hidrodinamik kavitasyon: Ventüri, orifis, vana gibi hidrolik aygıtların kullanılarak sıvının geçtiği alanların sıkıştırılması sonucu oluşan kavitasyondur. Yıgın çözeltilerinde kimyasal değişimlere sebep olmaktadır (Gogate & Pandit, 2004).

Optik ve tanecik kavitasyon: Yıgın çözeltilerinde kimyasal değişime sebep olamayan ve tek kabarcıktan oluşan kavitasyondur (Gogate & Pandit, 2004).

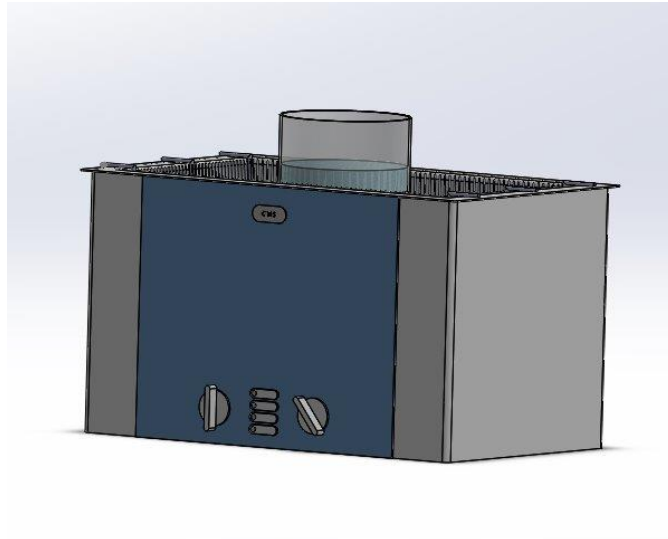
1.6.5 Ultrasonik Prob ve Ultrasonik Banyo

Ses dalgalarının ortama yayılabilmesi için elektrik enerjisi kullanarak ses üretebilen cihazlar kullanılmaktadır. Belirli frekanslarda çalışan bu ses cihazları (endüstriyel amaçlı kullanım için genel olarak 20-50 kHz'dir) bir dönüştürücü sayesinde alternatif akımı mekanik titreşimlere dönüştürmektedirler. Genel anlamda kullanım alanlarına göre bu cihazlar ultrasonik prob (Şekil 1.2) ve ultrasonik banyo (Şekil 1.3) olarak adlandırılmaktadırlar. Yapılan çalışmaların birçoğunda ultrasonik banyoların tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi ise, ultrasonik banyolarda ses dalgaları sıvı ortama daha homojen bir şekilde yayılabilmektedir ve bu sistem adaptasyon gerektirmemektedir. Bu sistemin dezavantajı ise, yalnızca sabit frekans değerinde çalışabiliyor olması, prob uygulamalarına kıyasla daha az oranda akustik şiddet uygulanabiliyor olması ve sıcaklık kontrolünün zayıf olmasıdır (Mason & P.Lorimer, 2002). Prob kullanılan uygulamalarda, enerji kaybı olmaksızın direkt olarak ortama aktarılması, kontrol edilebilir enerji aktarılmasına bağlı olarak ultrases gücünden daha verimli şekilde faydalanmanın mümkün olması bu sistemin avantajlı olmasını sağlamaktadır. Prob uygulamasının frekansının sabit olması, sıcaklık kontrolünün zor olması, radikal oluşumu ihtimalinin bulunması ve metalik yüzeylerde erozyon oluşmasına bağlı olarak metal kontaminasyonu nedeniyle kullanımı dezavantajlıdır (Mason & P.Lorimer, 2002). Prob uygulamalarında probun tipine ve çapına

bağlı olarak akustik Şiddet değişmektedir. Bunun yanı sıra sıcaklık kontrolünü sağlayabilmek ve prob ısınmalarının önlenmesi için puls uygulamalarda yapılmaktadır.



Şekil 1.2: Ultrasonik Prob.



Şekil 1.3: Ultrasonik Banyo.

1.6.6 Sonokimyasal Reaksiyonların Temelleri

Sisteme ses ötesi dalgalar verilerek oluşturulan tepkimelere sonokimyasal tepkimeler adı verilir. Ses ötesi dalgaların kimyasal tepkimelere karşı olan etkisi, fiziksel ve kimyasal etki olmak üzere iki şekilde sınıflandırılabilir. Ses ötesi dalgaların oluşturduğu fiziksel etkiler, katalizörün aktifliği artırarak tepkimenin yürüşünü olduğundan daha verimli hale getirmektedir. Kimyasal etkileri ise, kavitasyon olayı esnasında oluşan reaktif radikal bileşenlerinin oluşması nedeniyle reaksiyon hızının artış göstermesi olarak açıklanmaktadır (Adewuyi, 2001). Sıvı fazlı homojen sistemlerde ses ötesi dalgalar kavitasyonu oluşturarak akustik mikro akım ve çok küçük girdaplara neden olarak yağın çözeltinin kütle ve ısı aktarımını artırır ve hız gradyeni oluşturarak kesme gerilmesiyle sonuçlanmaktadır. Heterojen sistemlerde kavitasyonun mekanik etkileri görülür. Kavitasyon kabarcıkları ile yağın çözelti ara yüzeyinde ortamdaki kabarcıkların asimetric olarak parçanmasını sağlayıp, mikrojet biçiminde erozyon oluşturmaktadır. Buraya kadar bahsedilen bu kimyasal olayları tanımlamak için 4 teori önerilmiştir. Bu teoriler (1) sıcak-nokta teorisi, (2) elektrik teorisi, (3) plazma yük dağılımı teorisi ve (4) süperkritik teori olarak sıralanabilir. Bu teoremler prolitik bozunma, plazma kimyası, hidroksil radikal oksidasyonu ve süperkritik su oksidasyonu gibi bazı aktivitelerin gerçekleştiğini savunmaktadır.

Sıcak nokta teorisi, meydana gelen kabarcıkların ses şiddetiyle parçalanması sırasında noktasal basıncın 1000 atmosferin üzerinde ve sıcaklığın yaklaşık olarak 5000 K olduğundan söz etmektedir.

Elektrik alan teorisinde, yoğun elektrik alanı yüzünden sınır koşullarda parçalanma ile beraber aşırı uç koşullar oluşmaktadır. Kavitasyon kabarcıklarının oluşumu ve parçalanması sırasında önemli bir elektrik alan gradyeni meydana gelmektedir. Bunlar bağın kırılıp kimyasal aktivitelerin artmasını sağlamaktadır.

Plazma teorisinde, tıpkı elektrik alan teorisindeki gibi oluşan yoğun elektriksel alan sebebiyle aşırı uça şartlar oluşmakta ve gerçek bir iç patlamanın olmadığı vurgulanmaktadır. Kavitasyon kimyası, parçalanma prosesiyle oluşan parçalanmış korona tipi akıma benzetilmektedir. Sonokimya ile korona kimyası arasında birçok benzerlik olması bu fikri destekler ve kavitasyon kabarcıkları içinde mikroplazmaların oluşması bu öngörülerini desteklemektedir.

Süperkritik teori, kavitasyon kabarcığı ile çözelti ara yüzeyinde bir tabakanın var olduğunu öne sürmektedir ve basınç ve sıcaklık suyun kritik şartlarının (647 K, 22,1 MPa) üstünde olabilmektedir ve fiziksel özellikleri sıvı ile gaz arasında yer almaktadır. Sonolitik olarak

meydana gelen kavitasyon kabarcıklarının parçalandığı esnada süperkritik su elde edilmektedir (Adewuyi, 2001).

Genel olarak sonokimyanın çevresel konularındaki birçok çalışma “Sıcak-nokta” kavramını onaylayarak deney sonuçlarını açıklamıştır. Su ve atıksu arıtımında kullanılan giderim yöntemleri yalnız başına yeterli olamayabilmektedir. Bu sebeple bir ya da daha çok yöntem birlikte kullanılarak etkin bir giderim verimi sağlanmaya çalışılır. Bu yöntemler hibrit veya bileşik yöntem olarak adlandırılır (Gogate & Pandit, 2004).

1.7 Literatür Taraması

Gündüz, Atabey RR195 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderimini farklı parametreler uygulayarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Çalışma süresince çeşitli elektrotlar (demir, alüminyum ve çinko) kullanarak, sistemin akım yoğunluğu (10-20 ve 40 mA/cm²), asidik ve bazik pH değerlerinde (4 ve 8) renk giderim etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda RR195 boyarmaddesinin gideriminde demir elektrot için, 5 dakikalık süre sonunda 10 mA/cm² akım yoğunluğunda asidik koşullarda %97,67 ve bazik koşullarda %95,57 renk giderim verimi elde edilmiştir (Gündüz & Atabey, 2019).

Akbaş, iplik boyama banyosunda kullanılan boyarmadde ile hazırlanmış çözeltiden demir ve alüminyum elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon prosesi ile renk giderimi çalışmıştır. Yapılan testler sonucunda Fe elektrot için en uygun başlangıç boyarmadde derişiminin 100 mg/L, başlangıç pH değeri 9 ve 8 A akım; Al elektrot için, başlangıç boyarmadde derişiminin 50 mg/L, başlangıç pH değerinin doğal pH olan 7,57 değeri ve 8 A akım yoğunluğu olduğu belirlenmiştir. 5 saatlik elektroliz süreleri neticesinde Fe elektrotlarda %99, Al elektrotlarda % 96 renk giderim verimi elde edilmiştir (Akbaş, 2014).

Ergün, LSE2 ve LYE3 boyarmaddelerinin elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon proseslerinde renk giderimini çalışmıştır. LSE2 boyarmaddesinin giderimi için elektrokoagülasyon prosesinde başlangıçtaki boyarmadde derişimi (25-100 mg/L), akım yoğunluğu (0.5-4 A/m²), pH (2-10) ve iletkenlik (0,5-4 mS/cm) parametrelerinin verim üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda elektrokoagülasyon prosesi için en uygun giderim şartları başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, 1 A/m², pH 6 ve 2 mS/cm iletkenlik olarak belirlenmiştir. Bu şartlar altında 15 dakikalık elektroliz sonrasında elektrokoagülasyon prosesi için %99,9, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi (40 W/cm²) için % 99,2 renk giderim verimi elde edilmiştir.

LYE3 boyarmaddesinin sulu çözeltilerden giderimi çalışmalarında başlangıç boyarmadde derişimi (25-125 mg/L), akım yoğunluğu (1-7,5 A/m²), pH (2-10) ve iletkenlik (1-4 mS/cm) parametreleri için testler yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda LYE3 boyarmaddesi için en uygun çalışma koşullarının; başlangıçtaki boyarmadde derişimi 50 mg/L, akım yoğunluğu 2,5 A/m², pH 6 ve iletkenlik 2 mS/cm olarak belirlenmiştir. 30 dakikalık elektroliz süresi sonunda elektrokoagülasyon prosesinde %95,8, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinde %97,2 verim sağlanmıştır (Ergün, 2013).

Gheraout ve arkadaşları Direct Brown 2 ve BF Cibacete Blue boyarmaddelerinin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimini çalışmıştır. Her iki boya çözeltisi de 40 mg/L olarak hazırlanmıştır. Direct Brown 2 boyarmaddesi için 10 pH uygun görülmüş ve 12V'da 60 dakika elektroliz sonrasında %99,9 verim elde edilmiştir. BF Cibacete Blue boyarmaddesi için için çözelti pH'ı 2,5'ta 12 V ve 60 dakika süre ile elektroliz gerçekleştirildiğinde % 99,74 verim sağlanmıştır (Gheraout, et al., 2015).

Mollah ve arkadaşları Orange II boyarmaddesinin sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon ile giderimini çalışmışlardır. En iyi boya giderim verimini elde etmek adına alüminyum elektrotlar varlığında başlangıç boyarmadde derişimi (10-50 mg/L), akım yoğunluğu (120-215 A/m²), pH (3-12), ilave edilen NaCl miktarı (2-8 g) ve akış hızı (300-550 mL/dakika) parametreleri çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde Orange II boyarmaddesinin gideriminde elektrokoagülasyon prosesi için en uygun çalışma koşulları; başlangıç boyarmadde derişimi 10 mg/L, akım yoğunluğu 160 A/m², pH 6,5, 4 g NaCl elektrolit ilavesi, 350 mL/dk akış hızı ve iletkenliği 7,1 mS/cm olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilmiş çalışmalarda % 94,5 renk giderim verimi sağlanmıştır (Mollah, Gomes, Das, & Cocke, 2010).

Wei ve arkadaşları, farklı tiplerdeki katotları kullanarak azo Acide Black 1, Reaktif Blue 4, Eosin Yellow boyarmaddelerinin elektrokoagülasyon ile sulu çözeltilerden giderimini çalışmışlardır. 100 mg/L başlangıç boya madde derişimi, 0,3A elektrik akımı ve demir anot-çelik yün katot kullanılarak boya giderimi gerçekleştirildiğinde demir veya paslanmaz çelik katotlarına göre 1,8-4,4 kat daha hızlı sonuç alınmıştır. Bu kapsamda yapılan deney sonuçlarında Acide Black, Reaktif Blue 4, Eosin Yellow boyarmaddelerinin elektrokoagülasyon ile gideriminde 12 dakikalık elektroliz sonrasında sırasıyla elde edilen renk giderim verimleri %84, %81 ve %39 şeklindedir (Wei, et al., 2012).

Somayajula ve arkadaşları, Reaktif Red 195 boyarmaddesinin elektrooksidasyon ve sonoelektrokimyasal olarak, sulu çözeltilerden giderimini çalışmışlardır. Karışık metal oksit(MMO), akım yoğunluğu 5 mA/cm², 500 mL işlenmiş hacim, 39.54 W ve 50 dakika elektroliz süresi ile çalışmalar gerçekleştirildiğinde elektrooksidasyon ile giderimde %91, sonoelektrokimyasal giderimde %99 verim sağlanmıştır. Farklı destekleyici elektrolitlerden KCl ve NaCl'nin renk giderim veriminde maksimum etki gösterdiği belirlenmiştir. Sonuç olarak renk gideriminde ultrasonik etkinin verimi oldukça iyi yönde etkilediği görülmüştür (Somayajula, Asaithambi, Modepalli, & Matheswaran, 2012).

Siddique ve çalışma arkadaşları, Reaktif Blue 19 boyarmaddesinin hidrolize edilmiş ve hidrolize edilmemiş formlarının ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi ile ayrıştırılması, başlangıçtaki boyarmadde derişimi (20-100 mg/L), pH (3-9), ultrases frekansı (20-80 kHz) ve elektroliz süresi gibi çeşitli parametreler kullanılarak araştırmalar yapmışlardır. Belirlenen uygun koşullarda yapılan çalışmalar sonucunda elektrokoagülasyonda %52, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinde %90 verim elde edilmiştir. Boya ayrışması ve dolayısıyla renk giderme için ultrases destekli elektrolizin daha etkili olduğu ve basit elektroliz/sonokimyasal ayrışmaya kıyasla toplam enerji tüketiminin yarıya düştüğü kanıtlanmıştır. Bu nedenle, ultrases destekli elektroliz, aksi takdirde çevresel olarak kalıcı bir reaktif boyanın boya ayrışmasında daha etkili bir teknik olarak bulundu (Siddique, Farooq, MehmoodKhan, ZarsherKhan, & S.F.Shaukat, 2011).

Rivera ve arkadaşları, yöntemin fizibilitesini test etmek için karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır. Çeşitli boya çözeltilerinin (Reaktif Blue, Lissamine Green B) renksizleştirilmesi, geleneksel bir elektrokimyasal işlem olan elektrokoagülasyon, ultrases desteğini birleştiren hibrit bir işlemle gerçekleştirilmiştir. Süreçteki çeşitli değişkenlerin etkisi test edilmiş ve bir akış sonoelektrokimyasal sistemi tasarlanmıştır. Yapılan testler sonucunda Reaktif Blue boyarmaddesi için PbO₂/ SS elektrodu, 20 kHz ultrases frekansı, 5 V elektrik gücü, 40 mL çözelti hacmi ve 120 dakikalık elektroliz süreci sonunda %90 renk giderim verimi sağlanmıştır. Lissamine Green B boyarmaddesinin giderimi için grafik elektrot, 20 kHz ultrases frekansı, 5 V elektrik gücü, 40 mL çözelti hacmi ve 60 dakika elektroliz süresi ile çalışmalar yapılarak %95 verim elde edilmiştir (Rivera, Pazos, & Sanromán, 2009).

Özyonar ve arkadaşları, RR241 ve DB60 boyarmaddelerini içeren sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon yöntemlerini kullanarak renk giderimi çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda her iki boya için de başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, Fe elektrot, 40 kHz sabit frekans, 180 W ve 4 dakika elektroliz süresi kullanılmıştır. RR241 ve DB60 boyarmaddeleri için akım yoğunlukları sırasıyla 75 A/m², 50 A/m² olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda yapılan elektrokoagülasyon çalışmalarında RR241 ve DB60 boyarmaddeleri için elde edilen verim %92 civarındadır. Ultrases destekli çalışmalarda ise renk giderim verimi sırasıyla %99,9 ve %100 olarak tespit edilmiştir (Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020).

Tablo 1.2: Elektrokoagülasyon Prosesi ile Yapılan Çalışmalar.

Elektrokoagülasyon

Boya	Deney Şartları	Renk Giderim Verimi (%)	Referans
Reaktif Red 195	Fe Elektrot, pH 8, akım yoğunluğu 40 mA/cm ² , 45 dakika	100	(Gündüz & Atabey, 2019).
Setazol Black TNN	Boyarmadde derişimi 50 mg/L, Fe Elektrot, pH 9, Akım 8A, 30dk	99	(Akbaş, 2014)
Levafix Scarlet E2GA	Boyarmadde derişimi 50 mg/L, Al elektrot, pH 2-10, iletkenlik 0,5-4 mS/cm, akım yoğunluğu 0,5-4 A/m ²	99,9	(Ergün, 2013)
Levafix Yellow E3RL	Boyarmadde derişimi 50 mg/L, Al elektrot, pH 2-10, iletkenlik 1-4 mS/cm, akım yoğunluğu 0-7,5 A/m ²	92,9	(Ergün, 2013)
Direct Brown 2	Al elektrot, 12 V, 500 ml hacim, 60 dakika	99,9	(Ghernaout, et al., 2015)

Tablo 1.2 (devam)

BF Cibacete Blue	Al elektrot, 12 V, 500 mL hacim, 60 dakika	99,7	(Ghernaout, et al., 2015)
Orange II	Başlangıç boyarmadde derişimi 10-50 mg/L, Alüminyum elektrot, Akım yoğunluğu: 120-215 A/m ² , 2-8 g NaCl, pH 3-12, akış hızı 300-550 mL/dk	94,5	(Mollah, Gomes, Das, & Cocke, 2010)
Acid Black 1	Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, 1g/L NaCl, 0,3A, 12 dakika, Fe Elektrot	84	(Wei, et al., 2012)
Reaktif Blue 4	Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, 1g/L NaCl, 0,3A, 12 dakika, Fe Elektrot	81	(Wei, et al., 2012)
Eosin Yellow	Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, 1g/L NaCl, 0,3A, 12 dakika, Fe Elektrot	39	(Wei, et al., 2012)
RB 222	Başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, 2 mA/cm ² , pH 5, 9 dakika	99,1	Bu çalışma

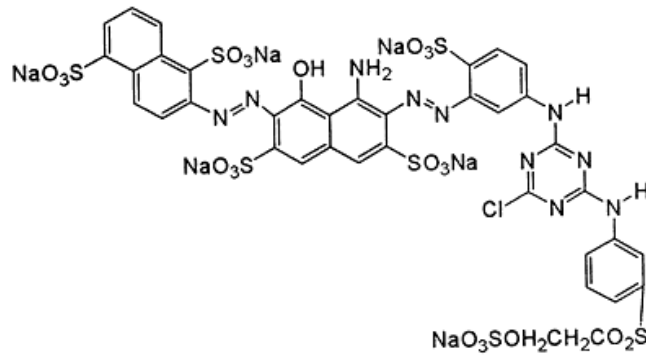
Tablo 1.3: Elektrokogülasyon ve Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Yapılan Çalışmalar.**Ultrases /Elektrokoagülasyon**

Boya	Deney Şartları	Renk Giderim Verimi (%)	Referans
Reaktif Red 195	MMO (Karışık Metal Oksit), 5 mA cm ² , 500 ml işlenmiş hacim, 39.54 W, 50 dakika	91(EC) 99(US/EC)	(Somayajula, Asaithambi, Modepalli, & Matheswaran, 2012).
Reaktif Blue 19	Boyarmadde derişimi 20-100 mg/L, ultrases frekansı 20-80 kHz, pH 3-9	52(EC) 90(US/EC)	(Siddique, Farooq, MehmoodKhan, ZarsherKhan, & S.F.Shaikat, 2011)
Levafix Scarlet E2GA	Boyarmadde derişimi 50 mg/L, pH 6, iletkenlik 2 ms/cm	99,2	(Ergün, 2013)
Levafix Yellow E3RL	Başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, pH 6, iletkenlik 2 ms/cm	92,7	(Ergün, 2013)
Lissamine Green B	Grafit Elektrot, frekans 20 kHz, 5 V, 40 mL işlem hacmi 60 dakika	95	(Rivera, Pazos, & Sanromán, 2009)
RR 241	Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, Fe elektrot, 40 kHz, 180 W, 75 A/m ² , 1000 mL hacim, 4 dakika	(EC) 92 (US+EC) 99,9	(Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020)
DB 60	Başlangıç boyarmadde derişimi 100 mg/L, Fe elektrot, 40 kHz, 180 W, 50 A/m ² , 1000 mL hacim, 4 dakika	(EC) 92 (US+EC) 100	(Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020)
RB 222	Başlangıç boyarmadde derişimi 50 mg/L, sistemin akım yoğunluğu 2 mA/cm ² , pH 5, 25 dakika	99,3	Bu Çalışma

2. MATERYAL METOD

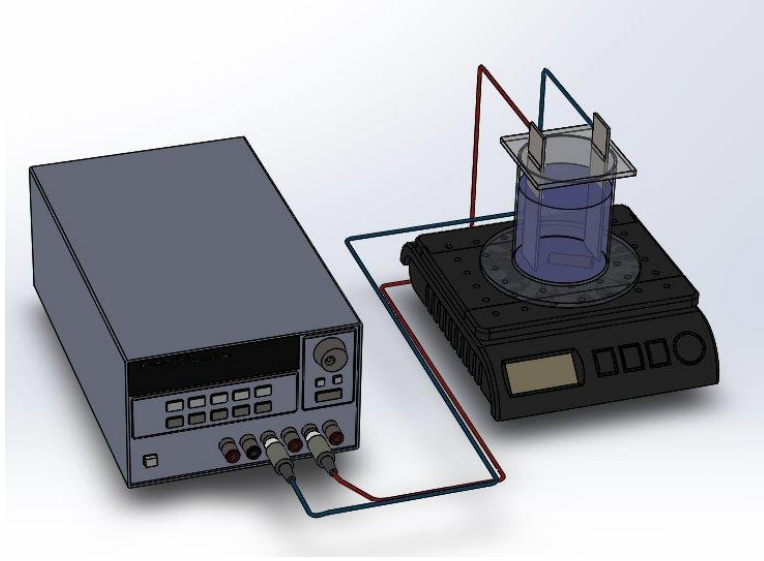
2.1 Materyal ve Deneysel İşlemler

Bu çalışmada, reaktif bir boyarmadde olan Reaktif Blue 222 (Yatuzol Navy Blue) ile çalışılmıştır. Elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesleri uygulanarak, sulu çözeltilerden RB222'nin giderimi incelenmiştir. Manisa Organize Sanayi Bölgesinde bulunan bir boyahaneden temin edilen reaktif boyarmaddenin molekül ağırlığı 1357,49 g/mol, maksimum absorbands verdiği dalga boyu 600 nm, kimyasal formülü $C_{37}H_{23}ClN_{10}Na_6O_{22}S_7$ 'dir ve molekül yapısı aşağıdaki gibidir (dye|World dye variety) :



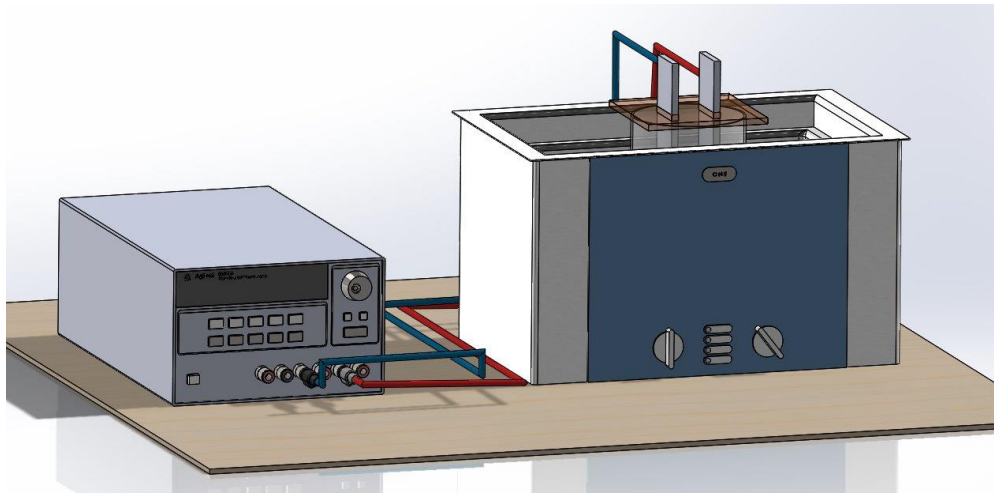
Şekil 2.1: Reaktif Blue 222'nin molekül yapısı.

Elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon deneylerinde 0.8 L hacimli pilexi glasstan üretilmiş beher koagülatör olarak kullanılmış ve 0.5 L hacminde boyarmadde çözeltisi ile çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar kapsamında demir elektrotlar, monopolar paralel bir biçimde, birer adet anot ve katot olmak koşuluyla sistem hazırlanmıştır. Boyutları 20cmx6cmx0,2cm olan elektrotlar arasındaki mesafe 5,5 cm olarak ayarlanmış olup her bir elektrodun elektroaktif yüzey alanı 120 cm²'dir. Elektrotlar, elektrik akımının kontrolünü sağlayabilen SL-3010D markalı doğru akım güç kaynağına bağlanmıştır. Proses ilerledikçe, belirlenen zaman değerlerinde elektrokimyasal hücreden numuneler alınmış ve boyarmaddenin ortamda kalan derişimi belirlenmiştir. Elektrokoagülasyon deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2: Elektrokoagülasyon deney sisteminin şematik gösterimi.

Ultras ses destekli elektrokoagülasyon prosesinde boyarmadde giderimi için kullanılan elektrokoagülator, Elmasonic D-78224 markalı ultras ses banyo içerisine yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan ultrasonik banyo 37 kHz sabit frekanslı, 550 W gücünde Elma S 60 H tipi 4,3 L çalışma kapasitesine sahiptir. Elektrokoagülasyon hücresi ultrasonik banyo içerisine yerleştirildikten sonra ultras ses destekli elektrokoagülasyon ile boyarmadde giderim prosesi gerçekleştirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde olduğu gibi belirlenen zaman değerlerinde numuneler alınarak boyarmadde konsantrasyonu belirlenmiştir. Ultras ses destekli elektrokoagülasyon prosesinin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3: Ultras ses destekli elektrokoagülasyon deney sisteminin şematik gösterimi.

Elektrokimyasal proseslerde çözeltinin iletkenliği önemli bir parametredir. Boya çözeltilerinde oluşan çözünme moleküler seviyededir ve iletkenlik yoktur. Bundan dolayı çözeltilerde iletkenliği sağlayabilmek için ilave edilen elektrolitin derişimi ve cinsi, çözeltilerde iletkenliğini önemli seviyede etkiler. Elektrokoagülasyon prosesinde, düşük maliyetle elde edilebilen ve çözeltilerde meydana gelen aktif klorun güçlü oksitleme özelliği sebebiyle genellikle yüksek iletkenlik ve çözünürlük sağlayan NaCl, elektrolit olarak kullanılmaktadır (Kim, Park, Shin, & Kim, 2002). Bu çalışmada, elektrokoagülasyon prosesinin uygulanması için gereken elektriksel iletkenliği sağlayabilmek üzere 2 g/L derişimli olacak şekilde %99,9 saflığa sahip Merck kalitedeki NaCl elektroliti kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda başlangıçtaki pH değerinin atıksuyun renk giderim verimi üzerine etkisini incelemek amacıyla HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak pH ayarlaması yapılmıştır. Proses boyunca hücre içerisinde homojenizasyonu sağlamak için yapılan karıştırma işlemi, 400 rpm hızında Yellowline MST Basic manyetik karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Ultrases ile yapılan elektrokoagülasyon işleminde ses dalgalarının sağladığı akustik karıştırıcı etkisi ile karıştırma sağlanmış olup, ek bir karıştırma işlemi uygulanmamıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan RB222 çözeltileri çalışma öncesinde ultra saf su ile hazırlanmıştır. Gerekli hesaplamaların yapılması sonucu hazırlanmış olan 1000 mg/L derişimli stok RB222 çözeltilerinden, deneysel çalışmalarda belirlenen derişimlerde kullanılmak üzere farklı çalışma çözeltileri hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda yapıldığı reaktörden, belirli zaman aralıklarında alınan numunelerin pH değerleri ve iletkenlik ölçümleri HANNA Edge multiparametre cihazı ile yapılmıştır. Ardından HERMLE Z 206 A santrifüj cihazında işleme tabi tutulduktan sonra, boyarmadde konsantrasyonundaki değişimi belirleyebilmek adına DR-LANGE CADAS 30S spektrofotometre cihazında 600 nm'de absorbans değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Yapılan her deney sonrasında elektrotlar, sonraki çalışmalarda oluşabilecek pasivasyonu engellemek için 0.1M'lık HCl çözeltisi ile temizliği yapıldıktan sonra yıkanıp ultra saf su ile yıkanmıştır. Pasivasyon, elektrokimyasal proseslerde kullanılmakta olan elektrotların yüzeyinde boyarmadde ya da farklı maddelerin birikmesi ve metal elektrodun iyonlaşmasının kısmen engellenmesidir (Khandegar & Saroha, 2013). Bu olay akımın etkinliğini azaltacağından reaksiyon süresinin artmasına sebep olur.

2.2 Deneysel Değişkenler

Bu tez çalışmasında elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesleriyle RB222'nin giderimine başlangıç boyarmadde derişiminin, akım yoğunluğunun, başlangıç pH değerinin ve arıtım süresinin etkisi araştırılmıştır. Başlangıç derişiminin etkisi için 50, 100, 250 mg/L, başlangıç pH'mın etkisi için 5, 7, 9 ve akım yoğunluğunun etkisi için 2, 10, 20, 40 mA/cm² değerleri çalışılmıştır. Arıtım süresinin etkisini incelemek amacıyla 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 ve 30. dakikalarda numuneler alınarak gerekli işlemler ve hesaplamalar yapılmıştır. Ultrasesin elektrokoagülasyon prosesine sağladığı etkinin araştırılması için elektrokoagülasyon ve ultrases aynı anda uygulanmıştır.

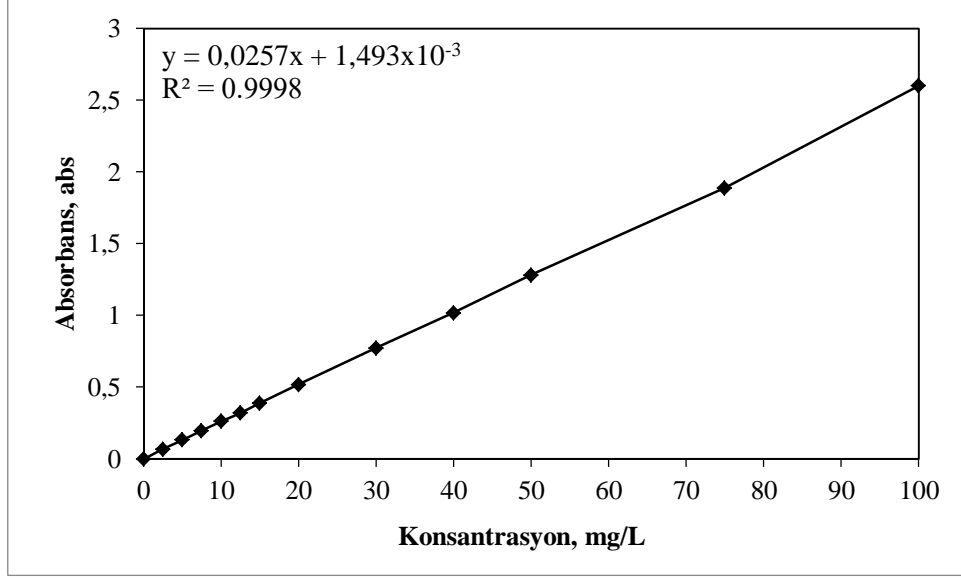
2.3 Analiz

Elektrokogülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesleri sonucunda elde edilen renk giderim verimini hesaplayabilmek için, ilk olarak spektrofotometrede RB222 boyarmaddesinin dalgaboyu taraması yapılmıştır. Boyarmaddenin spektrofotometrede verdiği maksimum pik ve deneylerin gerçekleştirileceği süreçte çalışılacak olan dalga boyu değeri $\lambda_{\max}=600$ nm olarak belirlenmiştir.

Proses sonrasında çözelti ortamında kalan boyarmaddenin konsantrasyonu, Lambert-Beer Yasası ($A=\epsilon.b.C$) ile hesaplanmıştır. Lineer kalibrasyonu ile elde edilen kalibrasyon grafiği, 0-100 mg/L aralığında çeşitli derişimlerdeki boyarmadde çözeltilerinin absorbansları kullanılarak oluşturulmuş ve sonuçlar Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu kalibrasyon çalışmasında elde edilen konsantrasyona bağlı absorbans denklemi $y = 0,0257x + 1,493 \cdot 10^{-3}$ 'tür. Eşitlik 2.1'teki formül kullanılarak proses verimi hesaplanmıştır.

$$\text{Renk Giderim Verimi (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte C_0 boyarmaddenin başlangıç derişimini, C_t ise herhangi bir t anında boyarmaddenin çözelti ortamında kalan derişimini ifade etmektedir.



Şekil 2.4: RB222 boyarmaddesi için lineer kalibrasyon grafiği.

Akım yoğunluğu (J) eşitlik 2.2’da verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.2)$$

Burada I amper biriminde elektrik akımı, A ise m^2 biriminde elektroaktif anot yüzey alanıdır.

Elektrokimyasal işleme tabi tutulan RB222’nin giderimi boyunca elektrokoagülasyon prosesinde tüketilen elektrik enerjisi eşitlik (2.3)’de, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi için tüketilen elektrik enerjisi ise eşitlik (2.4)’de verilen denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E = \frac{V \times I \times t_{ec}}{R_b \times v} \quad (2.3)$$

$$E = \frac{V \times I \times t_{ec} + W \times t_{us/ec}}{R_b \times v} \quad (2.4)$$

Burada E , 1 g boyarmaddenin 1 L çözeltilerden giderimi için tüketilen elektrik enerjisi (kWh/gL); V , hücre voltajı (Volt); I , akım (Amper); t_{ec} , elektrokoagülasyon prosesinin süresi; $t_{us/ec}$, ultrases prosesinin süresi; W , sisteme sağlanan ultrases gücü (watt); v ,

Çalışılan boyarmadde çözeltisinin hacmi (L) ve Rb, giderilen RB222 miktarı (mg/L)'dir (Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020).

Her iki proses sonunda yüzeyde oluşan flokların ve dipte biriken çökeltilerin yapısal analizi için FT-IR (Fourier Transform Infrared) spektrofotometre ve SEM (Scanning Electron Microscopy) cihazları kullanılmıştır. FT-IR için 4000-650 cm^{-1} dalga boyu aralığında alışan Perkin Elmer infrared spektrofotometre; yüzey görüntüleme analizi için Zeiss EVO/LS10 taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

3. BULGULAR

Yapılan bu çalışmada, ilk olarak tekstil endüstrilerinde kullanılan Reaktif Blue 222 boyarmaddesinin demir elektrotlar varlığında elektrokoagülasyon prosesiyle giderimi çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ultrasonik banyo içerisinde elektrokoagülasyon prosesi gerçekleştirilmiş ve ultrasesin elektrokoagülasyon prosesinin verimine etkileri araştırılmıştır. Kesikli bir hücre içerisinde gerçekleştirilen proseste başlangıç boyarmadde derişiminin, akım yoğunluğunun, başlangıç pH'ının ve elektroliz süresinin verime etkisi araştırılmıştır. Elde edilen bulgular yüzde renk giderim verimi açısından değerlendirilmiştir.

3.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon Prosesi ile Giderimi

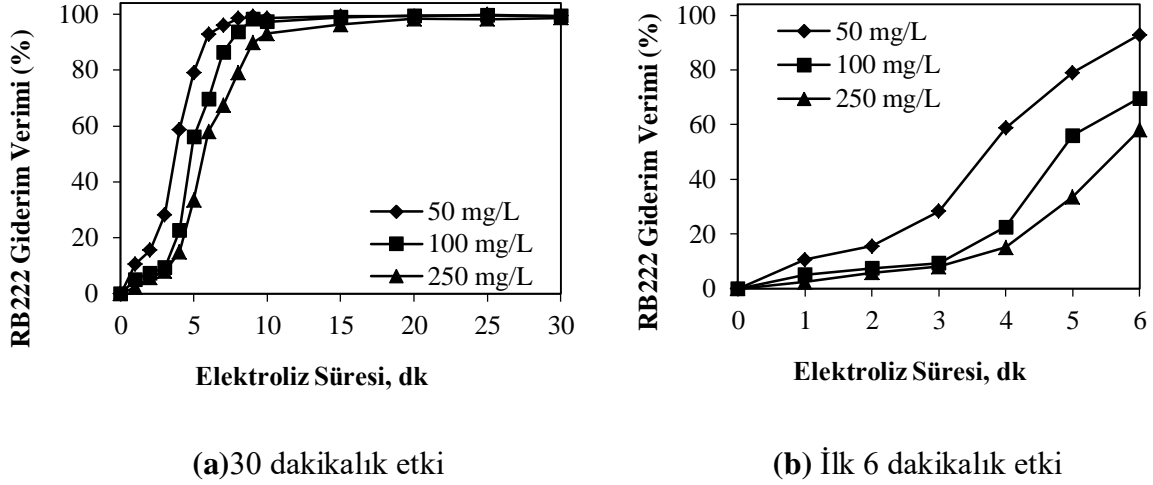
Bu bölüm, elektrokoagülasyon prosesi uygulanarak RB222 gideriminin yapıldığı deneylerin bulgularını içermektedir.

3.1.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi

Elektrokoagülasyonda proses verimini etkileyen başlıca parametrelerden birisi giderimi yapılacak boyanın başlangıç derişimidir. Boyarmadde derişiminin arıtım verimine etkisini incelemek amacıyla RB222 boyarmaddesinin 50, 100 ve 250 mg/L başlangıç boyarmadde derişimli çözeltiler hazırlanarak elektrokoagülasyon ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma boyunca sistemin akım yoğunluğu 2 mA/cm² ve başlangıçtaki pH'ı 5 olarak sabit tutulmuştur. 30 dakikalık proses boyunca 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25 ve 30'uncu dakikalarda belirli miktarda numuneler alınıp gerekli ölçümler ve hesaplamalar yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen bulgulara ait grafikler Şekil 3.1' de, deneysel bulgular Ek A. 1'de verilmiştir.

Şekil 3.1 (a) ve (b)' de açıkça görüldüğü gibi %99,1 renk giderim verimine 50 mg/L başlangıç derişimli çözeltilerde 9.dakikada ulaşılırken, 100 mg/L başlangıç derişimli çözeltilerde 15.dakikadan sonra; 250 mg/L başlangıç derişimli çözeltilerde ise 30.dakikada ulaşılabilmiştir. Başka bir açıdan başlangıç derişiminin etkisini değerlendirecek olursak; 50 mg/L başlangıç derişimli boyarmadde çözeltileri için yapılan testlerde 7.dakikada %95,9 boya giderim verimi elde edilmiştir. Buna karşılık aynı elektroliz süresinde 100 mg/L için %86,4, 250 mg/L için ise %67,3 verimle proses sonuçlanmıştır. Buna göre boyarmaddenin

başlangıç derişimi arttıkça, elektrokoagülasyon prosesinin boyarmadde giderim verimi düşmüştür. Yani boyarmadde miktarının az olduğu çözeltiler fazla olan çözeltilere kıyasla daha kısa sürede arıtılmıştır.



Şekil 3.1: RB222 Boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine derişim etkisi (Elektrokoagülasyon, $J: 2 \text{ mA/cm}^2$, $\text{pH}_0: 5$).

Bilindiği gibi proses ilerledikçe elektrokoagülasyon hücresinde oluşan polimerik demir hidroksit türleri ve miktarı artış göstermektedir. Oluşan bu adsorplayıcı polimerik türler, boyarmadde molekülleriyle etkileşip adsorban olarak proste görev almaktadır. Yüksek derişimli çözeltilerde daha fazla boyarmadde molekölü ortamda yer aldığından, mevcut adsorplayıcı türler giderim için yeterli olamayacaktır. Bununla birlikte proses boyunca ara ürünler oluşup kullanılan demir elektrotların aktif kısımlarını kapatarak pasivasyon oluşumuna neden olmakta ve boya giderim verimini olumsuz yönde etkilemektedir (Khandegar & Saroha, 2013). RB222 giderim verimi, düşük başlangıç konsantrasyonlarında belirli bir elektroliz süresinden sonra sabit kalmaktadır. Bu durum, boyarmaddenin koagülasyonunda elektriksel yük nötralizasyonunun kritik öneme sahip bir konu olduğunu göstermektedir. Çünkü polimerik demir hidroksit türlerinin negatif yüklü kısımları üzerine adsorpsiyon ile boyarmadde molekülleri bağlanmaktadır. Şayet negatif yüklü polimerik türlerin miktarı RB222' nin stokiyometrik ihtiyacından az ise boya giderim verimi düşer ve boyarmaddenin fazlası giderilmeden çözeltide kalır. Daha da önemlisi bu olay, elektrokoagülasyon prosesinde adsorpsiyon mekanizmasının, flokülasyon mekanizmasından daha etkin olduğunu göstermektedir (Bulut, 2016). Çünkü düşük pH ($\text{pH} < 6,5$) aralıklarında flokülasyon ile çökeltme; daha yüksek pH aralıklarında ise ($\text{pH} > 6,5$) adsorpsiyon prosesi ile renk giderimi sağlanmaktadır (Rebhun & Lurie, 1993).

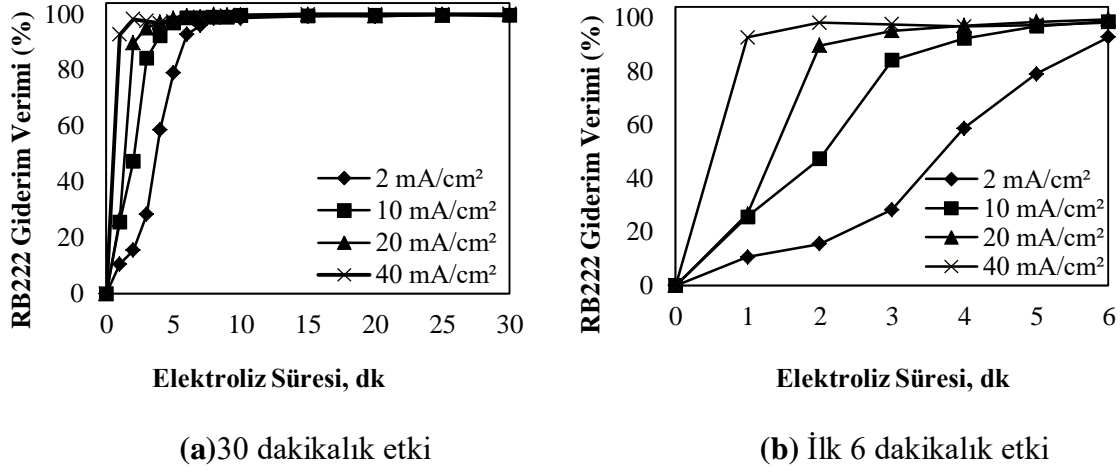
3.1.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine Akım

Yoğunluğunun Etkisi

Bu çalışma boyunca başlangıç derişimi 50 mg/L ve başlangıç pH'ı 5 olarak sabit tutulmuştur. 2-40 mA/cm² aralığında dört akım yoğunluğu değeri çalışma parametresi olarak seçilmiş ve akım yoğunluğunun elektrokoagülasyon prosesine etkisi incelenmiştir. 2 dakikalık elektroliz süresi için; renk giderim verimleri sırasıyla, akım yoğunluğu 2 mA/cm² için %15,5, 10 mA/cm² için %68,4, 20 mA/cm² için %89,7, 40 mA/cm² için %98,2 olarak tespit edilmiştir. 9.dakikadan sonra dört akım yoğunluğu değeri için de %99' luk verimin sağlandığı görülmektedir. Birim elektrot alanı başına uygulanan elektriksel akım olarak tanımlanan akım yoğunluğu, elektrokoagülasyon prosesinde verimi doğrudan etkileyen kritik faktörlerden biridir. Akım yoğunluğu artırdıkça kullanılan demir elektrotların demir iyonu salımı yani anodik çözünme hızı artar. Elektrotlardan salınan bu iyonların hareketleri ve gerçekleştirdiği reaksiyonlar sayesinde boyarmadde giderimi sağlanmaktadır. Akım yoğunluğunun önemli olduğu bir diğer husus flokülasyon mekanizmasıdır. Bu parametre koagülant türlerin salım hızını, köpük oluşum hızını, flok büyümesi ve boyutunu doğrudan etkileyebilir (Khandegar & Saroha, 2013). Proses boyunca oluşan hidrojen gazı kabarcık ve köpük şeklinde gözle görülür. Akım yoğunluğu artırdıkça kirleticilerin çözeltilerin yüzeyine taşınmasını sağlayan bu kabarcıkların sayısı da artar. Akım yoğunluğunun bu etkisi elektrokoagülasyon veriminde belirgin bir şekilde ortaya çıkar. Ayrıca eşitlik (2.3)' de görüldüğü gibi uygulanan elektriksel akımın değeri elektrik enerjisi tüketimini de etkilemektedir. Hem elektrot tüketimi hem de enerji tüketimi bakımından akım yoğunluğunun seçimi prosesin optimizasyonu açısından dikkatle ele alınmalıdır. Burada uygulanan elektroliz süresi ile akım yoğunluğu karşılaştırılmalıdır. Aynı verim değerine daha uzun süre ve daha düşük akım yoğunluğunda ulaşılmakla birlikte daha kısa süre ve daha yüksek akım yoğunluğunda da ulaşılabilir.

Uygulanan akım yoğunluğunun artışı ile birlikte çözelti ortamında oksijen gazının çıkışı da artar. Bununla birlikte çözelti ortamı ısınarak bozucu etkiler gerçekleşir. Testler süresince akım yoğunluğu artırdıkça çözelti ortamının sıcaklık değerlerinde de artış görülmüştür. 5 dakikalık elektrokoagülasyon prosesi boyunca Ek A.2' de verilen sıcaklık değerlerine göre 2 mA/cm² için 24.6°C, 10 mA/cm² için 25.1°C, 20 mA/cm² için 27.4°C ve 40 mA/cm² için 29,8°C derece değerleri elde edilmiştir. 30 dakikalık proses sonunda ise belirtilen akım değerleri için sırasıyla 31.6°C, 32.4°C, 42.7°C, 51.4°C değerlerine kadar çıktığı görülmüştür.

Ayrıca 40 mA/cm^2 akım yoğunluğu değeri için yapılan testlerin sonuçlarına bakıldığında 2.dakikada verim %98,2 elde edilmiş, 4.dakikada %96,7'ye inmiştir ve ilerleyen zamanlarda tekrar artış göstermiştir.



Şekil 3.2: RB222 Boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine akım yoğunluğunun etkisi (Elektrokoagülasyon, C_0 : 50 mg/L, pH_0 : 5).

Bu salınımın sebebi yüksek akım yoğunluğunda çok hızlı bir giderimin kısa bir zaman içerisinde gerçekleşmesi ve elektroliz devam ettiği için tekrar çözelti fazına boyarmaddelerin geçmesi yani çözünmesidir. Yani çözelti ortamında Le Chatalier Prensibine göre geri reaksiyon yönünde boyarmadde floklardan çözelti fazına geçmiştir (Özçelik, 2019). Sonuç olarak, yüksek akım yoğunluğu değerleri ile çalışıldığında elektroliz süresinin kısa tutulması gerektiği söylenebilir.

3.1.3 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Elektrokoagülasyon ile Giderimine

Başlangıç pH'ının Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde kirletici giderimi, anot elektrotta yükseltgenme ve katot elektrotta indirgenme reaksiyonları ile beraber ilerleyen bir takım elektrokimyasal reaksiyon mekanizmaları yoluyla gerçekleştirir. Sisteme elektrik enerjisi yardımıyla akım verildiğinde ortamdaki iyonlar elektroforik olarak göç eder ve yığın çözeltide bulunan kirleticiler koagüle olur. Hidroksil iyonları ile koagülasyon ve flokülasyona uğrayan kirleticiler, bu gazlarla birlikte yüzeye taşınır. Öte yandan elektrotların oluşturduğu oksijen ve hidrojen gazları, elektrokimyasal tepkimelere maruz kalarak flotasyona uğrar. Sisteme verilen elektriğin etkisi ile anot elektrot çözünmeye uğradığı zaman katot elektrotta pasivasyon meydana gelir. Prosesin veriminin yüksek etkinliğe sahip olması kullanılan

elektrotların yüzey alanlarının büyüklüğüne bağlıdır (Mollah, Morkovsky, Gomes, Kesmez, Parga, & Cocke, 2004).

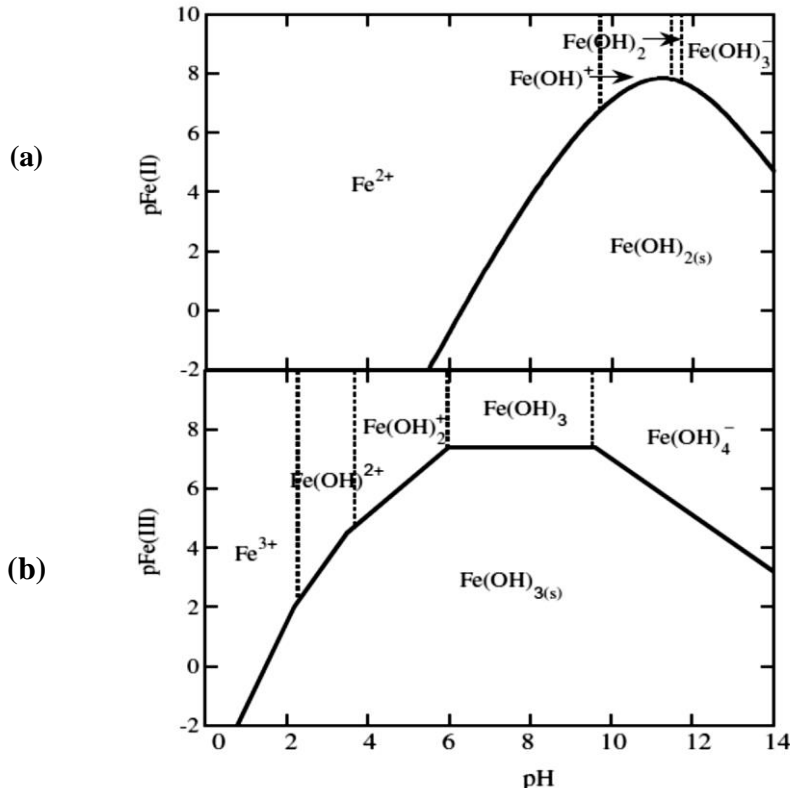
Elektrokoagülasyon prosesinde demir, çelik veya paslanmaz çelik anot elektrot olarak tercih edildiğinde, demirde meydana gelen anot oksidasyonu aşağıda eşitlik (3.1) verildiği gibi gerçekleşir.



Suyun katot elektrotta gerçekleşen indirgenme reaksiyonu sonucunda H_2 gazı ve hidroksil iyonu ve üretimi eşitlik (3.3)'de verilmiştir.



Bu eşitlikte (3.2) verilen hidroksil iyonunun oluşumu, elektroliz olayında pH değerlerinin artmasına neden olarak burada yükselen pH, çözültide çeşitli demir hidroksokomplekslerini oluşturur (Verma, 2017). Koagülasyonun önemli kontrol parametrelerinden olan pH değerinin bir fonksiyonu olarak Fe^{+2} , Fe^{+3} ve demir hidroksokomplekslerine ait ağırlıklı türler bölgesinin diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmektedir (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).



Şekil 3.3: Ağırlıklı türler bölgesi diyagramı.

Şekil 3.3 (a)'da görüldüğü üzere pH değeri 5,5'ten büyük olduğunda ortamda çözünmeyen Fe(OH)₂ çökerek bazik koşullarda pH 9,5'e gelinceye kadar Fe⁺² iyonu dengede kalmaktadır. Bunun yanı sıra pH 9,5 değerinden 11,4 değerine gelene kadar Fe(OH)⁺ ile ve buna ek olarak pH 11,8 değerinden 14 değerine gelene kadar Fe(OH)₃⁻ dengede kalmaktadır. Ortamda çökmeyi kolaylaştıran yapıda olan çözünmez Fe(OH)₂ 'nin oluşum reaksiyonu aşağıda verilen eşitlik (3.4) ile gösterilebilir.



Yukarıda (3.1), (3.2) ve (3.3) eşitliklerinde verilen reaksiyonların toplamı sonucunda elde edilen net eşitlik aşağıda verildiği gibidir;

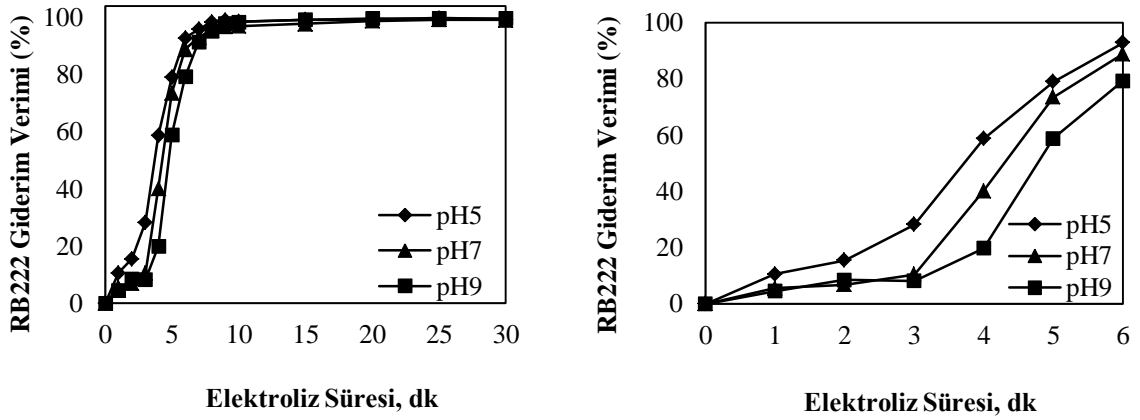


Fe(II) türleri her ne kadar koagüle yapıları üretiyor olsa da, yüksek akım yoğunluğundaki Fe(III) türleri koagülasyon ve flokülasyon proseslerini daha verimli hale getirir (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

Ağırlıklı türler bölgesi diyagramında Fe(III)'ün gösterildiği Şekil 1 (b)'de pH değeri 1'den büyük olduğu zaman Fe(OH)₃'ün koagülasyona uğradığını ispatlamaktadır. Bu koşullarda çözünebilir monomerik türler ile ağırlıklı çökelmiş türler denge halindedir (Holt, Barton, & Mitchell, 2005). Böylelikle Fe(OH)₃, pH 2 değerine kadar Fe⁺³ ile; pH 2-3,8 değer aralıklarında Fe(OH)²⁺ ile; pH 3,8-6,2 değer aralıklarında Fe(OH)₂⁺ ile ve pH 9,6-14 aralıklarına kadar Fe(OH)₄⁻ ile dengededir. pH 6,2-9,6 aralığında çözelti içerisinde bulunan tek demir türünün Fe(OH)₃ olduğu verilen diyagramda açık olarak görülmektedir. Ayrıca elektroliz süresi ve akım yoğunluğuna bağlı olarak pH 3,5-7 değer aralıklarında ortamda bulunan kompleksler, Fe₂(OH)₂⁴⁺ ve Fe₂(OH)₄²⁺ komplekslerine doğru polimerize olma eğilimindedir (Secula, Cretescu, Cagnon, Manea, Stan, & Breaban, 2013). Fakat Fe(III) türleri arasında kirlenici gideriminde tercih edilen koagülantın Fe(OH)₃ olduğu görülmektedir (Garcia-Segura, Eiband, Melo, & Martínez-Huitle, 2017).

Boyarmadde çözeltilisinin başlangıçtaki pH değerinin renk giderim verimine etkisini tespit etmek için başlangıç derişiminin 50 mg/L'de ve sistemin akım yoğunluğunun 2 mA/cm² değerinde sabit tutularak pH 5, pH 7 ve pH 9 değerlerinde elektrokoagülasyon prosesi uygulanmıştır. 30 dakika elektroliz süresi boyunca belirlenen sürelerde numuneler alınmıştır. Başlangıç pH değeri seçilen değerlere ayarlandıktan sonra, süreç boyunca pH kontrolü yapılmadan testler gerçekleştirilmiştir. Bilindiği gibi pH, çözelti ortamında

bulunan H^+ ve OH^- iyonlarının konsantrasyonlarını ifade eder. Elektrokoagülasyon prosesinde pH, çözelti ortamında oluşacak olan türleri belirleyen temel bir parametredir. Çözeltinin pH konfigürasyonuna bağlı olarak, çeşitli monomerik ve polimerik hidroksil kompleksleri oluşur. Bugüne dek yapılan çalışmalar elektrokoagülasyon için en uygun ve etkin pH değerinin hafif asidikten nötral bölgeye kayan aralıklarda olduğunu göstermiştir. Bu pH aralıkları, kirletici gideriminde rol alan metal hidroksit komplekslerinin elektrokimyasal hücre içerisinde oluşumunun optimum düzeyde sağlanabildiği aralıklardır (Moreno-Casillas, Cocke, Gomes, Morkovsky, Parga, & Peterson, 2007).



(a) 30 dakikalık etki

(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.4: RB222 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderim verimine pH etkisi (Elektrokoagülasyon, C_0 : 50 mg/L, J : 2 mA/cm²).

Elde edilen bulgulara ait değişimler Şekil 3.4'te, bulgular ise Ek A.3'te verilmiştir. Şekil 3.4 (a) ve (b) incelendiğinde, elektroliz uygulanan çözeltinin başlangıç pH'nın değiştirilmesinin proses verimini etkilediği görülmektedir. En iyi renk giderimi pH 5'te ve sonra sırasıyla pH 7 ve pH 9 da olduğu görülmektedir. Literatür bulguları ve test sonuçlarının ışığında, yüksek proses performansı için düşük başlangıç pH değerleri ile çalışılması gerektiği söylenebilir.

3.1.4 Elektroliz Süresinin Etkisi

Bu tez çalışması boyunca yapılan testlerde elektroliz süresi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30 dakikalık zaman değerleri için incelenmiştir. Yukarıda çizilen tüm şekiller ve verilen bulgu tabloları belirli bir süreye kadar zaman ilerledikçe verimin yükseldiğini göstermektedir.

Tüm arıtım proseslerinde zaman dikkatle çalışılan bir parametredir. Çünkü kirletici gideriminin verimi elektroliz süresinin bir fonksiyonudur. Buna ilaveten eşitlik (2.3)'ye göre prosesin ekonomik analizi zaman parametresi ile birlikte değerlendirilir. Elektrokoagülasyonda elektroliz süresi arttıkça kirletici giderim verimi artmaktadır. Fakat belirli bir elektroliz süresinden sonra verim sabit kalmaktadır ve süre ilerlese de herhangi bir değişim göstermemektedir. Belirli bir akım yoğunluğu, başlangıç pH'ı ve başlangıç boyarmadde derişimi için anodun çözünmesiyle oluşan metal hidroksitlerin sayısı ancak elektroliz süresi arttıkça artar. Optimum elektroliz süresinden fazla bir süre için kirletici giderimini sağlayan flokların sayısı artmaz ve proses verimi de değişmez (Khandegar & Saroha, 2013).

3.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Ultrases/Elektrokoagülasyon Prosesi ile Giderimi

Bu bölüm, RB222 boyarmaddesinin ultrases-elektrokoagülasyon ikili prosesi kullanılarak gideriminin yapıldığı deneylerle ilgili bulguları içermektedir.

Çevre mühendisliğinde kirlilik gideriminde ve atıksu arıtımında ultrases tek başına uygulanabildiği gibi farklı bir proses veya proseslerle birleştirilerek eş zamanlı olarak kullanımı şeklinde olabilir. Sonikasyon olarak da adlandırılan ses dalgası enerjisi herhangi bir ortamdan geçerken kimyasal, fiziksel ve biyokimyasal olarak çeşitli etkilerde bulunur (Knorr, Zenker, Heinz, & Lee, 2004). Sonikasyonda en kritik akustik süreç kavitasyon olayıdır. Akustik kavitasyon, yığın çözeltide kimyasal değişimler meydana getirir. Ultrases bir ortamdan geçerken ses dalgalarının basıncı bazı bölümlerde düşer ve ortamda bulunan moleküllerin arasındaki mesafe normalin üzerine çıkarak kabarcık oluşur. Sürekli ultrasonik enerjiye maruz kalan ortamda oluşan bu kabarcıklar giderek büyür, salınır ve daha fazla sonikasyon enerjisi absorplayamayacak kritik hacme ulaştıklarında içeri doğru sönmülenir (Kantaş, 2007), (Uzunoğlu, 2012). Bu sönmülenme yani baloncukların patlamaları, ultrases uygulanan ortamda enerji birikimine sebep olur. Sonuçta kavitasyon bölgesinde bir türbülans ve yüksek enerjili kesme dalgaları oluşur (Yılmaz T. , 2011) (Patist & Bates, 2008). Akustik kavitasyonda üretilen yüksek enerji, yığın çözeltide çeşitli radikallerin ve ara ürünlerin oluştuğu bazı sonokimyasal tepkimeler gerçekleştirir. Bu sonokimyasal tepkimeler kirlilik giderim proseslerinde tepkime hızını artırma, serbest radikal oluşumunu sağlama ve katalizör görevi görme, mekanik etkilerle yüzey alanını artırıp reaksiyonu hızlandırma gibi etkilerde bulunur (Thompson & Doraiswamy, 1999), (Adewuyi, 2001).

Ultrasesin uygulandığı ortamda serbest hidroksil radikallerinin oluşunu aşağıda verilen eşitlik (3.5)-(3.11) ile açıklanabilir (Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020).



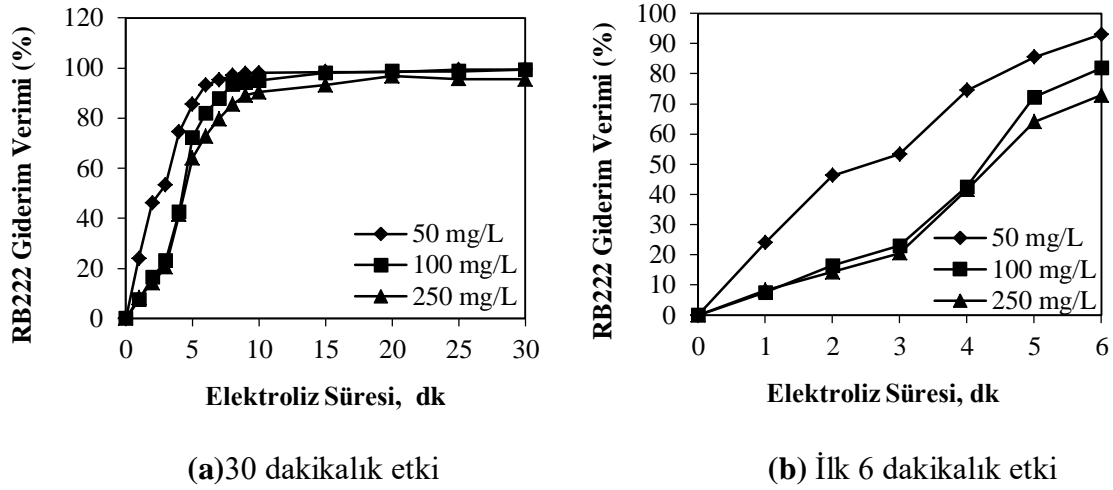
$\bullet\text{OH}$, $\text{H}\bullet$, $\text{O}\bullet$ ve hidroksiperoksil ($\text{OOH}\bullet$) gibi serbest radikallerin oluşunu suyun sonoliz yani sonokimyasal etkilerle elektrolizi sonucunda gerçekleşir. Bu radikaller organik kirliliklerin gideriminde oldukça işlevsel bir rol oynamaktadır (Chowdhury & Viraraghavan, 2009). Hem kirletici giderim hızını hem de elektrokoagölasyon prosesinin performansını artıran ultrasonik işınım, elektroliz boyunca elektrotların pasivasyonu sebebiyle yüzeyde katı madde birikiminden kaynaklanan olumsuz etkiyi azaltır. Bunun yanı sıra elektrot yüzeyindeki elektriksel çift tabakanın kalınlığını indirger. Ayrıca ultrasonik etki reaksiyonda elektrotların her iki yüzeyinin aktif olarak işlem görmesini sürdüren lokal bir implant gibi elektrotlarla su arasındaki sürtünmeyi artırır (Al-Qodah & Al-Shannag, 2019). Tüm bu etkilerin bileşkesi olarak ultrasonik işınım elektrokoagölasyon prosesinde sinerjistik etki ile proses verimine katkı sağlamaktadır.

3.2.1 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagölasyon ile Giderimine Başlangıç Boyarmadde Derişiminin Etkisi

Bu bölüm, RB222 boyarmaddesinin ultrases destekli elektrokoagölasyon prosesi kullanılarak gideriminin yapıldığı deneylere ait bulguları içermektedir.

Kirlilik giderim proseslerinde kirleticinin miktarı yani başlangıç derişimi proses verimini etkileyen önemli bir etkidir. Çalışmanın bu bölümünde elektrokoagölasyon prosesi ultrasonik banyo içinde gerçekleştirilerek RB222'nin başlangıç derişiminin proses verimine etkisi incelenmiştir. Ultrases işınımlı kirlilik giderimlerinde tek başına ya da başka prosesler eşliğinde kullanılabilir. Burada elektrokoagölasyon ile kombine edilerek uygulanmış ve prosesin performansına etkisi değerlendirilmiştir. 50, 100 ve 250 mg/L başlangıç derişimlerinde boyarmadde çözeltileri hazırlanarak sistemin akım yoğunluğu 2

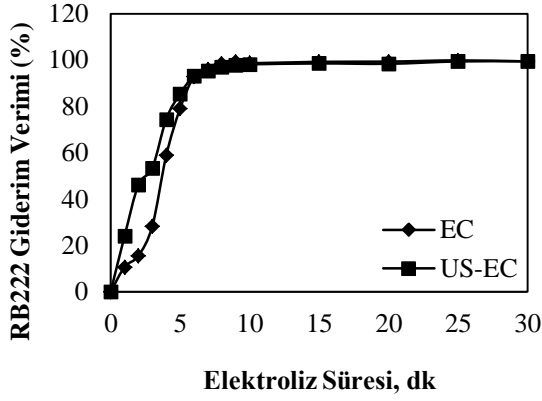
mA/cm² ve pH değeri 5'te sabit tutulmuş ve testler yapılmıştır. Deneysel bulgulara ait değişimleri gösteren grafikler Şekil 3.5 (a) ve (b) de; deneysel bulgular ise Ek B.1'de verilmektedir. Verilen grafikler ve tablo incelendiğinde 5 dakikalık ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi uygulaması neticesinde 50 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler için % 85,4, 100 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler için % 72,2 ve 250 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler için % 64,1 verime ulaşılmıştır.



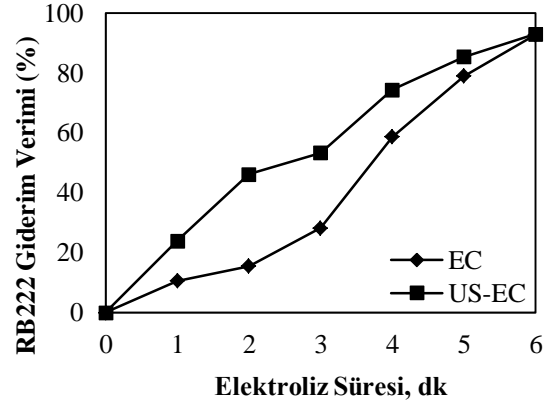
Şekil 3.5: RB222 boyarmaddesinin ultrases-elektrokoagülasyon ile giderim verimine başlangıç derişimi etkisi (Ultrases/Elektrokoagülasyon, J: 2 mA/cm², pH₀: 5).

Başlangıç derişimi artırıldıkça verimde düşme olduğu görülmektedir. Süre ilerledikçe her üç derişim için elde edilen renk giderim verimi artış hızında göze çarpan bir yavaşlama olduğu görülmektedir. 50 ve 100 mg/L başlangıç derişimine ait sonuçlar 30.dakikada % 99'un üzerinde elde edilebilmiş 250 mg/L için ise en yüksek verim değeri 20.dakikada %96,8 olarak elde edilmiş 25 ve 30.dakikada ise yaklaşık 1 birim azalma ile proses % 95,54 verimle sonuçlanmıştır.

Bölüm 3.1.1'de verilen RB222 boyarmaddesinin elektrokoagülasyon ile giderimine başlangıç boyarmadde derişiminin etkisi deneysel çalışmasının sonuçlarıyla ilgili bulgulara ait şekil ve tablo mevcut verilerle karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmayla ilgili olarak Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8 oluşturulmuştur.

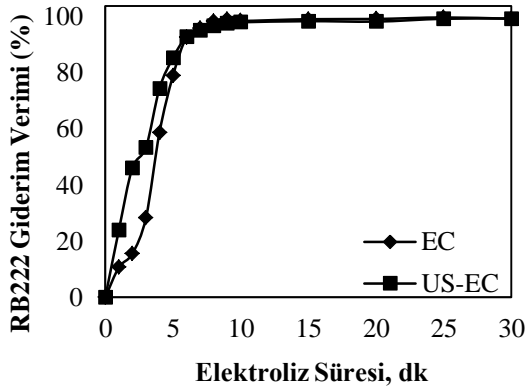


(a)30 dakikalık etki

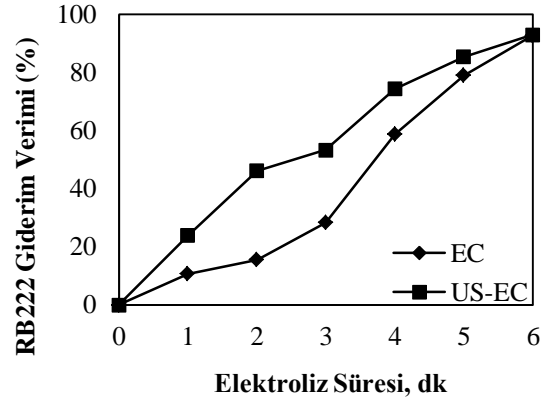


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.6: 50 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması (J: 2 mA/cm², pH₀: 5).

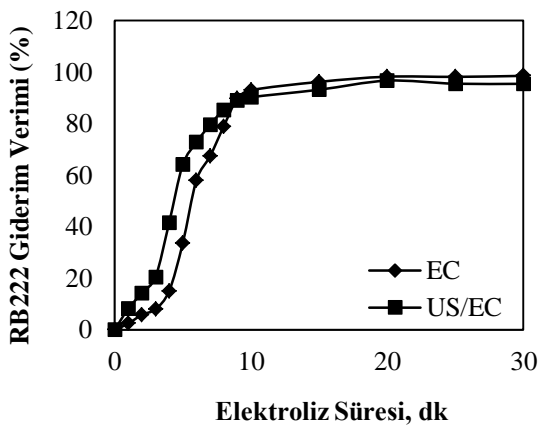


(a)30 dakikalık etki

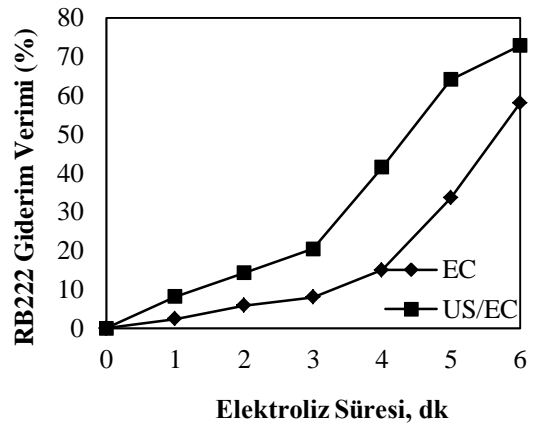


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.7: 100 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması (J: 2 mA/cm², pH₀: 5).



(a)30 dakikalık etki



(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.8: 250 mg/L EC ile US/EC karşılaştırması (J: 2 mA/cm², pH₀: 5).

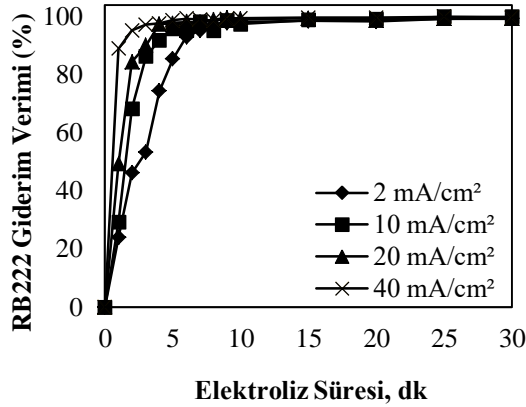
50 mg/L, 100 mg/L ve 250 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler için verilen bu karşılaştırma grafikleri Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8 incelendiğinde ultrases desteğinin elektrokoagülasyon prosesine 7.dakikaya kadar katkı sağladığı ve elektrokoagülasyona kıyasla daha yüksek verimle neticelendirdiği söylenebilir. Örneğin 50 mg/L başlangıç derişimi değerlerinde (Şekil 3.6) 3 dakikalık elektrokoagülasyon verimi %28,3 iken ultrases destekli elektrokoagülasyon verimi %53,4'e ulaşmıştır. Fakat artış yönünde giden bu seyir 7.dakikadan sonra elektrokoagülasyonda devam ederken, ultrases destekli elektrokoagülasyonda yavaşlamıştır. Nihayetinde elektrokoagülasyon prosesi 9.dakikada %99 verime ulaşmış, ultrases destekli elektrokoagülasyon ise 25.dakikada ulaşmıştır. Benzer durum 100 mg/L başlangıç derişimli testler için de geçerlidir. 250 mg/L başlangıç derişimli çözeltilerin ultrases destekli elektrokoagülasyona tabi tutulmasıyla elde edilen proses verimi değerleri incelendiğinde 5 dakikalık elektrokoagülasyon verimi %33,6 iken ultrases destekli elektrokoagülasyon verimi %64,1 olarak elde edilmiştir. Proses için verilen süre yani 30 dakikalık elektroliz süresi tamamlandığında elektrokoagülasyon verimi %98,6, ultrases destekli elektrokoagülasyon verimi ise %95,5 olarak hesaplanmıştır. Göze çarpan bir diğer husus ise ultrases destekli gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde verim 20.dakikaya kadar artış göstermiş ve devamında %95,5'e kadar azalmıştır. Buna sebep olan etkinin ultrases uygulamasıyla oluşan kavitasyonun olduğu ve kavitasyon neticesinde oluşan yüksek basıncın boyarmaddenin tutunmuş olduğu floklardan çözelti fazına doğru çözüldürdüğü düşünülmektedir.

3.2.2 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Giderimine Akım Yoğunluğunun Etkisi

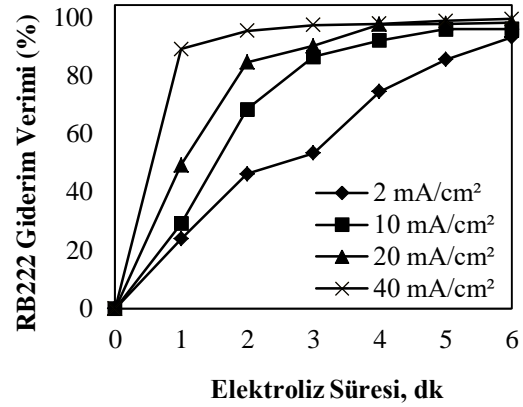
Elektroliz süresi ilerledikçe hidroksil radikallerinin miktarı artar ve böylece renk giderim verimi de artar. Bir başka deyişle elektroliz sürecinde artan hidroksil radikalleri boyarmaddeyi okside eder ve rengin uzaklaştırılmasını kolaylaştırır (Özyonar, Gökkuş, & Sabuni, 2020).

Reaktif Blue 222 boyarmaddesinin sulu çözeltilerden ultrases ortamında elektrokoagülasyon prosesinin uygulanarak gideriminde akım yoğunluğunun proses verimine etkisi incelenmiş ve elde edilen bulgularla çizilen grafikler Şekil 3.9 (a) ve (b)'de deneysel bulgular ise Ek B.2'de verilmiştir. Bilindiği gibi elektrokoagülasyon prosesinin verimini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biri akım yoğunluğudur. Çalışmanın bu bölümünde ultrases eşliğinde gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesine akım

yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma boyunca boyarmaddenin başlangıç derişimi 50 mg/L'de ve pH 5'te sabit tutulmuştur. 30 dakikalık proses (ultrases/elektrokoagülasyon) verimi sonuçlarını gösteren Şekil 3.9 (a) ve ilk 6 dakikanın verim değerlerini gösteren Şekil 3.9 (b) incelendiğinde akım yoğunluğunun artırıldıkça proses veriminin artış hızının da arttığı görülmektedir. Örneğin 3.dakikada elde edilen verim değerleri 2 mA/cm² için %53,4, 10 mA/cm² için %86,3, 20 mA/cm² için %90,1 ve 40 mA/cm² için %97,2 olduğu görülmektedir.



(a) 30 dakikalık etki



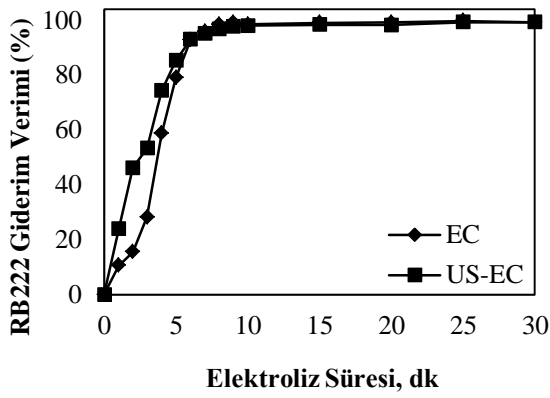
(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.9: RB222 boyarmaddesinin ultrases/elektrokoagülasyon ile giderim verimine akım yoğunluğunun etkisi (Ultrases/Elektrokoagülasyon, C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

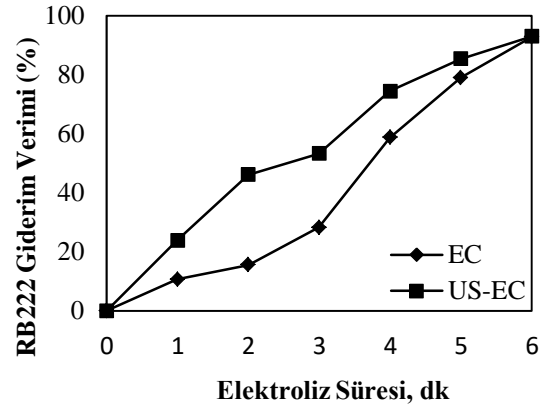
Bununla birlikte süreç ilerledikçe elde edilen verim değerleri incelendiğinde %99 üzerinde verime 2 mA/cm²'de 25.dakikada, 10mA/cm²'de 20.dakikada, 20 mA/cm²'de 9.dakikada, 40 mA/cm²'de ise 6.dakikada ulaşılmıştır. Bir başka deyişle akım yoğunluğu azaltıldıkça boyarmaddenin ortamdan giderilme süresi uzamaktadır. Akım yoğunluğunun ve sürenin proses maliyetini doğrudan etkilediği düşünülürse, düşük bir işletme maliyeti için parametrelerin iyi tasarlanması gerekmektedir.

Akustik bir enerji olan ultrases elektrokoagülasyon prosesi ile birlikte uygulandığında farklı akım yoğunlukları için elde edilen sonuçların elektrokoagülasyon prosesi sonuçları ile karşılaştırılması yapıldığında Şekil 3.10, 3.11, 3.12, 3.13'teki değişimler elde edilmiştir. Genel anlamda bakıldığında her dört akım yoğunluğu çalışmasının sonuçlarının ultrasesten olumlu yönde etkilendiği söylenebilir. Ancak 2 amperlik akımın uygulandığı ve 40 mA/cm² akım yoğunluğuna karşılık gelen çalışmanın sonuçları ilk 2 dakikada

elektrokoagülasyon prosesi için daha yüksek çıkmış olsa da 3.dakikadan itibaren her ikisi de %97 üzerinde verimle devam etmiştir. Yüksek akım yüksek maliyet anlamına geleceğinden 40 mA/cm² değerinin en uygun akım yoğunluğu olarak seçilmemesi gereken bir parametre olduğu açıktır. Burada elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon için verilen eşitlik (2.3) ve eşitlik (2.4) ile gerekli maliyet hesaplamaları yapılarak beklenen performansa karşılık uygun akım yoğunluğu ve zaman değerleri seçilebilir.

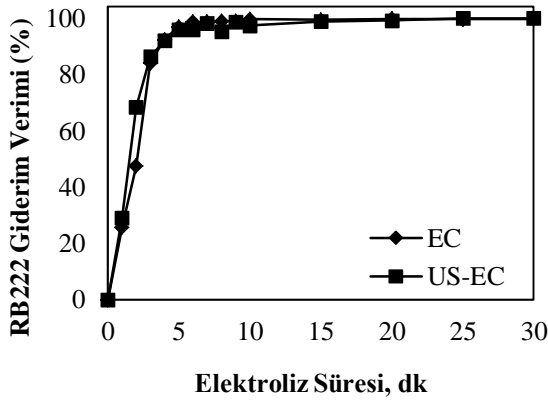


(a)30 dakikalık etki

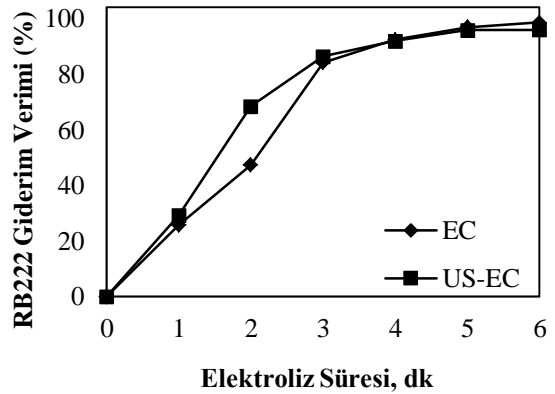


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.10: 2 mA/cm² için EC ile US/EC karşılaştırması (C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

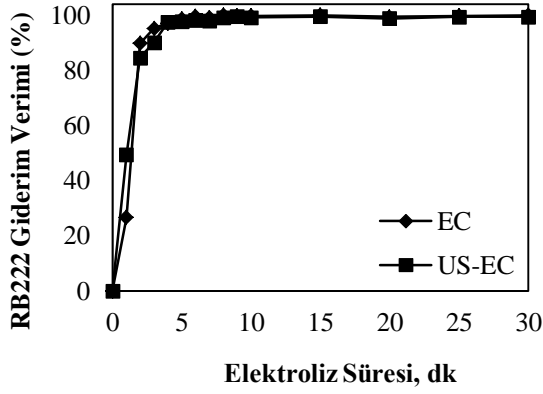


(a)30 dakikalık etki

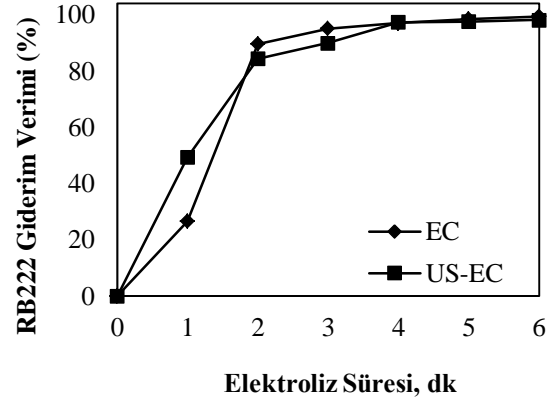


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.11: 10 mA/cm² için EC ile US/EC karşılaştırması (C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

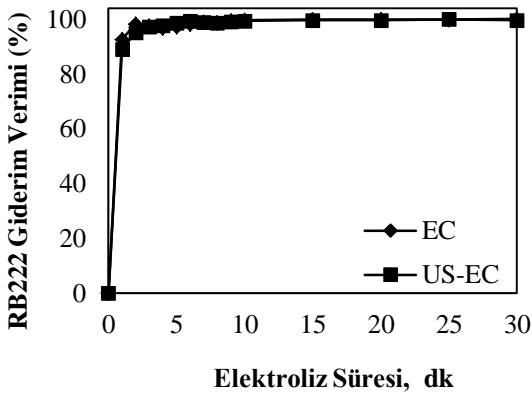


(a) 30 dakikalık etki

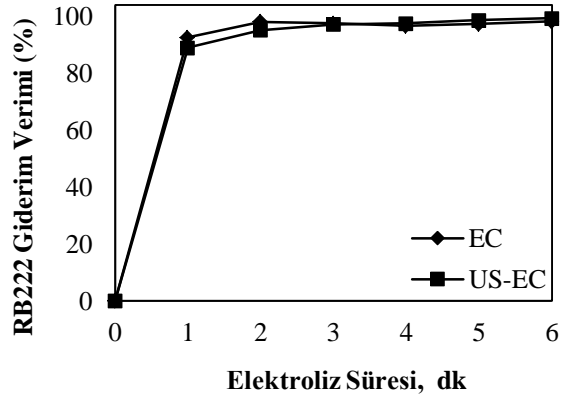


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.12: 20 mA/cm² için EC ile US/EC karşılaştırması (C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).



(a) 30 dakikalık etki

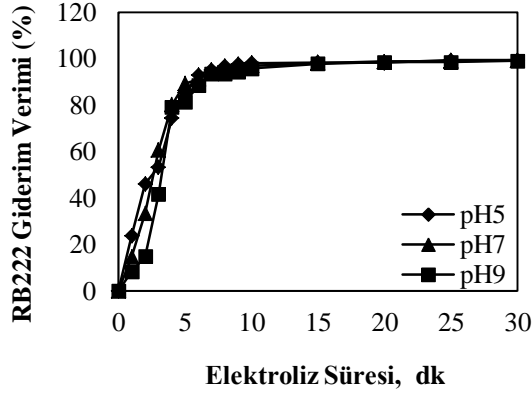


(b) İlk 6 dakikalık etki

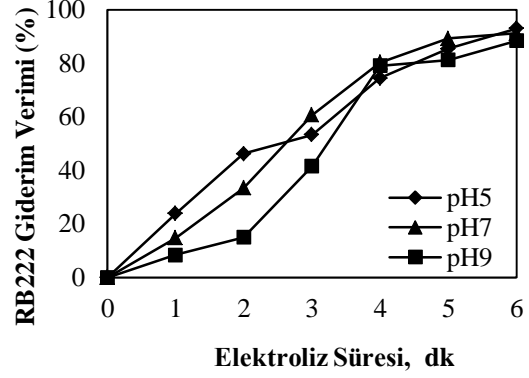
Şekil 3.13: 40 mA/cm² için EC ile US/EC karşılaştırması (C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

3.2.3 Reaktif Blue 222 Boyarmaddesinin Ultrases/Elektrokoagülasyon ile Giderimine Başlangıç pH'nın Etkisi

RB222'nin ultrases ile kombine edilmiş elektrokoagülasyon prosesiyle giderimine pH parametresinin etkisini incelemek amacıyla başlangıç derişimi 50 mg/L'de 2 mA/cm²'de sabit tutarak 5, 7 ve 9 pH değerlerinde işlem gerçekleştirildi. 30 dakikalık süreçte belirlenen zaman aralıklarında numuneler alınıp UV spektrofotometrede absorbansları ölçülerek derişim hesaplaması yapıldı. Testlerin başında ayarlanan pH değerleri kontrol edilmeksizin takip edildi ve kaydedildi. Deneyler sonucunda elde edilen bulguların değişimleri Şekil 3.14 (a) ve (b)'de bulgular ise Ek B.3'te gösterilmiştir.



(a) 30 dakikalık etki



(b) İlk 6 dakikalık etki

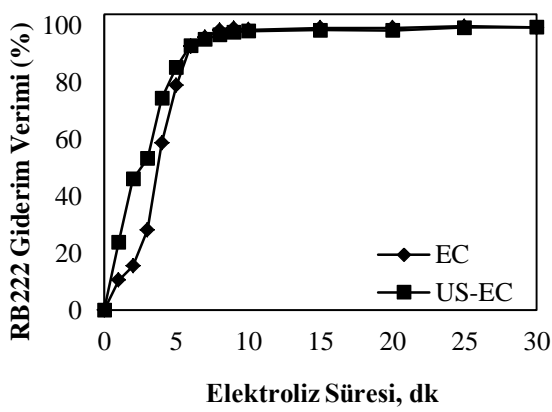
Şekil 3.14: RB222 boyarmaddesinin ultrases/elektrokoagülasyon ile giderim verimine pH etkisi (Ultrases/Elektrokoagülasyon, C_0 : 50mg/L, J : 2 mA/cm²).

Grafiklerin seyri ve verilen tablodaki bulgular dikkatle incelendiğinde ilk 3 dakikada pH düştükçe verimin daha yüksek değerlerde seyrettiği görülmektedir. Ancak 3.dakikadan sonra pH'ın etkisi ortadan kalkmaktadır. Her üç başlangıç pH değeri çalışmasına ait sonuçlar, %99'un üzerinde verim elde etmenin 25 dakika gibi uzun bir elektroliz süresinde gerçekleştiğini göstermektedir.

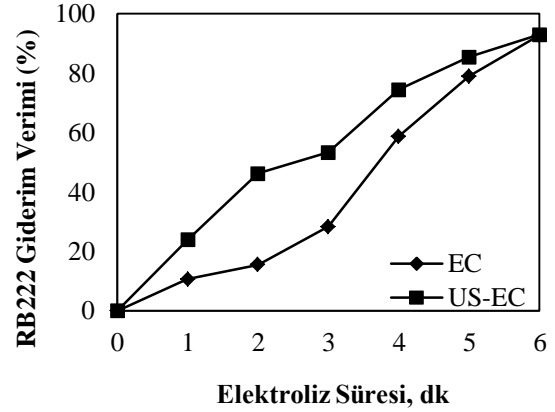
Şekil 3.15(a)-(b), Şekil 3.16 (a)-(b), Şekil 3.17 (a)-(b)' de sırasıyla pH 5, 7 ve 9'da elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon proseslerinin karşılaştırılması verilmektedir. Her üç pH değeri için de ultrases desteğinin elektrokoagülasyonda verimi artırıcı yönde katkısı olmuştur. Bu katkı 7.dakikaya kadar devam etmiştir. Fakat 7.dakikadan sonra her iki proseste de birbirine yakın verim değerleri elde edilmiştir. pH 5 için 4.dakikada elektrokoagülasyon verimi %58,7 iken ultrases desteği verildiğinde proses verimi %74,4'e çıkmıştır. Aynı elektroliz süresi için pH 7 deneyinde elektokoagülasyon verimi %40,2 ultrases destekli elektrokoagülasyon verimi %80,3'e ulaşmıştır. pH 9 parametresi çalışıldığında elektrokoagülasyon verimi %19,9 ultrases destekli elektrokoagülasyon verimi ise %79,1 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan anlaşılacağı gibi ultrasesin etkisinin en yüksek düzeyde olduğu pH değeri 9'dur. pH 9'da ultrases desteği verimi yaklaşık 4 kat, pH 7'de yaklaşık 2 kat ve pH 5'te yaklaşık 1,25 kat artış göstermiştir. Alkalin koşullardaki bu belirgin farkın sebebinin ultrases prosesinin oluşturduğu dalgaların yığın çözeltiyi karıştırma etkisi göstermesi olarak açıklanmaktadır. Metal hidroksit flokları ve kirletici moleküllerinin arasında gerçekleşen çarpışmaların

şiddeti ve frekansı arttığı için verimdeki bu artış olağan kabul edilmektedir (Raschitor, Fernandez-Marchante, Cretescu, Rodrigo, & Cañizares, 2014).

Buna ilaveten pH 5 için boyarmaddenin %99'un üzerinde giderilme süresi elektrokoagülasyonda 9.dakikada gerçekleşmişken ultrases destekli elektrokoagülasyonda 25.dakikada gerçekleşmiştir. Aynı durum pH 7'de her iki proses için de 25.dakikadan sonra, pH 9'da ise elektrokoagülasyon için 15.dakikadan sonra ultrases destekli elektrokoagülasyon için ise 30.dakikada gerçekleşmiştir. Bu durum literatürde ultrases enerjisinin elektrokoagülasyon prosesi boyunca oluşan flokları kırması ya da çözündürmesiyle açıklanmaktadır (Lakshmi & Sivashanmugam, 2013). Floklar bu yolla kırılırken ya da çözünürken beraberinde kirleticileri de çözündürür. Bu durumda arıtım işleminin tersi gerçekleşir ve giderim performansı düşer.

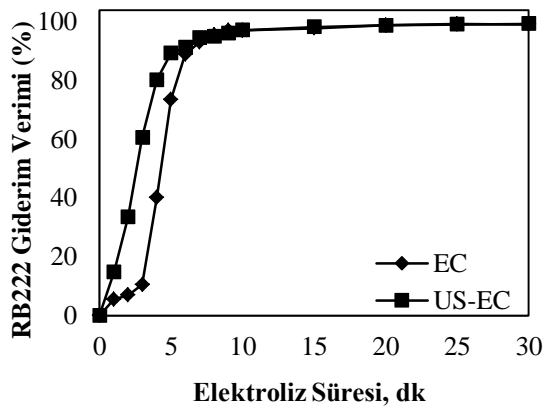


(a) 30 dakikalık etki

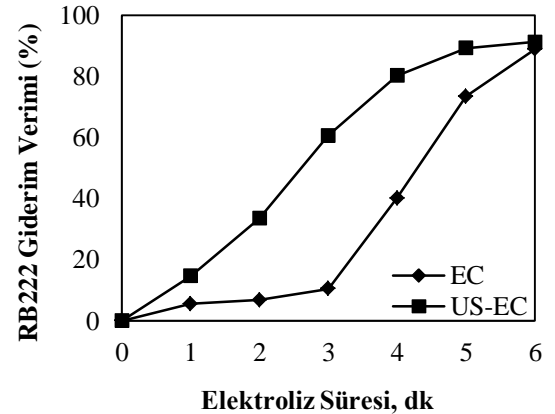


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.15: pH:5'te EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm², C₀: 50 mg/L).

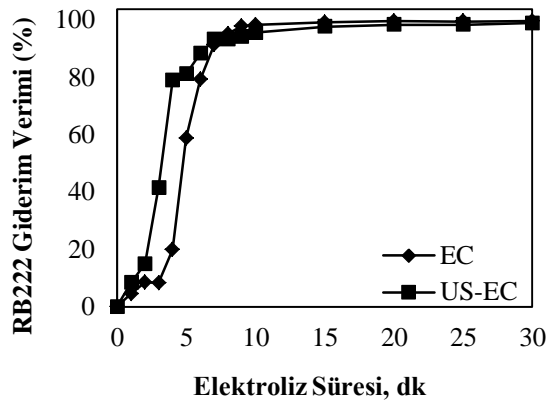


(a) 30 dakikalık etki

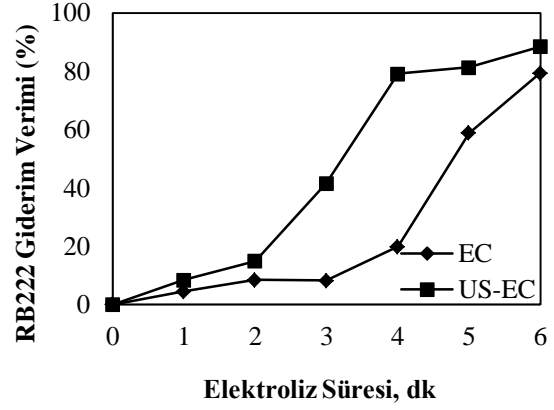


(b) İlk 6 dakikalık etki

Şekil 3.16: pH:7'de EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm², C₀: 50 mg/L).



(a) 30 dakikalık etki

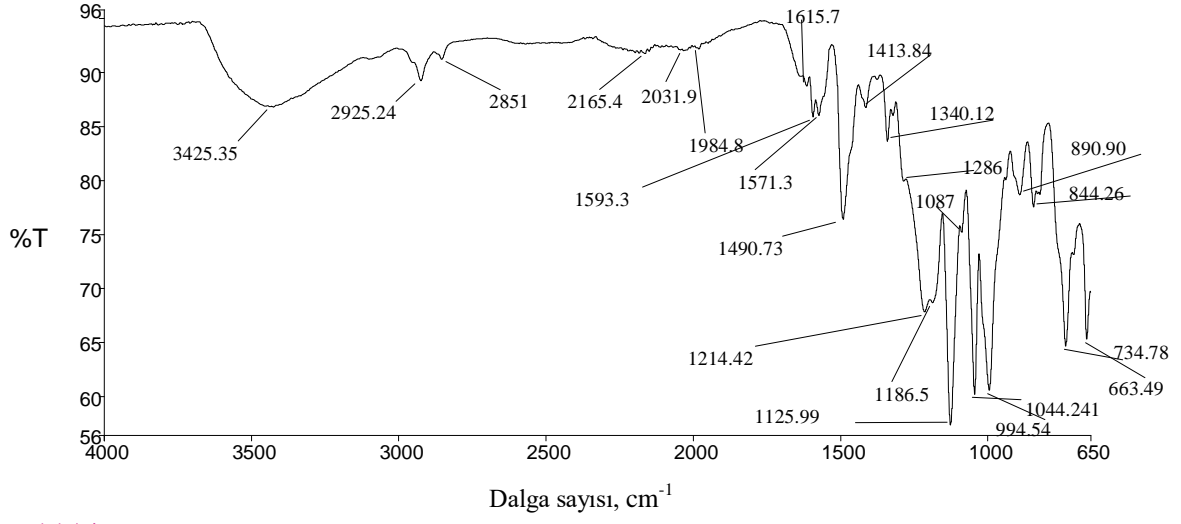


(b) İlk 6 dakikalık etki

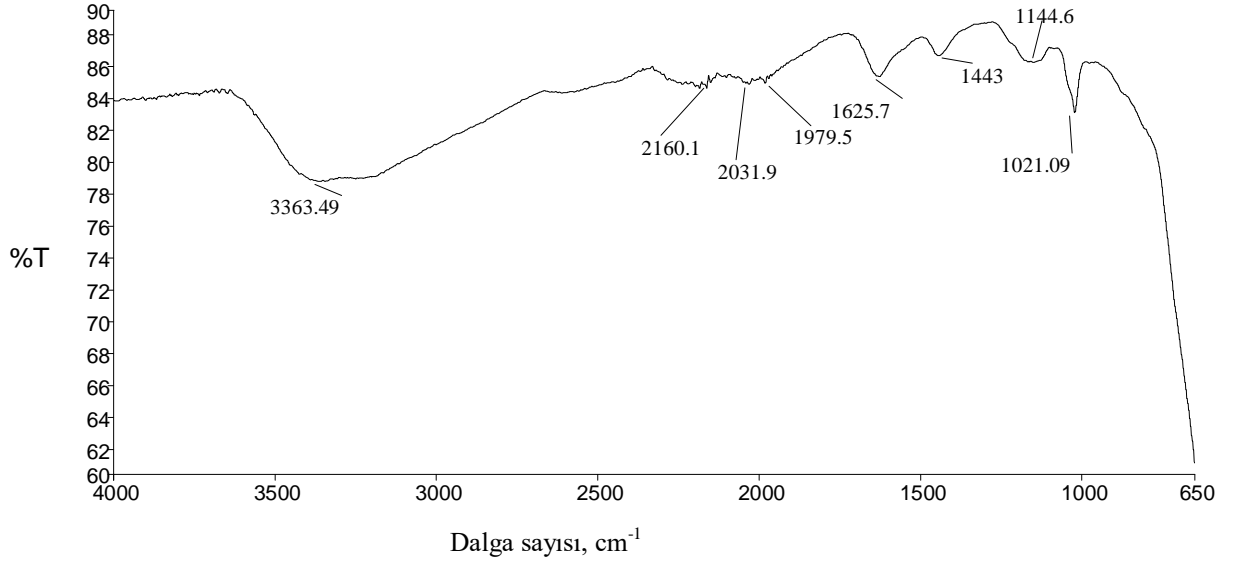
Şekil 3.17: pH:9'da EC ile US/EC karşılaştırılması (J: 2 mA/cm², C₀: 50 mg/L).

3.3 FT-IR Karakterizasyonu

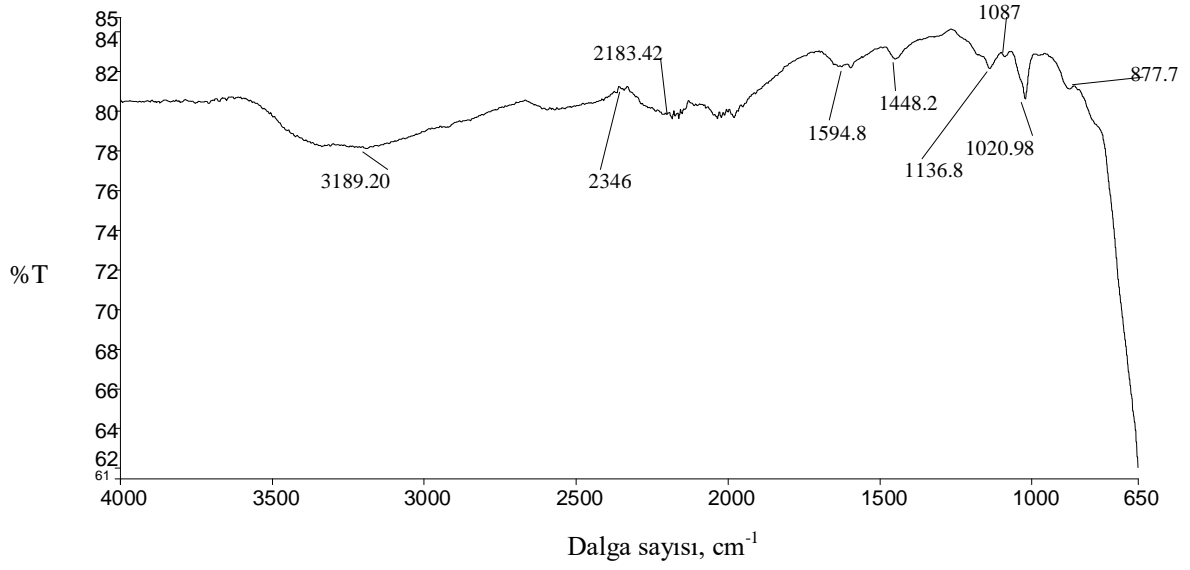
Bu tez çalışmasında kullanılan RB222 boyarmaddesinin, elektrokoagülasyonda yüzeyde ve dipte biriken fazların, ultrases destekli elektrokoagülasyonda yüzeyde ve dipte biriken fazların infrared spektrumları Şekil 3.18-22'de sırasıyla verilmektedir. Şekil 3.18'de verilen boyarmaddeye ait IR spektrumunda bazı karakteristik pikler görülmektedir. 3425 cm⁻¹'de görülen geniş pik -NH, -OH ve aromatik =CH gerilmelerini; 2925 ve 2851 cm⁻¹ bantları alifatik -CH asimetrik gerilmelerini; 2031 cm⁻¹'de görülen pik C-N titreşimini; 1615 cm⁻¹'de görülen pik aromatik C=C gruplarını; 1593 ve 1571 cm⁻¹'deki bantlar C=N gerilmelerini; 1490 cm⁻¹ bandı -N=N- azo grubunu; 1125 ve 1044 cm⁻¹'deki pikler asimetrik ve simetrik sülfonil gruplarını; 1413cm⁻¹'de görülen bant simetrik -N-C=N- gerilmelerini; 1340 cm⁻¹'de görülen bant S=O grubunun titreşimlerini; 1186 ve 1214 cm⁻¹ bandı fenolik -C-OH grubu titreşimlerini; 734 cm⁻¹'de görülen bant C-Cl gerilim titreşimlerini; 663 cm⁻¹'de görülen bant ise -S=O gerilmelerinin varlığını ifade etmektedir. Şekil 3.19-22'de verilen her iki prosetteki üst ve alt fazlara ait IR spektrumlarında boyarmaddenin bu karakteristik bantlarından bazılarının kaybolduğu bazılarının ise kaydığı ve yeni bir pikle ortaya çıktığı görülmektedir (Skoog, Holler, & Nieman, 1998). Bu bulgu bize boyarmaddenin çözelti fazından giderildiğini ve üst fazlardaki floklarda ve alt fazlardaki çökeltilerde toplandığını göstermektedir.



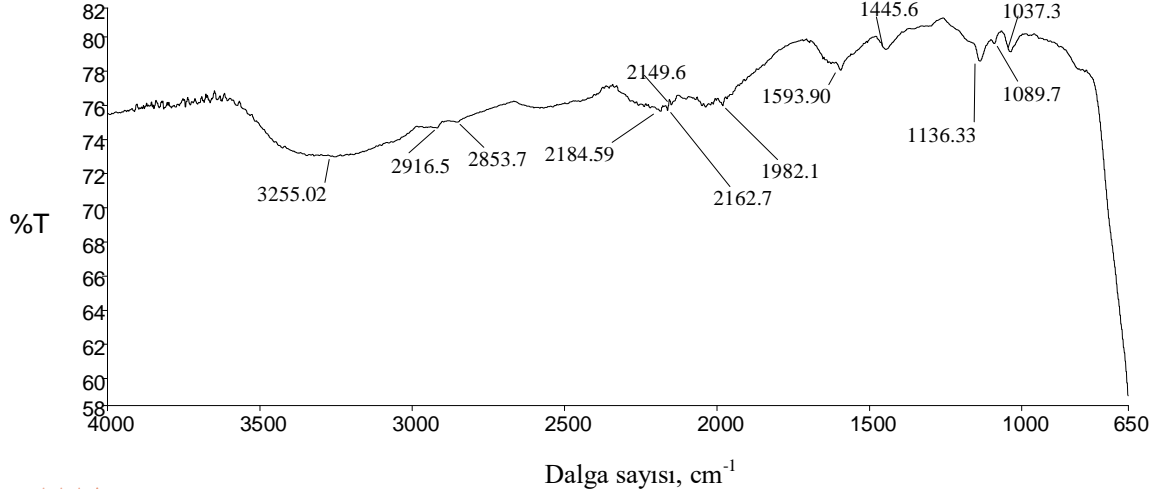
Şekil 3.18: Çalışmada kullanılan RB222 boyarmaddesinin IR spektrumu.



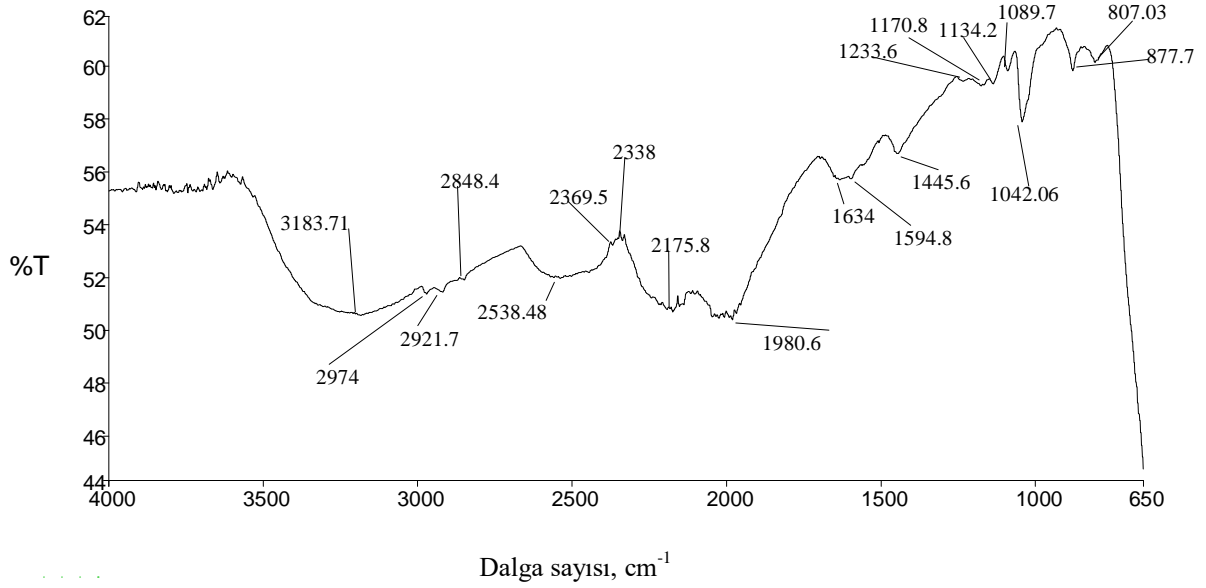
Şekil 3.19: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin EC üst faz IR spektrumu.



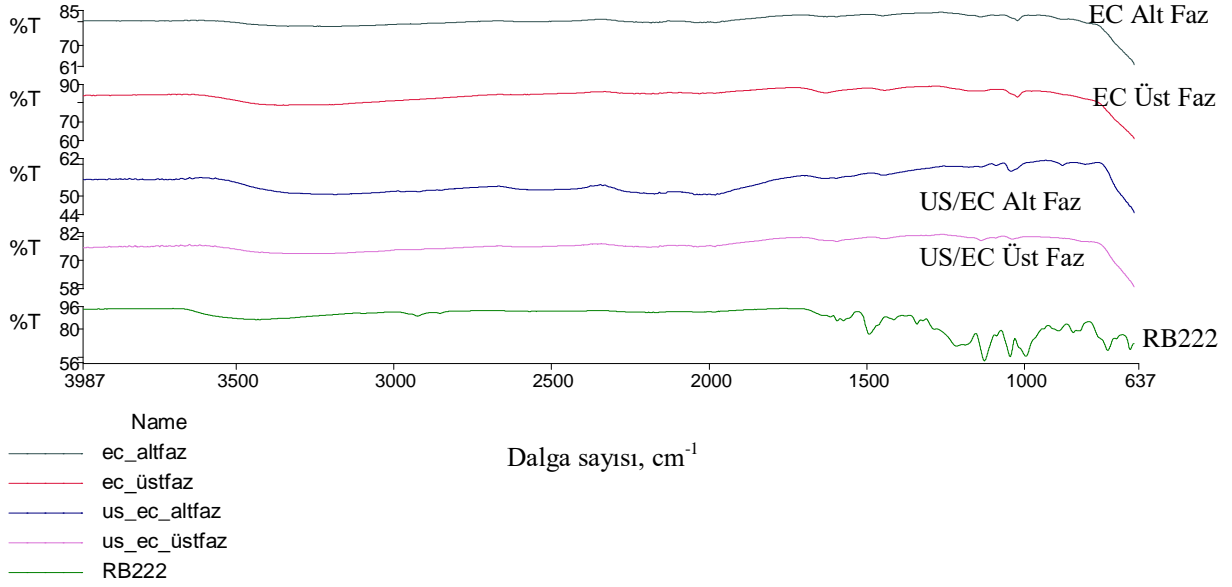
Şekil 3.20: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin EC alt faz IR spektrumu.



Şekil 3.21: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin US/EC üst faz IR spektrumu.



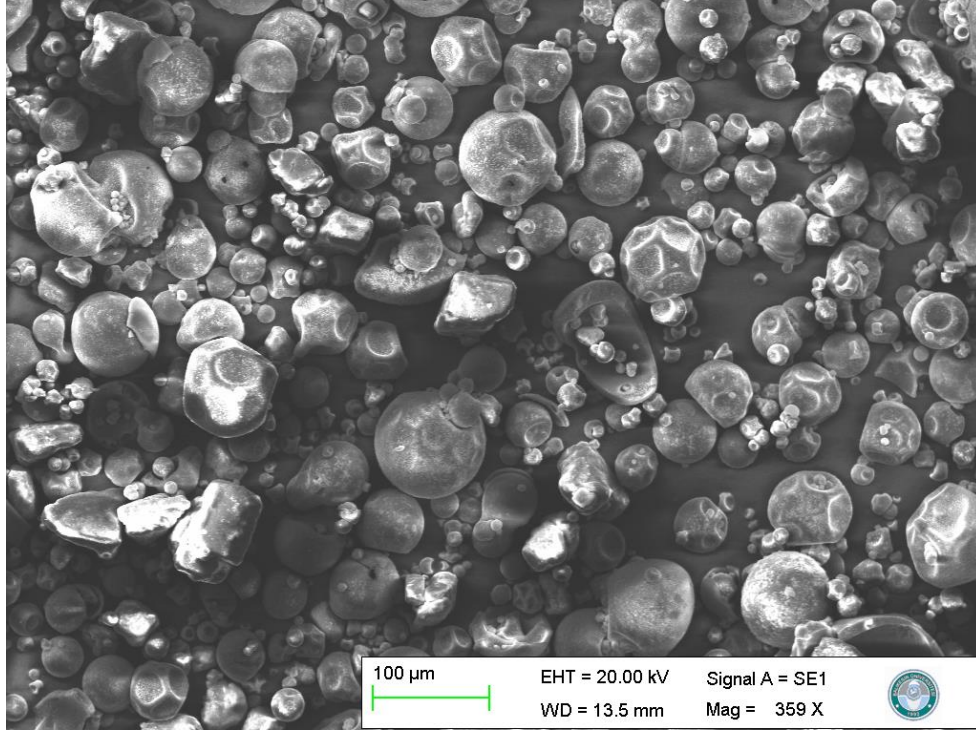
Şekil 3.22: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin US/EC alt faz IR spektrumu.



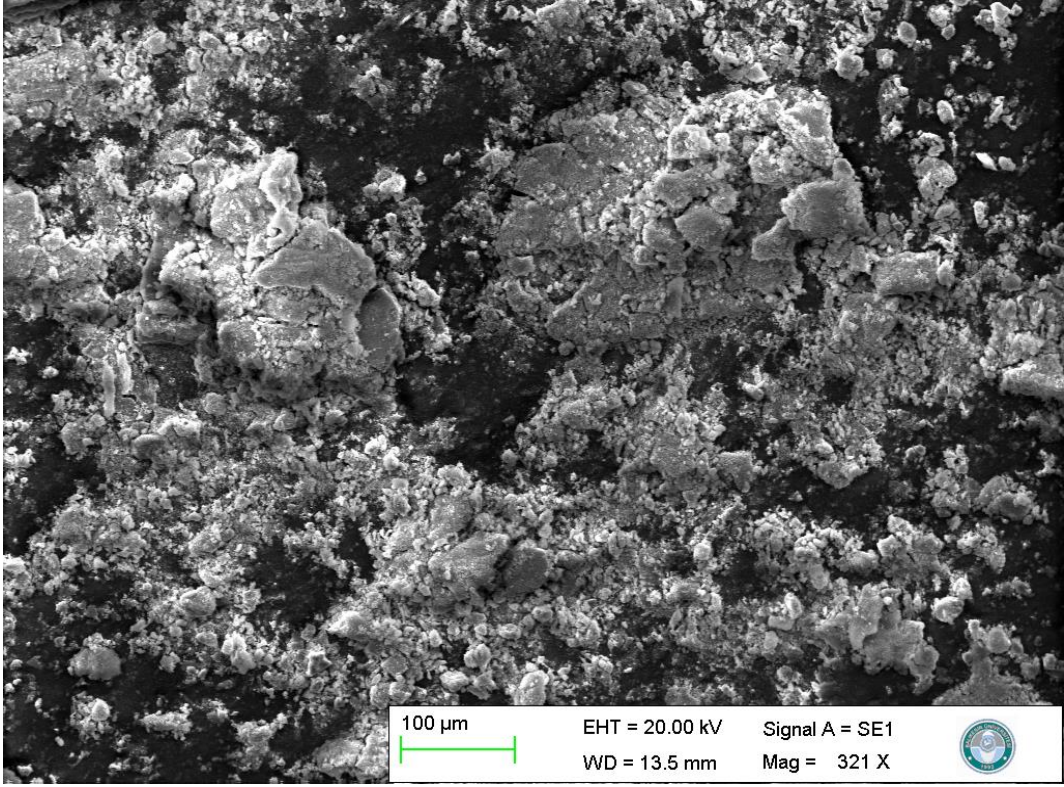
Şekil 3.23: Çalışmada kullanılan boyarmaddenin, üst ve alt fazlarının IR spektrumları.

Bu tez çalışmasında kullanılan RB222 boyarmaddesi, elektrokoagülasyon prosesinde yüzeyde ve dipte biriken fazlar, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinde yüzeyde ve dipte biriken fazlar morfolojik olarak görüntülenmek üzere taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen görüntüler Şekil 3.(24-26)'da verilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu, malzemelerin yüzey görüntülerini ve uygulanan herhangi bir işlem sonrası yüzeyde meydana gelen değişimlerini göstermede etkili bir analizdir. Bu çalışma boyunca kullanılan boyarmaddenin SEM görüntüsü (Şekil 3.24), söz konusu yapının boncuksu taneciklerden oluştuğunu göstermektedir. 30 dakikalık elektrokoagülasyon prosesinden sonra yüzeyde biriken fazın SEM görüntüsü (Şekil 3.25(a)) dipte biriken fazın SEM görüntüsünden (Şekil 3.25(b)) farklı bir yapıdadır. Yüzeyde biriken floklar kısmen birleşmiş halde ve köpüksü yapıda olduğu açıktır. Dipteki faz ise polimerik hidrokso türlerinin bir karışımı olup jelimsi bir yapı sergilemektedir. Ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi sonucunda elde edilen üst fazın morfolojik yapısı ultrases uygulanmayan elektrokoagülasyonda elde edilene göre (Şekil 26) kısmen farklıdır. Ultrases etkisiyle ortamdaki flokların yüksek hızlı çarpışmaları bazılarının düzleşmesine ve parçalanmasına neden olmuştur. Ultrasesin karıştırma etkisi flokların morfolojik yapılarının daha düzgün olmalarını sağlamıştır. Aynı durum Şekil 26 (a) ve Şekil 26 (b)'de verilen alt fazlar için de gözlenmektedir. Alt fazda biriken jelimsi hidrokso çökeltilerinin yüzeysel görüntüleri elektrokoagülasyonda daha girintili ve büyük

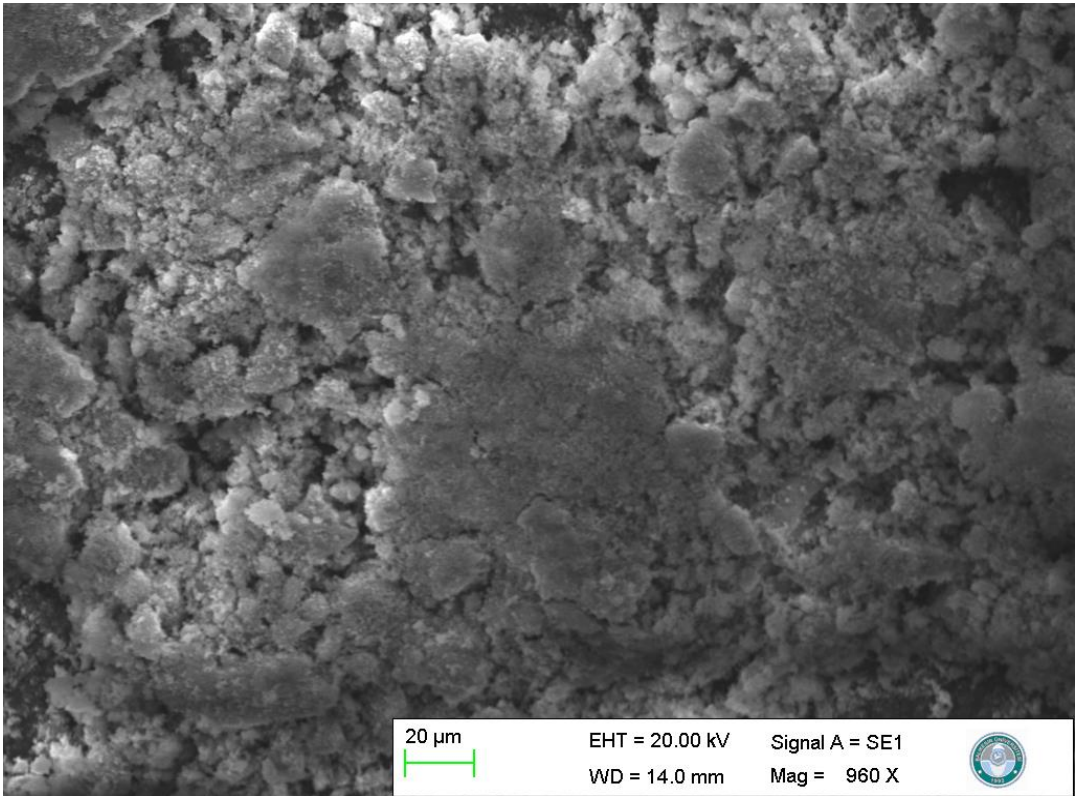
formlardayken ultrases uygulamalı elektrokoagülasyon neticesinde parçalanmış ve düzleşmiş formda karşımıza çıkmaktadır (Suslick, 1988).



Şekil 3.24: RB222 Boyarmaddesine ait SEM görüntüsü.

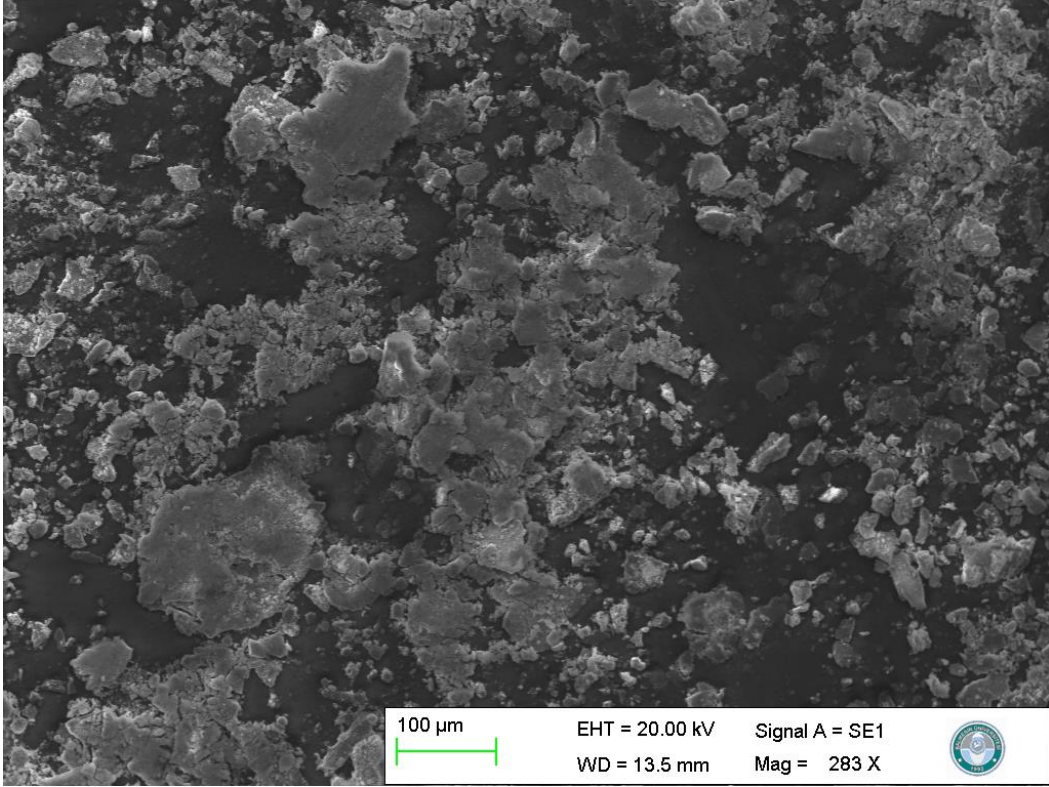


(a)

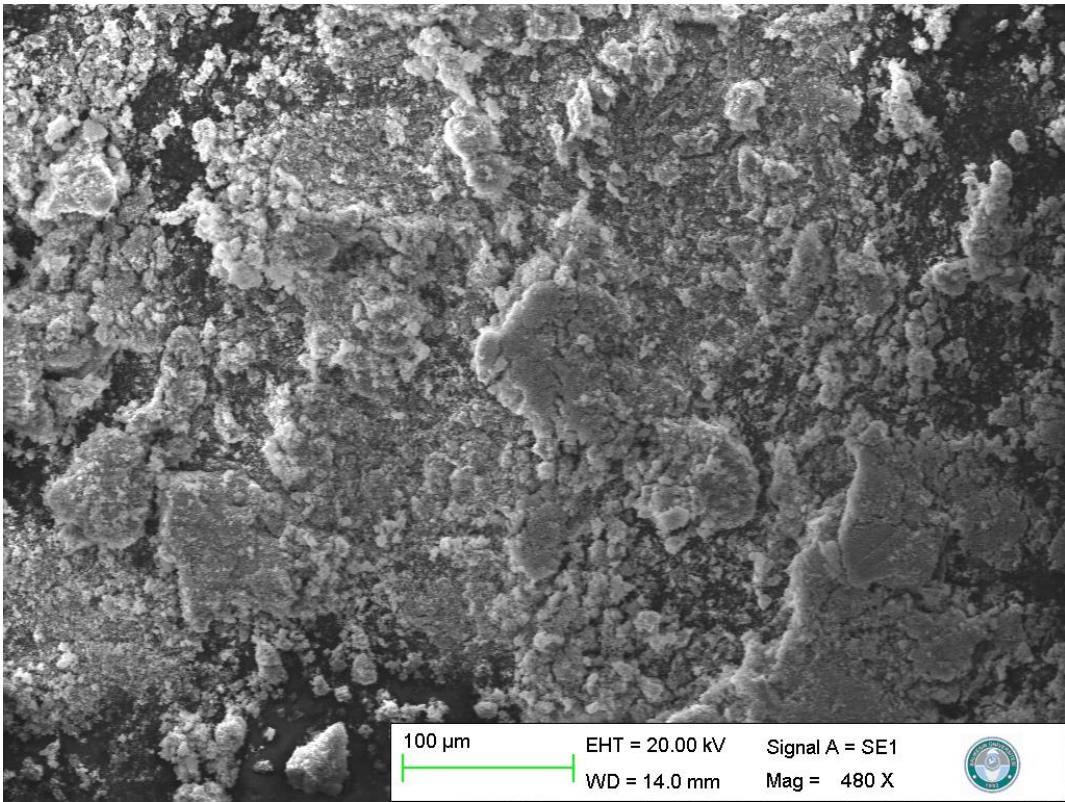


(b)

Şekil 3.25: Elektrokoagülasyon prosesinde elde edilen (a): üst faz, (b): alt faza ait SEM görüntüleri.



(a)



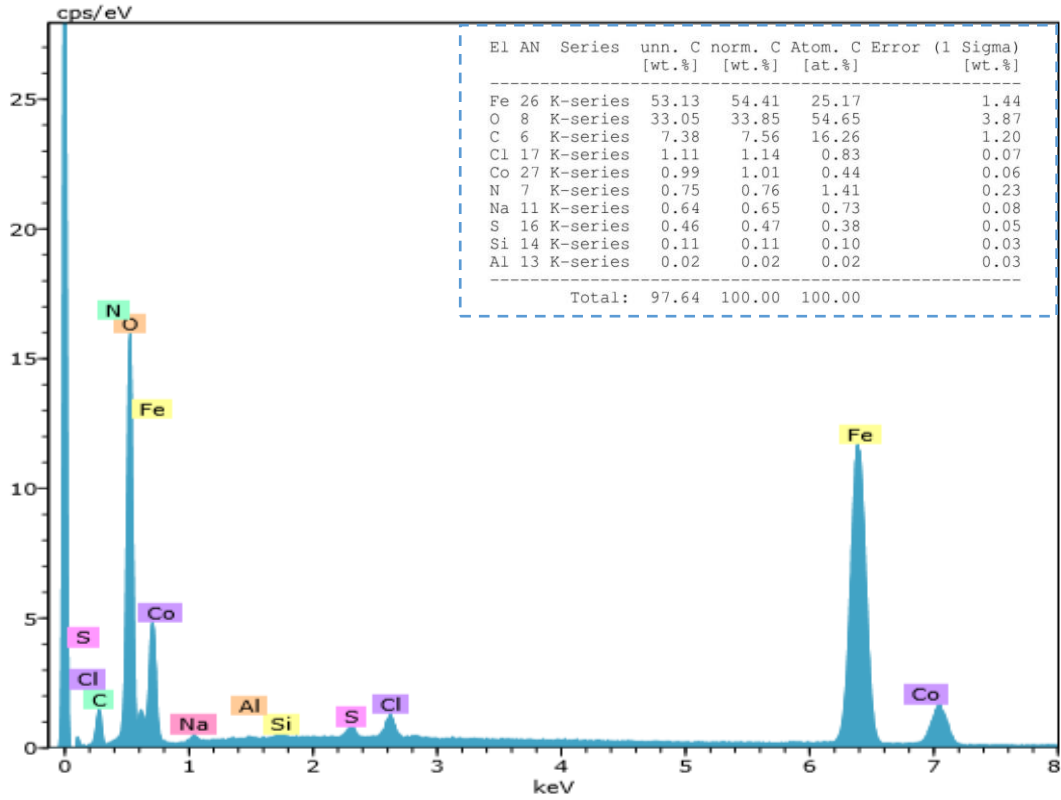
(b)

Şekil 3.26: Ultrases destekli lektrokoagülasyon prosesinde elde edilen (a): üst faz, (b): alt faza ait SEM görüntüleri.

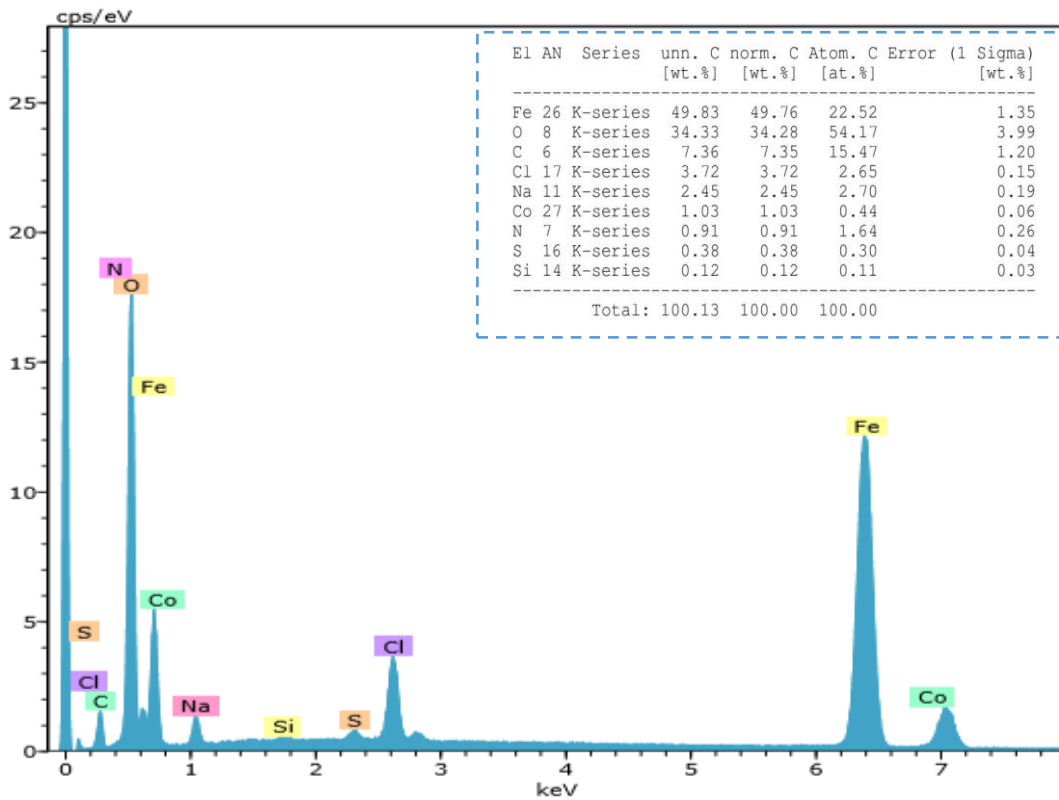
3.5 EDX Analizi

Kalitatif ve kantitatif analiz yaparak numune içerisinde var olan elementlerin varlığını ve miktarını bulmamızı sağlayan EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) analizinde enerjiye karşı yayılan x ışını sayısı belirlenir. Her bir element için karakteristik bir x ışını yayılımı gerçekleşir ve bu ışınların bağıl sayısının bir spektrumu oluşturulur. Bu spektrumda numunedeki elementlerin ağırlıkça ve atomikçe yüzde bileşimleri dikkate alınır. Elektrokoagülasyon prosesi sonunda elde edilen üst faz ve alt faz, ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinde elde edilen üst faz ve alt faza ait EDX spektrumları sırasıyla Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da verilmektedir. EDX analizi SEM görüntüsünün alımı ile aynı anda gerçekleştirilmiştir.

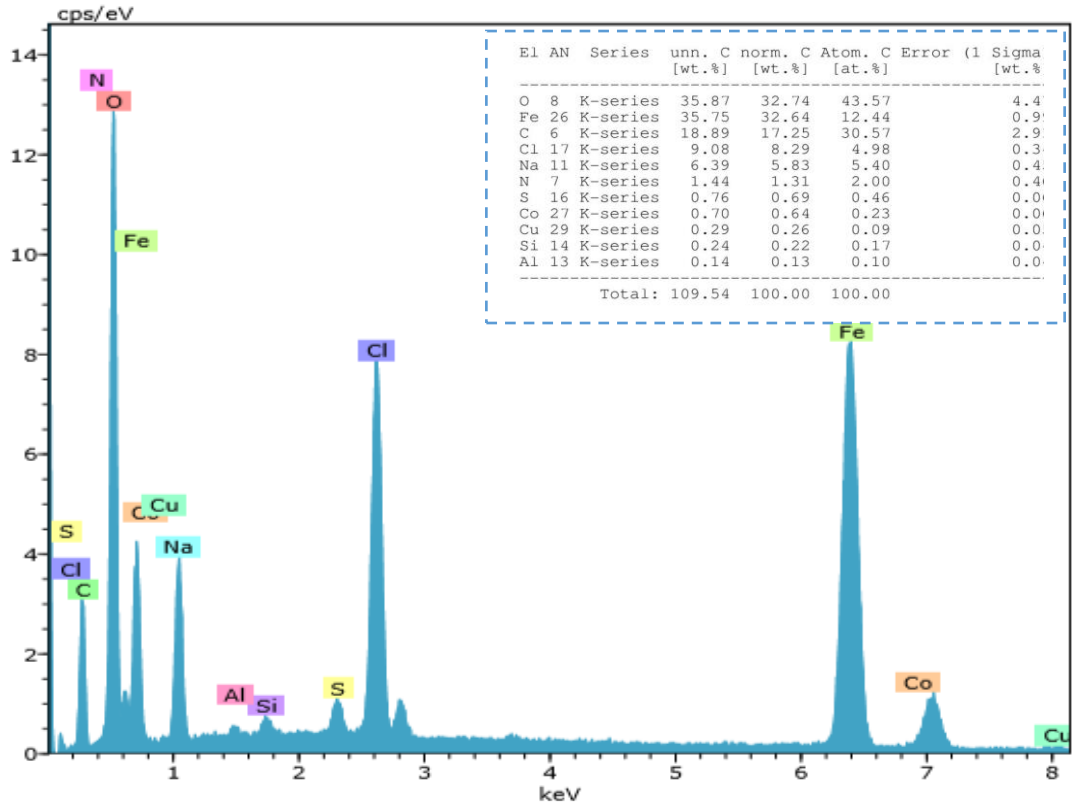
Verilen EDX spektrumlarının her birinde numune içerisinde sırasıyla en fazla Fe, O (%33,85) ve C elementinin bulunduğu görülmektedir. Flokların demir hidroks polimerik komplekslerini ve boyarmaddeyi içerdiği göz önünde bulundurulursa, bu beklenen bir sonuçtur. Düşük atom numarasına sahip olan elementlerin yaydığı x ışını şiddeti de düşük olduğundan EDX analizlerinde kullanılabilir değildir (Karpuz, 2006). Bu yüzden EDX analizinde hidrojen ile ilgili bir veriye ulaşılmaz.



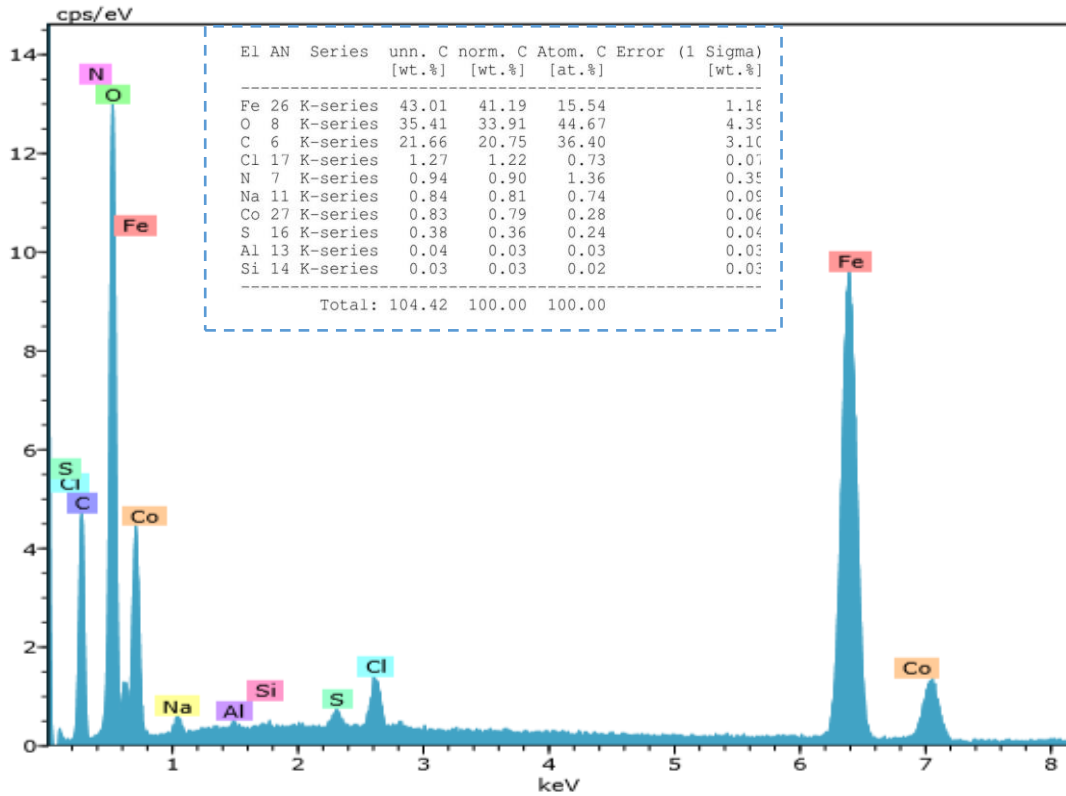
Şekil 3.27: Elektrokoagülasyonda üst faz EDX spektrumu.



Şekil 3.28: Elektrokoagülasyonda alt fazın EDX spektrumu.



Şekil 3.29: Ultrases destekli elektrokoagülasyonda üst fazın EDX spektrumu.

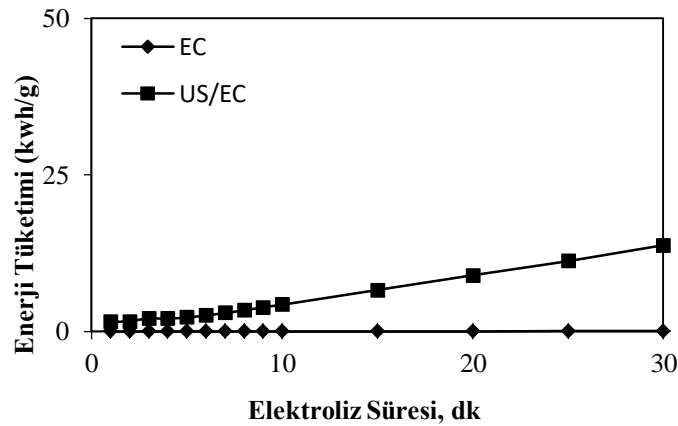


Şekil 3.30: Ultrases destekli elektrokoagülasyonda alt fazın EDX spektrumu.

3.6 Elektrokoagülasyon ve Ultrases Destekli Elektrokoagülasyon İçin Enerji

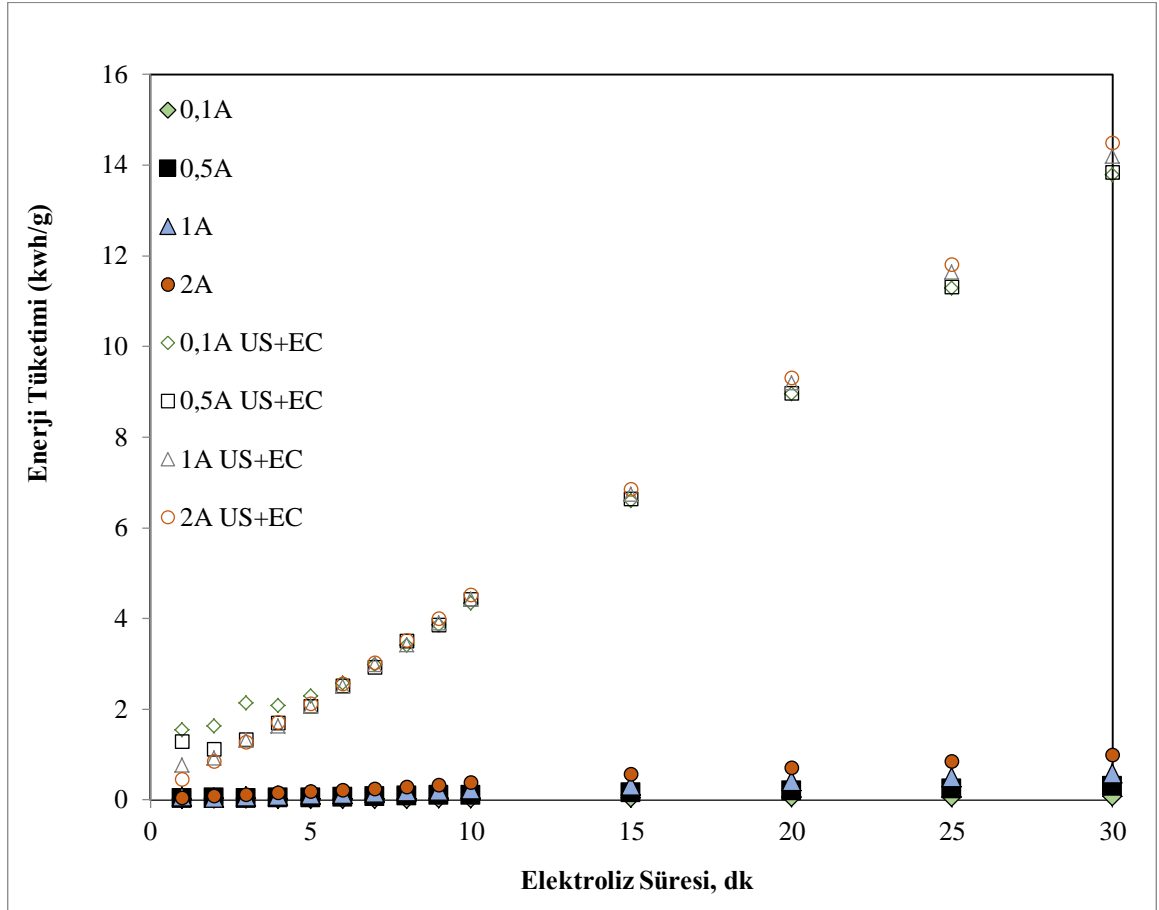
Tüketimi

Çevre mühendisliğinde kirlilik gideriminde uygulanan proseslerde işletme maliyeti ve özellikle tüketilen enerjinin miktarı önemlidir. Bu çalışmada işçilik ve bakım gibi dolaylı maliyetlerden ziyade doğrudan maliyetlerden biri olan enerji tüketim maliyeti hesaplanmış ve elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon için bir karşılaştırma yapılmıştır. Özellikle ultrases varlığında uygulanan elektrokoagülasyon proseslerinde elektrik enerjisi tüketim miktarı en önemli ekonomik parametre olarak kabul edilmektedir. Farklı akım değerleri için hesaplanan elektrik enerjisi tüketim miktarlarını gösteren Şekil 3.32'den de görüleceği gibi elektrokimyasal hücreye verilen akım artırıldıkça proseste harcanan elektrik enerjisi miktarı da artmaktadır. Bununla birlikte proses boyunca zaman ilerledikçe elektrik tüketimi de artmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesiyle %99 üzerinde verimin sağlandığı akım değerleri için elektrik sarfiyatı karşılaştırıldı. 1 g RB222 giderimi yapabilmek için 2 mA/cm²'de 9 dakikada 0,021 kwh; 10 mA/cm²'de 9 dakikada 0,091 kwh; 20 mA/cm²'de 7 dakikada 0,157 kwh ve 40 mA/cm²'de 7 dakikada 0,244 kwh elektrik enerjisi sarf edilmiştir. Bu bulgulara göre düşük akım yoğunluğu değerleri ekonomik bir işletme maliyeti için tercih ve tavsiye edilebilir. Elektrokoagülasyon ile ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi Şekil 3.30'daki gibi karşılaştırıldığında, ultrases desteği ilavesinin ekonomik bir yük getirdiği görülmektedir. 2 mA/cm² akım yoğunluğu için %99'un üzerinde verim elektrokoagülasyonda 9.dakikada ve 0,021 kwh/g ile; ultrases destekli elektrokoagülasyonda 25.dakikada ve 11,29 kwh/g ile sağlanmıştır. Bahsedilen bu parametreler, RB222'nin gideriminde optimum çalışma koşulları olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.31: EC ile US/EC enerji tüketimi karşılaştırılması
(J: 2 mA/cm², C₀: 50 ppm, pH: 5).

Şekil 3.31’de elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesleri uygulanarak farklı akım yoğunluklarında elektrik enerjisi tüketim değişimi verilmektedir. Tüm akım yoğunluğu değerleri için elektrik sarfıyatı elektrokoagülasyon prosesinde 0-1 kwh/g arasında değişiyorken ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinde 0-14,5 kwh/g aralığında değişmektedir. Süre uzadıkça ve akım yoğunluğu yükseldikçe enerji tüketimi artmıştır.



Şekil 3.32: Farklı akım yoğunluklarında EC ve US/EC için enerji tüketimi karşılaştırma grafiği (pH 5, 50 mg/L).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Reaktif Blue 222 boyar maddesinin elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesleri uygulanarak sulu çözeltilerden giderimi ve bazı parametrelerin bu proseslerin verimine etkileri araştırılmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesi ile RB222'nin giderimine etki eden parametreler incelendiğinde;

Düşük başlangıç derişimlerinin prosesi daha yüksek performansla sonuçlandırdığı görülmüştür. 50, 100 ve 250 mg/L başlangıç derişimleri içerisinde en uygun değerin 50 mg/L olduğu anlaşılmıştır. Başlangıç boyarmadde derişimi arttıkça boyarmaddenin ortamdaki giderilme süresi uzamaktadır.

2, 10, 20, 40 mA/cm² akım yoğunlukları içerisinde sadece verim açısından karşılaştırma yapıldığında doğru bir orantı olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, elektrokimyasal hücreye verilen akım arttıkça kirletici giderimini de artmıştır. Ancak işletme maliyeti baz alındığında, düşük akım yoğunluklarının daha ekonomik olduğu ve en uygun akım yoğunluğunun 2 mA/cm² olduğu sonucuna varılmıştır.

En uygun pH değerinin 5 olduğu bulunmuştur. Çalışılan diğer pH değerlerinde daha az miktarda ve türde Fe içeren floklar oluştuğundan, daha düşük verimler elde edilmiştir.

Ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi ile RB222'nin giderimine etki eden parametreler incelendiğinde;

Başlangıç derişimi artırıldıkça verimde düşme olduğu görülmüştür. Aynı elektroliz süresi için en yüksek verimi 50 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler, ardından sırasıyla 100 ve 250 mg/L başlangıç derişimli çözeltiler sağlamıştır.

Akım yoğunluğu ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesinin verimini doğru orantıyla etkilemiştir. Sabit bir elektroliz süresi için, 2-40 mA/cm² aralığında değişen akım yoğunluğu değerleri arttıkça renk giderme verimi artmıştır. Ancak elektrik sarfıyatı baz alındığında, kısa sürede yüksek verim sağlayan yüksek akım yerine uzun sürede yüksek verim sağlayan düşük akım tercih edilmelidir.

pH'nin ilk 3 dakikada etkili olduğu ve bu 3 dakikalık zaman diliminde düşük pH'larda daha yüksek verimin elde edildiği görülmektedir. 3.dakikadan sonra pH etkisinin ortadan kalkmış ve herhangi bir kurala uymadığı anlaşılmıştır.

Elektrokoagülasyon ve ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi karşılaştırıldığında genel olarak prosesin ilk dakikalarında ultrasesin verim artırıcı yönde etki ettiği görülmektedir. Fakat belirli bir elektroliz süresinden sonra her iki prosesin verimi yaklaşık olarak eşitlenmiş ve devamında elektrokoagülasyon verim artış hızı daha yüksek bir seyirde gerçekleşirken, buna karşılık ultrases destekli elektrokoagülasyon verim artış hızı daha yavaş bir seyirde gerçekleşmiştir. Buna göre ultrasesin prosese katkı sağlaması isteniyorsa, proses başlangıcında ultrases desteği verilip belirli bir süre sonra sadece elektrokoagülasyon prosesi ile devam edilebilir. Bu ayrımın yapılacağı zaman değeri için çeşitli testler gerçekleştirilmelidir.

Aynı verime (>%99) ulaşmak için ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesine (11.29 kWh/g) kıyasla elektrokoagülasyon prosesi (0.021 kWh/g) oldukça düşük maliyetle işletilmiştir. Bu sonuç, ultrases uygulandıktan belli bir süre sonra boyarmadde giderimini sağlayan flokların dağılmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çerçevede, prosesi uygun işletim maliyetiyle gerçekleştirebilmek için ultrases desteğine gerek olmadığı ve elektrokoagülasyon prosesinin tek başına yeterli ve ekonomik olduğu anlaşılmıştır.

Sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesi ile RB222'nin sulu çözeltilerden gideriminde %99'un üzerinde verim elde edebilmek için optimum çalışma koşulları; başlangıçtaki boyarmadde derişimi 50 mg/L, sistemin akım yoğunluğu 2 mA/cm², pH 5 ve elektroliz süresi 9 dakikadır. Ultrases destekli elektrokoagülasyon prosesi için optimum çalışma koşulları ise; başlangıçtaki boyarmadde derişimi 50 mg/L, sistemin akım yoğunluğu 2 mA/cm², pH 5 ve elektroliz süresi 25 dakikadır.

Kısa proses zamanı gerektirmesi, basit ekipman ihtiva etmesi, daha az çamur oluşumu ile sonuçlanması ve tehlikeli reaktant ve ürün ortaya çıkarmaması gibi avantajları ile elektrokoagülasyon prosesi Reaktif Blue 222'nin gideriminde oldukça etkili sonuçlar ortaya koymuştur.

Yapılan bu çalışmanın devamı olarak;

- çeşitli türde elektrotların (çelik, alüminyum, titanyum vb.) EC ve US/EC giderim verimliliğine etkileri,
- iletkenlik tuzu olarak farklı bir tuzun (Na₂SO₄, KCl vb.) prosese etkisi,
- ultrasesin kesikli ve sürekli modda çalıştırılmasının proses verimliliğine etkisi,

- çözeltili ortamına ilave edilen adsorban karakterli minerallerin proses verimliliğine etkileri,
- RB222 boyarmaddesi içeren gerçek atıksuya uygulanan EC ve US/EC'nin giderim verimliliği konusunda araştırma çalışmaları yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Adeuwuyi, Y. G. (2001). Sonochemistry: Environmental Science and Engineering Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 22, 4681–4715, doi: <https://doi.org/10.1021/ie010096l>.
- Akbaş, H. (2014). *Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Renk Gideriminin İncelenmesi*. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi) Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No: 398733) .
- Al-Qodah, Z., and Al-Shannag, M. (2019). On the Performance of Free Radicals Combined Electrocoagulation Treatment Processes. *Separation & Purification Reviews*, 48, s: 143-158, doi: <https://doi.org/10.1080/15422119.2018.1459700> (Erişim Tarihi: 18.06.2020).
- Andrade, S. L., Ruotolo, L., Rocha-Filhoa, R., Bocchi, N., Biaggio, S., Iniesta, J., et al. (2007). On the performance of Fe and Fe,F doped Ti–Pt/PbO₂ electrodes in the electrooxidation of the Blue Reactive 19 dye in simulated textile wastewater. *Chemosphere*, 2035-2043, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.028>.
- Aslan, M. (2016). *Membran Teknolojileri*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, TÜÇEV, 275 s., 9-13 (Erişim Adresi: <https://docplayer.biz.tr/20323169-Membran-teknolojileri-yrd-doc-dr-mustafa-aslan.html>), (Erişim Tarihi: 26.02.2020).
- Aygün, A. (2012). *Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon*. (Doktora tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 315861).
- Başer, İ., ve İnanıcı, Y. (1990). *Boyarmadde Kimyası*. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayın 482 (2), 207.
- Birgül, A. (2006). *Tekstil Endüstrisi Atıksu Arıtımında İleri Oksidasyon Proseslerinin Kullanımı*. Bursa: Uludağ Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi) Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No: 202227)
- Bulut, E. (2016). Tekstil Atıksularından C.I. Bazik Mavi 3 boyarmaddesinin elektrokimyasal Uygulama ile Giderilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20, 3, s:521-531, doi: <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.85559>, (Erişim Tarihi: 15.06.2020).
- Büyüktanır, A. (2010). *Ultras (Ultrasound)*. Ankara: Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Tez no: 070557006), (Erişim Adresi: <https://docplayer.biz.tr/1720388-Ultras-ultrasound.html>), (Erişim Tarihi: 19.02.2020).
- Cameselle, C., Pazos, M., and Sanromán, M. A. (2005). Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. *Chemosphere*, 60, 1080-1086, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.018>.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.

- Chmielewski A. G., U. M. (1977). *Separation Technologies for metals recovery from industrial wastes*. Hydrometallurgy 45, 333-344.
- Chowdhury, P., and Viraraghavan, T. (2009). Sonochemical degradation of chlorinated organic compounds, phenolic compounds and organic dyes – A review. *Science of The Total Environment*, 407,8, s: 2474-2492, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.031> (Erişim Tarihi:18.06.2020).
- Coughlin, M. F., K. K. B., Tepper, A., and Bishop, P. L. (1997). Characterization of aerobic azo dye-degrading bacteria and their activity in biofilms. *Water Science and Technology*, 215-220, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00327-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00327-2).
- Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., and Tizpar, A. (2003). Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*, 31, 153-162, [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(02\)00178-8](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00178-8).
- Dikmen, F. (1998). *Tekstil Atıksularında Ozonla Renk Giderimi Üzerine Bir Çalışma*. İstanbul: İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi).
- dye/World dye variety*. (29.06.2020 tarihinde <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-blue-222.html> adresinden alındı).
- Edecan, M. E. (2006). *Kombine Ultrases/Aktif Karbon Kullanarak Tekstik Boyarmaddesinin Renk Gideriminin Modellenmesi ve Optimizasyonu*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi) Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No: 185475).
- Ergün, G. (2013). *Bazı tekstil boyarmaddelerin sulu çözeltilerden elektrokoagülasyon ve ultrases yöntemlerini kullanarak giderimi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 341410).
- Eyvaz, M., Kırılroğlu, M., Aktaş, T. S., and Yüksel, E. (2009). The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 153,16-22, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.028>.
- Ferda, G. (2006). *Atıksulardaki tekstil boyarmaddeleri ve metal iyonlarının tekli ve ikili karışımlarının serbest ve tutuklanmış mikroorganizma sistemleri ile biyogideriminin kesikli ve sürekli Sistemlerde İncelenmesi* (Doktora Tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi(Tez No. 182346). Ankara: Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fernandes, A., Morão, A., Magrinho, M., Lopes, A., and Gonçaves, I. (2004). Electrochemical degradation of C. I. Acid Orange 7. *Dyes and Pigments*, 287-296, <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2003.11.008>.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M., Melo, J. V., and Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 267-299, <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>.

- Ge, J., and Qu, J. (2004). Ultrasonic irradiation enhanced degradation of azo dye on MnO₂. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47, 133-140, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.08.001>.
- Ghernaout, D., Al-Ghonamy, A. I., Messaouden, N. A., Aichouni, M., Naceur, M. W., Benchelighem, F. Z., et al. (2015). Electrocoagulation of Direct Brown 2 (DB) and BF Cibacete Blue (CB) Using Aluminum Electrodes. *Journal Separation Science and Technology*, 50-9, s:1413-1420, doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.982763>.
- Gogate, P. R., and Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hybrid methods. *Advances in Environmental Research*, 8, 3-4, s: 553-597, doi: [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00031-5), (Erişim Tarihi:14.06.2020).
- Gündüz, Z., and Atabey, M. (2019). Effects of Operational Parameters on the Decolourisation of Reactive Red 195 Dye from Aqueous Solutions by Electrochemical Treatment. *International Journal Of Electrochemical Science*, 5868-5885, doi: 10.20964/2019.06.37.
- Halliday, D., and Resnick, R. (1992). *Fiziğin Temelleri-1, (Çeviren: Prof. Dr. Cengiz Yalçın)*. Arkadaş Kitabevi, 3.Baskı.
- Holt, P. K., Barton, G. W., and Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 1-6, 355-367, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., ve Gönüllü, T. (2007). Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması. *AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu*. 1-9, İstanbul.
- İrdemez, Ş., Yıldız, Y. Ş., and Tosunoğlu, V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52(2): 394-401, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.05.020>.
- Kantaş, Y. (2007). *Effect of ultrasound on drying rate of selected produce*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Gıda Mühendisliği Bölümü: (Doktora Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 199188).
- Kapdan, İ., ve Kargı, F. (2000). Atıksulardan Tekstil Boyar Maddesinin Coriolus Versicolor ile Dolgulu Kolon Reaktörde Giderimi. *7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu* (s. 1-7). İstanbul: İ.T.Ü.
- Karpuz, A. (2006). *Fe - Cu Alaşım Filmlerin Büyütülmesi, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu*. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 180142).

- Khandegar, V., and Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>.
- Kim, T. H., Park, C., Shin, E. B., and Kim, S. (2002). Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150, 165-175, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00941-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00941-4).
- Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., and Lee, D.-U. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15,5, s: 261-266, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.001>, (Erişim Tarihi:17.06.2020).
- Kobyas, M., Bayramoğlu, M., and Eyvaz, M. (2007). Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, 148: 311-318, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.036>.
- Kobyas, M., Can, O. T., Demirbaş, E., and Bayramoğlu, M. (2006). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62, 181-187, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.022>.
- Kobyas, M., Can, O., and Bayramoğlu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 163-178, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X).
- Kocaer, F. O., ve Alkan, U. (2002). Boyarmadde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. *Uludağ Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, 51-52, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/202895>.
- Konuk, K. (2014). *Çelik Elektrotların Kullanıldığı Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Florür Giderimi*. (Yüksek Lisans Tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No.363641).
- Lakshmi, P. M., and Sivashanmugam, P. (2013). Treatment of oil tanning effluent by electrocoagulation: Influence of ultrasound and hybrid electrode on COD removal. *Separation and Purification Technology*, 116, s: 378-384 , doi: 10.1016/j.seppur.2013.05.026, (Erişim Tarihi: 18.06.2020).
- Mamadiev, M., and Yılmaz, G. (2011). Treatment and recycling facilities of highly polluted water-based paint wastewater. *Desalination and Water Treatment* , 26, 66-71, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2111>, (Erişim tarihi: 14.06.2020).
- Martínez-Villafañe, F., Montero-Ocampo, C., and García-Lara, A. M. (2009). Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water. *Journal of Hazardous Materials*, 172:1617-1622, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.044>.
- Mason, T. J., and P.Lorimer, J. (2002). *Applied Sonochemistry: The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*. Wiley VCH.
- Mason, T. J., Lorimer, J. P., Plattes, M., and Phull, S. S. (2000). Dye effluent decolourisation using ultrasonically assisted electro-oxidation. *Ultrasonics*

Sonochemistry, 7,4, s: 237-242, doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(99\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(99)00045-0).

- Mercimek, H. A. (2007). *Trametes versicolor*'ın *Tekstil Boyalarının Gideriminde Kullanım Olanakları*. (Yüksek Lisans Tezi) Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 212571).
- Mollah, M. Y., Gomes, J. A., Das, K. K., and Cocke, D. (2010). Electrochemical treatment of Orange II dye solution-Use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization. *Journal of Hazardous Materials* , 174(1-3):851-858, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.131 .
- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., and Cocke, D. L. (2004). "Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation". *Journal of Hazardous Materials*, 199-210, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>.
- Mollah, M., Schennach, R., Torres, J. R., and Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 29-41, doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).
- Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A., Morkovsky, P., Parga, J. R., and Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, 204-211, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.01.031>.
- O'Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D., Esteves, S., and Wilcox, S. (2000). Anaerobic-aerobic biotreatment of simulated textile effluent containing varied ratios of starch and azo dye. *Water Research*, 2355-2361, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00395-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00395-4).
- Okitsu, K., Iwasaki, K., Yobiko, Y., Bandow, H., Nishimura, R., and Maeda, Y. (2005). Sonochemical degradation of azo dyes in aqueous solution: a new heterogeneous kinetics model taking into account the local concentration of OH radicals and azo dyes. *Ultrasonics Sonochemistry* 12, 255-262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.01.038>.
- Özçelik, F. S. (2019). *Reaktif Red 195 Tekstil Boyarmaddesinin Sulu Çözeltilerden Elektrokoagülasyon ile Giderilmesinde Farklı Elektrotların Proses Verimine Etkisinin İncelenmesi*. Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (Yüksek Lisans Tezi) Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No: 628953).
- Özden, M. (2016). *Boyarmaddelerin elektrokoagülasyon ile arıtımının incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi),Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 432883).
- Özyonar, F., Gökkuş, Ö., and Sabuni, M. (2020). Removal of disperse and reactive dyes from aqueous solutions using ultrasound-assisted electrocoagulation. *Chemosphere*, Volume 258, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127325>,(Erişim Tarihi: 18.06.2020).

- Patist, A., and Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9, s: 147-154, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.004> (Erişim Tarihi: 18.06.2020).
- Peker, İ. (2007). *Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 258 s., 153-154.
- Ràfols, C., and Barceló, D. (1997). Determination of mono- and disulphonated azo dyes by Chromatography-atmospheric pressur ionization mass, spectrometry. *J.Chromatogr. A* 777, 172-197.
- Raschitor, A., Fernandez-Marchante, C. M., Cretescu, I., Rodrigo, M. A., and Cañizares, P. (2014). Sono-electrocoagulation of wastewater polluted with Rhodamine 6G. *Separation and Purification Technology*, 135, s:110–116, doi: 10.1016/j.seppur.2014.08.003, (Erişim Tarihi: 18.06.2020).
- Rebhun, M., and Lurie, M. (1993). Control of Organic Matter by Coagulation and Flocc Separation. *Water Science & Technology*, 27, 11, s: 1-20, doi: <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0260>, (Erişim Tarihi: 15.06.2020).
- Rivera, M., Pazos, M., and Sanromán, M. A. (2009). Improvement of dye electrochemical treatment by combination with ultrasound technique. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84,8, 1118-1124 doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.2141>.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., and Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77, 247-255, [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8).
- Rozzi, A., Antonelli, M., and Arcari, M. (1999). Membrane treatment of secondary textile effluents for direct reuse. *Water Science and Technology*, 409-416, [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00524-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00524-7).
- Samsunlu, A. (2011). *Atıksuların Arıtılması*. İstanbul: Birsen Yayınev , 647 s., 156.
- Sangyong, K., Chulhwan, P., Tak-hyun, K., Jinwon, L., and Seung-Wook, K. (2003). Cod reduction and decolorization of textile effluent using a combined process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 1, 102-105, doi: <http://dx.doi.org/10.6000/1929-5030.2016.05.04.3>.
- Secula, M. S., Cretescu, I., Cagnon, B., Manea, L. R., Stan, C. S., and Breaban, L. B. (2013). "Fractional Factorial Design Study on the Performance of GAC-Enhanced Electrocoagulation Process Involved in Color Removal from Dye Solutions ". *Materials*, 6, 2723-2746, doi:10.3390/ma6072723.
- Siddique, M., Farooq, R., MehmoodKhan, Z., ZarsherKhan, and S.F.Shaukat. (2011). Enhanced decomposition of reactive blue 19 dye in ultrasound assisted electrochemical reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18-1,190-196 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.05.004>.

- Skoog, D. A., Holler, F. J., and Nieman, T. A. (1998). *Enstrümantal Analiz İlkeleri*. Bilim Yayıncılık.
- Somayajula, A., Asaithambi, P., Modepalli, S., and Matheswaran, M. (2012). Sonoelectrochemical oxidation for decolorization of Reactive Red 195. *Ultrasonics Sonochemistry*, 208-211 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.12.019>.
- Song, S., Yao, J., He, Z., Qiu, J., and Chen, J. (2008). Effect of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Blue 19 in aqueous solution by ozone-enhanced electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 204-210, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.104>.
- Soria, A. C., and Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21,7, s: 323-331, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.04.003>.
- Suslick, K. S. (1988). *Ultrasound: Its Chemical, Pyhsical and Biological Effects*. Newyork: VCH Publishers.
- Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry. *American Association for the Advancement of Science*, 247, 4949, s: 1439-1445, doi:<http://www.jstor.com/stable/2874223>.
- T.G.Leighton. (1998). An introduction to acoustic cavitation. B. A. F.A. içinde, *Ultrasound in Medicine* (s. 199-223). London: Institute of Physics Publishing.
- Thompson, L. H., and Doraiswamy, L. K. (1999). Sonochemistry: Science and Engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38,4 s: 1215-1249, doi: <https://doi.org/10.1021/ie9804172>, (Erişim Tarihi:14.06.2020).
- Türkoğlu, G. (2007). *Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon ile Arıtılabilirliğinin İncelenmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez no. 222281).
- Uyanık, S., and Çelikel, D. C. (2019). Türk Tekstil Endüstrisi Genel Durumu. *Journal of Technical Sciences*, 32-41, <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/649677>.
- Uzunoğlu, T. P. (2012). *Yüksek güçlü ultrases işleminin kısa ve uzun ömürlü ayranın mikrobiyolojik ve duyuşal özelliklerine etkisi* . İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı: Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 323671).
- Vardar, B. (2006). *Tekstil Endüstrisi Reaktif Boya Banyolarının Elektrokimyasal Yöntemler İle Arıtımı*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, (Tez no. 501041702)(Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11527/8947>), (Erişim Tarihi: 01.03.2020).
- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal of Water Process Engineering*, 168-172, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>.

- Voncina, D. B., and Majcen-Le-Marechal, A. (2003). Reactive dye decolorization using combined ultrasound/H₂O₂. *Dyes and Pigments* 59, 173-179, doi: [https://doi.org/10.1016/S0143-7208\(03\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7208(03)00101-3).
- Walker, G. M., and Weatherley, L. R. (1997). Adsorption of acid dyes on to granular activated carbon in fixed beds. *Water Research*, 31, s:2093-2101 , doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00039-0).
- Watanabe, M., and Ushiyama, T. (2000). Characteristics and Effective Applications of Polymer Coagulants. *Technology Exchange Dept. Japan*.
- Wei, M.-C., Wang, K.-S., Huang, C.-L., Chiang, C.-W., Chang, T.-J., Lee, S.-S., et al. (2012). Improvement of textile dye removal by electrocoagulation with low-cost steel wool cathode reactor. *Chemical Engineering Journal*, 37-44, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.086>.
- Yakartepe, M. (1997). *Genel Tekstil Terbiyesi*. Tekstil Konfeksiyon Araştırma Merkezi Yayınları, 520-600.
- Yılmaz, A. E., Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M. M., and Keskinler, B. (2005). The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials*, s:125, 160-165 , doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.020> , (Erişim Tarihi: 01.03.2020).
- Yılmaz, T. (2011). *Domates işleme atıklarından ultrason destekli likopen ekstraksiyonu işleminin optimizasyonu*. Ege Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 291153).
- Zhang, H., Duan, L., Zhang, Y., and Wu, F. (2005). The use of ultrasound to enhance the decolorization of the C.I. Acid Orange 7 by zero-valent iron. *Dyes and Pigments* 65, 39-43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.06.015>.

EKLER

EKLER

EK A: Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri

Tablo A.1: Başlangıç derişiminin etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular
(Elektrokoagülasyon, J: 2 mA/cm², pH₀: 5).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (µS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
50 mg/L	0	5,01	22,2	365	30,3	-	50,00	0
	1	6,5	22,3	1259	30,4	1,15	44,69	10,6
	2	6,44	23,3	1252	30,4	1,087	42,24	15,5
	3	6,5	23,6	1246	30,4	0,923	35,86	28,3
	4	6,55	24,1	1254	30,4	0,532	20,64	58,7
	5	6,69	24,6	1275	30,4	0,271	10,49	79,0
	6	6,87	24,9	1254	30,4	0,094	3,60	92,8
	7	7,11	25,3	1258	30,4	0,054	2,04	95,9
	8	7,42	25,6	1254	30,4	0,022	0,80	98,4
	9	7,57	25,9	1270	30,4	0,013	0,45	99,1
	10	8,13	26,2	1256	30,4	0,02	0,72	98,6
	15	8,27	27,1	1276	30,4	0,012	0,41	99,2
	20	9,91	28,5	1292	30,4	0,011	0,37	99,3
	25	9,53	30,1	1289	30,4	0,004	0,10	99,8
30	10,34	31,6	1298	30,4	0,01	0,33	99,3	
100 mg/L	0	5,01	21,2	2091	26,6	-	100,00	0
	1	6,2	21,2	1405	26,3	2,44	94,88	5,1
	2	6,43	21,9	1419	26,5	2,38	92,55	7,5
	3	6,43	22,1	1417	26,7	2,33	90,60	9,4
	4	6,37	22,3	1396	26,9	1,99	77,37	22,6
	5	6,49	22,9	1436	27,1	1,131	43,95	56,1
	6	6,68	23,2	1388	27,3	0,783	30,41	69,6
	7	6,85	23,3	1387	27,6	0,35	13,56	86,4
	8	6,98	23,6	1394	27,8	0,166	6,40	93,6
	9	7,15	24,1	1391	28,1	0,047	1,77	98,2
	10	7,39	24,3	1400	28,4	0,071	2,70	97,3
	15	8,75	25,4	1443	27,7	0,031	1,15	98,9
	20	9,3	26,5	1410	27	0,015	0,53	99,5
	25	10,41	27,8	1449	26,6	0,013	0,45	99,6
30	10,69	29,2	1464	26,2	0,018	0,64	99,4	
250 mg/L	0	5,04	23,5	2306	25,3	-	250,00	0
	1	6,33	23,3	1536	25	6,27	243,91	2,4
	2	6,15	24,4	1528	25,2	6,05	235,35	5,9
	3	6,26	25	1541	25,2	5,91	229,90	8,0
	4	6,32	25,3	1547	25,4	5,46	212,39	15,0
	5	6,44	25,6	1538	25,6	4,27	166,09	33,6
	6	6,49	25,9	1530	26	2,7	105,00	57,9
	7	6,63	26,2	1517	26,2	2,1	81,65	67,3
	8	6,93	26,5	1516	26,4	1,356	52,70	78,9
	9	7,5	26,8	1513	26,5	0,66	25,62	89,8
	10	8,34	27,1	1568	26,7	0,448	17,37	93,1
	15	9,75	28,4	1607	25,9	0,24	9,28	96,3
	20	10,18	29,3	1603	25,4	0,111	4,26	98,3
	25	10,54	30,4	1602	24,8	0,115	4,42	98,2
30	10,72	31,9	1622	24,4	0,09	3,44	98,6	

Tablo A. 2: Akım yoğunluğunun etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular
(Elektrokoagülasyon, C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (µS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
2 mA/cm ²	0	5,01	22,2	365	30,3	-	50,00	0
	1	6,5	22,3	1259	30,4	1,15	44,69	10,6
	2	6,44	23,3	1252	30,4	1,087	42,24	15,5
	3	6,5	23,6	1246	30,4	0,923	35,86	28,3
	4	6,55	24,1	1254	30,4	0,532	20,64	58,7
	5	6,69	24,6	1275	30,4	0,271	10,49	79,0
	6	6,87	24,9	1254	30,4	0,094	3,60	92,8
	7	7,11	25,3	1258	30,4	0,054	2,04	95,9
	8	7,42	25,6	1254	30,4	0,022	0,80	98,4
	9	7,57	25,9	1270	30,4	0,013	0,45	99,1
	10	8,13	26,2	1256	30,4	0,02	0,72	98,6
	15	8,27	27,1	1276	30,4	0,012	0,41	99,2
	20	9,91	28,5	1292	30,4	0,011	0,37	99,3
	25	9,53	30,1	1289	30,4	0,004	0,10	99,8
30	10,34	31,6	1298	30,4	0,01	0,33	99,3	
10 mA/cm ²	0	5,01	20,4	3880	26,8	-	50,00	0
	1	6,48	20,7	2584	25,9	0,957	37,18	25,6
	2	5,65	21,4	2621	25,8	0,678	26,32	47,4
	3	5,53	22	2607	25,7	0,205	7,92	84,2
	4	5,98	22,5	2621	25,9	0,1	3,83	92,3
	5	6,05	23	2630	25,9	0,042	1,58	96,9
	6	6,69	23,5	2608	26,1	0,019	0,68	98,6
	7	7,5	23,8	2625	26,2	0,019	0,68	98,6
	8	7,65	24,3	2643	26,3	0,016	0,56	98,9
	9	8,59	24,7	2612	26,5	0,015	0,53	99,0
	10	8,24	25,2	2628	26,5	0,007	0,21	99,6
	15	9,79	27	2654	25,4	0,01	0,33	99,3
	20	10,25	28,9	2637	24,6	0,005	0,14	99,7
	25	10,73	32,3	2722	23,9	0,006	0,18	99,7
30	10,88	33,5	2748	23,3	0,005	0,14	99,7	
20 mA/cm ²	0	5,03	23,2	4700	30,4	-	50,00	0
	1	9,34	23,6	3070	30,4	0,945	36,71	26,6
	2	5,97	24,9	3130	30,4	0,134	5,16	89,7
	3	5,27	25,8	3120	30,4	0,064	2,43	95,1
	4	5,31	26,6	3130	30,4	0,039	1,46	97,1
	5	5,56	27,4	3140	30,4	0,02	0,72	98,6
	6	6,13	28,4	3130	30,4	0,008	0,25	99,5
	7	7,22	29,3	3150	30,4	0,014	0,49	99,0
	8	6,98	30,2	3160	30,4	0,003	0,06	99,9
	9	7,14	30,8	3160	29,3	0,006	0,18	99,7
	10	7,39	31,5	3140	28,7	0,006	0,18	99,7
	15	6,91	34,7	3160	26,8	0,003	0,06	99,9
	20	10,44	37,3	3220	25,4	0,01	0,33	99,3
	25	10,93	40	3230	24,4	0,005	0,14	99,7
30	11,22	42,7	3300	23,2	0,003	0,06	99,9	

Tablo A.2 (devamı)

40 mA/cm²	0	5,04	21,5	7530	30,4	-	50,00	0
	1	6,27	23,9	5570	29,3	0,096	3,68	92,7
	2	6,04	25,6	5790	28,4	0,025	0,91	98,2
	3	10,53	27,1	5640	27,4	0,033	1,23	97,6
	4	11,41	28,6	5920	25,9	0,044	1,65	96,7
	5	11,62	29,8	6200	24,7	0,036	1,34	97,3
	6	11,77	30,8	6440	24,1	0,024	0,88	98,3
	7	11,78	31,8	6260	23,5	0,016	0,56	98,9
	8	11,84	32,6	6480	23,2	0,018	0,64	98,7
	9	11,7	33,8	6130	24,1	0,009	0,29	99,4
	10	7,15	34,5	5730	25	0,007	0,21	99,6
	15	6,96	38,6	5840	23,8	0,003	0,06	99,9
	20	6,72	40,4	5860	21,9	0,003	0,06	99,9
	25	11	48,6	6090	20,8	0,003	0,06	99,9
30	11,15	51,4	6050	19,9	0,001	-0,02	100	

Tablo A. 3: pH'in etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular
(Elektrokoagülasyon, C₀: 50 mg/L, J: 2 mA/cm²).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (μS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
pH=5	0	5,01	22,2	365	30,3	-	50,00	0
	1	6,5	22,3	1259	30,4	1,15	44,69	10,6
	2	6,44	23,3	1252	30,4	1,087	42,24	15,5
	3	6,5	23,6	1246	30,4	0,923	35,86	28,3
	4	6,55	24,1	1254	30,4	0,532	20,64	58,7
	5	6,69	24,6	1275	30,4	0,271	10,49	79,0
	6	6,87	24,9	1254	30,4	0,094	3,60	92,8
	7	7,11	25,3	1258	30,4	0,054	2,04	95,9
	8	7,42	25,6	1254	30,4	0,022	0,80	98,4
	9	7,57	25,9	1270	30,4	0,013	0,45	99,1
	10	8,13	26,2	1256	30,4	0,02	0,72	98,6
	15	8,27	27,1	1276	30,4	0,012	0,41	99,2
	20	9,91	28,5	1292	30,4	0,011	0,37	99,3
	25	9,53	30,1	1289	30,4	0,004	0,10	99,8
30	10,34	31,6	1298	30,4	0,01	0,33	99,3	
pH=7	0	7,02	24,5	2094	30,1	-	50,00	0
	1	7,23	24,8	1388	29,7	1,215	47,22	5,6
	2	7,14	25,5	1386	29,9	1,198	46,56	6,9
	3	7,09	25,9	1392	30,1	1,151	44,73	10,5
	4	6,95	26,3	1396	30,3	0,77	29,90	40,2
	5	7,05	26,8	1419	30,5	0,342	13,25	73,5
	6	7,05	27,1	1401	30,7	0,145	5,58	88,8
	7	7,14	27,3	1394	30,7	0,09	3,44	93,1
	8	7,24	27,6	1400	30,7	0,059	2,24	95,5
	9	7,31	27,9	1398	30,7	0,042	1,58	96,9
	10	7,52	28,5	1407	30,7	0,04	1,50	97,0
	15	8,36	29,3	1430	30,7	0,03	1,11	97,8
	20	9,72	30,9	1421	30,6	0,017	0,60	98,8
	25	10,1	31,5	1443	30	0,012	0,41	99,2
30	10,34	33,7	1458	29,6	0,013	0,45	99,1	
pH=9	0	9,01	21,4	2077	30,3	-	50,00	0
	1	8,68	21,2	1394	23	1,228	47,72	4,6
	2	8,25	22,1	1395	22,6	1,177	45,74	8,5
	3	8,09	22,3	1386	22,5	1,18	45,86	8,3
	4	7,89	22,5	1395	25,8	1,031	40,06	19,9
	5	7,77	22,8	1397	26	0,53	20,56	58,9
	6	7,83	23,2	1400	26,2	0,267	10,33	79,3
	7	8,01	23,4	1414	26,4	0,111	4,26	91,5
	8	9,33	23,8	1413	26,5	0,062	2,35	95,3
	9	9,99	24,1	1441	26,8	0,028	1,03	97,9
	10	9,77	24,3	1411	27,1	0,022	0,80	98,4
	15	10,37	25,1	1445	26,4	0,011	0,37	99,3
	20	10,51	26,5	1438	25,9	0,005	0,14	99,7
	25	10,65	27,7	1456	25,4	0,006	0,18	99,7
30	10,86	29,1	1479	25,1	0,005	0,14	99,7	

EK B: Ultrases/Elektrokoagülasyon Prosesi Deneysel Çalışma Verileri

Tablo B.1: Başlangıç boyarmadde derişiminin etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular (Ultrases/Elektrokoagülasyon, J: 2 mA/cm², pH₀: 5).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (µS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
50 mg/L	0	5	21,2	2100	23,3	-	50,00	0
	1	5,77	21,2	1427	24	0,979	38,04	23,9
	2	5,45	22,5	1457	14,6	0,693	26,91	46,2
	3	5,71	23,1	1401	21,5	0,601	23,33	53,4
	4	6,22	23,8	1391	19,3	0,33	12,78	74,4
	5	6,64	24,1	1415	20,8	0,189	7,30	85,4
	6	6,7	24,5	1389	20,8	0,091	3,48	93,0
	7	6,85	25,2	1400	21,4	0,063	2,39	95,2
	8	7	25,8	1384	21,5	0,042	1,58	96,9
	9	6,96	26,3	1393	22,4	0,03	1,11	97,8
	10	6,84	26,7	1408	15,2	0,026	0,95	98,1
	15	7,7	28,6	1410	16,8	0,021	0,76	98,5
	20	10,32	30,8	1466	15,8	0,023	0,84	98,3
25	9,95	32,5	1442	15,4	0,01	0,33	99,3	
30	9,29	34,3	1449	15,8	0,009	0,29	99,4	
100 mg/L	0	5,02	20,1	2118	22,3	-	100,00	0
	1	6,09	22,9	1451	21,5	2,38	92,55	7,5
	2	5,76	25,2	1452	20,5	2,15	83,60	16,4
	3	5,87	26,5	1438	20,2	1,98	76,98	23,0
	4	6,03	27,8	1442	20,1	1,48	57,53	42,5
	5	6,22	29	1455	19,8	0,716	27,80	72,2
	6	6,3	29,8	1469	19,7	0,469	18,19	81,8
	7	6,5	30,5	1453	19,6	0,314	12,16	87,8
	8	6,7	31,4	1450	19,6	0,174	6,71	93,3
	9	6,81	32,3	1463	19,9	0,149	5,74	94,3
	10	6,78	33	1482	20	0,129	4,96	95,0
	15	7,11	34,3	1487	19,2	0,051	1,93	98,1
	20	9,28	36,2	1515	18,7	0,034	1,26	98,7
	25	9,68	37,7	1523	18,5	0,035	1,30	98,7
30	9,11	39,6	1456	18,3	0,019	0,68	99,3	
250 mg/L	0	5,02	23,5	2236	23,8	-	250,00	0
	1	5,98	26,3	1563	23,1	5,9	229,51	8,2
	2	6	28,6	1518	22,7	5,51	214,34	14,3
	3	6,07	29,6	1531	22,6	5,11	198,77	20,5
	4	6,12	30,7	1532	22,4	3,76	146,25	41,5
	5	6,23	32	1547	22,3	2,31	89,83	64,1
	6	6,46	32,8	1565	22,3	1,75	68,04	72,8
	7	6,46	33,7	1545	22,2	1,31	50,91	79,6
	8	6,63	34,4	1542	22,2	0,937	36,40	85,4
	9	6,73	35	1540	22,2	0,705	27,37	89,1
	10	6,84	35,8	1548	22,3	0,622	24,14	90,3
	15	7,04	37,1	1567	21,5	0,436	16,91	93,2
	20	7,92	38,7	1590	20,9	0,21	8,11	96,8
	25	8,21	40,3	1583	20,8	0,286	11,07	95,6
	30	8,62	41,4	1552	20,3	0,288	11,15	95,5

Tablo B.2: Akım yoğunluğunun etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular
(Ultras/elektrokoagülasyon, C₀: 50 mg/L, pH₀: 5).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (μS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
2 mA/cm ²	0	5	21,2	2100	23,3	-	50,00	0
	1	5,77	21,2	1427	24	0,979	38,04	23,9
	2	5,45	22,5	1457	14,6	0,693	26,91	46,2
	3	5,71	23,1	1401	21,5	0,601	23,33	53,4
	4	6,22	23,8	1391	19,3	0,33	12,78	74,4
	5	6,64	24,1	1415	20,8	0,189	7,30	85,4
	6	6,7	24,5	1389	20,8	0,091	3,48	93,0
	7	6,85	25,2	1400	21,4	0,063	2,39	95,2
	8	7	25,8	1384	21,5	0,042	1,58	96,9
	9	6,96	26,3	1393	22,4	0,03	1,11	97,8
	10	6,84	26,7	1408	15,2	0,026	0,95	98,1
	15	7,7	28,6	1410	16,8	0,021	0,76	98,5
	20	10,32	30,8	1466	15,8	0,023	0,84	98,3
	25	9,95	32,5	1442	15,4	0,01	0,33	99,3
30	9,29	34,3	1449	15,8	0,009	0,29	99,4	
10 mA/cm ²	0	5,01	21,1	3960	23	-	50,00	0
	1	5,8	21,6	2587	17,5	0,912	35,43	29,1
	2	6,92	22,7	2617	19	0,408	15,82	68,4
	3	7,25	23,5	2633	16	0,177	6,83	86,3
	4	6,07	24,2	2617	16,2	0,105	4,03	92,0
	5	6,64	25,1	2643	17,1	0,055	2,08	95,8
	6	6,44	25,7	2634	16,7	0,054	2,04	95,9
	7	6,32	26,3	2636	16,6	0,025	0,91	98,2
	8	10,15	27,1	2667	16,5	0,064	2,43	95,1
	9	8,39	27,7	2660	16,4	0,018	0,64	98,7
	10	9,88	28,3	2682	16,5	0,035	1,30	97,4
	15	9,68	30,5	2648	15	0,016	0,56	98,9
	20	9,88	32,2	2660	13,7	0,012	0,41	99,2
	25	7,36	32,7	2666	12,8	0,002	0,02	100
30	9,01	32,4	2669	13,3	0,002	0,02	100	
20 mA/cm ²	0	5,02	19,2	4690	19	-	50,00	0
	1	5,94	19,8	3080	18,4	0,653	25,35	49,3
	2	6,95	21,1	3090	25,9	0,201	7,76	84,5
	3	9,14	22,2	3100	25,7	0,129	4,96	90,1
	4	6,74	23,1	3120	18,3	0,034	1,26	97,5
	5	7,3	23,9	3110	18	0,032	1,19	97,6
	6	8,63	24,6	3100	18	0,025	0,91	98,2
	7	9,65	25,3	3120	17,9	0,028	1,03	97,9
	8	7,74	26,3	3100	17,8	0,015	0,53	99,0
	9	7,58	26,8	3110	17,8	0,008	0,25	99,5
	10	7,62	27,4	3110	17,8	0,013	0,45	99,1
	15	8,15	30	3110	18,9	0,009	0,29	99,4
	20	10,33	32,1	3170	18,4	0,017	0,60	98,8
	25	7,8	32,6	3130	18,8	0,01	0,33	99,3
30	7,78	32,6	3150	17,6	0,01	0,33	99,3	

Tablo B.2 (devamı)

40 mA/cm²	0	5	21	8300	27,8	-	50,00	0
	1	10,47	22,5	5460	25,4	0,143	5,51	89,0
	2	9,35	24,6	5610	24,8	0,063	2,39	95,2
	3	10,3	25,9	5620	23,2	0,037	1,38	97,2
	4	10,49	27,3	5670	22,6	0,032	1,19	97,6
	5	8,22	28,3	5510	19,4	0,018	0,64	98,7
	6	7,42	29,5	5580	18,9	0,01	0,33	99,3
	7	10,22	30,2	5520	16,3	0,015	0,53	99,0
	8	10,57	31,3	5730	16,1	0,019	0,68	98,6
	9	10,5	31,9	5560	16	0,012	0,41	99,2
	10	10,29	32,4	5540	16	0,009	0,29	99,4
	15	7,84	34,3	5540	15,2	0,006	0,18	99,7
	20	10,31	35,3	5680	15,5	0,006	0,18	99,7
	25	9,5	35,9	5680	15,4	0,002	0,02	100
	30	7,63	36,4	5540	15,6	0,006	0,18	99,7

Tablo B.3: Başlangıç pH'ın etkisi çalışmasında elde edilen deneysel bulgular
(Ultrases/Elektrokoagülasyon, C₀: 50mg/L, J: 2 mA/cm²).

	t (dk)	pH	T (°C)	S (mS/cm)	V (volt)	A (abs)	C (mg/L)	Renk Giderim Verimi (%)
pH=5	0	5	21,2	2100	23,3	-	50,00	0
	1	5,77	21,2	1427	24	0,979	38,04	23,9
	2	5,45	22,5	1457	14,6	0,693	26,91	46,2
	3	5,71	23,1	1401	21,5	0,601	23,33	53,4
	4	6,22	23,8	1391	19,3	0,33	12,78	74,4
	5	6,64	24,1	1415	20,8	0,189	7,30	85,4
	6	6,7	24,5	1389	20,8	0,091	3,48	93,0
	7	6,85	25,2	1400	21,4	0,063	2,39	95,2
	8	7	25,8	1384	21,5	0,042	1,58	96,9
	9	6,96	26,3	1393	22,4	0,03	1,11	97,8
	10	6,84	26,7	1408	15,2	0,026	0,95	98,1
	15	7,7	28,6	1410	16,8	0,021	0,76	98,5
	20	10,32	30,8	1466	15,8	0,023	0,84	98,3
	25	9,95	32,5	1442	15,4	0,01	0,33	99,3
30	9,29	34,3	1449	15,8	0,009	0,29	99,4	
pH=7	0	7,04	26,8	2119	25,2	-	50,00	0
	1	8,58	26,8	1392	24,6	1,097	42,63	14,8
	2	7,86	27,9	1403	24,4	0,856	33,25	33,5
	3	7,4	28,8	1414	24,2	0,507	19,67	60,7
	4	9,38	29,4	1407	24,3	0,255	9,86	80,3
	5	9,01	29,9	1429	24,5	0,139	5,35	89,3
	6	9,44	30,6	1423	24,6	0,114	4,38	91,3
	7	8,89	31,3	1421	24,7	0,071	2,70	94,6
	8	9,9	31,7	1468	24,7	0,065	2,47	95,1
	9	10,02	32,3	1453	24,6	0,051	1,93	96,2
	10	9,97	32,9	1480	24,8	0,039	1,46	97,1
	15	10,45	34,8	1525	23,5	0,025	0,91	98,2
	20	10,46	36,8	1488	22,8	0,017	0,60	98,8
	25	10,12	38,9	1489	22,5	0,014	0,49	99,0
30	9,88	40,8	1437	22,2	0,01	0,33	99,3	
pH=9	0	9,03	22,8	2146	21,7	-	50,00	0
	1	9,58	23,6	1446	21,7	1,178	45,78	8,4
	2	9,8	25,2	1406	22,8	1,094	42,51	15,0
	3	9,83	26	1408	21,5	0,752	29,20	41,6
	4	9,84	26,8	1430	21,5	0,27	10,45	79,1
	5	9,93	27,7	1457	21,3	0,242	9,36	81,3
	6	9,74	28,4	1433	21,3	0,15	5,78	88,4
	7	9,68	29,1	1449	21,2	0,086	3,29	93,4
	8	10,13	29,7	1449	21,2	0,086	3,29	93,4
	9	10,28	30,4	1486	21,1	0,075	2,86	94,3
	10	10,04	31	1440	20,4	0,056	2,12	95,8
	15	10,54	32,8	1497	18,5	0,029	1,07	97,9
	20	10,55	34,4	1457	17,3	0,02	0,72	98,6
	25	10,75	35,7	1563	17,1	0,02	0,72	98,6
30	10,1	37,8	1448	16,9	0,013	0,45	99,1	

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :Cansu Özmez

Doğum tarihi ve yeri : **22.11.1995/BURSA**

e-posta : cansu-ozmez@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2018/2020
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2013/2018
Lise	Bursa Cumhuriyet Lisesi	2013