

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ELEKTROTLAR
KULLANILARAK TEKSTİL ATIKSU VE
BOYALARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
İLE ARITIMI

127304,

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Orhan Taner CAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr.Mehmet KOBYA

GEBZE

2002

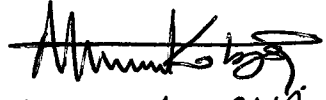
127304

Orhan Taner CAN'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11.06.2002 tarih ve 2002/18 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Geyre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.



JÜRİ

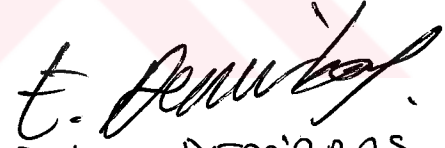
ÜYE
(Tez Danışmanı)


: Yrd. Doç. Dr. Mehmet KOBAY.

ÜYE


: Prof. Dr. Mehmet BAYRAMOĞLU

ÜYE


: Yrd. Doç. Dr. Erhan DEMİRBAŞ.

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.03.2002 tarih ve 2002/23 sayılı kararı.



ÖZET

Bu çalışmada elektrokoagülasyon ile reaktif tekstil boyası (Remazol Red RB 133) çözeltilerinden renk giderimi ve tekstil atıksularından COD ve türbidite giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Renk giderimi, COD ve türbidite giderimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, zaman, konsantrasyon, polielektrolit ilavesi gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi, çözünmüş alüminyumun renk giderme kapasitesi ve çözünmüş alüminyumun COD giderme kapasitesi incelenmiştir.

Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon proseslerinde kirleticilerin giderimin de iki asıl etkileşme mekanizması mümkündür; pH 4.0-6.5 aralığında monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin çökelme mekanizması, pH>6.5 aralığında $Al(OH)_3$ ve polimerik alüminyum hidroksit türlerinin adsorpsiyon mekanizması.

Yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyonun renk ve türbidite giderminde oldukça etkili olduğu, ancak tekstil atıksularından COD giderimin de aynı düzeyde etkili olmadığı görülmüştür. Bu da Al türlerinin çözünmüş COD gidermede kısmen etkili olduğunu göstermektedir.

SUMMARY

The purpose of this study was to investigate the decolourization of the reactive textile dye solutions (Remazol Red RB 133) and the removal of COD and turbidity from textile wastewater by electrocoagulation. This for purpose, aluminium electrode is connected in a monopolar paralel electrochemical reactor. The effect on the decolourization and the removal of COD and turbidity of parameters such as, current density, initial pH, conductivity, stirring rate, dye concentration, time and polyelectrolyte concentration were investigated. Energy consumption, decolourization capacity of dissolved aluminium and removal of COD capacity of dissolved aluminium have also been examined.

There is two mechanisms for removal of pollutants where aluminium electrode used in electrocoagulation process ; pH 4.0-6.5 precipitation mechanism of monomeric and polimeric aluminium hidrokside species are as fallows. pH > 6.5 adsorption mechanism of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and polimeric are as fallows.

In this study, electrocoagulation have been effective for decolourization and removal of turbidity, but removal of COD from textile wastewater not so much. Aluminium hidrokside species was observed partially effective to remove COD.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KOBYA 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve görüşleriyle yardımcı olan ve bu çalışmaların olgunlaşmasında büyük katkısı olan Sayın Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU 'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

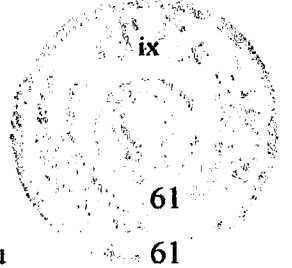
Laboratuar çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen İpek AKIN 'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

İÇ KAPAK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ	3
2.1. Tekstil Endüstrisinde Üretim Proses ve İşlemleri	3
2.1.1. Pamuklu Tekstil Endüstrisi	3
2.1.2. Yünlü Tekstil Endüstrisi	4
2.1.3. Sentetik Tekstil Endüstrisi	4
2.2. Boyarmaddeler ve Boyama Atıksularının Özellikleri	4
2.2.1. Boyarmaddeler	4
2.2.1.1. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması	5
2.2.1.1.1. Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	5
2.2.1.1.2. Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	7
2.2.1.1.3. Kimyasal Yapısına Göre Sınıflandırılması	10
2.2.2 Boyama Atıksularının Özellikleri	11
2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu	12

2.3.1. Atıksu Karakterizasyonunda Temel Kirletici Parametreler	12
2.3.2 Pamuklu Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu	14
2.3.3. Yünlü Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu	14
2.3.4. Sentetik Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu	15
2.3.5. Tekstil Endüstrisi Atıksuları İçin Deşarj Standartları	15
2.4. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımı	19
2.4.1. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler	19
2.4.1.1. Tekstil Atıksularının Biyolojik Oksidasyonu	19
2.4.1.2. Tekstil Atıksularının Kimyasal Oksidasyonu	25
2.4.1.3. Tekstil Atıksularının Kimyasal İndirgemeyle Arıtımı	29
2.4.1.4. Tekstil Atıksularının Membran Proseslerle Arıtımı	30
2.4.1.5. Tekstil Atıksularının Ters Osmoz ve Elektrodializ ile Arıtımı	30
2.4.1.6. Tekstil Atıksularının Adsorpsiyon ile Arıtımı	31
2.4.1.7. Tekstil Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı	31
3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESLERİ	33
3.1. Elektrokimyasal Prosesin Esasları	33
3.1.1. Faraday Kanunu ve Akım Verimi	35
3.2. Elektrokimyasal Atıksu Arıtım Prosesleri	36
3.2.1. Elektrooksidasyon Presesi ve Uygulamaları	37
3.2.2. Elektroflotasyon Presesi ve Uygulamaları	42
3.2.3. Elektrokoagülasyon Presesi ve Uygulamaları	44
3.2.3.1. Elektrokoagülasyonun Teknolojisi	46
3.2.3.2. Elektrokoagülasyonun Teorisi	49
4. MATERYAL VE METOD	54
4.1. Materyal	54
4.2. Deney Düzenegi	55
4.3. Deneysel İşlem	56
4.4. Analitik Metod	57
4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi	57
4.4.2. Tekstil Atıksuyunda COD ve Türbidite Ölçümleri	58
4.4.3. Kullanılan Eşitlikler	59



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. Remazol Red RB 133 Boya Çözeltilisinin Elektrokoagülasyonu

5.1.1. Renk Giderimi Üzerine pH 'ın Etkisi	61
5.1.2. Renk Giderimi Üzerine İletkenliğin Etkisi	65
5.1.3. Renk Giderimi Üzerine Karıştırma Hızının Etkisi	68
5.1.4. Renk Giderimi Üzerine Akım Yoğunluğunun Etkisi	71
5.1.5. Renk Giderimi Üzerine Zamanın Etkisi	73
5.1.6. Renk Giderimin de Boya Konsantrasyonunun Etkisi	75
5.1.7. Renk Giderimin de Polielektrolit İlavesinin Etkisi	78
5.1.8. Boya Çözeltilisinin Kimyasal Koagülasyonu	83
5.1.9. Değerlendirme ve Karşılaştırma	84
5.1.10. Renk Giderimi Deney Sonuçları İçin Regresyon Çalışması	86

5.2. Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonla Arıtımı

5.2.1. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine pH 'ın Etkisi	91
5.2.2. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine İletkenliğin Etkisi	93
5.2.3. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Akım Yoğunluğunun Etkisi	95
5.2.4. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Zamanın Etkisi	98
5.2.5. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Polielektrolit İlavesinin Etkisi	100
5.2.5.1. Alüminyum Klorür (PAC) İlavesi Etkisi	100
5.2.5.2. Alum İlavesi Etkisi	103
5.2.6. PAC ve Alumun Karşılaştırılması	106

5.3. Arıtma Maliyetlerinin Hesaplanması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR

ÖZGEÇMİŞ

61

61

61

65

68

71

73

75

78

83

84

86

91

91

93

95

98

100

100

103

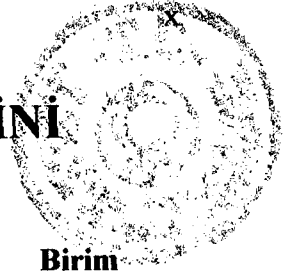
106

109

111

114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ



		Birim
A	Aktif anot yüzey alanı	[cm ²]
AC	Alternatif akım	[Amper]
AKM	Askıda katı madde	[mg/l]
BOI ₅	Biyolojik oksijen ihtiyacı	[mg/l]
C _{0COD}	COD 'nin deneye başlangıç konsantrasyonu	[mg/l]
C _{COD}	COD 'nin deneyden sonraki konsantrasyonu	[mg/l]
C _{0R}	Boyanın deneye başlangıç konsantrasyonu	[mg/l]
C _R	Boyanın deneyden sonraki konsantrasyonu	[mg/l]
C _{0T}	Deneyin başında türbidite değeri	[NTU]
C _T	Deneyin sonunda türbidite değeri	[NTU]
CE	Faraday değeriadaki kayıp veya akım verimi	[-]
CI	Colour index	[-]
COD	Kimyasal oksijen ihtiyacı	[mg/l]
ÇO	Çözünmüş oksijen	[mg/l]
DC	Direkt akım	[Amper]
E	Akım verimi	[-]
E	Elektrik enerjisi	[Wh]
F	Faraday sabiti ve 96485 C/mol	[C/mol]
I	Akım şiddeti	[A, mA]
I _j	Bir elektrottaki toplam akım	[A, mA]
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi	[-]
J	Akım yoğunluğu	[mA/cm ²]
K	Hız sabiti	[-]
k'	Hız sabiti	[-]
k''	Hız sabiti	[-]
M	Teorik olarak çözünen metalin (mol olarak) miktarı	[mol]
m _{act}	Pratikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı	[mol]
M _A	Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı	[g]
M _{Ate}	Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı	[g]

M_K	Pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı	[g]
M_T	Toplam çözünen alüminyum miktarı	[g]
MA	Molekül ağırlığı	[g]
N	Çözünen metalin tesir değeri	[-]
PH	Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonu	[-]
pH_b	Deney başlangıcında çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyon	[-]
pH_s	Deneyden sonra çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonu	[-]
q	Akımın miktarı (yük)	C
q_b	Birim alüminyum başına giderilen boya miktarı	[kg/kg]
q_{COD}	Birim alüminyum başına giderilen COD miktarı	[kg/kg]
q_p	oluşan ürünün harcadığı yük	C
q_T	toplam harcanan yük değerini	C
R_{COD}	COD giderme verimi	[-]
R_R	Renk giderme verimi	[-]
R_T	Türbidite giderme verimi	[-]
$SKKY$	Su Kalitesi Kontrol Yönetmeliği	[-]
T	Sıcaklık	[°C, °K]
T	Zamanı	[sn, dak., h]
TOK	Toplam organik karbon	[mg/l]
V	Volt	[Volt]
V	Elektrolit hacmi	[ml, m ³]

Greek Harfleri

		Birim
ω	Karıştırma hızı	[rpm]
α	Sabit	[-]
β	Sabit	[-]

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
3.1 Elektrokimyasal Hücrenin Şematik Görünüşü	34
3.2 Elektrokimyasal Dönüşüm veya Parçalanma Şematik Görünümü	38
3.3 Pilot Ölçekte Bir Elektrokimyasal Reaktör Sistemi	39
3.4 Şekil.. Paralel Bağlı Monopolar Elektrokimyasal Reaktörü	47
3.5 Seri Bağlı Monopolar Elektrokimyasal Reaktörü	48
3.6 Paralel Bağlı Bipolar Elektrokimyasal Reaktörü	49
3.7 Sulu Ortamda Alüminyum Kompleksleri ve pH İlişkisi	51
3.8 Elektrokimyasal Oluşacak Polimerik Al Türleri	52
4.1 Remazol Red RB 133 lün moleküler yapısı.	54
4.2 Deney Düzeneklerinin Şematik Diyagramı	55
4.3 Deney Düzeneklerinin Görünüşü	56
4.4 Elektrokimyasal Reaktörün Yakından Görünüşü	56
4.5 Absorbans-Konsantrasyon Arasındaki Kalibrasyon Eğrisi	58
4.6 Absorbans-COD Kalibrasyon Eğrisi	58
5.1 Elektrokimyasal Reaktörle Renk Giderimin de pH 'ın Etkisi	62
5.2 pH 'ın Enerji Tüketimine Etkisi	65
5.3 pH 'ın Alüminyum Boya Giderme Kapasitesine Etkisi	65
5.4 Elektrokimyasal Reaktörle Renk Giderimin de İletkenliğin Etkisi	66
5.5 İletkenliğin Enerji Tüketimine Etkisi	68
5.6 İletkenliğin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi	68
5.7 Karıştırma Hızının Renk Giderme Verimine Etkisi	69
5.8 Karıştırma Hızının Enerji Tüketimine Etkisi	70
5.9 Karıştırma Hızının Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi	70
5.10 Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi	72
5.11 Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi	72
5.12 Akım Yoğunluğunun Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi	73
5.13 Zamanın Renk Giderme Verimine Etkisi	74
5.14 Zamanın Enerji Tüketimine Etkisi	75
5.15 Zamanın Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi	75
5.16 Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Renk Giderme Verimine Etkisi	77

5.17	Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Enerji Tüketimine Etkisi	77
5.18	Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi	78
5.19	Polielektrolit İlavesinin Renk Giderme Verimine Etkisi ($J=10 \text{ mA/cm}^2$)	80
5.20	Polielektrolit İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi ($J=10 \text{ mA/cm}^2$)	80
5.21	Polielektrolit İlavesinin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi ($J=10 \text{ mA/cm}^2$)	81
5.22	Polielektrolit İlavesinin Renk Giderme Verimine Etkisi ($J=5 \text{ mA/cm}^2$)	82
5.23	Polielektrolit İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi ($J=5 \text{ mA/cm}^2$)	83
5.24	Polielektrolit İlavesinin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi ($J=5 \text{ mA/cm}^2$)	83
5.25	Şekil 5.25. Elektrokoagülasyondan Önceki Görünüm	85
5.26	Şekil 5.26. Elektrokoagülasyondan Sonraki Görünüm	85
5.27	Şekil 5.27. Elektrokoagülasyonda Üste Biriken Flok Tabakası	85
5.28	Giderme Verimi – Zaman İlişkisi (1)	87
5.29	Giderme Verimi - Zaman İlişkisi (2)	87
5.30	Akım Yoğunluğuna Bağlı Renk Giderme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi	88
5.31	Zamana Bağlı Renk Giderme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi	88
5.32	Renk Giderme Verimi – Faraday İlişkisi	89
5.33	Renk Giderme Verimi – Başlangıç Boya Konsantrasyonu İlişkisi	90
5.34	Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesi – Başlangıç Boya Konsantrasyonu İlişkisi	90
5.35	pH 'ın Giderme Verimine Etkisi	92
5.36	pH 'ın Enerji Tüketimine Etkisi	93
5.37	pH 'ın Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	93
5.38	İletkenliğin Giderme Verimine Etkisi	94
5.39	İletkenliğin Enerji Tüketimine Etkisi	95
5.40	İletkenliğin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	95
5.41	Akım Yoğunluğunun Giderme Verimine Etkisi	96
5.42	Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi	97
5.43	Akım Yoğunluğunun Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	97
5.44	Zamanın Giderme Verimine Etkisi	99

		xiv
5.45	Zamanın Enerji Tüketimine Etkisi	99
5.46	Zamanın Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	99
5.47	Giderme Verimine İlave Edilen PAC Miktarının Etkisi	101
5.48	Elektrokoagülasyona PAC İlavesinin Etkisi (800 mg/l)	102
5.49	PAC İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	102
5.50	PAC İlavesinin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	103
5.51	Giderme Verimine İlave Edilen Alum Miktarının Etkisi	104
5.52	Elektrokoagülasyona Alum İlavesinin Etkisi (800 mg/l)	105
5.53	Alum İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	105
5.54	Alum İlavesinin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi	106
5.55	Polielektrolitlerin Etkisinin Karşılaştırılması (giderme verimi açısından)	106
5.56	Polielektrolitlerin Etkisinin Karşılaştırılması (enerji tüketimi açısından)	107



ÇİZELGELER DİZİNİ

xv

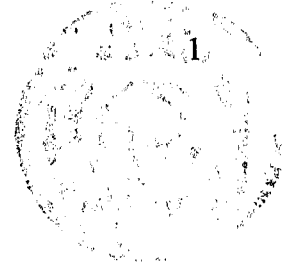
Tablo

Sayfa

2.1.	Atıksu Karakterizasyonunda Kullanılan Temel Kirletici Parametreler	13
2.2.	Tekstil Üretim ve Terbiye İşlemleri Atıksularının Deşarj Limit Değerleri	16
2.3.	Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları	17
2.4.	İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Limitleri	18
2.5.	Adsorbsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil Boya ve Atıksularının Arıtımı	20
2.6.	Kimyasal Oksidasyon İşlemleri ile Tekstil Boya ve Atıksularının Arıtımı	26
3.1.	Elektrokimyasal Yükseltgenme ve İndirgenme Reaksiyonları	34
3.2.	Bazı Anot Elektrotlarının Renk ve COD Giderim Sonuçları	38
3.3.	Elektrokoagülasyonun Avantajları	46
3.4.	Elektrokoagülasyonun Dezavantajları	46
3.5.	Al^{3+} Sulu Ortamda Oluşan Hidroksi Kompleks Türleri (I: 0, 25°C)	51
4.1.	Remazol Red RB 133 'ün Özellikleri	54
4.2.	Kullanılan Tekstil Atıksuyunun özellikleri	55
5.1.	pH Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	61
5.2.	İletkenlik Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	66
5.3.	Karıştırma Hızı Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	69
5.4.	Akım Yoğunluğu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	71
5.5.	Zaman Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	74
5.6.	Boya Konsantrasyonu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	76
5.7.	Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları*	79
5.8.	Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları*	79
5.9.	Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları*	81
5.10.	Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları*	82
5.11.	Renk Giderme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	84
5.12.	pH Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	92
5.13.	İletkenlik Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	94
5.14.	Akım Yoğunluğu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	96
5.15.	Zaman Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	98

5.16. PAC İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	100
5.17. 800 mg/l PAC İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	101
5.18. Alum İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	103
5.19. 800 mg/l Alum İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları	104
5.20. Atıksu Arıtma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	107
5.21. Renk Giderme Maliyeti *	109
5.22. Tekstil Atıksuyu Arıtma Maliyeti *	110





1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

Her geçen gün artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte yeni endüstri dalları ortaya çıkmış, mevcut endüstri dalları ise artan nüfus ile kapasitelerini artırmıştır. Bu durum mevcut doğal kaynakların ve bunların en önemlisi olan suyun kullanımını artırmaktadır. Kullanılan bu sular kirlenmiş olarak tekrar doğal su ortamlarına verilmektedir. Endüstrilerden kaynaklanan atıksular, evsel atıksulara göre kaynak, miktar ve karakter açısından büyük farklılıklar gösterirler. Endüstriyel atıksuların doğaya yaptığı etkiler çok daha önemli düzeyde, doğal dengeyi değiştirici ve bazı durumlarda geri dönülmez nitelikte olmaktadır. Doğal kaynak sınırlılığı ve bizden sonraki nesillerinde bu kaynaklardan faydalanması gerekliliğinden doğal kaynakların korunması gerekliliği çevre bilincini ortaya çıkarmıştır. Çevrenin kirlenmesine neden olan etkenlerin kontrol altına alınması ve endüstri tesislerinin kullanılmış sularının doğal su ortamlarını kirletmesini engelleyecek şekilde arıtılması gerekmektedir.

Türkiye 'de endüstriyel kirlenme konusunda 1974 yılına kadar bir yasal düzenleme bulunmamaktadır. 1974 yılında 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu çerçevesinde endüstriler için deşarj standartları getirilmiştir. 1983 tarihli Çevre Kanunu 'nda endüstriyel kirlenme kontrolü, genel kirlenme kontrolü çerçevesinde belirli esaslara bağlanmıştır. Bunların dışında belediyelerce ön arıtma standartları yürürlüğe konulmuştur. Bunların ilki İSKİ Atık Suların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliği 'dir. Bu yönetmeliği İzmit ve Adana 'da devreye giren ön arıtma standartları izlemiştir. Türkiye 'de en gelişmiş endüstri dalı tekstildir. Tekstil endüstrisi Türkiye 'de toplam endüstriyel üretimin %20 'sini oluşturmaktadır [1].

Tekstil endüstrisinin yüksek su tüketimi dolayısıyla atıksu üretimi fazladır. Bu atıksuların kirlilik kaynağı liflerde mevcut olan safsızlıklar, kullanılan kimyasal maddeler, boyamada kullanılan boyar maddelerdir. Boyar madde atıksuya renk vermektedir. Renkli tekstil atıksuları alıcı su ortamlarında birikerek suyun hem estetik görünümü bozar hem de ışık geçirgenliğini azaltır. Işık geçirgenliğinin azalması ve çözünmüş oksijen miktarının düşmesi canlıların yok olmasına sebep olmakla beraber suyun yeniden kullanım imkanlarını da kısıtlamıştır. Aynı zamanda bazı boyar maddeleri toksik maddeler içerdiği de bilinmektedir.

Literatürde tekstil atıksularından renk giderilmesi ve arıtılması konusunda bir çok yöntem geliştirilmiştir. Daha önce denenmiş olan biyolojik oksidasyon, kimyasal çöktürme, klorlama, ozon, adsorpsiyon, kimyasal oksidasyon, membran prosesler yanında son yıllarda boyarmadde içeren tekstil atıksularının arıtılmasında elektrokimyasal yöntemler başarı ile kullanılmaktadır.

Yokovlev ve arkadaşları, boya içeren atıksuların elektrokimyasal arıtımında oluşan yükseltgenme ürünlerini incelemiştir. Deney sonunda ağırtılmış suyun toksik olmadığı bildirilmiştir [2].

Naumezyk ve arkadaşları, yüksek Cl^- iyonu konsantrasyonuna sahip bir tekstil atıksuyunu Ti/RuO_2 , Ti/Pt ve $Ti/Pt/Ir$ gibi elektrot kullanılarak elektrokimyasal olarak arıtmaya çalışmıştır. Elektrokimyasal oksidasyon sonucu COD giderme verimi kullanılan Ti/RuO_2 , Ti/Pt ve $Ti/Pt/Ir$ elektrotlara göre sırasıyla %92, %87.5 ve %85.2 olarak gerçekleşmiştir [3].

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, yaygın olarak kullanılan bir reaktif tekstil boyası (Remazol Red RB 133) çözeltilerinin ve polipropilen iplik üretim/boyama yapan bir tekstil fabrikası atıksularının alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile arıtımı araştırılmıştır.

Elektrokoagülasyonla renk, türbidite ve COD giderimi üzerine; pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, zaman, konsantrasyon, polielektrolit ilavesi etkisi gibi parametrelerin etkisi incelenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu, Faraday, elektrik ve elektrot tüketimleri değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca renk giderme verimi ile elektrokoagülasyon parametreleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur.

2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ



2.1. Tekstil Endüstrisinde Üretim Proses ve İşlemleri

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

Tekstil endüstrisi Cumhuriyet dönemine sayısı 10 'dan az pamuk ipliği fabrikası ile girmiş, sonra en hızlı gelişen sektörlerden biri olmuştur. Halen Türkiye sanayisindeki payı %20 'nin üzerindedir. Endüstri, İstanbul, Adana ve İzmir illerinde yoğunlaşmakla birlikte hemen tüm yurda dağılmış bulunmaktadır. Tekstil endüstrisinin hammaddesi elyaftır. Doğal elyaflar arasında pamuk, keten, kenevir, yün, ipek, mohair ve kıllar, fabrikasyon elyaflar arasında reyon, kazein, asetat-selüloz ester, naylon, polyester, akrilik ve vinil bulunur. Tekstil endüstrisinde yer alan proses ve işlemler işlenen elyafla bazı farklılıklar göstermekle beraber çoğunlukla benzerdir. Pamuklu yün ve sentetik elyaflar için üretim aşamaları aşağıda özetlenmiştir [1].

2.1.1. Pamuklu Tekstil Endüstrisi

Pamuk elyafı, iplik yapımı, dokuma hazırlık ve ürünlerinin terbiyesi olarak üç aşamada işlenir. İplik yapımı, açma temizleme, tarama, çekme, eğirme, bobinleme gibi işlemleri kapsar. Bunlar çoğunlukla mekanik kuru işlemlerdir. Dokuma hazırlık işlemleri, bobin ve çile hazırlaması, çözgüler, tahar, haşılama ve dokuma işlemlerini kapsar, bu işlemlerde kuru işlemlerdir. Terbiye işlemlerinde önemli miktarlarda su kullanımı vardır. Başlıca terbiye işlemleri haşıl sökme, yıkama, pişirme, merserizasyon, kasar, boyama ve apre işlemleridir. Haşıl sökme ve dokuma sırasında aşınma ve germeyi önlemek için uygulanan nişastanın asit veya enzimle giderilmesi

işlemidir. Pişirme işlemi bir bazla pamuklu ürünün kaynatılması ve temizlenmesi işlemidir. Kasar klorit, hipoklorit veya hidrojen peroksit kullanılarak temizlenmesi işlemidir. Boyamada reaktif naftol, direkt, kükürtlü, indigo gibi çeşitli boya türleri kullanılır. Kasar ve boya çok su kullanılan işlemlerdir. Apre son ürüne tutum, buruşmazlık, çekmezlik, su geçirmezlik gibi özelliklerin kazandırıldığı son işlemlerdir.

2.1.2. Yünlü Tekstil Endüstrisi

Pamuklu tekstil ile aynı aşamalarda gerçekleştirilen yünlü tekstil işlemlerinde ilk ve en önemli fark yünün (yaprak, yapağı) yıkanmasıdır. Çok kirli yağlı atıksu oluşturan bu işlem ayrı bir alt kategori oluşturur. İlk aşamada yün aşama, taraklama gibi işlemler yapılır ve kamgarn veya strayhgarn iplik olarak sentetik madde katkıları da yapılarak bobinlere sarılır ve dokunur. Terbiye işlemleri arasında karbonizasyon, dinkleme, yıkama, boyama ve apre işlemleri yapılır. Boyamada başlıca asit, metalize ve mordant boyalar kullanılır, sonra sıcak asit, metalize ve mordant boyalar kullanılır, sonra sıcak su veya kimyasal maddeler ile fisaj yapılır. Apre işlemleri keçeleşmezlik işlemi ve pamuklu kumaşlara uygulanan diğer işlemleri kapsar.

2.1.3. Sentetik Tekstil Endüstrisi

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

2.2. Boyarmaddeler ve Boyama Atıksularının Özellikleri

2.2.1. Boyarmaddeler

Boyarmaddeler, diğer maddelerle az veya çok renk verebilen, kendisinde renkli olan maddelerdir. Boyarmaddenin tekstil boyama prosesinde kullanılabilmesi, için gerekli iki özelliği, renkliliği ve elyaf üzerine bağlanabilmesidir. Bütün renkli

organik bileşikler, rengi oluşturan doymamış kromofor grubu içerirler. Bu grubu taşıyan bileşiklere kromojen adı verilir. Bir kromojenin boyarmadde olabilmesi için molekülde kromofordan başka oksokrom adı verilen amino ($-\text{NH}_2$), yer değiştiren amino ($-\text{NHR}$, $-\text{NR}_2$), hidroksil ($-\text{OH}$), metoksil ($-\text{OCH}_3$), sülfonik ($-\text{SO}_3\text{H}$) ve karboksil ($-\text{COOH}$) gruplarının da bulunması gerekir. Bu gruplar aynı zamanda molekülün elyafa karşı affiniyete sahip olmasını ve suda çözünmesini de sağlar. Kromofor grupları; nitro (R.NO_2), nitrozo (N_2O), azo ($-\text{N}=\text{N}-$), karbonil ($\text{C}=\text{O}$), etilenik çifte bağ ($-\text{C}=\text{C}-$), tiyokarbonil ($-\text{C}=\text{S}-$) gibi çifte bağlı gruplardan oluşur [4, 5].

2.2.1.1. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması

2.2.1.1.1. Çözünürlük Özelliklerine Göre Sınıflandırma

1. Suda Çözünen Boyarmaddeler

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

Suda Çözünen Anyonik Boyarmaddeler: Suda çözünen grup olarak en çok sülfonik ($-\text{SO}_3$), kısmen de karboksilik (COO^-) asitlerin sodyum tuzlarını içerirler. ($-\text{SO}_3\text{Na}$ ve $-\text{COONa}$). Renk, anyonun mezomerisinden ileri gelir.

Suda Çözünen Katyonik Boyarmaddeler: Moleküldeki çözünürlüğü sağlayan grup olarak bir bazik grup ($-\text{NH}_2$), asitlerle tuz teşkil etmiş halde bulunur. Asit olarak anorganik asitler (HCl) veya $(\text{COOH})_2$ gibi organik asitler kullanılır.

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

2. Suda Çözünmeyen Boyarmaddeler

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

3. Substratta Çözünen Boyarmaddeler

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

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

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

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

Elyaf İçinde Oluşturulan Boyarmaddeler: Elyaf içinde kimyasal bir reaksiyon ile iki ayrı bileşenden oluşturulan boyarmaddeler bu sınıfa girer. Suda çözünmeyen pigmentlerdir. Azoik boyarmaddeler ve ftalosiyanınlar bu sınıfa girer.

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

2.2.1.1.2. Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

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

1. Bazik (katyonik) Boyarmaddeler

Bunlar organik bazların hidroklorürleri veya asetat tuzları şeklindedir. Renkli kısım katyon olup, pozitif yük taşıyıcı olarak N ve S atomu içerirler. Bazik (proton alan) olarak etki ettiklerinden sulu çözeltilerde bulunan boyarmadde katyonu elyafın anyonik gruplarıyla elyaf-boyarmadde tuzunu oluştururlar.

Bazik boyarmaddelerin en karakteristik özellikleri parlak olmaları ve geniş renk şiddetleridir. Yün, ipek ve pamuk üzerinde ışığa ve yıkamaya karşı mukavemetleri çok düşüktür. Günümüzde, bazik boyarmaddeler pamuk boyamada pek kullanılmazlar, çünkü reaktif boyarmaddelerle pamuk üzerinde çok parlak renkler elde edilebilmektedir. Ancak poliakrilonitril üzerinde ışığa dayanıklılıkları iyi olduğundan “orlon” boyanmasında geniş olarak kullanılır. Genellikle asetik asit ve tannik asit ile ve 80-90 °C 'de boyama yapılır [6].

2. Asit Boyarmaddeler

Moleküllerinde sülfonil ($-\text{SO}_4\text{H}$) veya karbonik asit ($-\text{COOH}$) grubu içerirler. Asit boyarmaddeler genellikle protein elyafın boyanmasında kullanılırlar. Öncelikle yün, ipek, poliamid (nylon) katyonik modifiye akrilik elyafı, deri ve besin maddelerinin boyanmasında kullanılır. Asit boyarmaddeler, 60-80 °C 'de düşük veya nötr pH değerlerinde kullanılır [6].

3. Direkt Boyarmaddeler

Bunlar genellikle sülfonik asitlerin, bazen de karboksilli asitlerin sodyum tuzlarıdır. Renkli kısmı oluşturan iyon, anyon şeklindedir. Yapı bakımından pek çoğu azo boyarmaddeler grubuna girer ve $(\text{boya}.\text{SO}_3)-\text{Na}^+$ genel formülüyle ifade edilir.

Direkt boyarmaddelerin selülozik elyafa bağlanmasında, boyarmaddelerin elyaf üzerinde yaklaşmasından sonra elyaf üzerine çekilebilmesi için elyaf

yakınlarında konsantrasyonların çok büyük olması gerekir. Bu ancak boyarmadde kümelerinin oluşması ile mümkündür. Boyarmadde molekülleri van der Waals ve hidrojen bağları sayesinde kümeleşir ve boyarmaddeler elyafı çok küçük olan kanallara difüzenir. Boyarmadde konsantrasyonlarının çok yüksek olduğu yerlerden, düşük olduğu yerlere doğru hareket edebilirler. Kaynatma ile hareketlenen boyarmaddeler tuz ilavesiyle çözeltide dağılırlar ve ısıtıcı ile birlikte doğrudan uygulanabilirler [6].

Direkt boyarmaddeleri ucuz olmaları, boyama işlemlerinin basit oluşu ve boyama sırasında elyafın yıpranmaması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilirler. Genellikle selülozik elyafın boyanmasında, bazen de, kağıt, deri, ipek, naylon boyamada kullanılırlar. Boyama sırasında sıcaklık yüksek olduğu gibi, boya banyolarına sodyum klorit veya sülfat eklenir.

4. Reaktif Boyarmaddeler

Elyaf üzerine kovalent bağla bağlanan bu boyarmaddeler selülozik elyaf, yün, ipek ve poliamid boyamada yaygın olarak kullanılır. Kimyasal reaksiyon sonucu kovalent bağ oluşturdıklarından, elde edilen boyanın yıkamaya karşı dayanıklılığı yüksek ve renkler çok parlaktır. Boyama soğukta bekletmeyle yapıldığı için enerji tasarrufu sağlanır. Reaktif boyarmaddelerin molekülleri çok küçük olduğundan elyaf içine difüzyon hızları büyüktür, dolayısıyla boyama kısa sürede tamamlanır. Reaktif boyarmaddeler ile yapılan yün boyama, nötr pH değerinde zayıf asit banyolarında yapılır [6].

5. Sülfür Boyarmaddeler

Sülfür boyarmaddeler amino ve nitro grupları içeren organik bileşiklerin, sülfür veya sodyum sülfid ile yüksek sıcaklıkta reaksiyonu sonucu elde edilir ve genellikle alkali banyolarda pamuk elyafın boyanmasında kullanılır. Ayrıca poliamid ve viskon rayon boyamada kullanılabilirler. Genellikle koyu mavi, siyah, kahve gibi koyu renkleri kullanılır. Sülfür boyalar suda çözünmezler, kimyasal indirgeyici maddelerle alkali çözeltide çözünür hale getirildikten sonra yüksek sıcaklıkta (100 °C 'de) kullanılırlar [6].

6. Küpe Boyarmaddeler

Moleküllerinde en az iki oksijen atomu içeren renkli bileşiklerdir. İri, ince ve çok ince toz halinde bulunabilirler. Donmaya karşı dayanıklı, kurumayan, çökmeyen, dispersiyon haline getirilmiş sıvılarda yaygın olarak kullanılır. Bu boyarmaddeler karbonil grubu içerir ve suda çözünmezler. Bunlar sadece indirgeme ile suda çözünür hale getirilerek boyamada kullanılırlar. Daha sonra oksidasyonla yeniden çözünemez hale getirilirler. İndirgeme aracı olarak Na_2SO_4 , NaOH ve NaHSO_3 kullanılır. Oksidasyon için ise hava kullanılır. Daha çok selülozik, kısmen de protein elyafın boyanmasında kullanılır. Işığa, yıkamaya, sürtünmeye karşı dayanıklıdır [6].

7. Mordan Boyarmaddeler

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

8. Metal-Kompleks Boyarmaddeler

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

9. Pigment Boyarmaddeler

Tekstil elyafı organik ve anorganik pigmentlerle boyanabilir. Çoğunlukla organik olanları tercih edilir. Pigmentlerin elyaf affinitesi yoktur. Kimyasal bağ ve

absorbsiyon yapmazlar. Elyaf üzerine bağlayıcı madde denilen sentetik reçineler ile bağlanırlar. Suda çözünmediklerinden sudaki yağ ve yağdaki su emülsiyonları şeklinde ince dağılmış olarak kullanılırlar. Emülsiyon, elyaf veya kumaşa emdirildikten sonra bozular. Pigment, kumaş yüzeyinde ince dağılmış halde kalır. Sıkılarak kurutulduktan sonra 140-170 °C 'de termofiks edilir. Özellikle açık renklerde yıkama ve ışık haslıkları iyidir. Sürtünme haslığının yüksek olmayışı, koyu renklerin elde edilememesi, bağlatıcı filmin hava etkisiyle parçalanması, bağlayıcının kumaşa sertlik vermesi dezavantajlarıdır.

10. Dispers Boyarmaddeler

Dispers boyarmaddeler amino ve hidroksil grupları içerirler ve molekül ağırlıkları düşüktür. Suda eser miktarda çözünebilen, bu nedenle sudaki dispersiyonları halinde uygulanabilen boyarmaddelerdir. Boyarmadde, boyama işlemi sırasında dispersiyon ortamından hidrofob elyaf üzerine difüzyon yolu ile çekilir. Boyama boyarmaddenin elyaf içinde çözünmesi ile gerçekleşir.

Dispers boyarmaddelerin elyaf içine difüzyonu oldukça yavaştır. Boyama uzun sürede gerçekleştiğinden pratik değillerdir. Dispers boyarmaddeler poliester, poliamid ve akrilik elyafın boyanmasında kullanılır.

2.2.1.1.3. Kimyasal Yapısına Göre Sınıflandırma

Kimyasal yapılarına göre boyalar aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır:

Azo boyarmaddeleri

Nitro ve nitrozo boyarmaddeleri

Polimetin boyarmaddeleri

Arilmetin boyarmaddeleri

Aza boyarmaddeleri

Boyar maddelerin; nitrozo, nitro, monoazo, disazo, trisazo, poliazo, stilben, difenil metan, triaril metan, ksanten, akridin, kinolin, metin, tiazol, indamin, indofenil, azin, oksazin, tiazin, kükürt, lakton, aminokinon, hidroksiketon, indigoid, antrakinin, ftalosiyenin, kloro ve dikloro-triazinil ve remazol olmak üzere türleri

vardır. Sınıflandırma yapılırken molekülün temel yapısı esas alınabildiği gibi molekülün kromojen ve renk verici özellikteki kısmıda esas kabul edilmektedir [4].

2.2.2 Boyama Atıksularının Özellikleri

Boyama atıksuları koyu renge, geniş pH aralığına, yüksek sıcaklığa, COD, toplam çözünmüş katı, yüksek iletkenliğe ve bazen de yüksek alkaliniteye sahiptirler.

Boyama atıksularının en kötü tarafı kuvvetli renkleridir. Boyar maddelerin tipine bağlı olarak, boyama atıksularının rengi kırmızı, kahverengi, mavi, mor ve siyahtan farklı olarak yoğunluk ve koyuluğa bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Boyama atıksularının rengi günden güne ve hatta gün içinde değişik zamanlarda değişebilir, çünkü müşteri istekleri nedeniyle boyama proseslerinde sık sık değişik boyar maddeler kullanılır. Rengin değişimi aynı zamanda boyahane atıksuyunun COD içeriğinin sık sık inip-çıkmasına neden olur [7].

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

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

Boyama atıksuları kullanılan kimyasallar ve boyarmaddelerden kaynaklanan toksik bileşikler ve ağır metaller içerebilmektedir. Boyama atıksuları bu yapılarıyla atıksu arıtma tesislerinde problemlere neden olmaktadır. Bu problemleri, çamurda kabarma, renkte süreklilik, pH 'da, sıcaklıkta, ağır metallerde aşırılık ve hidrolik akış hızında değişiklikler olarak sıralayabiliriz. Ayrıca bir çok boya çeşidi, biyolojik

ayrışmaya dayanıklı olarak geliştirildiğinden tekstil atıksularından biyolojik yöntemlerle giderimi sağlanamamıştır. Böylece renk giderimi tekstil atıksularında karşılaşılan en önemli çevresel problemlerden biri olmuştur [8].

2.3. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu

2.3.1. Atıksu Karakterizasyonunda Temel Kirletici Parametreler

Atıksuların karakteri elyaf cinsi, uygulanan işlemler ve kullanılan kimyasal maddelere bağlı olarak değişkendir. Tekstil endüstrisinde temel kirleticiler; BOI_5 , COD, AKM, yağ ve gres, toplam krom, fenol ve sülfürdür. Bunların dışında özellikle kullanılan boya ve diğer kimyasal maddelere bağlı olarak hem organik nitelikli hem de ağır metal olarak çok sayıda mikrokirletici atıksularda bulunmaktadır. Atıksu karakterizasyonunda kullanılan temel kirletici parametreler Tablo 2.1. 'de verilmiştir [1].

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

Tekstil endüstrisinde yağ ve gresin en önemli kaynakları, yüzeysel aktif madde içeren boyarmaddeler ve beraberinde kullanılan yağlar ve doğal elyaflardır. Özellikle yünün işlenmesi sırasında, elyafı kayganlaştırmak ve ipliklerin birbirine yapışmasını önlemek için çeşitli yağlar kullanılmaktadır. Bu amaçla zeytin ve yerfıstığı birinci sınıf yünler için, olein yağı ise ikinci kalite yünler için kullanılmaktadır. Pamuklu tekstil endüstrisinde yağ ve gres düşüktür, ama tünlülükte oldukça yüksektir. Tekstil endüstrisi atıksularında yağ ve gres konsantrasyonu 12-6000 mg/l arasında değişmektedir.

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

Tablo 2.1. Atıksu Karakterizasyonunda Kullanılan Temel Kirlenici Parametreler

<i>1. Fiziksel parametreler</i>	<i>2. Kimyasal parametreler</i>	<i>3. Biyolojik parametreler</i>	<i>4. Deşarj bilgileri</i>
• Renk • koku • Radyoaktivite • Sıcaklık • AKM • ÇÖ • Köpük • Korozyon • Bulanıklık	• pH • COD • TOK • İnorganik bileşenler • Klor ihtiyacı • Yağ ve hidrokarbonlar • Fenol • Toplam çözünmüş tuzlar • Sülfatlar • Azot ve fosfor • Sertlik • Klor iyonu • Alkalinite	• BOI • Patojenik mikroorganizmalar • Toksisite	• Ortalama günlük akış oranı • Sürekli maksimum akış oranı • Akış değişimin maksimum oranı

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

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

2.3.2. Pamuklu Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu

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

2.3.3. Yünlü Tekstil Sanayi Atıksularının Karakterizasyonu

Yün atıksularında, saman, diken, pıtrık, toprak, kum, alkali maddeler, organik asitler, yağ, H₂S, boyalar, deterjanlar, kimyasal ve organik maddeler bulunur. Yapak yıkama atıkları; kum ve toprak, pıtrık, yün gresi ve organik asitler içerir. Bu atıklar kahverengi ve bulanıktır. Gres emülsiyonları ve diğer organik bileşikler içerir. Çıkış

suyundaki gres miktarı 25 g/l gibi yüksek değerlerde olabilir. Kuvvetli alkalidirler, yüksek miktarda organik bileşik ve AKM içerirler.

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

2.3.4. Sentetik Tekstil Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu

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

2.3.5. Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarj Standartları

Tekstil endüstrisi atıksularının arıtılmasında sınırlayıcı faktör atıksuyun deşarj standartlarıdır. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği 'nde tekstil atıksularının alıcı ortamlara deşarj standartlarında kısıtlama getirilen parametreler; BOI₅, COD, toplam AKM, amonyum azotu, serbest klor, toplam krom, yağ ve gres, pH, fenol, balık biyodeneyi (ZSF), sülfür ve sülfid parametreleridir. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği 'nde sektör bazında çeşitli tekstil endüstrileri için alıcı ortama deşarj standartları Tablo 2.2 'de verilmiştir [9]. Atıksuların atıksu altyapı tesislerine deşarjında ön görülen deşarj standartları Tablo 2.3 'de verilmiştir.

İSKİ kanalizasyon şebekelerine atıksularını veren tesisler için, İSKİ 'nin sağlanmasını istediği deşarj standartları yönetmeliği genel yaklaşımlar ve teknik açıdan Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği ile uyum sağlamakta olup, deşarj kriterleri ve arıtma zorunluluğu gibi temel kavramlarda ayrılmaktadır. İSKİ Atıksuların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliği 'nde bir kirlenici kaynağın kanalizasyon şebekesine atıksu vermesi durumunda sağlanması gereken deşarj limitleri Tablo 2.4 'de verilmiştir [10].

Tablo 2.2. Tekstil Üretim ve Terbiye İşlemi Atıksularının Deşarj Limit Değerleri

Parametre	Açık Elyaf, İplik Üretimi		Dokunmuş Kumaş Terbiye		Pamuklu Tekstil Üretim İşlemleri		Yün Yıkama, Terbiye-Dokuma		Örgü kumaş Terbiyesi		Halı Terbiye İşlemleri		Sentetik Tekstil Terbiye	
	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat	2 saat	24 saat
BOI ₅ , mg/l	80	60	90	70	90	60	200	100	50	40	120	100	100	80
COD, mg/l	350	240	400	300	250	200	400	300	300	200	300	200	400	300
NH ₄ -N, mg/l	5	-	5	-	5	-	5	-	5	300	5	-	-	-
Serbest Klor, mg/l	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	0.3	-	-	-
Toplam Cr, mg/l	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	-	-
AKM, mg/l	-	-	140	100	160	120	400	300	-	-	160	120	-	-
Fenol, mg/l	-	-	1	0.5	-	-	-	-	1	0.5	1	0.5	1	0.5
Sülfür (S ²⁻), mg/l	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-
Sülfid, mg/l	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-
Çinko, mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	10
Yağ ve Gres, mg/l	10	-	-	-	10	-	200	100	10	-	10	-	-	-
ZSF deneyi	4	3	4	3	4	3	-	-	4	3	-	-	3	2
pH	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9

Tablo 2.3. Atıksuların Atıksu Altyapı Tesislerine Deşarjında Öngörülen Atıksu Standartları

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

(a) Bu parametrelere atıksu değerlendirilmesinde bakılmayacaktır

Tablo 2.4. İSKİ Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Limitleri

Parametre	İzin Verilebilir Maksimum Değerler (mg/l)
Sıcaklık (°C)	40
pH	5.5-10
AKM	350
Yağ ve Gres	100
Anyonik Yüzey Aktif Maddeler	5
COD	800
SO ₄ ²⁻	1750
Toplam Sülfür (S ²⁻)	2
Fenol	10
Toplam Azot (TN)	40
Toplam Fosfor (TP)	10
Arsenik (As)	3
Toplam Siyanür (CN ⁻)	10
Toplam Kurşun (Pb)	3
Toplam Krom (Cr)	5
Toplam Kadmiyum (Cd)	5
Toplam Civa (Hg)	1
Toplam Bakır (Cu)	10
Toplam Nikel (Ni)	10
Toplam Kalay (Sn)	5
Toplam Gümüş (Ag)	5
Bor (B)	3

2.4. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımı

2.4.1. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler

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

2.4.1.1. Tekstil Atıksularının Biyolojik Oksidasyonu

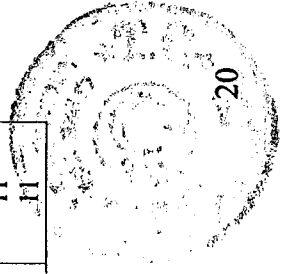
Tekstil boyama işlemlerinde farklı özellik ve kimyasal yapıda boyar maddeler kullanılmaktadır. Bunun sonucunda da çok kompleks ve biyolojik ayrışabilirliği zor atıksular ortaya çıkmaktadır. Tekstil atıksularının arıtımında biyoproses olarak en yaygın aktif çamur kullanılmakta olup, arıtmadan çıkan sularda renk problemi oluşmaktadır. Diğer bir ifadeyle renk giderimi oldukça düşüktür. Biyolojik prosesler ile tekstil ve boya atıksularının arıtımı Tablo 2.5 'de verilmiştir [11-16].

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

Anaerobik arıtma yöntemleri üzerine yapılan laboratuvar şartlarında ise renk giderimi için iyi sonuçlar alınmasına rağmen, bir takım problemler mevcuttur. Gerçek bir tekstil atıksuyunda sülfat ve nitrat gibi iyonların bulunması sistemin verimini azaltabilmektedir. Ayrıca anaerobik arıtımda oluşan H_2S gazı diğer önemli bir problemdir. Tekstil atıksularının anaerobik arıtımında azo boyar maddelerin parçalanmasında sonucu aromatik aminlerin oluşumu ancak anaerobik bir ortamda gerçekleşmektedir [17].

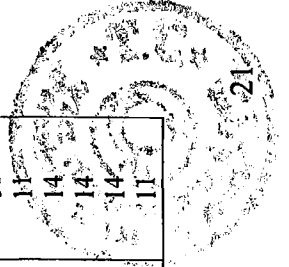
Tablo 2.5. Adsorpsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı

Boya		Renk Giderme Metodları								Kaynak
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Adsorbent	Kapasite mol/kg	Renk giderimi(%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Renk giderimi, (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	No
Acid Yellow 3	Quinoline	A. çamur	-	0	42	44	<10	2 saat	-	11-12
Acid Yellow 5	Quinoline	A. çamur	-	-	-	-	40	6	-	11
Acid Yellow 36	Monoazo	A. çamur	-	5	42	11	-	-	-	11
Acid Yellow 54	Monoazo	A. çamur	-	19	42	0	-	-	-	11
Acid Yellow 61	-	A. çamur	-	95	42	85	-	-	-	11
Acid Yellow 73	Xanthene	A. çamur	-	5	42	11	-	-	-	11
Acid Yellow 151	Azo	A. çamur	-	26	42	26	-	-	-	11
Acid Yellow 176	Azo	A. çamur	-	2	42	32	-	-	-	13
Acid Yellow 237	Azo	A. çamur	-	18	42	49	-	-	-	11
Orange 3	Nitro	A. çamur	-	18	30	29	-	-	-	11
Orange 7	Monoazo	Chitosan	4.5	-	-	-	100	7	-	14-12
Orange 7	Monoazo	Microbio	0.05	-	-	-	-	-	-	14-12
Orange 61	Monoazo	A. çamur	0.13	67	42	23	-	-	-	11
Orange 67	-	A. çamur	0.014	99	24	76	-	-	-	11
Red 1	Monoazo	Chitin	-	-	-	-	-	-	-	13
Red 1	Monoazo	Chitosan	-	-	-	-	-	-	-	13
Red 18	Monoazo	A. çamur	-	5	48	5	-	-	-	11
Red 73	Disazo	A. çamur	-	17	42	6	-	-	-	11
Red 87	Xanthene	A. çamur	-	7	42	3	-	-	-	11
Red 88	Monoazo	A. çamur	-	-	-	-	86	7	-	12
Red 97	Disazo	A. çamur	-	20	42	17	-	-	-	11
Red 114	Disazo	Microbio	0.11	-	-	-	-	-	-	14
Red 183	Monoazo	A. çamur	-	28	42	28	-	-	-	11
Red 186	Monoazo	A. çamur	-	0	42	6	-	-	-	11
Red 214	Monoazo	A. çamur	-	0	42	19.7	-	-	-	11
Red 348	Monoazo	A. çamur	-	98	15	93	-	-	-	11



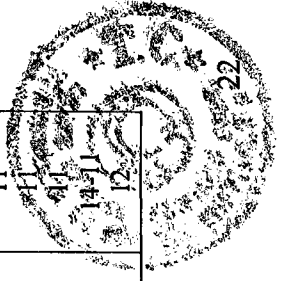
Tablo 2.5. Adsorpsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı (Devamı)

Boya		Renk Giderme Metodları							Kaynak	
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Adsorpsiyon			Biyolojik parçalanabilirliği			Kaynak		
		Adsorbent	Kapasite mol/kg	Renk giderimi (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Renk giderimi, (%)		Zaman, gün	DOC giderimi, (%)
Red 413	Monoazo	A. çamur	-	7	72	15	-	-	-	11
Red 413	Monoazo	A. çamur	-	83	42	97	-	-	-	11
Blue 9	Triaryl methane	A. çamur	-	0	42	45	-	-	-	11
Blue 9	Triaryl methane	A. çamur	-	33	33	24	-	-	-	11
Blue 13	Triaryl methane	Mod.cellul	0.013	-	-	-	-	-	-	14
Blue 15	Triaryl methane	A. çamur	-	100	42	4	-	-	-	11
Blue 25	Anthraquimone	Chitin	0.45	-	-	-	-	-	-	14
Blue 25	Anthraquimone	Chitosan	0.032	-	-	-	-	-	-	14
Blue 25	Anthraquimone	Unmod.cell	0.05-0.1	-	-	-	-	-	-	14
Blue 41	Anthraquimone	A. çamur	-	84	24	84	19	28	33	11
Blue 92	Monoazo	A. çamur	-	38	42	10	-	-	-	11
Blue 113	Disazo	A. çamur	-	98	41	70	-	-	-	11
Blue 354	-	-	-	-	-	-	90	3 saat	-	14
Green 25	Anthraquimone	A. çamur	-	14	42	29	-	-	-	11
Green 108	Azomethine	A. çamur	-	43	42	28	-	-	-	11
Brown 100	-	A. çamur	-	75	24	20	-	-	-	11
Brown 159	-	A. çamur	-	86	42	74	40	49	41	11
Brown 248	Nitro	A. çamur	-	100	42	28	-	-	-	11
Brown 311	Azo	A. çamur	-	84	41	67	-	-	-	11
Black 1	Disazo	A. çamur	-	18	35	30	-	-	-	11
Black 2	Azine	A. çamur	-	75	42	96	7	21	2	11
Black 48	Anthraquimone	A. çamur	-	61	42	80	-	-	-	11
Black 84	Monoazo	A. çamur	-	28	42	36	-	-	-	11
*Lanasyn Black	-	Unmod.cell	0.13	-	-	-	-	-	-	11
BRI ABK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14
Acid dyes*	-	Quaert.cell	0.6-0.7	-	-	-	-	-	-	14
Basic Orange 22	Quinoline	A. çamur	-	100	42	100	-	-	-	11



Tablo 2.5. Adsorpsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı (Devamı)

Boya		Renk Giderme Metodları							Kaynak	
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Adsorbent	Kapasite mol/kg	Adsorpsiyon		DOC		Biyolojik parçalanabilirliği		No
				Renk giderimi (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Renk giderimi, (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	
Basic Orange 40	Azo	A. çamur	-	48	42	22	-	-	-	11
Red 22	Azo	A. çamur	-	85	10	95	-	-	-	11
Red 46	Monoazo	A. çamur	-	98	42	95	-	-	-	11
Violet 19	Quinoline	A. çamur	-	54	42	19	-	-	-	11
Blue 3	Oxazine	A. çamur	-	37	42	30	-	-	-	11
Blue 3	Oxazine	A. çamur	-	46	42	10	-	-	-	11
Blue 22	Anthraquinone	A. çamur	-	100	42	100	-	-	-	11
Direct Yellow 27	Monoazo	A. çamur	-	44	42	26	-	-	-	11
Direct Yellow 44	Disazo	A. çamur	-	73	48	70	45	21	47	11
Direct Yellow 132	Disazo	A. çamur	-	0	41	12	-	-	-	11
Direct Yellow 133	Disazo	A. çamur	-	37	41	19	-	-	-	11
Orange 46	Stilbene	A. çamur	-	52	42	86	-	-	-	11
Orange 60	Stilbene	A. çamur	-	55	42	49	-	-	-	11
Red 7	Disazo	A. çamur	-	50	42	20	-	-	-	11
Red 23	Disazo	A. çamur	-	92	42	54	-	-	-	11
Red 28	Disazo	Unmod.	0.01	-	-	-	-	-	-	14
Red 81	Disazo	A. çamur	-	0	41	20	-	-	-	11
Red 254	Disazo	A. çamur	-	28	42	56	-	-	-	11
Blue 10	Disazo	A. çamur	-	1	42	17	-	-	-	11
Blue 14	Disazo	A. çamur	-	86	48	75	-	-	-	11
Blue 15	Disazo	A. çamur	-	25	41	-7	-	-	-	11
Blue 71	Trisazo	A. çamur	-	100	42	27	-	-	-	11
Blue 86	Phthalocyanine	Mod.cell	1.0	-	-	-	-	-	-	11
Blue 151	Disazo	A. çamur	-	100	42	44	-	-	-	11
Direct Brown 9	-	A. çamur	-	68	42	53	-	-	-	11
Direct Brown 106	Poliazo	A. çamur	-	100	42	71	-	-	-	11
Black 19	Poliazo	A. çamur	-	94	42	93	25	28	37	11
Direct dyes ^g	-	Quart. cell	0.6-0.7	-	-	-	-	-	-	12
Disperse Yellow 5	monoazo	-	-	-	-	-	>90	1	-	12



Tablo 2.5. Adsorpsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil ve Boya Atıksularının Artırımı (Devamı)

Boya		Renk Giderme Metodları						Kaynak	
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Adsorbent	Kapasite ml/kg	Adsorpsiyon		Biyolojik parçalanabilirliği			
				Renk giderimi (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Renk giderimi, (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)
Pigment Yellow 151	Monoazo	A. çamur	-	96	10	95	-	-	-
Reactive Yellow 2	Monoazo	Microbio	0.08	-	-	-	-	-	-
Reactive Yellow 19	Monoazo	Microbio	-	-	-	-	89-90	6.5 saat	-
Reactive Yellow 17	Monoazo	A. çamur	-	53	28	10	-	-	-
Reactive Yellow 23	Monoazo	A. çamur	-	84	30	85	-	-	-
Reactive Yellow 37	Monoazo	A. çamur	-	35	28	38	-	-	-
Reactive Yellow 42	Monoazo	A. çamur	-	40	28	45	-	-	-
Reactive Yellow 95	Azo	A. çamur	-	-	-	-	0	-	-
Reactive Yellow 155	-	A. çamur	-	3	42	47	-	-	-
Orange 12	Monoazo	A. çamur	-	-	-	-	90-95	23 saat	-
Orange 13	Monoazo	A. çamur	-	-	-	-	85-90	50 saat	-
Orange 19	Monoazo	A. çamur	-	37	28	15	-	-	-
Red 19	Monoazo	A. çamur	-	23	42	-6	-	-	-
Red 24	Azo	A. çamur	-	-1*	42	26	90-97	32 saat	-
Red 35	Monoazo	A. çamur	-	42	30	69	-	-	-
Red 45	Azo	A. çamur	-	7	42	-12	-	-	-
Red 133	Xanthene	A. çamur	-	53	30	20	-	-	-
Red 141	Disazo	Quart. cell	-	-	-	-	85-90	4.5 saat	-
Red 180	Azo	A. çamur	0.361	-	-	-	-	-	-
Red 185	Azo	A. çamur	-	11	42	-3	-	-	-
Red 198a	-	A. çamur	-	-	-	-	85-90	2 saat	-
Red 218	-	A. çamur	-	-	-	-	90-95	32 saat	-
*Reactive Red G	-	A. çamur	-	-	-	-	37.4	4	-
Reactive Blue 19	Anthraquimone	A. çamur	-	35	28	24	-	-	-
Reactive Blue 21	Phthalocyanine	A. çamur	-	72	28	64	85-90	4.5 saat	-
Reactive Blue 38	Phthalocyanine	A. çamur	-	-	-	-	40	4.5 saat	-
Reactive Blue 49	Anthraquimone	A. çamur	-	-	-	-	7-10	2 saat	-

Tablo 2.5. Adsorpsiyon ve Biyolojik Prosesler ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı (Devamı)

Boya		Renk Giderme Metodları							Kaynak	
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Adsorbent	Kapasite mol/kg	Adsorpsiyon		Biyolojik parçalanabilirliği				
				Renk giderimi (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Renk giderimi, (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	No
Reactive Blue 72	Phtalocyanine	A. çamur	-	-	-	-	25-30	50 saat	-	15
Reactive Blue 170	Monoazo	A. çamur	-	30	41	4	-	-	-	11
Reactive Blue 220	Azo	A. çamur	-	-	-	-	90-95	1 saat	-	15
Green 12	Phtalocyanine	A. çamur	-	47	42	27	-	-	-	11
Brown 11	Azo	A. çamur	-	-	-	-	90	23 saat	-	15
Brown 31	Azo	A. çamur	-	10	42	58	-	-	-	11
Brown 48	-	A. çamur	-	-	-	-	<10	2 saat	-	12
Black 5	Disazo	A. çamur	-	60	28	-53	80-85	4.5 saat	-	11-15
Black 8	Monoazo	A. çamur	-	6	42	47	-	-	-	11
Black 39	Disazo	A. çamur	-	-	-	-	70-75	5.5 saat	-	15
Blue PB (reactive)	-	A. çamur	-	-	-	-	98	2 saat	-	15
*Black SG (reactive)	-	A. çamur	-	-	-	-	75-80	7.5 saat	-	15
*Reactive RBB	-	A. çamur	-	-	-	-	93.2	4	-	16
*Reactive RP2B	-	A. çamur	-	-	-	-	92.4	4	-	16
*Reactive V2RP	-	A. çamur	-	-	-	-	88	4	-	16
Reactive dyes ^h	-	Quart. cell	0.6-0.76	-	-	-	-	-	-	16

Anaerobik arıtma işleminin azo boyası içeren karışımlardan renk giderimi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, orijinal atığın anaerobik arıtımında 5 gün içerisindeki COD değerinde %58 bir azalma gözlemlendiği tespit edilmiştir. Hazırlanan sentetik numunelerde ise boya miktarı arttıkça % COD gideriminin azaldığı görülmüştür. Renk parametrelerinde kısa sürede meydana gelen değişim azo çift bağlarının anaerobik arıtımı esnasında oluştuğu sonucuna varılmıştır [18].

2.4.1.2. Tekstil Atıksularının Kimyasal Oksidasyonu

Kimyasal oksidasyon prosesi; kimyasal ortamdaki kimyasal türler arasında elektron transferine dayanır. Kimyasal oksidasyon prosesleri ile yapılmış çalışmalar Tablo 2.6 'de verilmiştir [19-24]. Bu proseslerde amaç boyar maddelerle oluşan toksik bileşiklerin oksitlenerek biyolojik olarak parçalanabilir şekle dönüştürülmesidir. Bu amaçla oksidant olarak ozon (O_3), klor (Cl_2), hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum permanganat ($KMnO_4$) gibi oksitleyiciler kullanılmaktadır.

Ozon: Ozon (O_3), oksijenin allotropudur. Normal şartlarda gaz olup, kendine has bir kokuya ve mavimsi bir renge sahiptir. Ozonun sudaki çözünürlüğü ve kararlılığı, sıcaklığa, pH ve kısmi basınca bağlıdır. Kararsız bir madde olan ozon havanın oksijeninden elde edilir. Meydana gelen radikal maddeler havanın oksijeni ile reaksiyona girerek ozonun oluşumunu sağlamaktadır.



Ozon, organik maddeleri kuvvetli oksitleyici özelliğe sahiptir. Bu özelliğinden dolayı ozon içme sularında tat ve koku giderilmi, atıksularda ise organik maddeler, renk ve toksik bileşiklerin giderilmesinde kullanılır.

Tablo 2.6. Kimyasal Oksidasyon İşlemleri ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı

Boya		Renk Giderim Metodu								Kaynak
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Fenton reaktifli		H ₂ O ₂ /UV		H ₂ O ₂ /O ₃		NaOCl		
		Renk giderimi (%)Kireç sütü *	Renk giderimi. (%) NaOH*	Renk giderimi (%)	Zaman, dakika	Renk giderimi. (%)	Zaman, gün	DOC giderimi. (%)	Zaman, gün	No
Acid Yellow 17	Monoazo	-	-	98.20	40	-	-	-	-	22
Acid Yellow 23	Monoazo	-	100	30	-	-	-	-	-	22
Acid Yellow 151	Azo	-	-	-	-	-	90	-	-	23
Orange 7	Monoazo	-	-	-	-	-	-	30	-	23
Orange 10	Monoazo	-	-	-	-	-	-	100	15	22
Red 1	Monoazo	-	-	100	60	-	-	-	-	22-23
Red 14	Monoazo	-	-	99.9	30	-	-	100	15	22
Red 18	Monoazo	-	-	100	60	-	-	-	-	22
Red 138	Monoazo	-	-	99.1	40	-	-	-	-	23
Red 151	Disazo	-	-	-	-	-	-	100	15	23
Red 219	-	100	100	-	-	100	5	100	15	24
Violet 43	Anthraquinone	-	-	-	-	-	-	-	-	23
Blue 25	Anthraquinone	-	-	-	-	-	-	-	5	23
Blue 186	Monoazo	88	96.5	80	10	85	1	100	30	24-25
Black 1	Disazo	-	-	89.9	60	-	-	-	-	22
Black 60	Monoazo	-	-	-	-	-	-	-	-	23
Direct yellow 4	Disazo	-	-	83.2	60	-	-	60	30	22
Direct yellow 44	Disazo	-	-	-	-	100	0.5	-	-	23
Direct yellow 50	Disazo	-	-	-	-	100	0.5	-	-	23
Red 23	Disazo	-	-	-	-	100	0.5	-	-	23
Red 26	Disazo	-	99.5	-	-	100	0.5	-	-	23
*direct red 5b	-	97.5	-	-	-	99	45	-	-	24-25
Direct blue 1	Disazo	-	-	-	-	100	0.5	-	-	23
Direct blue 25	Disazo	-	-	-	-	100	0.5	-	-	23
Direct blue 71	Trisazo	94.33	88	98.5	3	90	7	-	-	24
Dispers yellow 3	Monoazo	-	-	-	-	95	1	-	-	23
Dispers yellow 64	Quinoline	-	-	-	-	100	4.5	-	-	23

Tablo 2.6. Kimyasal Oksidasyon İşlemleri ile Tekstil ve Boya Atıksularının Arıtımı (Devamı)

Boya		Renk Giderim Metodu										Kaynak
		Fenton reaktifi		H ₂ O ₂ /UV		H ₂ O ₂ /O ₃		NaOCl				
C.I. Numarası	Kimyasal sınıfı	Renk giderimi (%) (%)Kireç süti *	Renk giderimi, (%) NaOH *	Renk giderimi (%)	Zaman, dakika	Renk giderimi, (%)	Zaman, gün	DOC giderimi, (%)	Zaman, gün	No		
Red 13	Monoazo	-	-	-	-	100	0.7	-	-	23		
Red 60	Anthraquinone	-	-	-	-	100	1	-	-	23		
Red 279	Monoazo	95.5	100	-	-	99	98	-	-	24		
Blue 60	Anthraquinone	-	-	-	-	100	0.7	-	-	23		
*Palanil Blue 3RT	-	0.5	-	96	10	90	31	-	-	24-25		
Sulphur disperse dyes ^b	-	-	-	-	-	98	30	-	-	26		
*Helizarin Red GR	-	100	100	-	-	-	-	-	-	24		
*Helizarin Red BGT	-	95.9	97.4	-	-	-	-	-	-	24		
Reactive Yellow 37	Monoazo	-	-	85	8	93	4	-	-	24-25		
Reactive Yellow 125	Azo	-	-	96	8	98	2.5	-	-	24-25		
Reactive Yellow 145	-	-	-	-	-	100	7	-	-	24		
*Remazol Yellow RNL	-	-	-	85	8	93	4	-	-	24-25		
Reactive Red 35	Monoazo	100	100	100	8	99	4.5	-	-	24-25		
Reactive Red 195	-	-	-	100	60	100	6	-	-	27-23		
Blue 21	Phthalocyanine	-	-	95	150	-	-	-	-	27		
Blue 27	Anthraquinone	94.8	67.1	100	5	94	0.9	-	-	24-25		
Blue 221	-	-	-	-	8	100	9	-	-	23		
Green 13	Phthalocyanine	-	-	93	-	98	4	-	-	24-25		
Reactive dyes ^c	-	-	-	-	-	100	1	-	-	26		
*Indanthren Scarlet	-	51.8	49.9	-	-	-	-	-	-	26		
Vat Blue 14	Anthraquinone	83.5	63.6	15.5	10	-	-	-	-	24-25		
Vat dyes ^d	-	-	-	-	-	50	30	-	-	26		
Azoic dyes ^e	-	-	-	-	-	87	30	-	-	26		

Dispers tekstil boyaları dışındaki tüm boyaların ozonlama ile gideriminde yüksek arıtım verimleri elde edilmektedir. Tekstil endüstrisinde çok fazla atıksu oluşmakta olup, ozon ile tekstil atıksularının arıtım maliyetinin yüksek olması bu işlemin en önemli dezavantajıdır. Bir diğer dezavantaj ise, boyar maddelerin ozonlanması sonucu oluşan parçalanma ürünlerinin su ekosistemindeki flora ve fauna üzerine toksik etkisinin gözlenmesidir. Bazı boyar maddeler ozonla hemen reaksiyona girmektedir. Metal içeren ve antrakinon boyarmaddeler ise ozonla parçalanmaya direnç göstermektedir. Bir çok boyar madde kükürt, klorür ve klor içermekte olup, toksik parçalanma ürünleri açığa çıkabilmektedir.

Namboodri ve Perkins tarafından dispers boyar maddelerden ozonlama ile renk giderim çalışmaları yapılmış olup; disperse Red 13 ve Blue için 40 saniyede; Red 60 ve Orange 3 için ise 60 saniyede renk giderimi gerçekleşmiştir. 1 dakikada %70 'lik renk giderimi ve geri kalan kısmı ise 3 dakikada giderildiğini tespit etmişlerdir. 0.02 g/l disperse Red 13 ve Disperse Blue 60 için 160 mg/l, Red 60 ve Orange 3240 mg/l ozon tüketildiğinde %100 renk giderimi sağlandığı sonucuna varmışlardır [25].

Klor: Klor hem dezenfektan hem de oksidanttır. Organik maddeleri oksitleme özelliği mevcut olup, sonuçta daha toksik klorlu organik bileşikler meydana gelmektedir. En yaygın kullanılan oksitan klor bileşikleri $Cl_{2(g)}$, $NaOCl$, ve ClO_2 'tir. Tekstil endüstrisinde renk gideriminde $Cl_{2(g)}$ ve $NaOCl$ yaygın olarak kullanılmaktadır. $NaOCl$ sudaki reaksiyonları aşağıdaki şekildedir:



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

Klordioksit (ClO_2): Klordan daha az etkili olup, tam bir renk giderimi sağlayamamaktadır. Buna ek olarak bazı boya grupları üzerine ise hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Ancak klordioksit reaktif, direkt, dispers ve anyonik metalik boyarmaddeler üzerinde oldukça etkilidir. Son renk giderme prosesi olarak kullanılabilir.

Hidrojen Peroksit: Hidrojen peroksit (H_2O_2) normal şartlar altında oldukça etkisizdir. Fakat asidik ortamda demir (II) ile fenton reaktifini oluşturmaktadır. Fenton reaktifi ortamda hidroksil radikallerini oluşturmakta olup, bu radikaller boyar maddelerin rengini gidermektedir. Fenton reaktifi hem çözünür hem de çözünmeyen boyar maddelerin rengini gidermede oldukça etkindir. Oluşan reaksiyon sonucunda kimyasal oksijen giderimi de sağlanmaktadır. Fenton reaktifinin en önemli dezavantajı ise, her m^3 atıksu arıtımı için 4 \$ 'lık yüksek işletme maliyetidir.

Acid Red 337 ile hazırlanan sentetik boya ve Acid Red 151 'in kullanıldığı boya atıksuyundan fenton prosesi ile renk ve COD giderme çalışması yapılmıştır. Çalışmalar sonunda sentetik numune için renk giderme verimi %96, COD gideme verimi 290 mg/l 'den 55 mg/l düşürülerek %81 olarak gerçekleşmiştir. Atıksuda ise renk giderme verimi %91, COD gideme verimi 2380 mg/l 'den 650 mg/l düşürülerek %73 olarak gerçekleşmiştir [26].

2.4.1.3. Tekstil Atıksularının Kimyasal İndirgeme ile Arıtımı

Kimyasal indirgeme tekstil atıksularının ön arıtmada kullanılan yöntemlerden biridir. Azo boyarmaddeler çift azo bağının parçalanması ile aromatik aminlere çevrilebilir. Oluşan bu aromatik aminlerin biyolojik olarak parçalanması, azo boyar maddelerin parçalanmasından daha kolaydır. Pek çok azo boyar madde için kimyasal indirgeme oldukça etkilidir. Bundan dolayı en yaygın kullanılan kimyasal indirgeyici kimyasal madde sodyum hiposülfittir. Yaygın olarak kullanılan diğer indirgeyiciler ise; thioüre dioksit (formamidin sülfirik asit), sodyum borhidit, sodyum formaldehit sülfokzalat ve SnCl_2 'dir [17].



2.4.1.4. Tekstil Atıksularının Membran Proseslerle Arıtımı

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

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

Nanofiltrasyon membranları kullanılarak tekstil boya atıksularından, renk, COD ve iletkenlik giderme çalışmalarında verim her üç parametre için %96 'nın üzerinde gerçekleşmiştir. Besleme suyu COD değeri 400-720 mg/l arasında ve süzüntü COD 'si ise mg/l 'nin altındadır. %80 geri kazanım sağlandığında renk 500 Pt-Co birim değerinden 20 Pt-Co birim değerine düşmüştür. Renk, COD ve iletkenlikteki bu kayda değer düşüş, süzüntü suyunun boya banyoları ve diğer proseslerde yeniden kullanımın mümkün olduğunu göstermiştir [27].

2.4.1.5. Tekstil Atıksularının Ters Osmoz ve Elektrodializ ile Arıtımı

Gözenek çapı 0.001 μm küçük olan maddelerin ayırımı sağlanmaktadır. Enerji tüketimi ve basınçın yüksek olmasının yanı sıra maksimum 45 °C 'de çalışan ters osmoz membran sistemleri ile maddelerin ayırımı (tuz dahil) gerçekleştirilmektedir. Sonuç olarak, atıksuyun yaklaşık % 95 'i tekrar prosese geri döndürülebilmektedir. Ters osmoz

membranların en önemli problemi ise, yüksek sıcaklıklara ve oksidantlara karşı dayanıklılığının sınırlılığıdır.

Tekstil atıksularının arıtımında kullanılan diğer bir ayırma prosesi elektrodializdir. Bu proseste en önemli parametre kullanılan membranların özelliğidir. Bu membranlar anyonik ve katyonik olmak üzere ikiye ayrılır. Atıksulardan ayrılması istenen bileşikler moleküller yüklerine göre membranlarda tutulmaktadır. Anyonik membranlar anyonların geçmesine mücadele ederken katyonları tutmaktadır. Katyonik membranlar ise katyonların geçmesine izin verirken anyonların tutulmasını sağlayarak ayırma işlemi sağlanmaktadır. Boyama prosesi atıksularının tersosmoz ile arıtılması için yapılan çalışmada, poliakrilik-zikronyum oksitten yapılmış tüp şeklindeki membran kullanıldığında boya pigmentlerinde %97 azalma ve %95 geri kazanım sağlanmıştır [28]. Sonuç olarak; tersosmoz prosesi ile tekstil sanayi atıksularında %90 geri kazanım sağlanmaktadır.

2.4.1.6. Tekstil Atıksularının Adsorpsiyon ile Arıtımı

Adsorpsiyon fiziksel, kimyasal veya değişim adsorpsiyonu şeklinde olabilir. Adsorpsiyonun verimi yüzey alanına, pH 'a, sıcaklığa, adsorbantın yapısına ve karışım özelliğine göre değişir. Tekstil ve boya atıksularının farklı adsorbantler ile arıtım sonuçları Tablo 2.5 'de gösterilmiştir. Adsorpsiyon işlemi amacıyla en yaygın kullanılan adsorbant aktif karbondur. Aktif karbonun asidik, bazik ve dispers boyalar için uygun olduğu ancak direk boyalar için ise renk gideriminin zor olduğu belirtilmiştir. Aktif karbonun pahalı ve rejenarasyonunun zor olması yeni adsorbant maddelerinin denenmesini gündeme getirmiştir. Bu amaçla silika, kil, şekerkamışı posası, mısır bitkisi, pirinç, kitin, uçucu kül ve kömür gibi bir takım ucuz adsorbantlar kullanılmıştır [17].

2.4.1.7. Tekstil Atıksularının Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı

Suya kimyasal maddeler ilave edilerek (koagülantlar) çökelme özellikleri iyi olmayan çok ince süspanse madde veya kolloidlerin daha iyi çökebilen yapılara

TC YÜREK KURUMU İHA KURULUŞU
DOKÜMANASYON MENFESİ

dönüştürülmesi işlemi kimyasal koagülasyon olarak bilinmektedir. Bu işlem kolloidal taneciklerin etrafındaki elektriksel çift tabakanın bastırılması ile elde edilen bir elektriksel denge stabilizasyonudur. Teorik olarak tanımlanırsa, koagülasyon işlemi, kolloidal taneciklerin elektriksel dengelerinin bozulması işlemidir. Bu olaya destabilizasyon adı verilmektedir. Flokülasyon ise stabilliği bozulmuş kolloidlerin bir araya getirilip yumak teşkili ve yumakların büyütülmesi işlemidir [29].

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

Öte yandan sülfür ve dispers boyalar çok iyi koagüle olmaktadır. Bundan dolayı da son derece kolay çökmekte olup buna bağlı olarak da renk giderimi oldukça yüksektir. Bundan dolayı koagülasyon - flokülasyon işlemi bu tür boyalar için son derece uygundur [17].

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

3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESLERİ

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

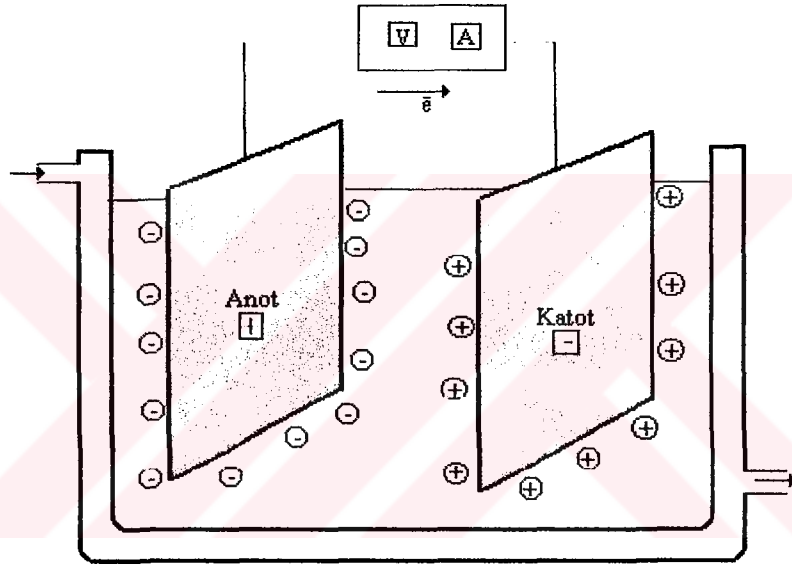
Bu çalışmanın esas konusunu oluşturan elektrokimyasal prosesin iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bundan dolayı aşağıda elektrokimyasal arıtım proseslerine girmeden önce temel prensipler açıklanmıştır:

3.1. Elektrokimyasal Prosesin Esasları

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten göç eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır [30]. Bir elektroliz hücresinin şematik olarak görünüşü Şekil 3.1 'de, anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise Tablo 3.1 'de verilmiştir. Bir elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı ve elektroliz çözeltisinde belli bir iletkenlik (anyon ve katyonlar) olması gerekir.

Tablo 3.1. Elektrokimyasal Yükseltgenme ve İndirgenme Reaksiyonları

Anot reaksiyonları	Katot reaksiyonları
•Anot elektron verir •Anotta yükseltgenme •Anodik çözünme ($Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$) •Anyonlar anotta toplanır •Anolit bölge oluşur •Anotta oksijen: $2H_2O - 4e^- \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^+$ •Klor var ise anotta klor: $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2 \uparrow$	•Katot elektron alır •Katotta indirgenme •Katodik birikme ($Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$) •Kasyonlar katotta toplanır •Katolit bölge oluşur •Katotta hidrojen: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH^-$ •Gazın indirgenmesi: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$



Şekil 3.1. Elektrokimyasal Hücresinin Şematik Görünüşü

Elektrokimyasal proseleri çevre kirlilik problemlerini önlemede ve çözmede ön plana çıkaran esas kriterleri ise aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz [31]:

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

Enerji verimliliği: Elektrokimyasal prosesler klasik proseslere göre daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymaktadırlar (termal yanma gibi). Düşük elektriksel akım

dağılımları, voltaj düşmeleri ve yan rekasiyonlardan dolayı oluşan güç kayıplarını minimize etmek için uygun elektrot ve hücre dizaynları ile enerji verimleri artırılabilir. Böylece klasik sistemlere göre daha az enerji tüketimi ortaya çıkmış olacaktır.

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

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

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

3.1.1. Faraday Kanunu ve Akım Verimi

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

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

(3.1) reaksiyonu ile tanımlanır. Yukarıdaki eşitlikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı Faraday kanunu ile ifade edilirse [32];

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

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

Bu proseslerde her bir elektrotta bir veya birden fazla reaksiyon eşzamanlı olarak gerçekleşir. Bu reaksiyonlar akım verimi ile ilişkili olup, elektrokimyasal sistemin verimini ölçmedeki en önemli kriterdir.

Bir elektrokimyasal sistemde; Faraday değeriindeki kayıp veya akım verimi (CE) ile ifade edilirse; akım verimi yük geçişine bağlı prosesi şekilde tanımlanır:

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

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

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

şeklinde ifade edilir. (3.2) eşitliği (3.5) eşitliğinde yerine yazılırsa;

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

elde edilir.

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

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

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

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

şeklinde ifade edilir.

3.2. Elektrokimyasal Atıksu Arıtım Prosesleri

Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrooksidasyon, elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon prosesleri kullanılmaktadır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilir. Atıksuda bulunan kirleticiler bu prosesler ile okside, adsorbe veya reaktör yüzeyinde birikerek ayrımı sağlanmaktadır.

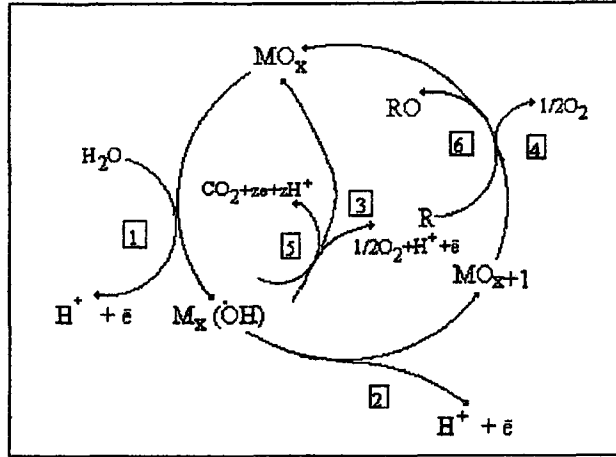
Elektrokimyasal atıksu arıtım proseslerini birbirinden ayıran en önemli özellik kirleticilerin giderilmesini sağlayan elektrokimyasal prosesin şekli ve yapısıdır. Bu durumu belirleyen kullanılan elektrodların özellikleridir. Elektrooksidasyon ve

elektroflotasyon proseslerinde ortama karşı dayanıklı çözünmeyen inert metal veya metal alaşımlarından yapılmış elektrodlar (Ti/Sn, Ti/Ru, Pt/Ti/Ir, çelik gibi) kullanılmaktadır. Ortam özelliklerinin oldukça önemli olduğu ortamda elektrodlardan çıkan gazlar (O_2 ve H_2) ile organik maddelerin oksidasyonu gerçekleşmektedir. Elektroflotasyonda ise oksidasyondan ziyade çıkan gazlar yardımıyla kirleticilerin reaktör yüzeyinde toplanarak ayrılması sağlanır. Elektrokoagülasyonda ortamda çözünen metal elektrodlar (Al ve Fe gibi) kullanılmaktadır. Bu elektrodlardan çözünen metal iyonları ortam koşullarına göre metal-polimer kompleksleri oluşturarak kirleticileri adsorplayarak koagüle olmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin kısmen de elektrooksidasyonu gerçekleşmez. Elektrokoagülasyonun diğer proseslerden farkı ortamdaki kirletici gideriminin oksidasyon, koagülasyon ve flotasyon olayları birlikte olabilmektedir. Ancak elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin oksidasyonu pek açık olmayıp, ortam şartlarına bağlıdır. Elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri aşağıda detaylı bir şekilde ele alınmıştır:

3.2.1. Elektrooksidasyon Prosesi ve Uygulamaları

Çözünmeyen metal/metal oksit elektrodlar (Pt/Ti, Ti/Ru/Ir, Ni/Ti/Ga, çelik gibi) ile ortamdaki kirleticilerin okside olduğu proses elektrooksidasyon prosesi olarak bilinir. Elektrooksidasyonda en iyi sonuçların metal oksit anotlarla alındığı belirtilmiştir [31,32]. RuO_2 , Co_3O_4 ve MnO_2 , titanyum bazı üzerine tatbiki ile oluşturulan anodun diğer anotlara göre daha iyi katalitik aktivite göstermektedir. Bununla beraber, kurşun ve grafit anotların da çok iyi sonuçlar vermektedir. Bazı anot elektrodların renk ve COD giderim verimleri Tablo 3.2 'de verilmiştir. Elektrodların bulunduğu ortam çok önemli olup, iki tip oksidasyon söz konusudur. Bunlar anodik (direkt) ve dolaylı (indirekt) oksidasyondur. Pilot ölçekte bir elektrooksidasyon reaktör sistemi Şekil 3.3 'de gösterilmiştir.

Anodik oksidasyon ile atıksulardaki istenmeyen organik bileşiklerin elektrooksidasyonu, elektrokimyasal dönüşüm ve ayrıştırma şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durum Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Elektrokimyasal Dönüşüm veya Parçalanma Şematik Görünümü

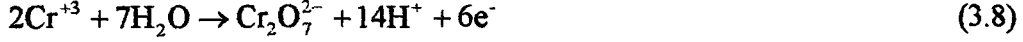
Elektrokimyasal dönüşüm, toksik biyolojik olarak parçalanamayan kirleticilerin biyolojik olarak parçalanabilir organik bileşiklere dönüştürülmesi olup, elektrooksidasyondan sonra biyolojik arıtım gerekir. Elektrokimyasal ayrıştırmada ise CO_2 ve H_2O açığa çıkmaktadır. Bu durum Şekil 3.2 'den de görülmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan bir çalışmada; 1,4 benzokinon içeren çözeltilerden Ti/IrO_2 anot elektrodlar kullanıldığında toksik olmayan ve biyolojik ayrışabilirliği kolay alifatik organik bileşikler oluşurken, Ti/SnO_2 anot elektrodlar kullanıldığında ise CO_2 ve H_2O açığa çıktığı ifade edilmiştir [33].

Anodik oksidasyon ile organik maddelerin tam oksidasyonu bazen gerçekleşmemektedir. Kirleticilerin anodik oksidasyonu doğrudan elektrodlarda yükseltgenme reaksiyonları ile gerçekleşmektedir. Yüksek molekül ağırlıklı organiklerin tam oksidasyonu için daha fazla elektron ve enerji gerekeceği için prosesin yatırım ve işletme maliyeti artacaktır.

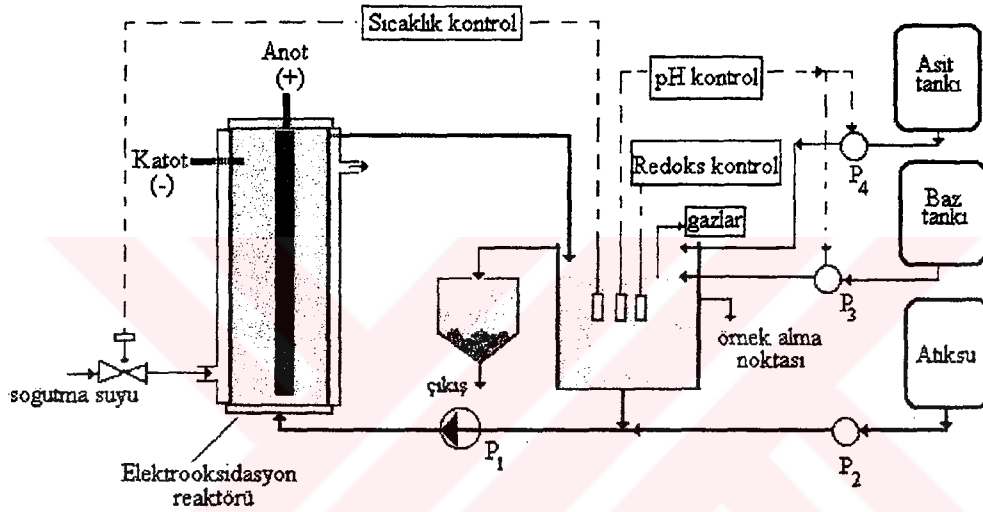
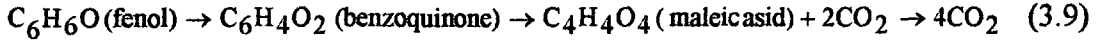
Tablo 3.2 Bazı Anot Elektrotlarının Renk ve COD Giderim Sonuçları [2,34]

Anot materyali	Renk Giderimi (%)	COD Giderimi (%)	Kaynak
Ti/Pt	40	9	31-32
Ti/RuO ₂ -TiO ₂	42	26	31-32
Ti/SnO ₂ -Sb ₂ O ₅	45	23	31-32
Ti/Pt-Ir	50	39	31-32
Ti/MnO ₂ -RuO ₂	46	10	31-32
TiRhO _x -TiO ₂	47	29	31-32
TiPdO-Co ₃ O ₄	48	25	31-32
Ti/RuO ₂	99	90	2
Ti/Pt	99	99	2
Ti/Pt/Ir	99	82	2

Metal kaplama işlemlerinde krom çok yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, kromun çok düşük konsantrasyonlarda bile elektrooksidasyonu sonucu anotta aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir.



Anodik oksidasyona bir diğer örnek olarak fenolün sulu ortamdaki oksidasyonu verilebilir [32].



Şekil 3.3 Pilot Ölçekte Bir Elektrooksidasyon Reaktör Sistemi

İndirekt (dolaylı) oksidasyonda ise; ortamda bazı kimyasal maddeler bulunması veya dışarıdan sisteme ilave edilmesi halinde elektrokimyasal reaksiyonlar neticesinde oksitleyici ajanlar şeklinde (Cl_2 , ClO_2 , O_3 , $\text{O}^\bullet$, $\text{OH}^\bullet$, $\text{ClOH}^\bullet$, H_2O_2 , O_2 , H_2 , CO_2 gibi) türler oluşmaktadır. $\text{O}^\bullet$, $\text{OH}^\bullet$ ve $\text{ClOH}^\bullet$ yüksek oksitleyici özelliğe sahip radikaller olup, çok kısa ömürlüdürler. Bu radikaller tekrar Cl_2 , ClO_2 , O_3 , H_2O_2 ve O_2 oksitleyici türlerle dönüşürler veya doğrudan (direkt) organik türleri okside ederler. Radikallerin oldukça uzun ömürlü ve oksidasyon prosesindeki elektrotlardan belli bir uzaklıktaki alan içine difüzlendiği durumda (direkt veya doğrudan oksidasyon) radikallerin parçalanmasından birincil (Cl_2 ve O_2) ve ikincil (ClO_2 , O_3 , ve H_2O_2) oksitleyici bileşikler oluşmaktadır [35,36].

Atıksu içerisindeki organik bileşiklerin doğrudan (direkt) elektrooksidasyon hızı anodun katalitik aktivitesi, uygulanan akım yoğunluğu ve anodun aktif

noktalarındaki organik bileşiklerin difüzyon hızına bağlıdır. İndirekt veya anodik oksidasyon hızı ise sıcaklık, pH ve atıksu çözeltisi içindeki ikincil oksidantların difüzyon hızına bağlıdır. Atıksu içindeki kirleticilerin elektrooksidasyonu anodik elektrokimyasal prosese dayandırılmaktadır. Çünkü ikincil oksitleyici bileşikler atıksu içindeki organik bileşiklerin CO₂ ve H₂O 'ya tamamen parçalanmasını sağlayamayabilirler.

Bir çok araştırmacı asidik çözeltilerde; O₂, serbest klor ve belki bir miktar O₃, ve doğrudan oksidasyon prosesindeki klor oksitler gibi ikincil oksitleyiciler ortaya çıkmaktadır [36.37]. Orta alkali çözeltilerde ise klorür, klor gazına ve hipoklorit, klorür iyonuna iyonuna dönüşmektedir. Bunun yanısıra O₂, bir miktar H₂O₂ ve belki O₃ oluşabilir. Oluşan bu reaksiyonlar aşağıda ifade edilmiştir:



Kuvvetli alkali çözeltilerde kararlı klorat anyonu, ClO₃⁻ oluşumundan dolayı klorür klor gazı ve klorür iyonlarına indirgenen bir çevrim sözkonusudur. Bu yüzden elektrooksidasyon prosesinde düşük pH 'da klorürler serbest klorüre, yüksek pH 'da ise klorat iyonlarına indirgenmektedir. Yalnız orta alkali-nötr pH arasında serbest hidroksil radikallerin sürekli oluşumu, başlangıç konsantrasyonlarındaki klorürlerin kararlılıklarını muhafaza etmesini sağlamaktadır.

Bundan dolayı elektrokimyasal arıtım sistemlerinde elektrikselsel iletkenlik ve kirletici bileşiklerin oksitlenmesi için destek elektrolitler ortama ilave edilir. Bu elektrolitlerden en yaygın kullanılanları NaCl, AlCl₃, FeCl₃ gibi tuzlardır. Fakat, atıksularda ise birçok anyon ve kation bulunacağından dışarıdan sisteme bu bileşiklerin ilavesi çoğu zaman gerekmemektedir. Bu durum atıksuların elektrokimyasal prosesler ile arıtımında bir avantaj teşkil etmektedir.

Yüksek klor iyonu içeren bir tekstil atıksuyunun Ti/RuO_2 , Ti/Pt ve $Ti/Pt/Ir$ elektrodlar ile direkt veya indirekt elektrooksidasyonu neticesinde organik türlerin oksidasyonunda oldukça etkili olduğu görülmüştür. Başlangıç 6330 mg/l klor konsantrasyonu ve 960 mg/l COD içeriğine sahip atıksu 60 dakikalık elektrooksidasyon süresi sonucunda Ti/RuO_2 , Ti/Pt ve $Ti/Pt/Ir$ elektrodlar kullanılarak arıtılmış olup, sırasıyla %92, 87.5 ve 85.2 COD giderimi elde edilmiştir [3].

Congo red, acid blue 2K, acid-bright orange boya çözelti atıksularının elektrokimyasal arıtımında yükseltgenme ürünleri ve optimum giderme parametreleri tespit edilmiştir. Elektrooksidasyon süresi sonucunda boya gideriminin %60-70 ve arıtılmış suyun toksik özellik taşımadığı ifade edilmiştir [2].

İki ucunda grafit anot ve katot elektrotların bulunduğu cam boru içine yerleştirilen grafit Raschig halkalarından ibaret iki kutuplu damlatmalı bir reaktörde anotik oksidasyonla Congo Red ve Xiron Blau 2RHD boya çözeltilerinden renk giderimi yapılmıştır. Congo Red başlangıç boya çözelti konsantrasyonu 10, 20 ve 30 mg/l olduğu durumlarda renk giderim verimi ve enerji tüketimi sırasıyla %92 (143 kWh/kg enerji tüketimi), %93 (75 kWh/kg), %94 (57 kWh/kg) gerçekleşmiştir. Xiron Blau 2RHD boya çözelti konsantrasyonu 20, 30 ve 40 mg/l için ise sırasıyla, %96 (67 kWh/kg enerji tüketimi), %97 (46 kWh/kg), %97 (31 kWh/kg) bulunmuştur [38].

Anot olarak çözünen metal elektrotların kullanıldığı bir elektrokoagülasyon işleminde, anot tüketiminin $5-200 \text{ g/m}^3$, 0.1 g/dm^3 konsantrasyondaki azo boyanın tamamen giderimi için 30 - 100 kWh/kg elektrik sarfıyatı olduğu ifade edilmiştir [32]. Çözünen metal anotların uygulandığı elektrokoagülasyon prosesinde oluşan metal hidroksitlerin boyaları adsorbladığı düşüncesi ileri sürülmüştür.

Yapılan birçok çalışmada, tekstil atıksu ve boya çözeltilerinden ortamda NaCl olmadığı durumda renk giderim veriminin düşük olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan ortamda klor iyonlarının bulunmasının ($NaCl$ 'den gelen Cl^- iyonları) anottan klor gazı açığa çıkmasına yol açtığı, ortam pH 'sına göre, pH 1.50 'de Cl_2 , pH 4-7 arasında ise $HOCl$ ve pH 10 'da OCl^- kirleticileri oksitleyici klor türleri ortaya

çıkılmaktadır. Buna göre bir elektrooksidasyon prosesinde, boyaların anotta yükseltgenmesi, çözeltide bulunan NaCl nedeniyle oluşan aktif klor bileşikler ve ortamın pH değerine bağlı olarak anotta açığa çıkan oksijen ile renk gideriminin olduğu ifade edilmektedir [38]. Boyar maddeler için elektrooksidasyon prosesi incelendiğinde anotta boyar maddelerin yükseltgenmesi, tepkime süresine ve boyanın cinsine bağlı olduğu görülmüştür. Yapılan incelemelerde önce azo ürünlerinin yükseltgendiği ve azo sayısı arttıkça elektrokimyasal yükseltgenmenin daha etkin olduğu belirlenmiştir. Boyaların parçalanarak renksizleşmesi sonucu oluşan ürünlerin analizi tatmin edici olmadığı, yükseltgenme basamağı mekanizması tam olarak açıklanamamıştır. Yükseltgenme hızının öncelikle kullanılan anot materyalinden etkilendiği ifade edilmiştir.

İdeal bir elektrooksidasyon prosesinde, arıtma veriminin yüksek, yeni teknolojilere adaptasyona açık olması ve en önemlisi arıtım sonucu oluşan ürünlerin hiçbirinin toksik olmaması gerekir. Kirleticilerin elektrooksidasyondan oluşacak ikincil ürünlerin biyolojik ayrışabilirliğinin mümkün olmasının yanı sıra uygun deşarj standartlarını da sağlaması gerekmektedir [32].

3.2.2. Elektroflotasyon Prosesi ve Uygulamaları

Atıksu arıtımında en fazla kullanılan elektrokimyasal arıtım proseslerinden bir diğeri elektroflotasyondur. Elektroflotasyon, elektrolitik şartlara göre oluşan gaz kabarcıkları (H_2 , O_2 gibi) tarafından kolloidal partiküllerin adsorplanarak su yüzeyine doğru hareket ederek toplanması işlemidir. Bu gazların oluşum reaksiyonları aşağıda verilmiştir:



Oldukça yüksek dispersiyona sahip bu kabarcıklar 5-100 μm çapındadır. Elektrot yüzey alanına bağlı olarak kabarcıkların sayısı 10-20 milyon/ cm^2 arasında değişmektedir. Bu işlemin yapıldığı reaktörlere elektroflotatör adı verilmektedir. Elektroflotatör yüzeyinde toplanan yumaklar köpük sıyrıcılar yardımıyla sıyrılarak filtrasyona gönderilir. Elektroflotasyonun verimi; oluşan kabarcıkların hacmine ve sayısına, oluşan kabarcıkların boyutu ise; akım yoğunluğu, elektrot cinsi ve şekline



bağlıdır. Akım yoğunluğun, elektrot materyali, pH ve sıcaklık değiştirilerek kabarcıkların sayısı ve büyüklüğü kontrol edilebilmekte olup, bu sayede elektroflotasyonun hızı artırılabilir [39].

Su içindeki katı süspansiyonların, yağların, emülsiyonların ve kolloidal partiküllerin ve diğer organik maddelerin ayrılması deşarj edilecek atık suyun BOD değerinin düşürülmesinde başlıca işlemdir. Flokülasyon ajanlarının (Fe^{3+} gibi) eklenmesi veya hava flotasyonu genellikle çökelmeden daha hızlı bir ayırma sağlar. Flotasyon tekniği hidrofobik yüzeylerin oluşması veya varlığına bağlıdır ki, bunun için yüzey aktif maddeleri kullanılır. Bu maddeler, hava kabarcıkları ile temasta olan kirletici partiküllerin biraraya toplanmasına yardımcı olur. Partikül yoğunluğundaki değişim sonucu, disperse partiküller flokülatör yüzeyine yüzdürülerek köpük tabakasında kalması sağlanır. Bu tabaka daha sonra mekanik olarak sıyrılır. Flotasyondaki problem 20 μm 'den daha küçük boyuttaki partiküllerin gideriminde ortaya çıkar. Bu problem, çözünmüş hava flotasyonu (DAF) veya elektroflotasyon ile oluşturulan ince gaz kabarcıkları ile çözümlenebilir. Elektroflotasyon, çözeltiye çözünmüş hava flotasyonuna nazaran daha küçük boyuttaki partiküllerin (8-15 μm) ayrılmasını sağlamış olmaktadır.

Elektroflotatöre uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek farklı boyutlarda gaz kabarcıkları oluşturulabilir, böylece daha büyük bir yüzey alanı oluşur ki, gaz kabarcıkların çarpışması ve biraraya gelme olasılığı artırılmış olunur. Bu durumda ayırma verimi ve etkinliği artırılır. Elektroflotasyon hücrelerinde tercih edilen akım yoğunlukları genellikle 0.1-10 mA/cm^2 dir. Hücre potansiyeli 10 V değerine çıktığında enerji tüketimi 0.2-0.4 kWh/m^3 aralığındadır. Elektroflotasyon hücrelerinin kapasiteleri genelde yüksek olmayıp, maksimum arıtma oranı 150 m^3/h civarındadır [30].

Elektroflotasyon; yağ-su emülsiyonları, metal kaplama atölyeleri, mandıra, konserve, yemek üretim, çiftlik, kağıt, restoran, tekstil, boya, kimya, deri endüstri atıksularının arıtımında kullanılmaktadır. Gemi sintine ve güverte atıksularının arıtımında da kullanılmaktadır. Ayrıca; maden cevherleri ve atıklarından değerli metallerin eldesi ve geri kazanımı; deniz suyundan magnezyum eldesi, radyoaktif ve

toksik metal atıksuların arıtımı, biyoteknolojide bir kısım maddelerin arıtılması ve ayrılma işlemlerinde de kullanılmaktadır [40-41].



Dispers Blue 56 boya çözeltisi ve tekstil boyama atıksularından elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon işlemi aynı reaktörde gerçekleştirilmiş olup, 10mA/cm^2 akım yoğunluğunda alüminyum elektrotlar kullanıldığında %93 'lük bir renk giderme verimi elde edilmiştir. Aynı reaktörlerde tekstil atıksuyu için elektroflotasyonda 15mA/cm^2 akım yoğunluğunda %85 'lik renk giderimi elde edilirken, elektroflotokoagülasyonda ise 10mA/cm^2 akım yoğunluğunda ise alüminyum elektrotlar kullanıldığında %94 'lük bir giderme verimi elde edilmiştir [39].

3.2.3. Elektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulamaları

20. yüzyılda atıksuların arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin kullanım düşüncesi sınırlı iken, özellikle son 20 yıl içerisinde popülaritesi ve etkinliği özellikle Avrupa ve Güney Amerika ülkelerinde kullanımının arttığını görmekteyiz. Kağıt ve kağıt hamuru endüstrisinde, maden ve metal proses endüstrisinde kullanılmıştır. Ayrıca gıda, yağ, boya, maden sanayi atıksuları [42], organik madde içeren sızıntı suları [43], resturant [44], flor giderimi [42], tekstil [7], sentetik deterjan ve maden üretim işlemleri atıksularının arıtımında kullanılır [42,45].

Elektrokoagülasyonda anot olarak çözünen demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünerek çözeltiye Al^{3+} ve Fe^{2+} , Fe^{3+} iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünen $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal hidroksit partiküllerinin adsorbsiyon özellikleri çok yüksektir.

Elektrokoagülasyon ile Drimarene Discharge X-3GL reaktif azo ve Samaron Yellow 4 dispers azo boyaları, demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak giderilmiştir. En iyi renk giderimi başlangıç pH değeri 3-9, karıştırma hızı 200 rpm 'de gerçekleşmiştir. Başlangıç boya konsantrasyonunun artışı ile renk giderim veriminin azaldığı tespit edilmiştir [46].

Demir ve alüminyum elektrotlar ile reaktif boya gideriminde, boya konsantrasyonu artışına bağlı olarak giderme veriminin değişmediği görülmüştür. Dispers boya konsantrasyonu artışı ile demir elektrotlar kullanılması halinde renk giderme veriminin daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [46].

Boyama ve apre imalatı atıksularından demir elektrotlar ile elektrokoagülasyonu üzerine atıksu iletkenliği, pH, enerji tüketimi ve polielektrolit miktarı etkileri araştırılmıştır. Boyama ve apre imalathanelerinden toplanan atıksuların çoğunda iletkenlik optimum işletme aralığı içinde olduğundan dolayı iletkenliğin ayarlanmasına gerek olmadığı, atıksu pH 5-10 arasında arıtma verimini etkilemediği görülmüştür. 40 mg/l 'lik polialüminyum klorür 'ün (PAC) arıtma verimini önemli derecede arttırdığı ve enerji tüketimini % 30 azalttığı tespit edilmiştir. 92.5 A/m² akım yoğunluğunda %51 civarında COD giderimi gerçekleştirilmiştir [7].

Koagüle edilen partiküller atıksularda bulunan mikro kolloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorbe etmektedir. Oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Bu yöntem renk, COD, toplam organik karbon, askıda madde ve ağır metallerin tekstil atıksularından giderilmesinde kullanılmaktadır [39]. Diğer atıksu arıtım işlemlerine göre elektrokoagülasyon prosesinin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuş olup, bu durum Tablo 3.3 ve 3.4 'de özetlenmiştir.

Kimyasal koagülasyon, kolloidal süspansiyon içindeki yüklü partiküllerin zıt yüklü iyonlarla karşılıklı çarpışması ile nötralize edilip bir araya toplanarak çökelmelerinin sağlanması olayıdır. Bu amaçla uygun kimyasal maddeler ilave edilir. Alum gibi bir kimyasal madde atıksuların arıtımı için uzun sürelerden beri geniş ölçüde kullanılmıştır. Koagülasyon kolloidal partiküllerin net yüzey yükünün azaltılması sonucu elektrostatik itme kuvvetiyle sıkışması ile bir araya gelip yeterli Van der Waals kuvvetiyle tutunup birikmesiyle gerçekleştirilir. Elektrolitteki zıt yüklerin neden olduğu elektriksel çift tabakanın itme potansiyelindeki azalma, yüzey yükünün azaltılması ile sağlanır. Kimyasal koagülasyondan farklı olarak, elektrokoagülasyon prosesin de koagülant uygun anot materyalinin elektrolitik

oluşur. Bu proseste yüklü iyon türleri ile anottan çözünmüş olan metal iyonları metal hidroksit floklarını oluşturur [43].

Tablo 3.3 Elektrokoagülasyonun Avantajları

- Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
- Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
- Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
- Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağlı su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katılar içerir.
- Elektrokoagülasyon prosesler en küçük kolloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
- Elektrokoagülasyonda kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddenin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olunur.
- Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, daha kolay ayrılmaları sağlanır.
- Elektrokoagülasyon hücresi içindeki elektrodlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.
- Elektrokoagülasyon prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese ilave edilen güneş panellerinden temin edilebilir.

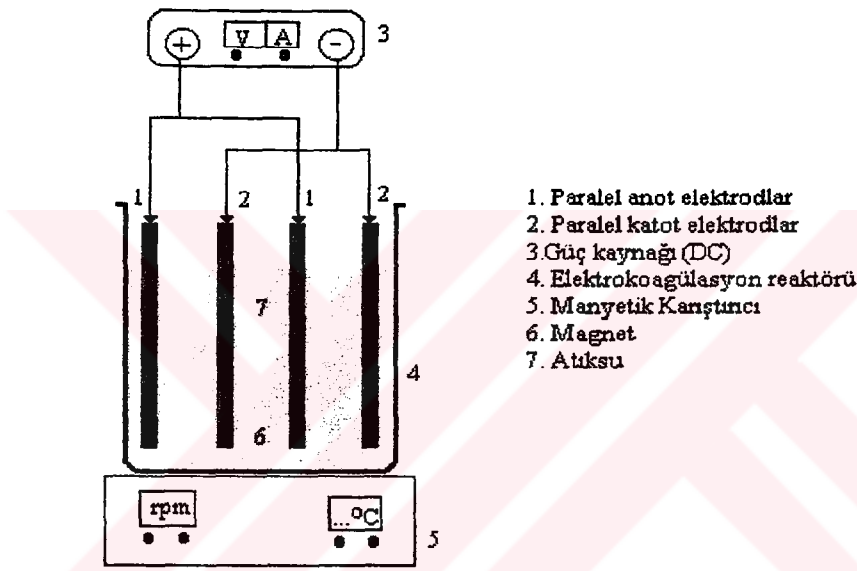
Tablo 3.4 Elektrokoagülasyonun Dezavantajları

- Çözünen 'harcanan elektrot' ların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
- Bazı yerlerde elektrik kullanımı pahalı olabilir.
- Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir
- Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.
- Bazı durumlarda jelatinli hidroksit çözünme yönüne meyledebilir.

3.2.3.1. Elektrokoagülasyonun Teknolojisi

En basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Çözünen anot ve katot elektrodlar bir güç kaynağına

bağlanır. Bu durumda anotta oksidasyon olacağından anot materyali elektrokimyasal olarak çözünecektir. Bu arada katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Fakat bu durum atıksu arıtımı için uygun değildir; çünkü metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir. Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Çift anot ve katotdan ibaret paralel bağlı bir monopolar elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 3.4 'de görülmektedir.

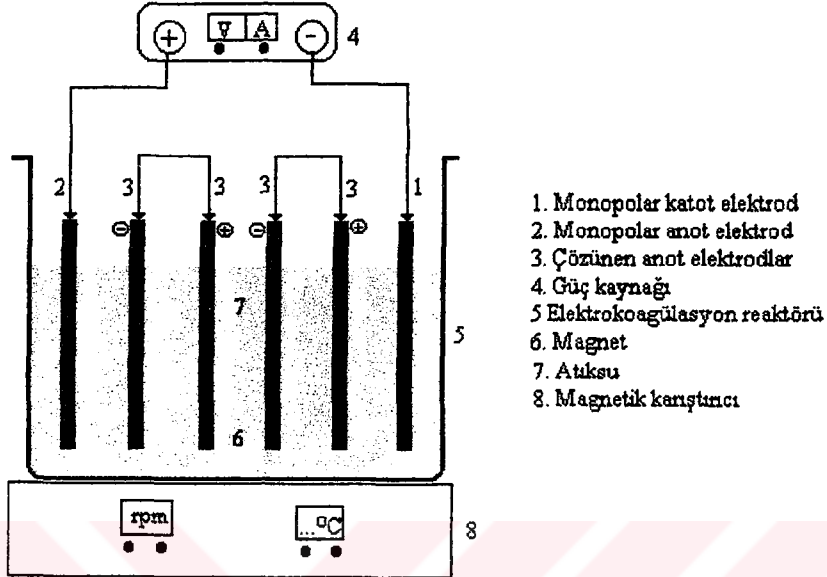


Şekil.3.4. Paralel Bağlı Monopolar Elektrokoagülasyon Reaktörü

Şekilden de görülebileceği gibi iki adet paralel iletken metal plaka paralel elektrotları oluşturmaktadır. Bu elektrotlar bir güç kaynağına bağlanmaktadır. Bu güç kaynağı üzerinden elektrokoagülasyon reaktöründeki akım ve voltaj değeri ayarlanır ve dijital olarak okunmaktadır. Elektrokoagülasyon reaktörlerindeki iletken metal plakalar 'tükenen elektrotlar' olarak bilinmektedir. Anot elektrotların çözünmesi veya tükenmesi anotun çözünme potansiyeli düşmekte ve sonuçta katodun pasivizasyonunu minimize olmaktadır. Çözünen anot tipleri Fe, Al gibi çeşitli metallerden yapılabilir.

Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 3.5 'de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine

bağlanmaktadır. Diğer taraftan ise monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır.



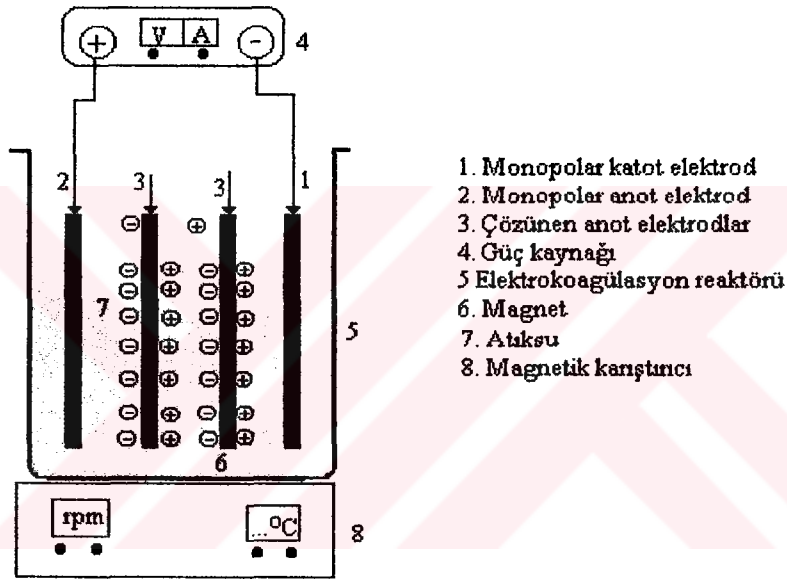
Şekil. 3.5 Seri Bağlı Monopolar Elektrokoagülasyon Reaktörü

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

Bir diğer elektrokoagülasyon reaktöründe ise elektrotlar paralel çift kutuplu (bipolar) olarak bağlanmaktadır (Şekil 3.6). Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasına birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar yerleştirilmiştir. Bu elektrokoagülasyon reaktör şekli, prosesin kullanım ve işletim kolaylığı amacıyla düzenlenmiştir. Elektrokoagülasyon reaktöründeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır.

Böylece elektrokimyasal arıtım esnasında elektrotların pozitif tarafında anotik negatif tarafında ise katodik reaksiyonlar oluşacaktır. Çözünen elektrotların iyon oluşturduğu sistemde demir ve alüminyum gibi çözünen metal levhalar kullanılabilir. Ortama verilen bu iyonlar, yüklenmiş partikülleri nötralize ederek koagülasyon

işleminin başlamasını sağlamaktadır. Elektrotlardan çözünen iyonlar, kimyasal reaksiyon ile çöktürme veya koloidal maddelerle birleşip elektroflotasyonla reaktör yüzeyine çıkan floklar oluşmaktadır. Ayrıca, elektriksel alandan dolayı sudaki koloidal partiküller, yağlar veya diğer bileşiklerin ayrılması da sağlanmaktadır. Elektrokoagülasyonda anot ve katot reaksiyonları ve ortamda oluşacak serbest radikal türleri, reaktör içindeki su ve bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Tüm bu karmaşık elektrokoagülasyon işleminde kirleticiler atıksulardan uzaklaştırılarak arıtım yapılmış olunur.



Şekil.3.6 Paralel Bağlı Bipolar Elektrokoagülasyon Reaktörü

Elektrokoagülasyon reaktörlerinde doğru akım (DC) veya alternatif akım (AC) uygulanmaktadır. Doğru akım elektrokoagülasyon (DC) teknolojisinde; oksitlenmeden dolayı anot bozunmakta, diğer taraftan ise katotta su geçirmeyen bir oksit tabakası oluşmasıdır. Bu olay elektrokoagülasyonda verim kaybına sebep olmaktadır. Elektrokoagülasyon reaktöründe çözünen paralel plaka elektrotlar eklenerek doğru akım kayıpları bir ölçüde küçültülür. Ancak bir çok elektrokoagülasyon işleminde alternatif akım tercih edilmektedir [32, 43].

3.2.3.2. Elektrokoagülasyonun Teorisi

Çözelti sistemlerinin elektrokimyasal proses mekanizması oldukça kompleksdir. Prosesde genellikle elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve



olmak üzere üç önemli mekanizmanın birlikte meydana geldiğine inanılmaktadır [43]. Elektrokimyasal proseste anotta yükseltgenme, kattotta ise indirgenme olacaktır. Elektrokoagülasyon prosesinde genellikle art arta üç aşamanın olduğu kabul edilmektedir.

- Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile koagülant türlerin oluşumu
- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması
- Destablize edilmiş fazlarda flokların toplanması

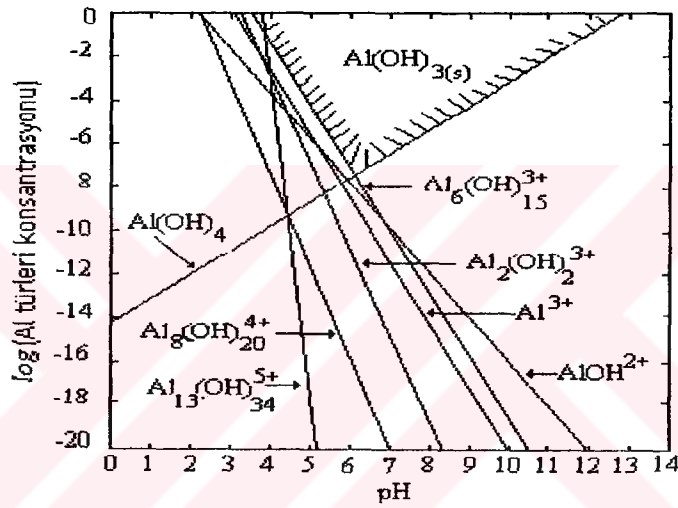
Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması aşağıdaki şekilde tanımlanır:

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

Elektrokoagülasyonun mekanizması, ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki kolloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin konsantrasyonu gibi özellikler de elektrokoagülasyon prosesi üzerine etki etmektedir. Elektrokoagülasyonda alüminyum ve demir elektrodlar en çok tercih edilen ve kullanılan elektrod materyalleridir [43]. Elektrokoagülasyonda çok sık kullanılan çözünen alüminyum elektrodların sulu ortamda oluşturacağı Al kompleksleri önemlidir. Sulu ortamda Al^{3+} 'nın oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri Tablo 3.5 ve Şekil 3.7 'de verilmiştir. Tabloda gösterilen reaksiyonlardan da görüleceği gibi sudaki hidroksil iyonları elektrodlardan çözünmüş olan Al^{3+} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerine göre komplekslerin oluşumuna yol açacaktır [47].

Tablo.3.5 Al^{3+} Sulu Ortamda Oluşan Hidroksi Kompleks Türleri (I: 0, 25°C)

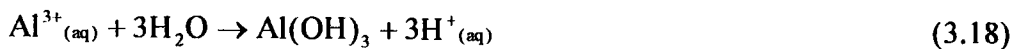
Reaksiyon	LogK
1. $Al^{3+} \rightleftharpoons Al(OH)^{2+} + H^+$	5.02
2. $2Al^{3+} \rightleftharpoons Al_2(OH)_2^{4+} + 2H^+$	6.27
3. $6Al^{3+} \rightleftharpoons Al_6(OH)_{15}^{3+} + 15H^+$	47.00
4. $8Al^{3+} \rightleftharpoons Al_8(OH)_{20}^{4+} + 20H^+$	-68.70
5. $13Al^{3+} \rightleftharpoons Al_{13}(OH)_{34}^{5+}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



Şekil 3.7 Sulu Ortamda Alüminyum Kompleksleri ve pH İlişkisi

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

Anotta:



Katotta:



kullanılmamaktadır. Temel elektrokimyasal çalışmalarda sınırlayıcı tabaka tepkisinden etkilenmenin yanı sıra, reaksiyonlar için 10-60 V arası bir voltaj gerekmektedir. Elektrokoagülasyonun verimi için gerekli aşırı gerilim (üst potansiyel) η_n , üç unsura bağlıdır [43]:

$$\eta_n = \eta_k + \eta_m + \eta_{IR} \quad (3.21)$$

Bu eşitlikte; η_k : kinetik üst potansiyeldir ki bazı ilave bilgiler ile hesaplanabilir (mesela; gaz genleşmesi), η_m : kütle transfer üst potansiyeli, ve η_{IR} : IR elektrot çökeltilerinden ve çözeltiden dolayı düşer. Çözeltide η_{IR} şunlara bağlıdır.

$$\eta_{IR} = \frac{I \cdot d}{A \cdot K} \quad (3.22)$$

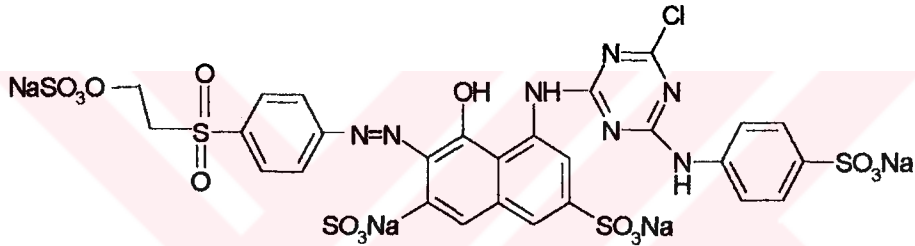
burada I: akım (Amper), d: elektrotlar arası mesafe, A: aktif elektrot yüzey alanı, K: özgül iletkenliktir (10^3mSm^{-1}). d azaltılarak, A ve K artırılır; akım direnç çarpımı diğer bir ifade ile voltaj $V = I \times R$ düşürülebilir. Sulu çözeltilerdeki bazı kimyasal ve fiziksel türlerin için bu durum ispatlanmıştır. Çözelti ve ilgili ara yüzey reaksiyonları üzerine elektrik alan gradyanı etkileri ayrıntılı bir şekilde çalışılması gerekir. Çözelti faz ve ara yüzey reaksiyonları üzerine pH ve elektrokimyasal potansiyelin etkileri incelenmelidir. Ayrıca, elektrotlar üzerindeki çökeltinin açıklanma gereklidir. Deneysel ve modelleme çalışmaları ile sabit ve denge durum sonuçları ortaya konulmalıdır. Ortamda oluşacak olası reaksiyonların kinetiği diğer proses parametreleri ile ilişkilendirilmelidir.

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Materyal

Bu çalışmada ticari olarak kullanılan reaktif bir boya çözeltisi (Remazol Red RB 133), polipropilen iplik üretimi ve boyaması yapan bir tekstil fabrikası atıksuyunun elektrokoagülasyonla arıtımı ele alınmıştır.

Deneylerde DyStar firmasından temin edilen reaktif tekstil boyası Remazol Red RB 133 kullanılmıştır. Şekil 4.1 'de Remazol Red RB 133 ün moleküler yapısı ve Tablo 4.1 'de ise ekolojik ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Remazol Red RB 133 'ün Moleküler Yapısı.

Tablo 4.1. Remazol Red RB 133 'ün Özellikleri

Parametre	Özellik
Colour index numarası	Reactive Red 198
Chromophore	Azo
Reaktif Anchor sistemi	Monochlorotriazine(MCT) ve vinylsulfone(VS)
Molar kütlesi (hidrolize olmamış)	984.2
Saf boya yüzdesi	63%
Su da çözünürlüğü 293 K (g/l)	70
Akut oral toxicity LD ₅₀ (mg/kg)	2000
Balık toxicity LC ₀ (mg/l)	>500
pH miktarı(10 g/l su da)	7
COD miktarı (mg/g)	540
BOI ₅ miktarı (mg/g)	<10
DOC miktarı (mg/g)	120

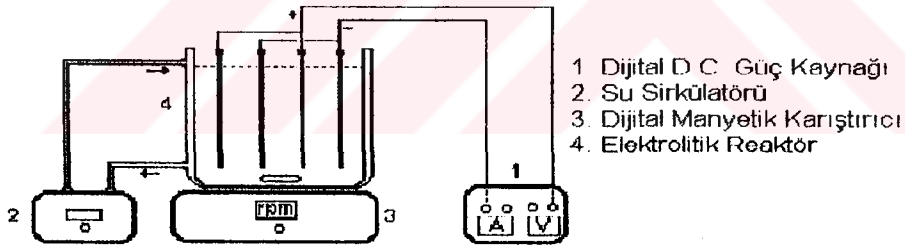
Deneylerde polipropilen iplik üretimi ve boyaması yapan bir tekstil fabrikası atıksuyu kullanılmıştır. Kullanılan bu atıksuya ait özellikler Tablo 4.2. 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Kullanılan Tekstil Atıksuyunun Özellikleri

Parametre	Değeri
COD (mg/l)	3422
AKM (mg/l)	1112
TOK (mg/l)	900
pH	6.95
İletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)	3990
Türbidite NTU	5700
Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	30

4.2. Deney Düzeneği

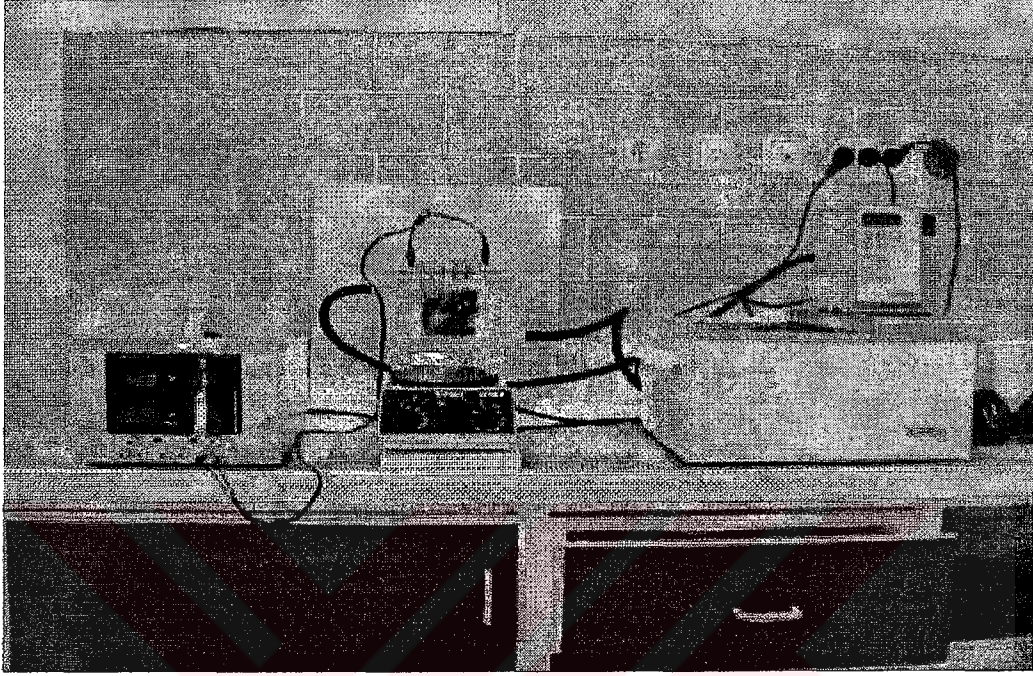
Elektrokoagülasyon deneyleri Şekil 4.2 'de gösterilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrolü dijital bir güç kaynağı (Topward Dual-Tracking DC Power Supply model, 0-30V, 0-6A) ile sağlanmıştır. Reaktördeki sıcaklık kontrolü bir sabit sıcaklık su sirkülatörü ile sağlanmıştır (Julabo 13 Tip: MP-BRUE/PU Germany model)



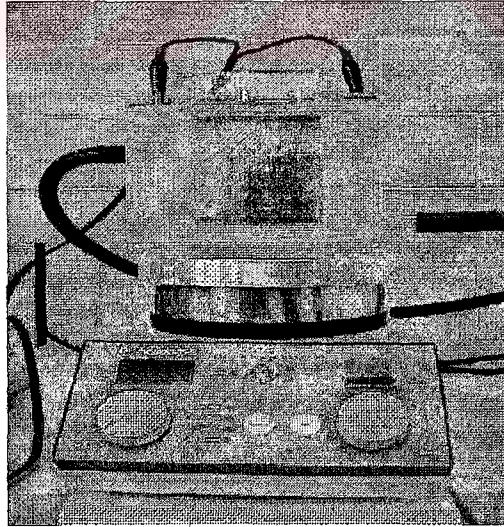
Şekil 4.2. Deney Düzeneğinin Şematik Diyagramı.

Karıştırma bir manyetik karıştırıcı (Heidhopf 3600.model) ile sağlanmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinde kullanılan 65 x 65 x 100 mm boyutlarında reaktör çift cidarlı olup, plexiglas 'tan yapılmıştır. Reaktörde her bir deneyde 250 ml çözelti kullanılmıştır. Reaktörde 2 anot ve 2 katot olmak üzere toplam 4 adet monopolar paralel bağlı elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotlar 11 mm aralıklarla yerleştirilmiş ve tamamen elektrolite batmış durumdadır. Elektrot materyali olarak 46 x 55 x 3 mm boyutlarında, 78 cm² aktif yüzey alanına sahip alüminyum plakalar kullanılmıştır.

Kullanılan alüminyum plakalar Assan Alüminyumun Türkiye temsilcisinden sağlanmış olup, Al:99.53 Si:0.12 Fe:0.25 içeriğine sahiptirler.



Şekil 4.3. Deney Düzenəğinin Görünüşü



Şekil 4.4. Elektrokoagülatorün Yakından Görünüşü

4.3. Deneysel İşlem

Elektrotlar, elektrokoagülasyon reaktörüne yerleştirildikten sonra hücreye 250 ml. elektrolit (boya çözeltisi veya tekstil atıksuyu) konulmuştur. Güç kaynağı

üzerinde istenen akım ve voltaj ayarlaması yapıldıktan sonra çalıştırılmıştır. Elektrot potansiyeli etkisi ile ısınan elektrolitin sıcaklığı 25 °C 'de sabit tutulmuştur. Elektrokoagülasyon esnasında oluşan hidrojen gazı yardımıyla floklar reaktörün üst kısmında toplanmış olup, net bir katı-sıvı ayrımı gözlenmiştir. Deney bitiminden hemen sonra reaktörden alınan numuneler çift kat kaba filtre kağıtından süzölmüştür. Süzölmüş numuneler daha sonra analiz edilmiştir.

Her deneyden önce elektrotlar yüzeyleri aseton ile yıkandıktan sonra deney süresince elektrot yüzeyinde biriken kir ve pasları gidermek için, elektrotlar, önceden hazırlanan temizleme çözeltisinde 5. dakika bekletilmiştir. Temizleme çözeltisi %35 'lik 100 ml HCl ve % 2.8 'lik 200 ml hekzametilen tetramin ((CH₂)₆N₄) çözeltisinden oluşmaktadır [45].

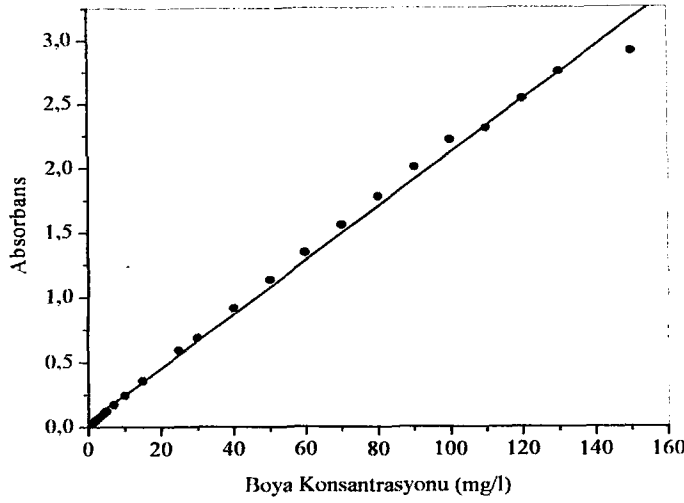
pH ayarlaması için 0.1 M HCl veya 0.1 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. İletkenlik ayarlaması NaCl veya saf su ile yapılmıştır. Polielektrolit ilave etkisi için [Al₂(SO₄)₁₈H₂O] ve [AlCl₃·6H₂O] kullanılmıştır. Kullanılan tüm kimyasal maddeler Merck ve Carlo Erba 'dan temin edilmiştir.

4.4. Analitik Metod

4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi

Çalışmalarda kullanılan farklı konsantrasyonlarda boya çözeltileri (Remazol Red RB 133) saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Unicam UV marka spektrofotometrede, boyanın maksimum absorbanı verdiği λ_{max} 518 nm dalga boyunda bir konsantrasyon-absorbanı kalibrasyon eğrisi çıkarılmış olup Şekil 4.5 'de verilmiştir. Boyanın kendi pH değeri olan 7 için yapılan bu işlem daha sonra pH 3 ve pH 9 için tekrarlanmış ve her bir pH için maksimum dalga boyunda bir değişiklik olmamış λ_{max} 518 nm. olarak gerçekleşmiş, kalibrasyon eğrileri arasındaki fark görölmemiştir. Deneylerden önce ve sonra yukarıda açıklandığı şekilde UV-spektrofotometre ile boya konsantrasyonu ölçölmüştür. Bu iki değer arasındaki fark esas alınarak renk giderme verimi, R_R , aşağıdaki formöl ile hesaplanmıştır:

$$R_R = \frac{C_{0R} - C_R}{C_{0R}} \quad (4.1)$$

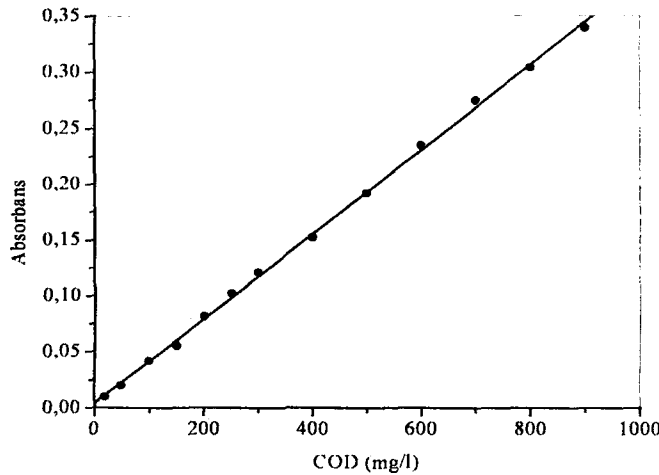


Şekil 4.5. Absorbans-Konsantrasyon Arasındaki Kalibrasyon Eğrisi

$$(Abs = 0.03764 + 0.02077 C ; r^2 = 0.998)$$

4.4.2. Tekstil Atıksuyunda COD ve Türbidite Ölçümleri

Çalışmalarda kullanılan tekstil atıksuyunda deney öncesi ve sonrasında COD ve türbidite ölçümleri yapılmıştır. COD ölçümleri kapalı riflax kolorimetrik metoda göre yapılmıştır [49]. COD ölçümü için öncelikle potasyum hidrojen fitalat standart çözeltisinden (20-900 mg O₂/l COD) bir standart eğri hazırlanmış olup, Şekil 4.6 'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Absorbans-COD Kalibrasyon Eğrisi ($Abs = 0.00348 + 3.7883 \cdot 10^{-4} COD$)

Başlangıç ve deney sonunda ölçülen COD konsantrasyonundan COD giderme verimi, R_{COD} , denklemiyle hesaplanmıştır.

$$R_{COD} = \frac{C_{0COD} - C_{COD}}{C_{0COD}} \quad (4.2)$$

Türbidite ölçümleri UV-spektrofotometrik ile ölçülmüştür. Başlangıç ve son türbidite ölçümlerinde, türbidite giderme verimi, R_T , denklemiyle hesaplanmıştır.

$$R_T = \frac{C_{0T} - C_T}{C_{0T}} \quad (4.3)$$

4.4.3. Kullanılan Eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$J = \frac{I}{A} \quad (4.4)$$

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

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

$$m = \frac{I \cdot t}{n \cdot F} \quad (4.5)$$

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

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

$$M_{ATe} = m \cdot (MA) \quad (4.6)$$

MA: Molekül ağırlığı (alüminyum için 26.982 g) 'dir.

$$E = \frac{M_A}{M_{ATe}} \quad (4.7)$$

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

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

$$M_T = M_A + M_K$$

(4.8)

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

Enerji Tüketimi: Harcanan elektrik enerjisini Watt saat (Wh) cinsinden hesaplarsak,

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (4.9)$$

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

Faraday/ m^3 : Faradayaşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$((\text{Faraday} / m^3) = \frac{I \cdot t}{F \cdot v} \quad (4.10)$$

Burada, I : akım şiddeti, Amper, t : Zaman, sn., v : Elektrolit hacmi, m^3

Bu çalışmada grafiklerin ve korelasyonlarda Excel ve Orgin 6.0 programları kullanılmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmanın birinci aşamasında bir reaktif tekstil boyası olan Remazol Red RB 133, ikinci aşamasında ise polipropilen iplik üretimi ve boyama işlemi yapan bir tekstil fabrikası atıksularının elektrokoagülasyonla arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın her iki aşamasında elektrokoagülasyonda arıtma verimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, karıştırma hızı, zaman, boya konsantrasyonu, polielektrolit ilavesi (PAC veya alum) gibi parametrelerin etkisi araştırılmış olup, her bir atıksu çözeltisi için bu parametrelerin etkileri aşağıda gösterildiği şekilde detaylı olarak ele alınmıştır.

5.1. Remazol Red RB 133 Boya Çözeltisinin Elektrokoagülasyonu

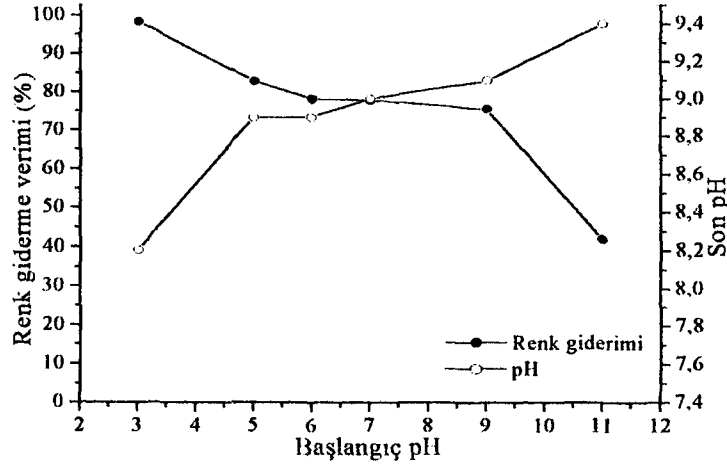
5.1.1. Renk Giderimi Üzerine pH 'ın Etkisi

Renk giderimi üzerine başlangıç pH 'sının etkisi pH 3-11 arasında incelenmiş olup, deneylerin şartları ve sonuçları Tablo 5.1. ve Şekil 5.1. 'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 pH Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Başlangıç pH	3	5	6	7	9	11
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	6.1	6.0	5.8	6.0	5.9	6.1
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	3.1-8.2	5.0-8.9	6.0-8.9	7.0-9.0	9.0-9.1	11-9.4
Akım verimliliği (%)	122	119	118	118	120	118
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	44	44	44	44	44	44
Anodik çözünme Al, mg	54	52	52	52	53	52
Katodik çözünme Al, mg	32	36	34	37	37	28
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.086	0.088	0.086	0.089	0.090	0.080
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	344	352	344	356	360	320
Enerji tüketimi, Wh	0.793	0.780	0.754	0.780	0.767	0.793
Faraday (F/m^3)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
Kg Al/kg boya	1.40	1.70	1.83	1.83	1.91	3.06
Kg boya /kg Al	0.71	0.59	0.55	0.55	0.52	0.33
KWh/kg boya	12.91	15.08	16.03	16.06	16.28	30.33
Renk giderme verimi (%)	98.25	82.77	78.10	77.68	75.37	41.84

Kolloidal sistemlerde çözelti içindeki iyonlar ve onların etkileşimde olduğu ortamlarda pH çok önemlidir. Elektrokoagülasyonda bu sistemlerden biridir.



Şekil 5.1. Elektrokoagülasyonla Renk Giderimin de pH 'ın Etkisi

Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotlar kullanılarak disperse partiküllerin destabilizasyonu sözkonusu olup, koagülant üretimi mekanizması kimyasal koagülasyondaki mekanizmaya benzemektedir. Her iki proste de Al^{3+} 'ün hidrolizi ve bunun sonunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir [43]. Bu durum Tablo 3.5 ve Şekil 3.7 'den de görülmektedir.

Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde pH dengesi değişimi anot ve katotta meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonları ile kontrol edilmektedir.

Anotta, alüminyum yükseltgenirken katotta ise su indirgenmektedir.

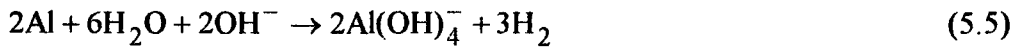


- Katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen oluşumu ve hidroksit birikmesi sonucu pH artmaktadır (5.3 eşitliği)
- $Al(OH)_3$ çok yüksek pH 'larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı mevcut OH^- iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH 'sını düşürmektedir [50].

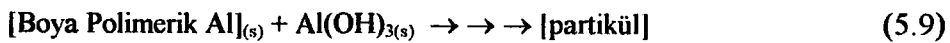
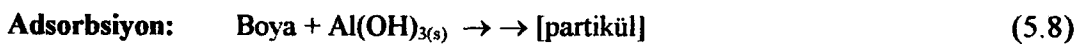


Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerin pH 'ları bir süre sonra 9 civarına artmakta (5.3), bu değerin üstüne çıkamamaktadır. pH 9 'un üzerindeki çözeltilerde ise deneyden bir süre sonra (5.4) reaksiyonu gereği pH 9 değerinde dengelenmektedir.

Alüminyum elektrot kullanılan elektrokoagülasyon proseslerinde anot elektrotta ki elektrokimyasal çözünmenin dışında, elektrotlara özellikle katoda H₂ çıkışı sırasında üretilen OH⁻ iyonlarının kimyasal atakları sonucu elektrotlarda kimyasal çözünme meydana gelmektedir [51].



Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları, pH 'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur [52]. Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler. Bir çok monomerik ve polimerik alüminyum türleri ortaya çıkmaktadır. En çok bilinen monomerik türler; Al(OH)²⁺, Al(OH)₂⁺, Al₂(OH)₂⁴⁺, Al(OH)₄⁻, ve en çok bilinen polimerik türler; Al₆(OH)₁₅³⁺, Al₇(OH)₁₇⁴⁺, Al₈(OH)₂₀⁴⁺, Al₁₃O₄(OH)₂₄⁷⁺, Al₁₃(OH)₃₄⁵⁺ 'dır [48]. Değişik türlerin oluşma oranları renk giderme prosesinde önemli bir rol oynar. Boya molekülleri ve hidroliz ürünleri arasında, mevcut iyon çeşidine ve ortamın pH 'sına bağlı olarak bunların oranları arasında aynı zamanda birkaç etkileşme mekanizması mümkündür. Son yıllarda var olduğu düşünülen asıl etkileşme mekanizması farklı pH aralıkları için çökelme ve adsorbsiyon olduğu ifade edilmektedir. Düşük pH aralığında flokülasyonla çökelme, pH > 6.5 olduğu aralılarda adsorbsiyonla renk giderimi gerçekleşir [48,53].

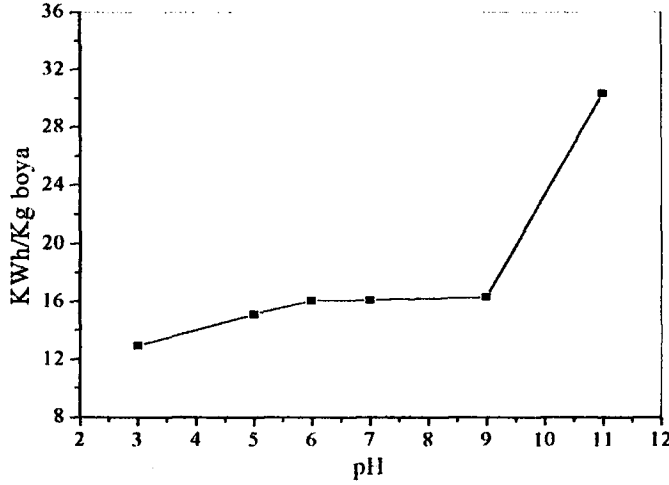


Şekil 5.1. 'de Alüminyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen renk giderme deneylerinde pH 'daki değişiklik (5.3) ve (5.4) nolu eşitliklerde açıklanmıştır.

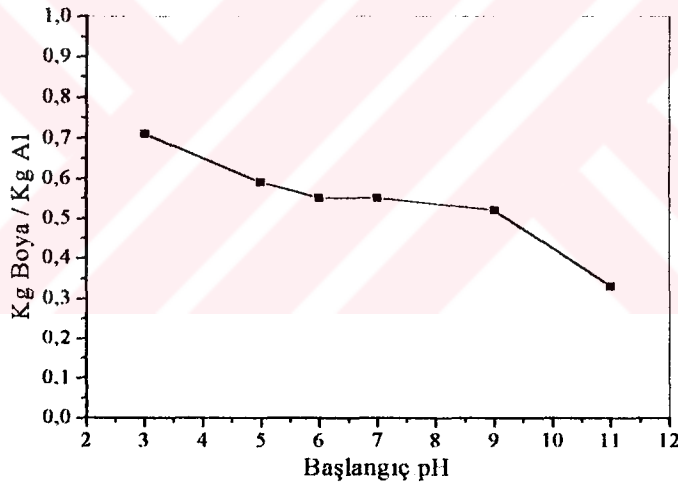
Şekil 5.1 'de görüldüğü gibi giriş pH 'sının 3 olduğu durumda renk giderme veriminin %98.25 olduğu görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: Deney pH 3 'ten 8.2 'ye artarken sırasıyla (5.6), (5.7), (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden renk gideriminde hepsi etkisini gösterebilmektedir. Giriş pH 'sının 5 olduğu durumda renk giderme verimi %82.77 'ile en iyi ikinci değeri sağlamış ve pH 'nın artarak 8.9 olarak son bulunduğu görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: Deney pH 5 'ten 8.9 'a artarken sırasıyla (5.7), (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden renk gideriminde (5.6) nolu denklemin etkisi görülmemekte bu durum renk giderme veriminin düşmesine neden olmuştur. Giriş pH 'sının 6, 7 ve 9 olduğu durumda renk giderme verimi %75-76 dolaylarında gerçekleşmiş ve pH 'nın artarak 9 civarında son bulunduğu görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: Deney pH 6, 7 ve 9 'dan 9 'a artarken sadece (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden renk gideriminde (5.6) ve (5.7) nolu denklemin etkisi görülmemekte bu durum renk giderme veriminin daha da düşmesine neden olmuştur. Giriş pH 'sının 11 olduğu durumda renk giderme veriminde önemli derecede bir düşüş olduğu ve sadece %41.84 'lük bir giderimin gerçekleştiği, pH 'nın ise önceki durumlardan farklı olarak azaldığı ve 9.4 'e kadar düştüğü görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerde kullanılan ve kirleticileri adsorbe etmekte etkili tür olan $Al(OH)_3$ yüksek pH 'dan dolayı faaliyete geçen (5.4) nolu denklem tarafından kullanılarak renk giderme veriminin düşmesine neden olmuştur.

Şekil 5.2. 'de pH 'ın kWh/kg boya oranına etkisi gösterilmiş olup, ortalama enerji tüketimi 3.0 kWh/m^3 olarak gerçekleşmiştir. Başlangıç pH 3 ve 11 için kg giderilen boya başına kWh enerji tüketimi sırasıyla 12.91 ve 30.33 olmuştur. pH arttıkça enerji tüketiminin arttığı görülmüştür. pH atışının enerji tüketimini yaklaşık 3 kat artırdığı bulunmuştur.

Şekil 5.3. 'te pH 'ın alüminyumun boya giderme kapasitesi üzerine etkisi gösterilmiştir. pH 3 ve 11 'de sırasıyla alüminyumun boya giderme kapasitesi 0.71 ve 0.33 olduğu, bununda yaklaşık 2 kat azaldığı hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. pH 'ın Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.3. pH 'ın Alüminyum Boya Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.2. Renk Giderimi Üzerine İletkenliğin Etkisi

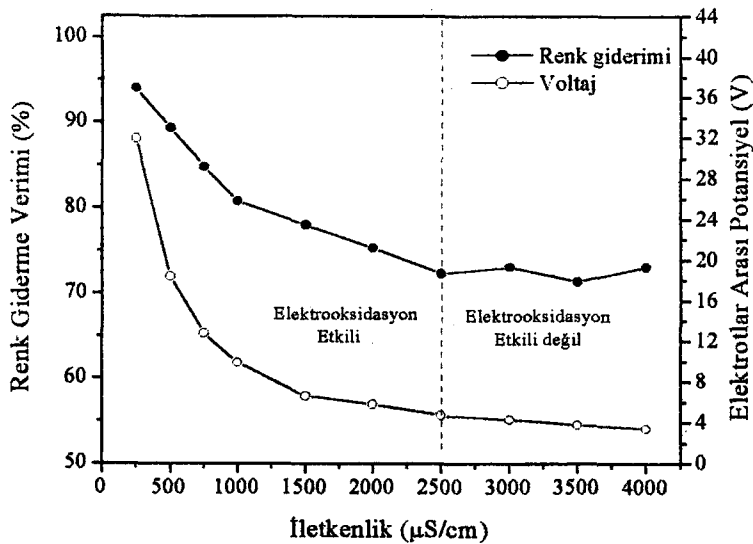
Arıtmada çözeltinin iletkenliği elektrokimyasal prosesler için önemli bir faktördür. Çünkü böyle prosesler elektrot yüzeyinden çözeltiye ve çözelti içinde heterojen iyon transfer reaksiyonlarına dayanmaktadır [54].

Çözelti iletkenliğinin renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla boya çözeltisinin iletkenliği, NaCl destek elektroliti ilavesi ile 250-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığında incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.2. ve Şekil 5.4. 'de gösterilmiştir.

Şekilden de görüldüğü gibi çözelti iletkenliğinin 250-2500 $\mu\text{S/cm}$ aralığındaki artışla birlikte renk giderme veriminde düşüş, 2500 $\mu\text{S/cm}$ 'nin üstündeki iletkenlik değerlerde bu düşüşün bir dengeye vardığı görülmektedir. İletkenlik deneylerdeki bir diğer nokta çözelti iletkenliğindeki artışla birlikte elektrotlar arası potansiyelin düştüğüdür. İletkenlik 250 'den 4000 $\mu\text{S/cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyelin 31.9 'dan 3.4 V 'a azalmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak renk giderme verimi değerlendirildiğinde; 31.9-4.7 V aralığındaki düşüşle birlikte renk giderme veriminde düşüş, 4.7 V 'un altındaki değerlerde bu düşüşün bir dengeye vardığı görülmektedir.

Tablo 5.2. İletkenlik Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Çözelti iletkenliği, $\mu\text{S/cm}$	250	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	31.9	18.4	12.8	9.9	6.6	5.8	4.7	4.3	3.8	3.4
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.0-9.1	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-8.9	6.0-8.9	6.0-8.9	6.0-8.9	6.0-8.8	6.0-8.9
Akım verimliliği (%)	118	116	122	116	129	118	116	118	125	116
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
Anodik çözünme Al, mg	0.052	0.051	0.054	0.051	0.057	0.052	0.051	0.052	0.055	0.051
Katodik çözünme Al, mg	0.039	0.032	0.029	0.036	0.036	0.034	0.034	0.033	0.036	0.033
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.091	0.082	0.083	0.087	0.093	0.086	0.085	0.085	0.091	0.084
1 m^3 Atıksu için harcanan Al., g	364	328	332	348	372	344	340	340	364	336
Enerji tüketimi, Wh	4.147	2.392	1.664	1.287	0.858	0.754	0.611	0.559	0.494	0.442
Faraday (F / m^3)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
Kg Al. / kg boya	1.55	1.47	1.59	1.72	1.91	1.83	1.88	1.86	2.04	1.84
Kg boya /kg Al.	0.64	0.68	0.63	0.58	0.52	0.55	0.53	0.54	0.49	0.54
KWh / kg boya	70.59	42.83	31.39	25.49	17.60	16.03	13.53	12.25	11.08	9.69
Renk giderme verimi (%)	94.00	89.35	84.82	80.78	78.00	75.24	72.28	73.03	71.32	73.00

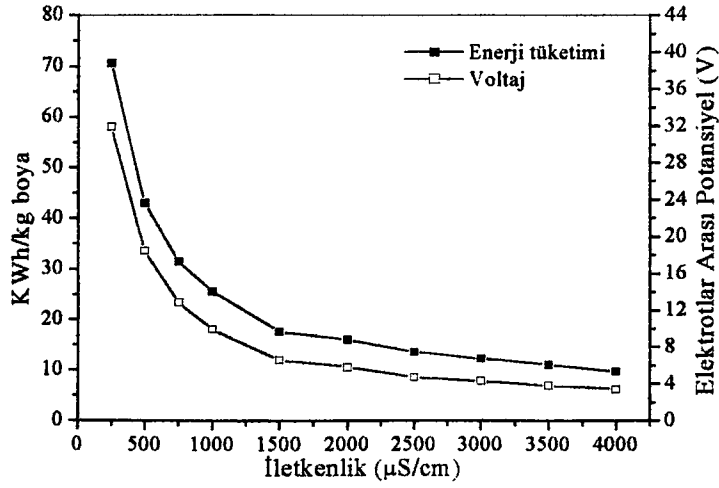


Şekil 5.4. Elektrokoagülasyonla Renk Giderimin de İletkenliğin Etkisi

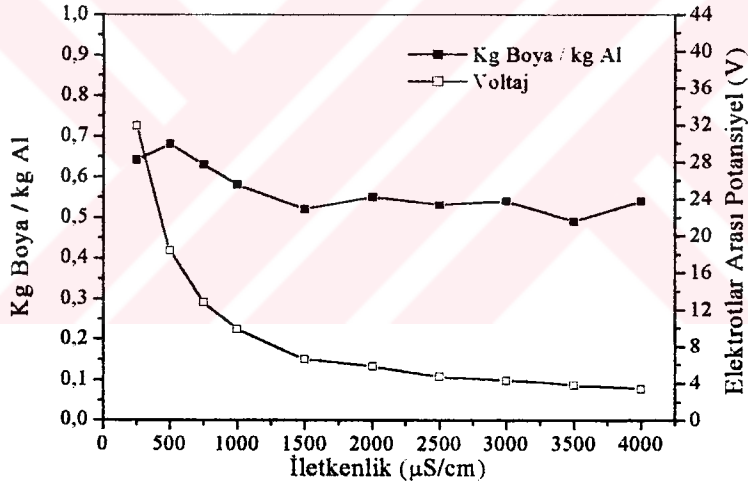
İletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalması sonucu anodik oksidasyon azalmakta ve renk giderme veriminde düşüş gözlenmektedir. Ancak potansiyel farkının 4.7 V altına düştüğü noktadan itibaren elektrooksidasyonun etkisini yitirdiği söylenebilir. Sulu sistemlerde, elektrokimyasal prosesin mekanizması oldukça karmaşık olduğu ve genellikle proseste muhtemel üç mekanizmanın; elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektrooksidasyon aynı anda gerçekleşebileceği belirtilmiştir [7]. Tekstil atıksularından renk ve organik bileşiklerin giderimin de elektrokimyasal oksidasyon önemli bir rol oynadığı bilinmektedir [50]. Çözünen metal anotların uygulandığı bir elektrokoagülasyon prosesinde meydana gelen metal hidroksitler boyayı adsorblarken, anotta boyanın kısmen direkt oksidasyona uğradığını gösteren bazı deliller varlığı belirtilmiştir [32].

Eşit akım şiddeti, eşit süre ve farklı çözelti iletkenliğinde yapılan iletkenlik deneylerinde iletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalmasından dolayı her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Şekil 5.5 'te iletkenlik 250 den 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 31.9 'dan 6.6 V 'a, enerji tüketimi ise 16.60 'tan 3.43 kWh/m^3 hızlı azalmaktadır. İletkenlik 1500 den 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 6.6 'dan 3.4 V 'a, enerji tüketimi ise 3.43 'tan 1.77 kWh/m^3 yavaş azalmaktadır. Çözelti iletkenliği elektrotlar arası potansiyele etki ettiğinden enerji tüketimini endirekt etkilemektedir. Bunun yanında iletkenliğin renk giderme verimine etkisinden dolayı, kg boya giderimi için enerji tüketimi 70.59 'dan 9.69 kWh/kg boya, gibi yaklaşık 7 katı farklı olabilmektedir. Ayrıca enerji tüketimi 16.60 'dan 1.77 kWh/m^3 yaklaşık 9.4 kat azalırken, kg boya giderimi için enerji tüketimi 70.59 'dan 9.69 kWh/kg boya yaklaşık 7 kat azalmıştır.

Şekil 5.6. 'da iletkenliğin alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. iletkenliğe bağlı olarak alüminyumun giderme kapasitesi çok fazla değişmemiştir.



Şekil 5.5 İletkenliğin Enerji Tüketimine Etkisi



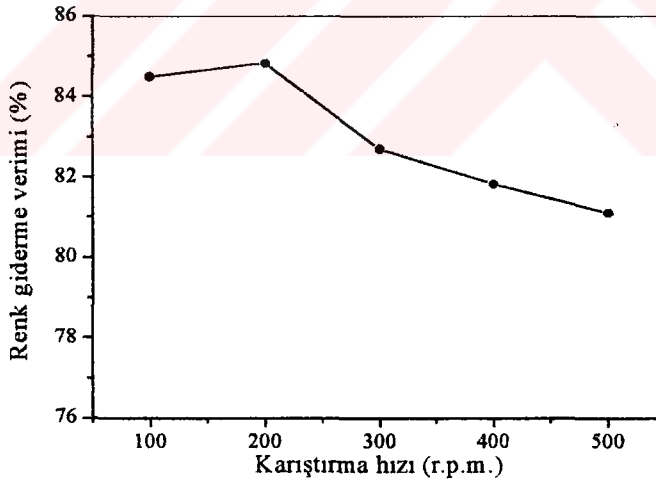
Şekil 5.6. İletkenliğin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.3. Renk Giderimi Üzerine Karıştırma Hızının Etkisi

Karıştırma hızının renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 100-500 rpm arasında çeşitli hızlarda deneyler yapılmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.3. 'de ve Şekil 5.7. 'de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi 100 ve 200 rpm değerlerinde iyi sonuçlar elde edilmiş, 200 rpm 'de en yüksek renk giderme verimi elde edilmiş bu değer üzerinde hız arttıkça verimde düşüş görülmektedir. Bu veriler sonunda en uygun karıştırma hızı 200 rpm alınmıştır.

Tablo 5.3. Karıştırma Hızı Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Karıştırma hızı (rpm)	100	200	300	400	500
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	12.8	12.8	12.7	13.3	13.6
İletkenlik, $\mu\text{S/cm}$	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6-9.1	6-9.0	6-9.0	6-9.0	6-9.0
Akım verimliliği (%)	120	122	125	120	130
Teorik olarak çöz. ger.. Al, mg	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
Anodik çözünme Al, mg	0.053	0.054	0.055	0.053	0.057
Katodik çözünme Al, mg	0.025	0.029	0.032	0.027	0.033
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.078	0.083	0.087	0.080	0.090
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	312	332	348	320	360
Enerji tüketimi, Wh	1.664	1.664	1.651	1.729	1.768
Faraday (F/m^3)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
Kg Al/kg boya	1.48	1.59	1.68	1.56	1.78
Kg boya/kg Al	0.68	0.63	0.60	0.64	0.56
KWh/kg boya	31.51	31.88	31.95	33.81	34.90
Renk giderme verimi (%)	84.49	84.82	82.69	81.82	81.09

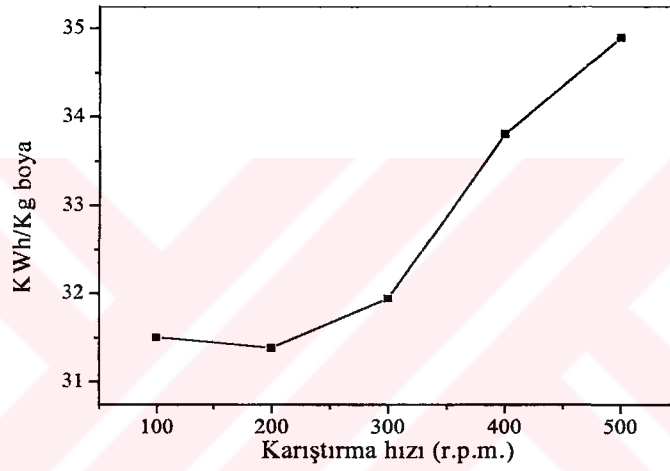


Şekil 5.7 Karıştırma Hızının Renk Giderme Verimine Etkisi

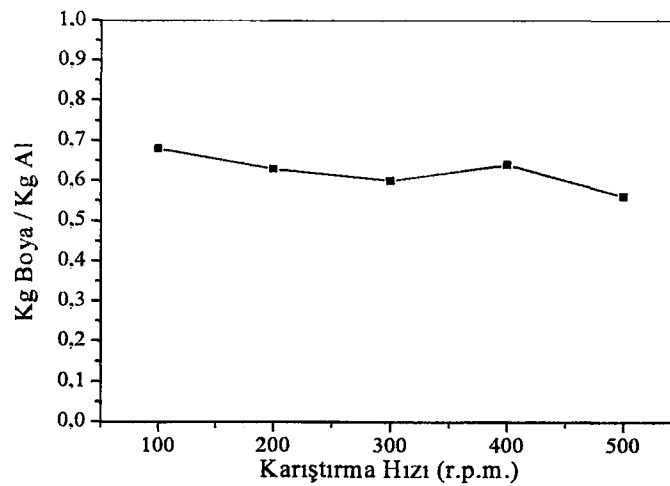
Şekil 5.8. 'de karıştırma hızı deneylerinde elektrotlar arası potansiyel farkı karıştırma hızından etkilenmiş, dolayısıyla deneyler için enerji tüketimi farklı olmuştur. 100-300 rpm karıştırma hız aralığındaki elektrotlar arası potansiyel farkı ortalama 12.8 V gibi gerçekleşirken ortalama enerji tüketimi 6.66 kWh/m^3 , 400 rpm 'de elektrotlar arası potansiyel fark 13.3 V enerji tüketimi 6.92 kWh/m^3 , 500 rpm 'de

‘de elektrotlar arası potansiyel fark 13.6 V enerji tüketimi 7.07 kWh/m² olarak gerçekleşmiştir. Karıştırma hızının renk giderme verimine etkisinin az olmasından dolayı, kg boya giderimi için enerji tüketimi 31.51 ‘den 34.90 kWh/kg boya çok az değişmektedir.

Şekil 5.9. 'da karıştırma hızının alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Karıştırma hızına bağlı olarak alüminyumun giderme kapasitesi çok fazla değişmemiştir



Şekil 5.8.Karıştırma Hızının Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.9. Karıştırma Hızının Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.4. Renk Giderimi Üzerine Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğunun renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla elektrokoagülatöre 2.5-25 mA/cm² aralığında çeşitli akım yoğunlukları uygulanmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.4. 'de ve Şekil 5.10. 'da gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi akım yoğunluğunun 10 mA/cm² olduğu noktaya kadar renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu, 10-15 mA/cm² arasında bu artışın yavaşladığı ve sonuçta 15 mA/cm² de en yüksek değere ulaştığı ve bundan sonra giderme veriminde artış olmadığı görülmektedir. Enerji tüketimi ve alüminyum tüketimi göz önüne alınarak optimum akım yoğunluğu 10 mA/cm² alınmış olup, diğer tüm deneyler bu akım yoğunluğunda yürütülmüştür.

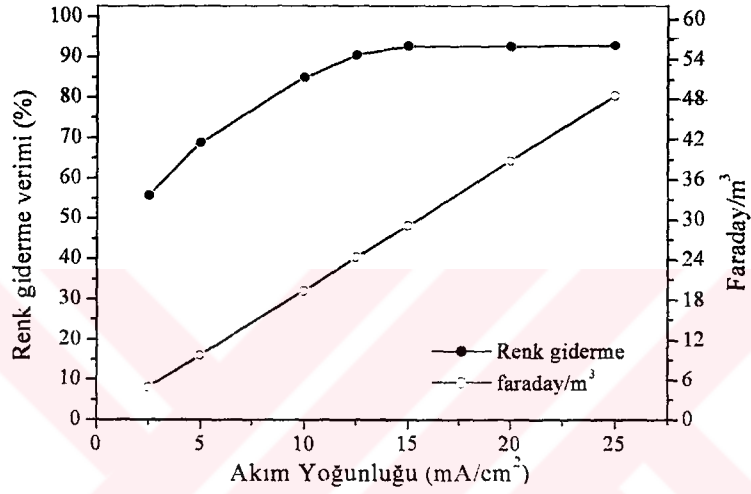
Tablo 5.4. Akım Yoğunluğu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Akım yoğunluğu, mA/cm ²	2.5	5	10	12.5	15	20	25
Akım, A	0.20	0.39	0.78	0.98	1.17	1.56	1.95
Voltaj, V	4.4	7.3	12.8	14.9	17.5	21.5	27.0
İletkenlik, µS/cm	750	750	750	750	750	750	750
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.0-8.8	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0
Akım verimliliği (%)	118	125	122	120	120	119	121
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.011	0.022	0.044	0.055	0.065	0.088	0.109
Anodik çözünme Al, mg	0.013	0.028	0.054	0.066	0.078	0.105	0.132
Katodik çözünme Al, mg	0.018	0.023	0.029	0.048	0.048	0.055	0.062
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.031	0.051	0.083	0.114	0.126	0.160	0.194
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	124	204	332	456	504	640	776
Enerji tüketimi, Wh	0.147	0.481	1.664	2.434	3.471	5.720	8.450
Faraday (F/m ³)	4.85	9.70	19.40	24.38	29.10	38.80	48.50
Kg Al/kg boya	0.89	1.19	1.59	2.02	2.18	2.76	3.35
Kg boya /kg Al	1.12	0.84	0.63	0.50	0.46	0.36	0.30
KWh/kgboya	4.22	11.21	31.39	43.13	60.01	99.02	145.88
Renk giderme verimi (%)	55.69	68.68	84.82	90.30	92.55	92.43	92.68

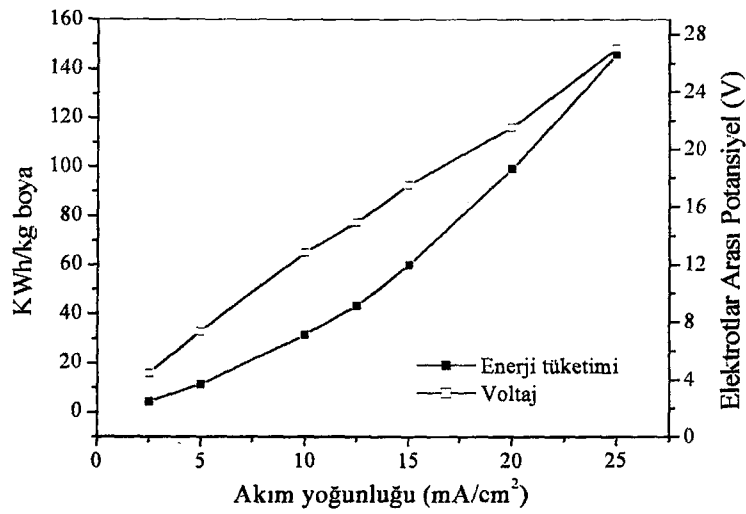
Şekil 5.11 'de eşit çözelti iletkenliği, eşit süre ve farklı akım yoğunluğunda yapılan akım yoğunluğu deneylerinde akım yoğunluğundaki artışla elektrotlar arası potansiyel farkının artmasından dolayı her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Akım yoğunluğu 2.5 'den 25 mA/cm² e artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 4.4 'dan 27.0 V 'a, enerji tüketimi ise 0.59 'dan 33.8 kWh/m³ 'e artmaktadır. Akım yoğunluğu enerji tüketimine direkt etki etmekte ayrıca elektrotlar arası potansiyele etki ettiğinden enerji tüketimini endirekt te etkilemektedir. Bunun yanında akım yoğunluğunun renk giderme verimine etkisinden dolayı, kg boya

giderimi için enerji tüketimi 4.22 'dan 145.88 kWh/kg boya, gibi farklı olabilmektedir.

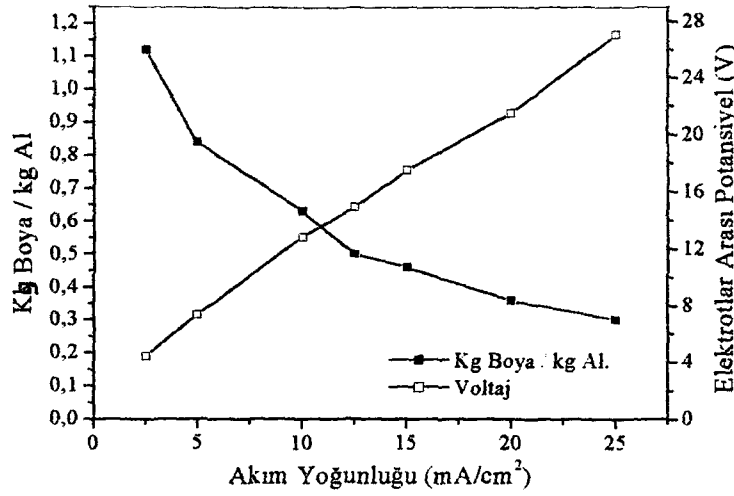
Şekil 5.12. 'de akım yoğunluğunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan akım yoğunluğu arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.10. Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.11. Akım yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.12. Akım Yoğunluğunun Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.5. Renk Giderimi Üzerine Zamanın Etkisi

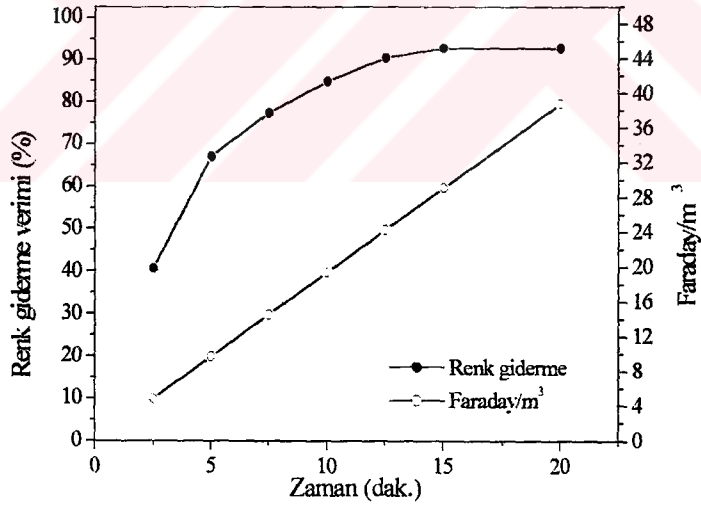
Zamanın renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 2.5-20 dakikalar arasında çeşitli sürelerde deneyler yapılmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.5. 'de ve Şekil 5.13. 'de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 2.5-12.5 dakikalar arası renk giderme veriminde hızlı bir artış olduğu, 12.5-15 dakikalar arasında bu artışın yavaşladığı ve sonuçta 15 dakikada de en yüksek değere ulaştığı ve bundan sonra giderme veriminde artış olmadığı görülmektedir.

Eşit çözelti iletkenliği, eşit akım yoğunluğu ve farklı sürelerde yapılan zaman deneylerinde süredeki artışa bağlı olarak her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Zaman 2.5 'den 20 dak. 'ya artarken enerji tüketimi 1.64 'dan 12.90 kWh/m³ 'e artmaktadır. Zaman enerji tüketimini direkt etkilemektedir. Bunun yanında zamanın renk giderme verimine etkisinden dolayı, kg boya giderimi için enerji tüketimi 16.14 'den 55.64 kWh/kg boya, gibi farklı olabilmektedir (Şekil 5.14).

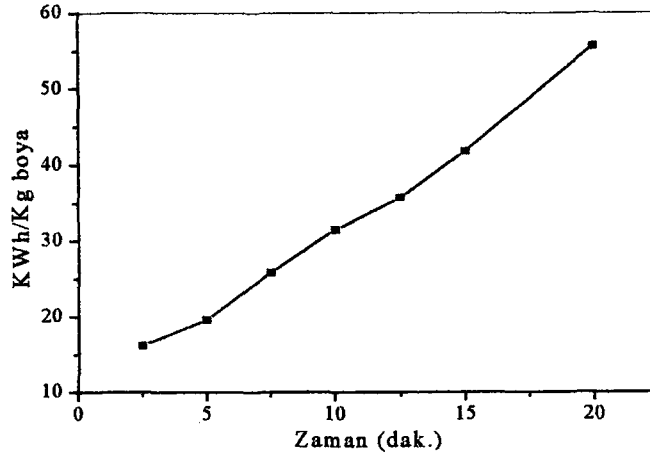
Enerji tüketimi ve alüminyum tüketimi göz önüne alınarak optimum süre 12.5 dakika alınabilir. Buda % 90.44 'lük renk giderimi için 8.06 kWh/m³ enerji tüketimi, kg boya giderimi için 35.65 kWh/kg boya ve 0.50 kg boya/kg Al değerlerine denk gelmektedir.

Tablo 5.5. Zaman Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Elektrokoagülasyon süresi, dak.	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	12.6	12.6	12.8	12.8	12.4	12.4	12.4
İletkenlik, $\mu\text{S/cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son Ph	6.0-8.8	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0
Akım verimliliği (%)	122	128	127	122	120	122	112
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.011	0.022	0.033	0.044	0.055	0.065	0.088
Anodik çözünme Al, mg	0.013	0.029	0.042	0.054	0.066	0.081	0.098
Katodik çözünme Al, mg	0.017	0.019	0.022	0.029	0.047	0.052	0.048
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.030	0.048	0.064	0.083	0.113	0.133	0.156
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	120	192	256	332	452	532	624
Enerji tüketimi, Wh	0.410	0.819	1.248	1.664	2.015	2.418	3.224
Faraday (F/m^3)	4.85	9.70	14.55	19.40	24.25	29.10	38.80
Kg Al/kg boya	1.18	1.15	1.32	1.59	2.00	2.30	2.69
Kg boya/kg Al.	0.85	0.87	0.76	0.63	0.50	0.43	0.37
KWh/kg boya	16.14	19.54	25.81	31.39	35.65	41.74	55.64
Renk giderme verimi (%)	40.65	67.06	77.38	84.82	90.44	92.68	92.71

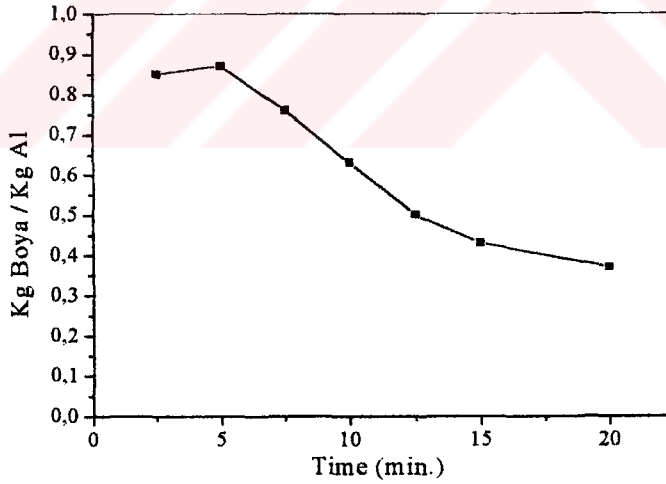


Şekil 5.13 Zamanın Renk Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.14. Zamanın Enerji Tüketimine Etkisi

Şekil 5.15. 'de zamanın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan zaman arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.15. Zamanın Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.6. Renk Giderimin de Boya Konsantrasyonunun Etkisi

Elektrokoagülasyonun verimi üzerine boya konsantrasyonunun etkisi 100-1000 mg/l boya konsantrasyon aralığında incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.6. 'da ve Şekil 5.16. 'da gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 100 mg/l

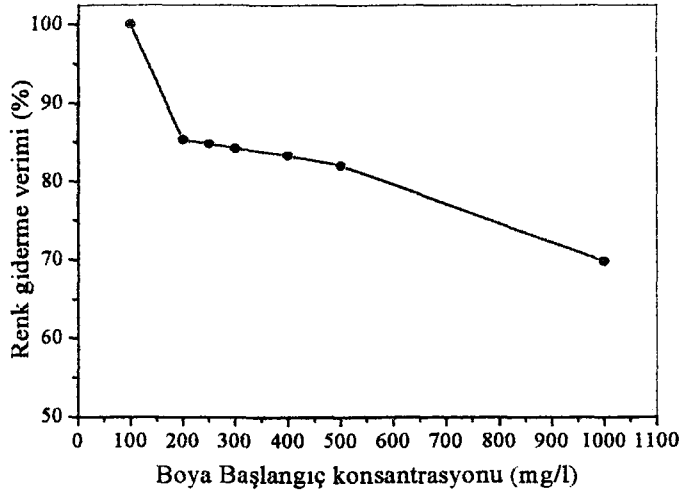
konsantrasyonda %100 renk gidermenin sağlandığı görülmektedir. 200 mg/l de giderme veriminin hızlı bir düşüşle %85.33 'e düştüğü ve bunu üstündeki konsantrasyonlarda da düşüşün azalarak ta olsa devam ettiği görülmektedir. Genel bir ifadeyle sabit elektrokoagülasyon şartlarında renk giderme verimi boya konsantrasyonu arttıkça düşmektedir denebilir.

Boya konsantrasyonu artırıldığı zaman boyanın koagülasyonu için gerekli koagülant türlerinin miktarı da artırılmalıdır [46]. Oluşturduğumuz elektrokoagülasyon şartları 100 mg/l için fazlasıyla yeterli olduğu bunun üstündeki konsantrasyonlarda bunu sağlamadığı görülmektedir.

Eşit akım şiddeti, eşit süre ve eşit çözelti iletkenliğinde yapılan boya konsantrasyonu deneylerinde her bir deney için ortalama enerji tüketimi 6.70 kWh/m³ olarak gerçekleşmiştir. Boya konsantrasyonunun renk giderme verimine etkisinden dolayı, kg boya giderimi için enerji tüketimi 66.56 'dan 10.20 kWh/kg boya, gibi farklı olabilmektedir. Şekil 5.17.

Tablo 5.6. Boya Konsantrasyonu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

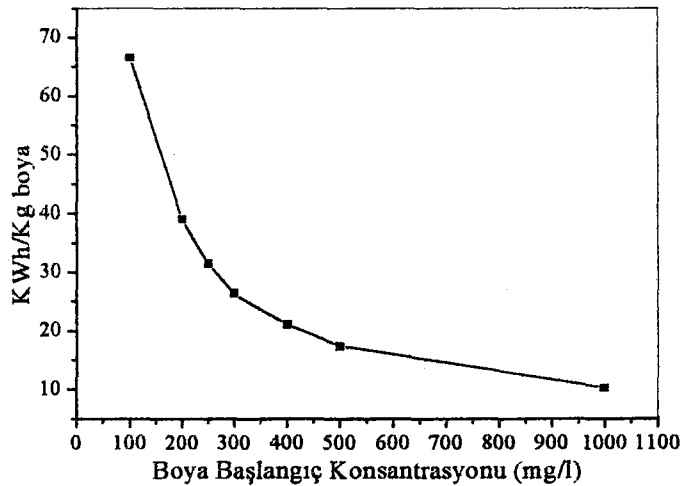
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	100	200	250	300	400	500	1000
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	12.8	12.8	12.8	12.8	13.3	13.6	13.6
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.0-9.0	6.0-9.1	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0	6.0-9.0
Akım verimliliği (%)	122	120	122	125	120	124	125
Teorik olarak çöz.ger., Al, mg	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044
Anodik çözünme Al, mg	0.054	0.053	0.054	0.055	0.053	0.055	0.055
Katodik çözünme Al, mg	0.029	0.025	0.029	0.032	0.027	0.030	0.032
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.083	0.078	0.083	0.087	0.080	0.085	0.087
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	332	312	332	348	320	340	348
Enerji tüketimi, Wh	1.664	1.664	1.664	1.664	1.755	1.781	1.781
Faraday (F/m ³)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
Kg Al/kg boya	3.32	1.83	1.59	1.38	0.96	0.83	0.50
Kg boya/kg Al	0.30	0.55	0.63	0.72	1.04	1.20	2.00
KWh/kg Boya	66.56	39.00	31.39	26.32	21.04	17.37	10.20
Renk giderme verimi (%)	100	85.33	84.82	84.29	83.40	82.05	69.83



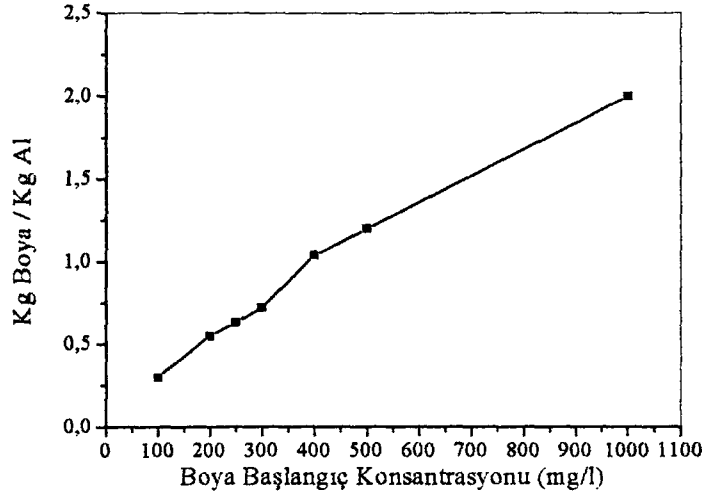
Şekil 5.16. Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Renk Giderme Verimine Etkisi

0.1 g/dm³ konsantrasyondaki azo boyanın tamamen giderimi için elektrik sarfıyatı 30-100 kWh/kg aralığında olduğu bildirilmektedir [32]. Şekil 5.17. 'den görüleceği gibi 100 mg/l konsantrasyondaki Rem. Red. RB tamamen giderimi için elektrik sarfıyatı 66.56 kWh/kg boya olarak bildirilen sınırlar içinde gerçekleşmiştir.

Şekil 5.18. 'de Başlangıç boya konsantrasyonunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan Başlangıç boya konsantrasyonunu arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.17 Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.18. Başlangıç Boya Konsantrasyonunun Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi

5.1.7. Renk Giderimin de Polielektrolit İlavesinin Etkisi

Polielektrolitler kimyasal arıtımında sentetik koagülant olarak bolca kullanılırlar. Aynı şekilde elektrokoagülasyonla renk giderimine yardımcı olması için deneylerden önce elektrokoagülasyon hücresine az miktarlarda polielektrolit ilave edildi. Bu amaçla alüminyum klorür [$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$] kullanılmıştır. Deneyler 5 ve 10 mA/cm^2 gibi farklı iki akım yoğunluğunda, 40 ve 100 mg/l alüminyum klorür konsantrasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar polielektrolitsiz şarlarda gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.7. Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

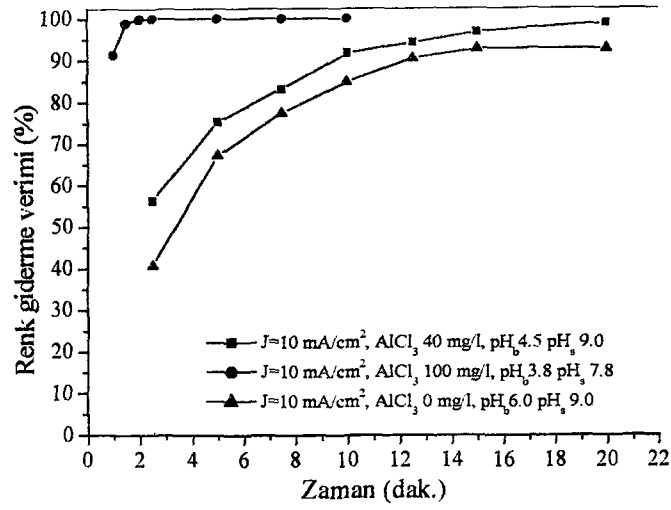
Elektrokoagülasyon süresi, dak.	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	12.5	12.6	12.7	12.5	12.4	12.4	12.5
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	4.5-8.0	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0
Akım verimliliği (%)	122	125	124	120	120	121	118
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.011	0.022	0.033	0.044	0.055	0.065	0.088
Anodik çözünme Al, mg	0.013	0.028	0.041	0.053	0.066	0.079	0.104
Katodik çözünme Al, mg	0.012	0.014	0.023	0.027	0.032	0.041	0.050
Toplam çözünen Al, g (E.K.)	0.025	0.042	0.064	0.080	0.098	0.120	0.154
$\text{g}/\text{Al}/\text{m}^3$ (E.K.)	100	168	256	320	392	480	616
Toplam çöz. Al, g (E.K.+K.)	0.026	0.043	0.065	0.081	0.099	0.121	0.155
$\text{g}/\text{Al}/\text{m}^3$ (E.K.+K.)	104	172	260	324	396	484	620
Enerji tüketimi, Wh	0.406	0.819	1.238	1.625	2.015	2.418	3.250
Faraday (F/m^3)	4.85	9.70	14.55	19.40	24.25	29.10	38.80
Kg Al/kg boya	0.74	0.91	1.25	1.41	1.68	2.00	2.50
Kg boya/kg Al	1.25	1.10	0.80	0.71	0.60	0.50	0.40
KWh/kg boya	11.54	17.40	23.82	28.35	34.22	40.00	52.55
Renk giderme verimi (%)	56.30	75.31	83.16	91.71	94.22	96.72	98.96

* (40 mg/l $[\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$); E.K.: Elektrokimyasal, K.: Kimyasal

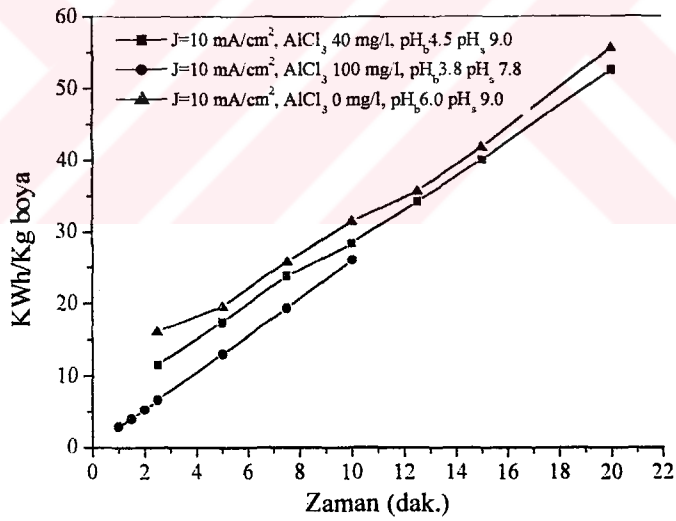
Tablo 5.8. Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları *

Elektrokoagülasyon süresi, dak.	1	1.5	2	2.5	5	7.5	10
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	12.7	12.5	12.6	12.8	12.5	12.4	12.5
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç Ph- Son pH	3.8-5.9	3.8-6.3	3.8-6.7	3.8-7.0	3.8-7.3	3.8-7.4	3.8-7.6
Akım verimliliği (%)	122	125	124	121	120	123	119
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.004	0.006	0.008	0.011	0.022	0.033	0.044
Anodik çözünme Al, mg	0.005	0.008	0.010	0.013	0.026	0.041	0.052
Katodik çözünme Al, mg	0.004	0.005	0.006	0.007	0.013	0.021	0.024
Toplam çözünen Al, g (E.K.)	0.009	0.013	0.016	0.020	0.039	0.062	0.076
$\text{g}/\text{Al}/\text{m}^3$ (E.K.)	36	52	64	80	156	248	304
Toplam çöz. Al, g (E.K.+ K.)	0.012	0.016	0.019	0.023	0.042	0.065	0.079
$\text{g}/\text{Al}/\text{m}^3$ (E.K.+ K.)	48	64	76	92	168	260	316
Enerji tüketimi, Wh	0.165	0.244	0.328	0.416	0.813	1.209	1.625
Faraday (F / m^3)	1.94	2.91	3.88	4.85	9.70	14.55	19.40
Kg Al/kg boya	0.21	0.26	0.30	0.36	0.66	1.03	1.26
Kg boya /kg Al	4.76	3.84	3.33	2.78	1.52	0.97	0.79
KWh / kg boya	2.89	3.95	5.25	6.66	13.01	19.34	26.00
Renk giderme verimi (%)	91.31	98.89	99.92	99.99	100	100	100

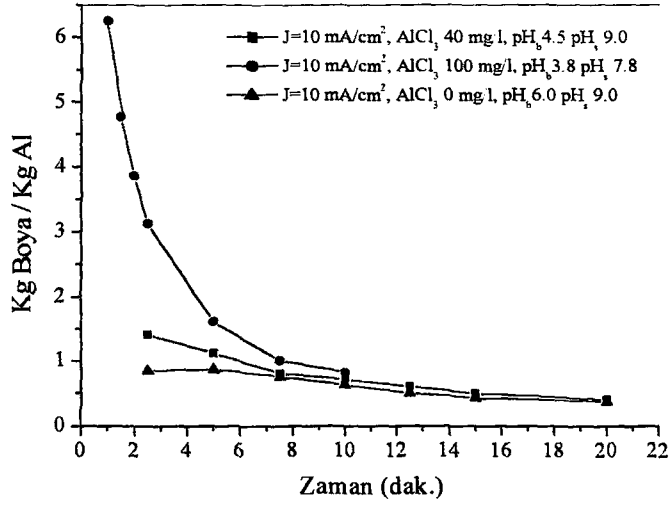
*(100 mg/l $[\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$); E.K.: Elektrokimyasal, K.: Kimyasal



Şekil 5.19. Polielektrolit İlavesinin Renk Giderme Verimine Etkisi ($J=10 \text{ mA/cm}^2$)



Şekil 5.20. Polielektrolit İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi ($J=10 \text{ mA/cm}^2$)



Şekil 5.21. Polielektrolit İlavesinin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi (J=10 mA/cm²)

Tablo 5.9. Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları *

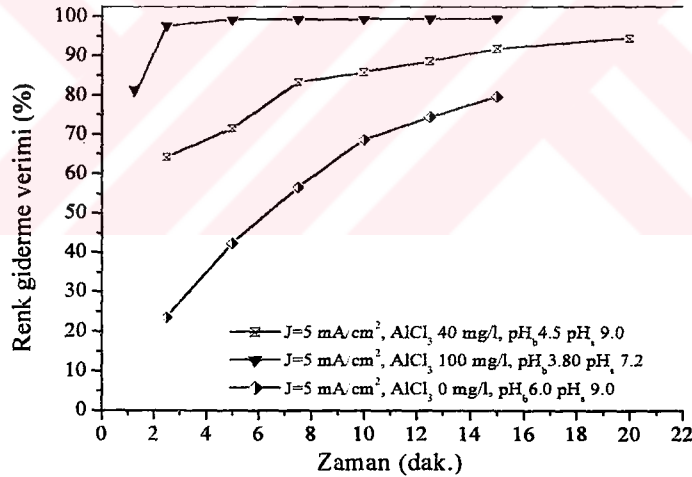
Elektrokoagülasyon süresi, dak.	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20
Akım, A	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Voltaj, V	7.4	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	5	5	5	5	5	5	5
Başlangıç Ph- Son pH	4.5-7.0	4.5-7.6	4.5-8.2	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0	4.5-9.0
Akım verimliliği (%)	124	121	122	122	123	120	118
Teorik olarak çöz.ger.. Al, mg	0.006	0.011	0.017	0.022	0.028	0.033	0.044
Anodik çözünme Al, mg	0.008	0.013	0.021	0.027	0.034	0.040	0.052
Katodik çözünme Al, mg	0.007	0.008	0.009	0.012	0.016	0.018	0.024
Toplam çözünen Al (E.K.) g.	0.015	0.021	0.030	0.039	0.050	0.058	0.076
$\text{g.Al.} / \text{m}^3$ (E.K.)	60	82	120	156	200	232	304
Toplam çöz. Al (E.K. + K.) g.	0.016	0.022	0.031	0.040	0.051	0.059	0.077
$\text{g.Al.} / \text{m}^3$ (E.K. + K.)	64	88	124	160	204	236	308
Enerji tüketimi, Wh	0.120	0.237	0.356	0.481	0.600	0.722	0.960
Faraday (F / m^3)	2.43	4.85	7.28	9.70	12.13	14.55	19.40
Kg Al. / kg boya	0.40	0.50	0.61	0.76	0.93	1.04	1.32
Kg boya /kg Al.	2.50	2.00	1.64	1.32	1.08	0.96	0.75
KWh / kg boya	2.99	5.30	6.84	8.97	10.84	12.60	16.26
Renk giderme verimi (%)	64.23	71.51	83.31	85.81	88.56	91.71	94.45

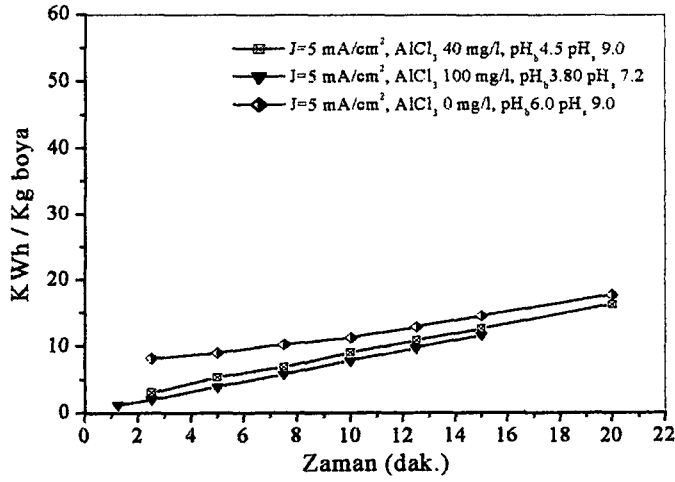
* (40 mg/l $[\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$); E.K.: Elektrokimyasal, K.: Kimyasal

Tablo 5.10. Polielektrolit ilavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları*

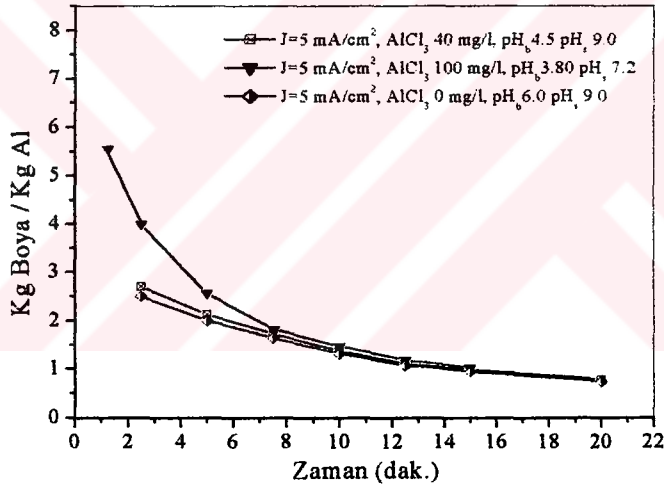
Elektrokoagülasyon süresi, dak.	1.25	2.5	5	7.5	10	12.5	15
Akım, A	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Voltaj, V	7.4	7.4	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	750	750	750	750	750	750	750
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	5	5	5	5	5	5	5
Başlangıç pH- Son pH	3.8-5.4	3.8-5.9	3.8-6.3	3.8-6.7	3.8-7.2	3.8-7.6	3.8-7.8
Akım verimliliği (%)	125	122	124	123	121	120	122
Teorik olarak çöz. ger. Al, mg	0.003	0.006	0.011	0.017	0.022	0.028	0.033
Anodik çözünme Al, mg	0.004	0.008	0.014	0.021	0.027	0.034	0.040
Katodik çözünme Al, mg	0.002	0.004	0.007	0.010	0.012	0.015	0.017
Toplam çözünen Al, g (E.K.)	0.006	0.012	0.021	0.031	0.039	0.049	0.057
$\text{g. Al}/\text{m}^3$ (E.K.)	24	48	82	124	156	196	228
Toplam çöz. Al, g (E.K.+K.)	0.009	0.015	0.024	0.034	0.042	0.052	0.061
$\text{g. Al}/\text{m}^3$ (E.K.+K.)	36	60	96	136	168	208	244
Enerji tüketimi, Wh	0.060	0.120	0.237	0.356	0.481	0.601	0.722
Faraday (F/m^3)	1.21	2.43	4.85	7.28	9.70	12.13	14.55
Kg Al/kg boya	0.18	0.25	0.39	0.55	0.68	0.84	0.97
Kg boya /kg Al	5.56	4.00	2.56	1.82	1.47	1.19	1.03
KWh/kg boya	1.18	1.97	3.82	5.74	7.74	9.67	11.61
Renk giderme verimi (%)	81.57	97.68	99.22	99.27	99.38	99.45	99.53

* (100 mg/l [$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]); E.K.: Elektrokimyasal, K.: Kimyasal

Şekil 5.22. Polielektrolit ilavesinin Renk Giderme Verimine Etkisi ($J=5 \text{ mA}/\text{cm}^2$)



Şekil 5.23. Polielektrolit İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi ($J=5 \text{ mA/cm}^2$)



Şekil 5.24. Polielektrolit İlavesinin Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesine Etkisi ($J=5 \text{ mA/cm}^2$)

5.1.8. Boya Çözeltisinin Kimyasal Koagülasyonu

Yukarıda yapılan elektrokoagülasyon deneyleri dışında, alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon ile alüminyum klorür polielektrolitin kullanıldığı kimyasal koagülasyonun sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla, 250 mg/l lik boya çözeltisine elektrokoagülasyonda 19.40 Faraday/ m^3 'te elektrotlardan çözünen Al miktarına denk Al içeren, 3070 mg/l $[\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ ilave edilip pH 5.5

'te çöktürülerek kimyasal koagülasyon uygulanmış ve % 46.09 renk giderme verimi elde edilmiştir.

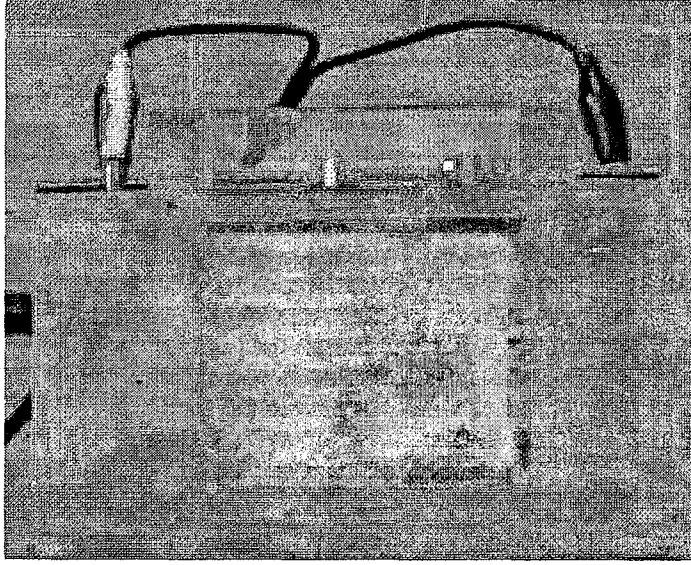
5.1.9. Değerlendirme ve Karşılaştırma

Elektrokoagülasyon, polielektrolit ilaveli elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla bazı deney sonuçları Tablo 5.11. 'de verilmiştir.

Tablo 5.11. Renk Giderme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney	Alüminyum Dozajı (mg)			kgboya/ kgAl	kWh/ kgboya	pH		Süre Dak.	Renk Gid. (%)
	E.K.	K.	Toplam			Baş.	Son		
E.K. pH = 3	86	-	86	0.71	12.91	3.1	8.2	10	98.25
E.K. pH = 6	83	-	83	0.63	31.39	6.0	9.0	10	84.82
E.K.+ (PAC)	9	3	12	4.76	2.89	3.8	5.9	1.0	91.31
E.K.+ (PAC)	13	3	16	3.84	3.95	3.8	6.3	1.5	98.89
E.K.+ (PAC)	16	3	19	3.33	5.25	3.8	6.7	2.0	99.92
E.K.+ (PAC)	6	3	9	5.56	1.18	3.8	5.4	1.25	81.57
E.K.+ (PAC)	12	3	15	4.00	1.97	3.8	5.9	2.5	97.68
E.K.+ (PAC)	21	3	24	2.56	3.82	3.8	6.3	5.0	99.22
Kimyasal koa.	-	86	86	0.34	-	3.0	5.5	-	46.09

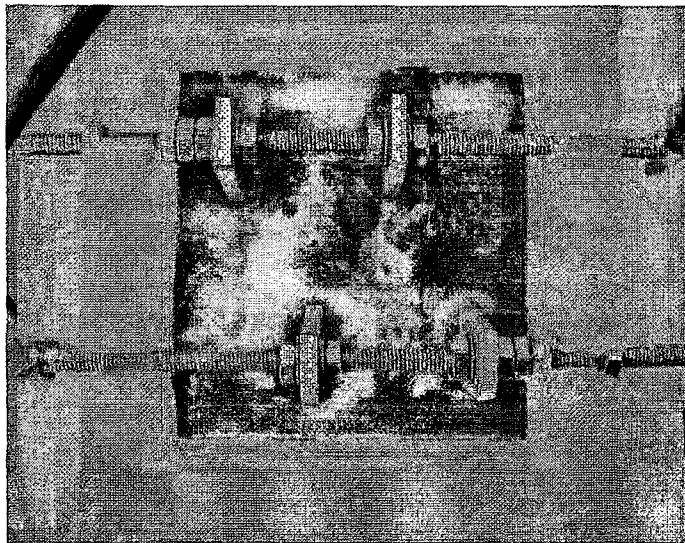
Tablo 5.11. 'de görüldüğü gibi elektrokoagülasyon yönteminde renk gidermenin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 5.25, 5.26, 5.27 'deki resimlerle gösterilmiştir. Kimyasal koagülasyonla karşılaştırma yapıldığında 86 mg eşit alüminyum dozajı için kimyasal koagülasyonla % 46.09 renk giderme verimi elde edilirken, elektrokoagülasyonla %98.25 renk giderme verimi elde edilmiştir. Ancak elektrokoagülasyonun enerji tüketimi ve bunun maliyeti göz ardı edilmemelidir. Elektrokoagülasyona yardımcı olması için elektrokoagülasyondan önce polielektrolit ilave edildiğinde; 2.5 dakikalık kısa bir süre sonunda %97.68 'lik renk giderme verimi elde edilirken, alüminyum dozajında %83 'lük bir tasarruf, enerji tüketiminde ise %85 'lik bir tasarruf sağlanmıştır. Bu durum polielektrolit ilavesinin elektrokoagülasyonun verimini nedenli arttırdığını açıkça göstermektedir.



Şekil 5.25. Elektrokoagülasyondan Önceki Görünüm



Şekil 5.26. Elektrokoagülasyondan Sonraki Görünüm



Şekil 5.27. Elektrokoagülasyonda Üste Biriken Flok Tabakası

5.1.10 Renk Giderimi Deney Sonuçları İçin Regresyon Çalışması

Renk Giderme Verimi – Zaman İlişkisi

$$R_R = \frac{C_{0R} - C_R}{C_{0R}} \quad \leftrightarrow \quad C_R = C_{0R} \cdot (1 - R_R)$$

Hız denkleminin tarifinden;

$$\frac{-dC_R}{dt} = C_{0R} \cdot \frac{dR_R}{dt} = k \cdot C_R^\alpha$$

veya

$$C_{0R} \cdot \frac{dR_R}{dt} = k \cdot C_{0R}^\alpha \cdot (1 - R_R)^\alpha$$

$$k' = k \cdot C_{0R}^{\alpha-1} \text{ alınırsa}$$

$$\frac{dR_R}{dt} = k' \cdot (1 - R_R)^\alpha$$

$$\frac{dR_R}{(1 - R_R)^\alpha} = k' dt$$

$$\int_0^1 \frac{dR_R}{(1 - R_R)^\alpha} = k' dt$$

$$(1 - R_R)^{1-\alpha} - 1 = -(1 - \alpha)k't$$

$$1 - \alpha = \beta \quad \text{alınırsa}$$

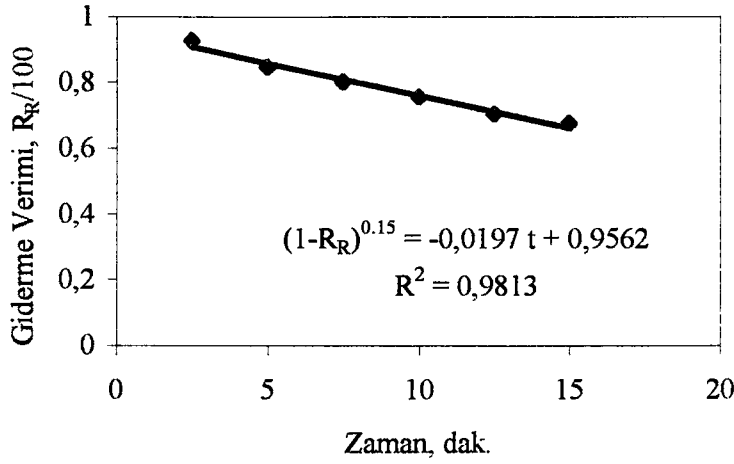
$$(1 - R_R)^\beta - 1 = -\beta \cdot k't$$

$$\beta \cdot k = k'' \quad \text{alınırsa}$$

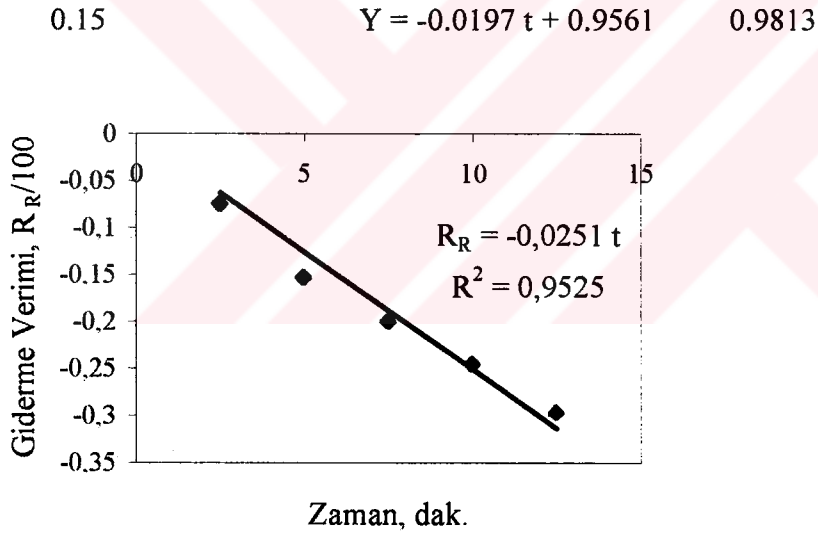
$$(1 - R_R)^\beta - 1 = -k''t$$

$$(1 - R_R)^\beta = 1 - k''t$$

β sabit seçilerek $(1-R_R)^\beta$ ya karşılık zaman konup lineer regresyon yapılırsa



Şekil 5.28. Giderme Verimi – Zaman İlişkisi (1)



Şekil 5.29. Giderme Verimi - Zaman İlişkisi (2)

$$Y = -0,0251 t$$

$$r^2 = 0,9525$$

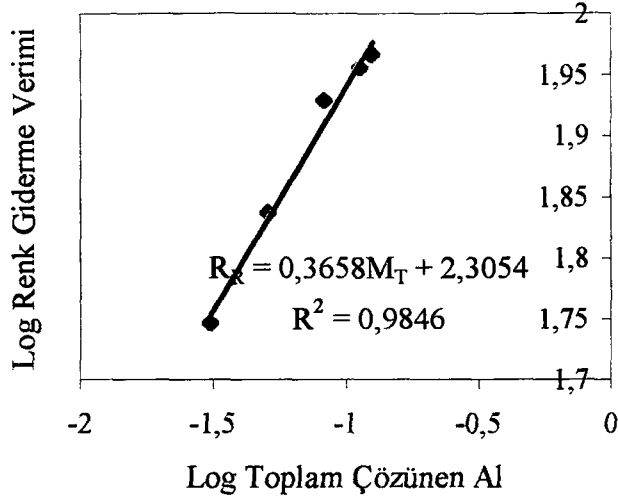
$$R_R = 1 - (1 - 0,025t)^{6,667}$$

Akım Yoğunluğu Deneylerinde Renk Gideme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi

R_R : renk giderme verimi

M_T : toplam çözünen alüminyum miktarı

log renk giderme verimi ile log w_T arasında lineer regresyon yapılırsa



Şekil 5.30. Akım Yoğunluğuna Bağlı Renk Giderme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi

$$\text{Log } R_R = 0.3658 \log (M_T) + 2.3054$$

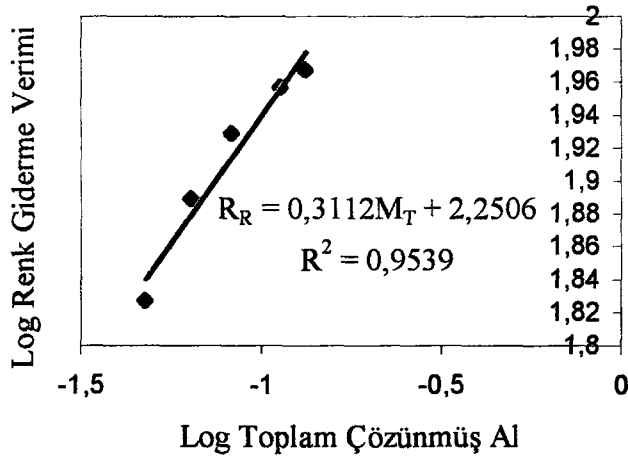
$$R_R = 202.02 \cdot M_T^{0.37}$$

Zaman Deneylerinde Renk Giderme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi

R_R : renk giderme verimi

M_T : toplam çözünen alüminyum miktarı

log renk giderme verimi ile log M_T arasında lineer regresyon yapılırsa



Şekil 5.31. Zamana Bağlı Renk Giderme Verimi – Toplam Çözünen Alüminyum İlişkisi

$$\log R_R = 0.3112 \log (M_T) + 2.2506$$

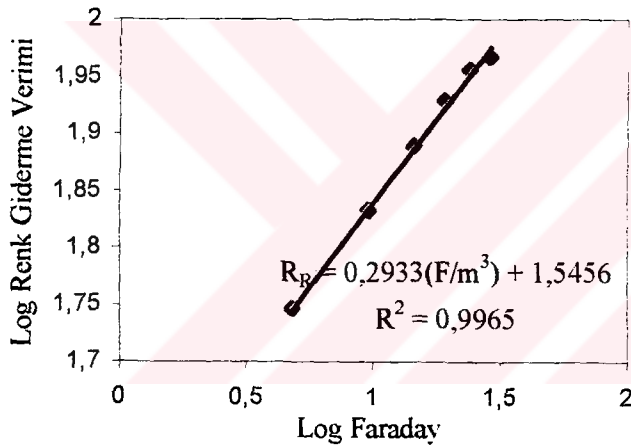
$$R_R = 178.07 \cdot M_T^{0.31}$$

Uygulanan Faraday – Renk Giderme Verimi İlişkisi

R_R : renk giderme verimi

F/m^3 : Faraday/ m^3

log renk giderme verimi ile log Faraday/ m^3 arasında lineer regresyon yapılırsa



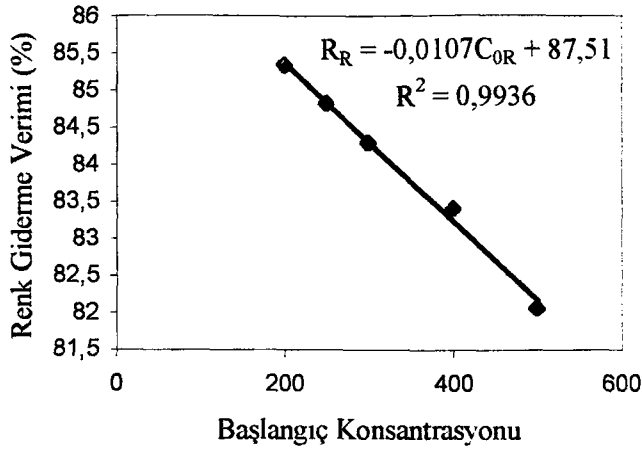
Şekil 5.32. Renk Giderme Verimi – Faraday İlişkisi

$$\log R_R = 0.2933 \log (F/m^3) + 1.5456$$

$$R_R = 35.12 \cdot (F/m^3)^{0.30}$$

Renk Giderme Verimi – Başlangıç Boya Konsantrasyonu İlişkisi

R_R : renk giderme verimi, C_{0R} : Boyanın başlangıç konsantrasyonu olmak üzere log renk giderme verimi ile log boyanın başlangıç konsantrasyonu arasında lineer regresyon yapılırsa

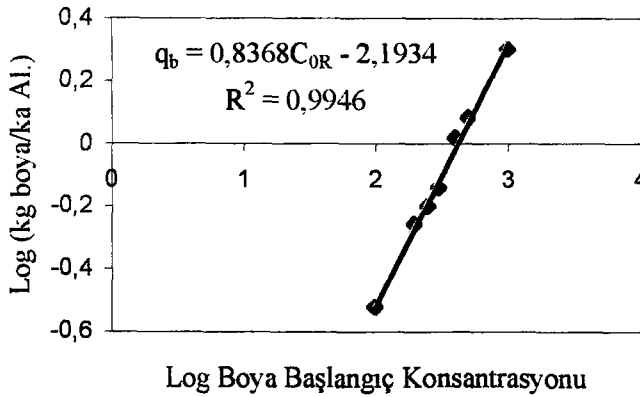


Şekil 5.33. Renk Giderme Verimi – Başlangıç Boya Konsantrasyonu İlişkisi

$$R_R = -0.0107 C_{0R} + 87.51$$

Boyanın Başlangıç Konsantrasyonu – Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesi İlişkisi

q_b : Birim alüminyum başına giderilen boya miktarı C_{0R} : Boyanın başlangıç konsantrasyonu. Log renk giderme kapasitesi ile log boyanın başlangıç konsantrasyonu arasında lineer regresyon yapılırsa:



Şekil 5.34. Alüminyumun Renk Giderme Kapasitesi – Başlangıç Boya Konsantrasyonu İlişkisi

$$\text{Log } q_b = 0.8368 \log (C_{0R}) - 2.1934$$

$$q_b = C_{0R}^{0.84} / 156.10$$

5.2. Tekstil Atıksularının Elektrokoagülasyonla Arıtımı

5.2.1. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine pH 'ın Etkisi

Atıksu pH 'sının COD ve türbidite giderme verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla deneylerden önce atıksuyun pH 'sı gerekli seviyeye ayarlanmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.12. 'de ve Şekil 5.35 'de gösterilmiştir.

Şekil 5.35. 'te pH 'daki değişiklik bölüm 5.1.1. 'de anlatılan mekanizma ile açıklanabilir, burada da (5.3)ve (5.4) nolu denklemler gerçekleşmiştir. Ancak boya çözeltilerinden farklı olarak pH 'daki değişikliklerin daha az olduğu görülmüştür bu durum atıksuyun pH tamponlama özelliğine bağlanmıştır.

Bölüm 5.1.1. genişçe anlatılmış olan alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları pH aralığına bağlı olarak monomerik ve polimerik hidroksi kompleksleri şeklinde bulundukları ve pH 4-7 aralığında polimerize olma eğiliminde oldukları. Flokülasyonun, düşük pH aralığında çökelmeyle, pH > 6.5 olduğu aralılarda adsorbsiyonla açıklandığı mekanizma burda da gerçekleşmiştir.

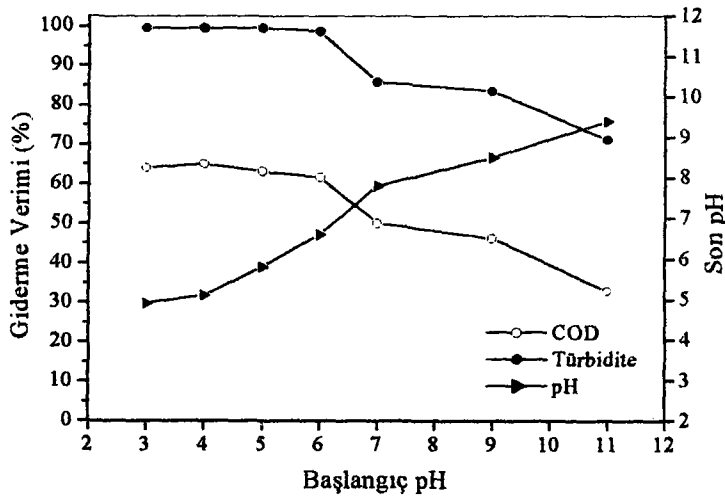
Atıksu başlangıç pH seviyesinin 3-6 aralığında olduğunda COD giderme verimini ortalama %62, türbidite giderme verimi ise ortalama %99 gibi gerçekleşmiş çıkış pH ları ise 5-6.6 aralığında artmıştır. Atıksu başlangıç pH 'sının 7 ve 9 olduğu durumda COD giderme verimleri sırasıyla %50 ve %46.19 türbidite giderme verimleri %85.79 ve %83.49 şeklinde çıkış pH 'sı ise 7.8 ve 8.5 şeklinde gerçekleşmiş ve verimde büyük bir düşüş gözlemlenmiştir bu durum alüminyum hidroksi komplekslerinin pH 4-7 aralığında polimerize olma eğiliminde olmaları. Flokülasyonun, düşük pH aralığında çökelmeyle, pH > 6.5 olduğu aralılarda adsorbsiyonla açıklandığı mekanizma açıklanmıştır. Atıksu başlangıç pH 'sının 11 olduğu durumda COD giderme verimi %32.86 türbidite giderme verimi %71.24 çıkış pH 'sı ise 11.4 şeklinde olmuştur verimdeki bu büyük düşüş (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerde kullanılan ve kirleticileri adsorbe etmekte etkili tür olan $Al(OH)_3$

yüksek pH 'dan dolayı faaliyete geçen (5.4) nolu denklem tarafından kullanılarak giderme veriminin düşmesine neden olması şeklinde açıklanmıştır.

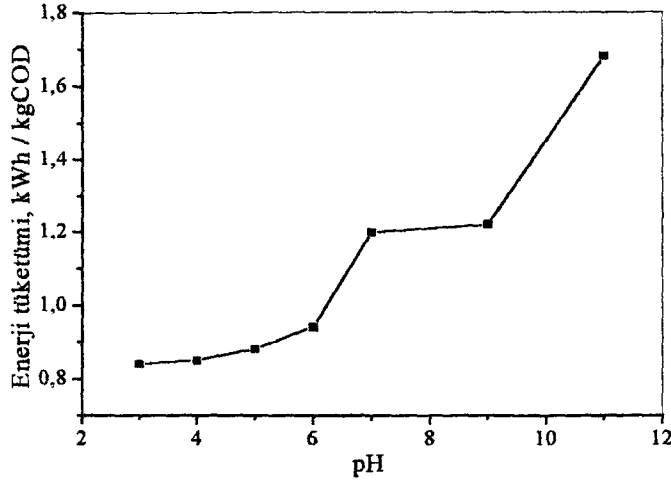
Şekil 5.36. 'de kWh/kg COD oranı incelenmiş ve atıksu başlangıç pH 'sının 6 'nın üstünde olduğu durumda COD giderme maliyetinin arttığı gözlenmiştir. Benzer şekilde atıksu başlangıç pH 'sının 6 'nın üstünde olduğu durumda çözünmüş alüminyumun COD giderme oranının düştüğü görülmektedir (Şekil 5.37).

Tablo 5.12. pH Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

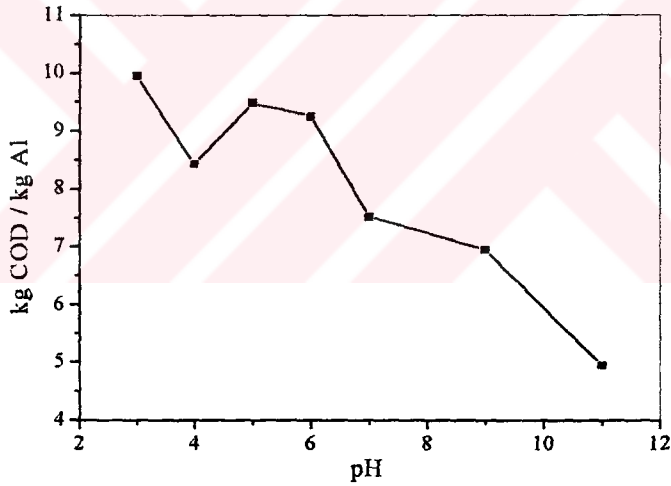
pH	3	4	5	6	7	9	11
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	3.5	3.6	3.7-3.6	3.8	4.0	3.8-3.6	3.6
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	4590	4350	4130	4010	3990	4220	4360
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	3.1-4.9	4.0-5.1	5.0-5.8	6.0-6.6	7.0-7.8	9.0-8.5	11.-11.4
Akım verimliliği (%)	123	139	118	109	118	105	104
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.055	0.066	0.057	0.057	0.057	0.057	0.057
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	220	264	228	228	228	228	228
Enerji tüketimi, Wh	0.459	0.473	0.473	0.494	0.512	0.481	0.473
Faraday (F/m^3)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
KgCOD/kg Al	9.95	8.43	9.48	9.25	7.51	6.94	4.94
KWh/kg COD	0.84	0.85	0.88	0.94	1.20	1.22	1.68
COD giderme verimi (%)	63.95	64.97	63.11	61.62	50.00	46.19	32.86
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	99.49	99.39	99.42	98.60	85.79	83.49	71.24



Şekil 5.35. pH 'ın Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.36. pH 'ın Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.37. pH 'ın Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

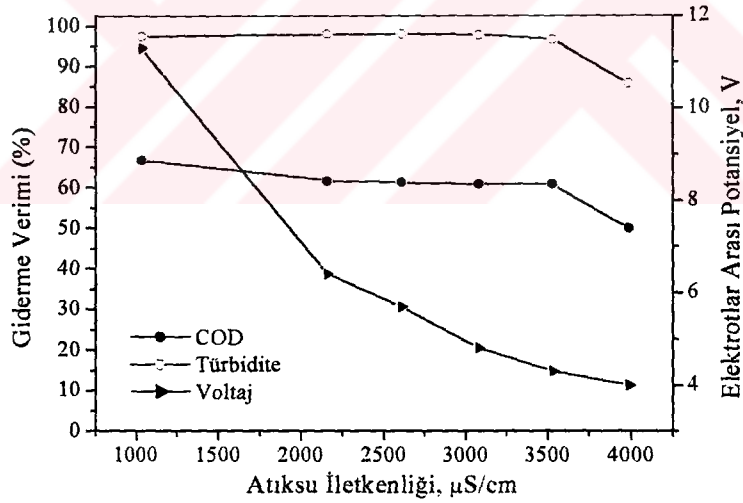
5.2.2. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine İletkenliğin Etkisi

Tekstil atıksuyunun iletkenliğinin COD ve türbidite giderme verimi üzerine etkisi araştırıldı. Bu amaçla atıksuya saf su ilave edilerek atıksuyun iletkenliği istenen seviyeye ayarlanmıştır. 1000-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında çeşitli iletkenlik değerleri için COD ve türbidite giderimi incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.13. 'de ve Şekil 5.38. 'de gösterilmiştir. Şekil 5.38. 'den görüleceği gibi 1000 ile 3500

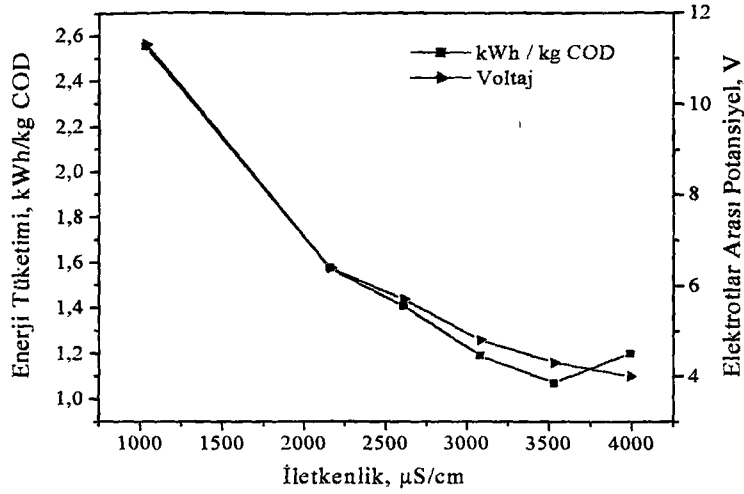
aralığında giderme veriminin biraz düştüğü görülmektedir. Buna karşılık Şekil 5.39)'dan görüleceği gibi iletkenlik COD giderme maliyetini artırdığı görülmektedir.

Tablo 5.13. İletkenlik Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Atıksu iletkenliği, $\mu\text{S}/\text{cm}$	3990	3530	3080	2610	2160	1035
Seyreltme oranı (%)	0	12.5	25	37.5	50	75
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	4.0-3.9	4.3	4.8	5.7	6.4	11-11.5
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.9-7.8	6.8-7.0	6.9-7.6	6.8-7.1	6.8-8.0	6.9-8.8
Akım verimliliği (%)	118	109	118	116	123	116
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.057	0.060	0.074	0.076	0.084	0.101
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	228	240	296	304	336	404
Enerji tüketimi, Wh	0.512	0.559	0.618	0.741	0.832	1.456
Faraday (F/m ³)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
KgCOD/kg Al	7.51	8.67	7.04	6.91	6.29	5.66
KWh/kg COD	1.20	1.07	1.19	1.41	1.58	2.55
COD giderme verimi (%)	50.00	60.80	60.83	61.31	61.69	66.79
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	85.79	96.62	97.72	97.99	97.96	97.33

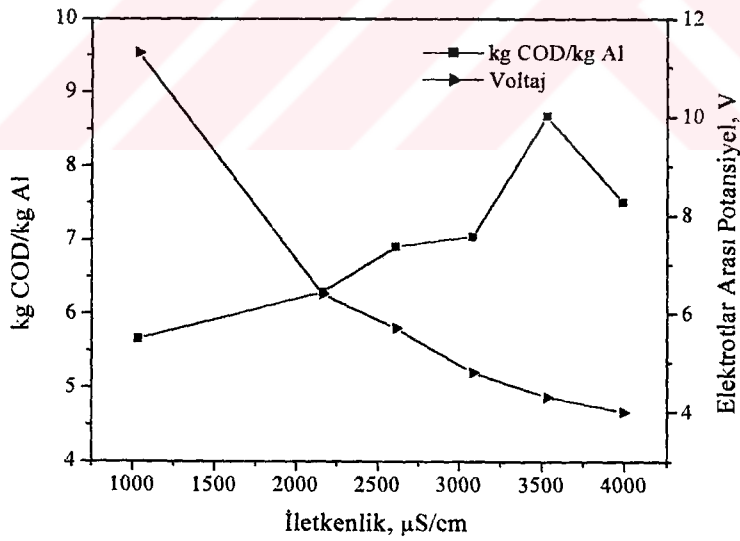


Şekil 5.38. İletkenliğin Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.39. İletkenliğin Enerji Tüketimine Etkisi

Şekil 5.40 'de görüldüğü gibi atıksu iletkenliği arttıkça Alüminyumun COD giderme kapasitesi düşmektedir.



Şekil 5.40. İletkenliğin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

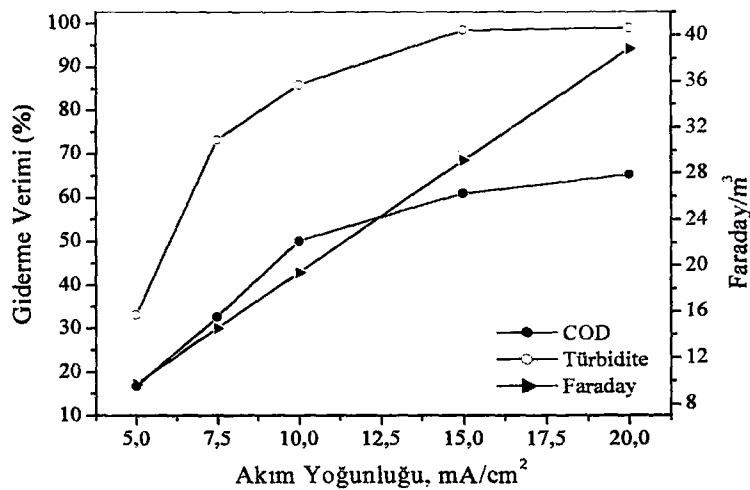
5.2.3. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğunun arıtma verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneyler sırasında elektrokoagülatöre $5\text{-}20\text{ mA/cm}^2$ aralığında çeşitli akım yoğunlukları uygulanmıştır.

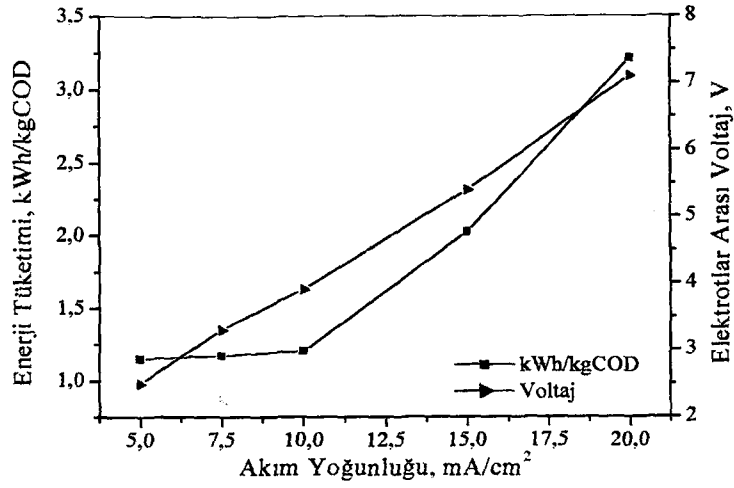
Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.14. 'de ve Şekil 5.41. 'de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi akım yoğunluğunu artırmakla giderme verimi artmaktadır. Ancak 10 mA/cm² den sonra bu artış azalmaktadır. Yine Şekil 5.42. 'da görüleceği gibi akım yoğunluğu 10 mA/cm² kadar COD giderme maliyeti çok az artarken bundan sonra hızlı bir artış göstermiştir. Ayrıca bu arıtma maliyetinin artmasının yanında Faraday kanunundan alüminyum elektrot tüketimi de artmıştır. Bu mukayeseden hareketle optimum akım yoğunluğu 10 mA/cm² alınmış ve diğer tüm deneyler bu akım yoğunluğunda yürütülmüştür.

Tablo 5.14 Akım Yoğunluğu Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Akım yoğunluğu, mA/cm ²	5	7.5	10	15	20
Akım, A	0.39	0.59	0.78	1.17	1.56
Voltaj, V	2.5	3.3	4.0-3.9	5.4	7.2-7.0
İletkenlik, µS/cm	3990	3990	3990	3990	3990
Süre, dak.	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.9-7.4	6.9-7.7	6.9-7.8	6.9-7.1	6.9-6.9
Akım verimliliği (%)	105	118	118	120	115
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.024	0.043	0.057	0.092	0.121
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	96	172	228	368	484
Enerji tüketimi, Wh	0.163	0.325	0.512	1.053	1.794
Faraday (F/m ³)	9.70	14.55	19.40	29.10	38.80
KgCOD/kg Al	5.93	6.49	7.51	5.66	4.61
KWh/kg COD	1.15	1.17	1.20	2.02	3.21
COD giderme verimi (%)	16.62	32.59	50.00	60.85	65.20
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	32.98	73.14	85.79	98.30	98.84

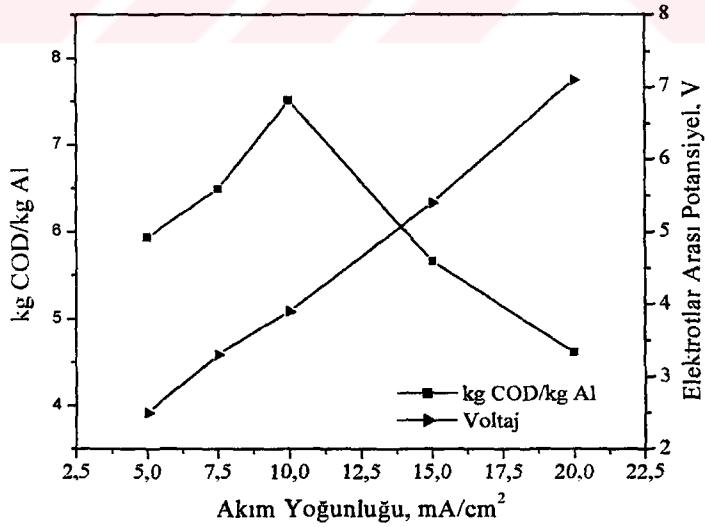


Şekil 5.41. Akım Yoğunluğunun Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.42. Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi

Şekil 5.43. 'da akım yoğunluğunun alüminyumun COD giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan akım yoğunluğunun 10 mA/cm² olduğu durumda alüminyumun giderme kapasitesinin en fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.43. Akım Yoğunluğunun Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

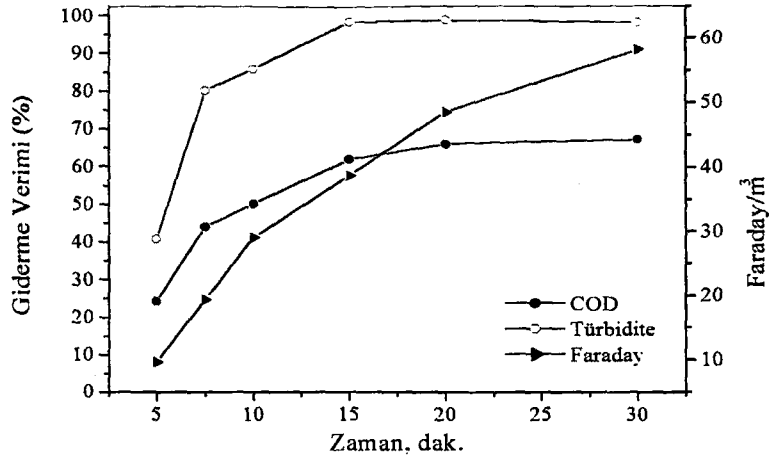
5.2.4. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Zamanın Etkisi

Arıtmanın süresinin arıtma verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 5 ila 30 dakika arasında çeşitli sürelerde yapılan deneylerde arıtma verimi araştırılmıştır. Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.15. 'de ve Şekil 5.44. 'de gösterilmiştir. Sonuçlardan zamanla giderme veriminin arttığı görülmüştür. Ancak 15. dakikadan sonra bu artış azalmaktadır. Şekil 5.45. 'den de görüleceği gibi bu dakikadan sonra arıtma maliyeti artmaktadır, ve aynı şekilde tablodan da görüleceği gibi fazladan anot tüketimi devam etmektedir. Tüm bu veriler ışığında, 15 dakikalık arıtma süresi optimum kabul edilebilir. Bu da %62.09 'luk COD giderme verimine, %98.39 'luk türbidite giderme verimine, 3.08 kWh/m³ enerji tüketimi, 1.45 kWh/kg COD, 5.59 kg COD/kg Al değerlerine denk gelmektedir.

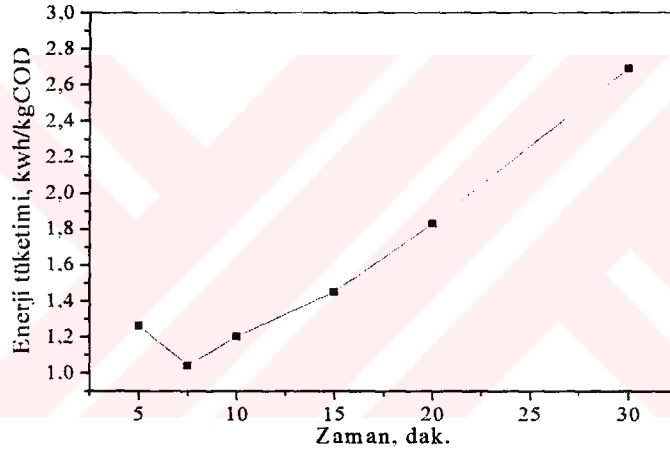
Tablo 5.15. Zaman Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

Elektrokoagülasyon süresi, dak.	5	7.5	10	15	20	30
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	4.0	4.0	4.0-3.9	4.0-3.9	4.0	4.0
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	3990	3990	3990	3990	3990	3990
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	5	7.5	10	15	20	30
Başlangıç pH- Son pH	6.9-7.4	6.9-7.7	6.9-7.8	6.9-7.3	6.9-7.4	6.9-7.4
Akım verimliliği (%)	120	118	118	122	109	114
Toplam çözünen Al miktarı, g	0.030	0.043	0.057	0.095	0.131	0.204
1 m ³ Atıksu için harcanan Al, g	120	172	228	380	524	816
Enerji tüketimi, Wh	0.260	0.390	0.512	0.770	1.030	1.545
Faraday (F/m^3)	9.70	14.55	19.40	29.10	38.80	58.20
KgCOD/kg Al	6.86	8.72	7.51	5.59	4.30	2.82
KWh/kg COD	1.26	1.04	1.20	1.45	1.83	2.69
COD giderme verimi (%)	24.04	43.80	50.00	62.09	65.81	67.13
Türbitide (NTU) giderme verimi (%)	40.67	80.02	85.79	98.39	98.74	98.07

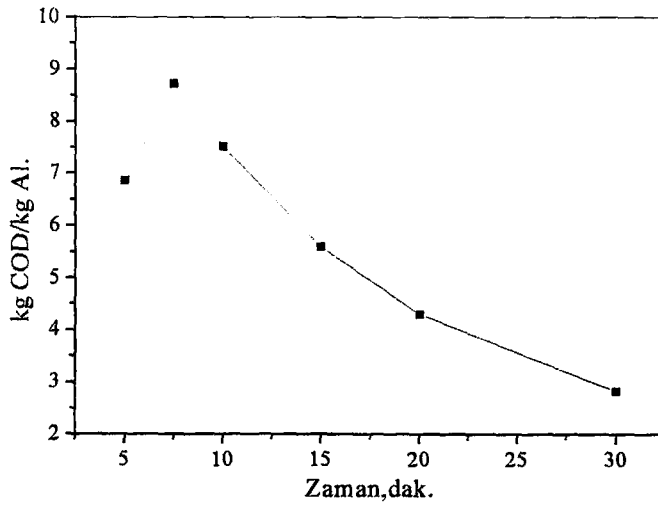
Şekil 5.46 'te görüldüğü gibi zaman geçtikçe alüminyumun COD giderme kapasitesinin düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 5.44. Zamanın Giderme Verimine Etkisi



Şekil 5.45 Zamanın Enerji Tüketimine Etkisi



Şekil 5.46. Zamanın Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

5.2.5. Tekstil Atıksuyu Arıtımı Üzerine Polielektrolit İlavesinin Etkisi

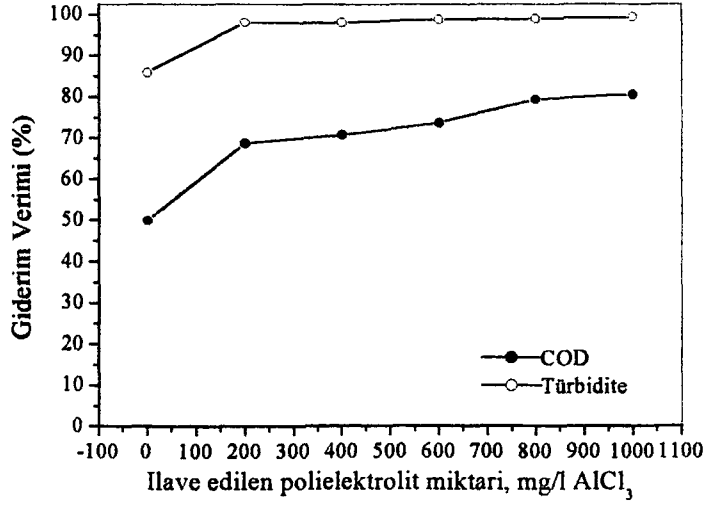
Polielektrolitler atıksuların kimyasal arıtımında sentetik koagülant olarak bolca kullanılırlar. Aynı şekilde elektrokimyasal arıtıma yardımcı olması için deneylerden önce elektrokoagülasyon hücresine az miktarlarda polielektrolit ilave edildi. Bu amaçla alüminyum sülfat ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve alüminyum klorür ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) gibi çokça kullanılan koagülantlar kullanılmıştır. Ayrıca bu farklı iki koagülant maddesinin elektrokoagülasyonun verimi üzerine ne tür etkilerinin olduğu araştırıldı. Deneyler daha önceki denemelerden elde edilen optimum akım yoğunluğu olan 10 mA/cm² ile yürütülmüştür.

5.2.5.1. Alüminyum Klorür (PAC) İlavesi Etkisi

Alüminyum klorür ilavesini elektrokoagülasyonun giderme verimi üzerine etkilerini incelemek amacıyla deneylerden öncesinde elektrokoagülasyon hücresine çeşitli miktarlarda alüminyum klorür ilave edildi. Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.16. 'da ve Şekil 5.47. 'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi alüminyum klorür ilavesinin COD ve türbidite giderme verimi üzerine oldukça etkili olduğu ve ilave edilen alüminyum klorür miktarındaki artışla bunun arttığı görülmektedir.

Tablo 5.16. PAC İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

PAC miktarı (mg/l)	0	200	400	600	800	1000
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	4.0-3.9	3.8	3.8	3.8	3.6	3.6
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	3990	4010	4050	4100	4200	4200
Akım yoğunluğu, mA/cm ²	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.9-7.8	6.3-6.4	6.0-6.1	5.3-5.5	5.2-5.4	5.0-5.0
Akım verimliliği (%)	118	118	118	112	112	114
Toplam çözünen Al, g (EK)	0.057	0.059	0.059	0.056	0.056	0.055
g Al/m ³ (EK)	228	236	236	224	224	220
Toplam çözünen Al, g (EK+K)	0.057	0.065	0.070	0.073	0.078	0.083
g Al/m ³ (EK+K)	228	260	280	292	312	332
Enerji tüketimi, Wh	0.512	0.494	0.494	0.494	0.481	0.481
Faraday (F/m ³)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
KgCOD/kg Al	7.51	9.08	8.69	8.64	8.70	8.30
KWh/kgCOD	1.20	0.84	0.81	0.78	0.71	0.70
COD giderme verimi (%)	50.00	68.91	71.02	73.70	79.25	80.50
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	85.79	98.01	98.12	98.74	98.88	99.30



Şekil 5.47 Giderme Verimine İlave Edilen PAC Miktarının Etkisi

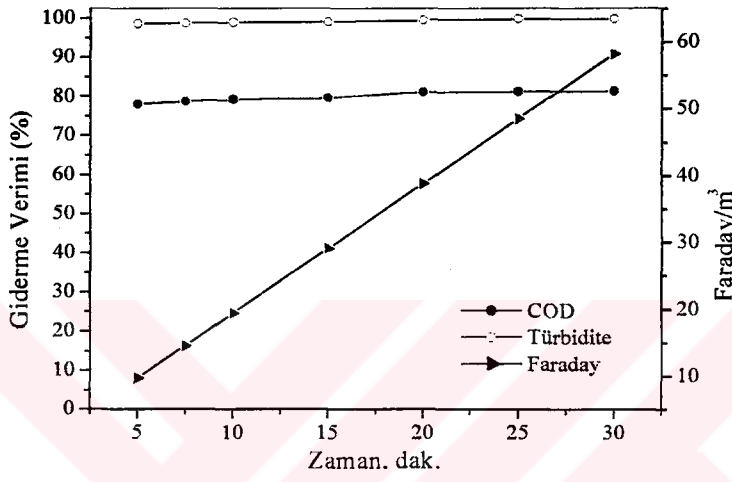
Alüminyum klorür ilavesinin elektrokoagülasyon süresi ile COD ve türbidite giderme verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla atıksu deşarj standartlarını sağlamak gerekliliği de göz önüne alınarak 800 mg/l alüminyum klorür optimum değer olarak alınmıştır.

Tablo 5.17. 800 mg/l PAC İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

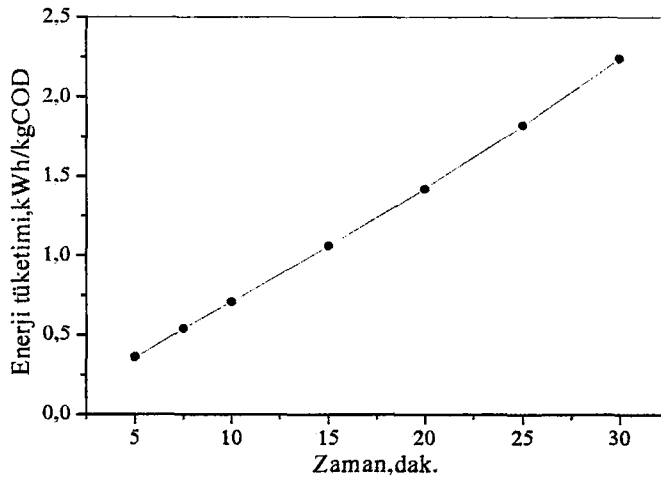
t, dak.	5	7.5	10	15	20	25	30
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	3.6	3.6	3.6	3.6-3.8	3.6-4.0	3.6-4.2	3.6-4.4
İletkenlik, $\mu S/cm$	4200	4200	4200	4200	4200	4200	4200
Süre, dak.	5	7.5	10	15	20	25	30
Başlangıç pH- Son pH	5.2-5.2	5.2-5.3	5.2-5.4	5.2-5.4	5.2-5.4	5.2-5.3	5.2-5.2
Akım verimliliği (%)	123	118	112	119	118	115	122
Toplam çözünen Al, g (EK)	0.027	0.039	0.056	0.086	0.122	0.166	0.237
gAl/m ³ (EK)	108	156	224	344	488	664	948
Toplam çözünen Al, g (E+K)	0.049	0.061	0.078	0.108	0.144	0.188	0.259
gAl/m ³ (EK+K)	196	244	312	432	576	752	1036
Enerji tüketimi, Wh	0.241	0.361	0.481	0.722	0.998	1.267	1.560
Faraday (F/m ³)	9.70	14.55	19.40	29.10	38.80	48.50	58.20
KgCOD/kg Al	13.63	11.04	8.70	6.32	4.82	3.70	2.69
KWh/kgCOD	0.36	0.54	0.71	1.06	1.42	1.82	2.24
COD giderme verimi (%)	78.00	78.65	79.25	79.70	81.10	81.20	81.35
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	98.57	98.64	98.88	98.98	99.51	99.76	99.75

Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.17. 'de ve Şekil 5.48. 'de gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi giderme veriminin zamanla çok fazla artmadığı, deneyin 5. Dakikasından itibaren COD giderme veriminin %78 'e vardığı bununda 753 mg/l COD ye tekabül ettiği ve atıksu deşarj standardını sağladığı görülmektedir. Tüm bu

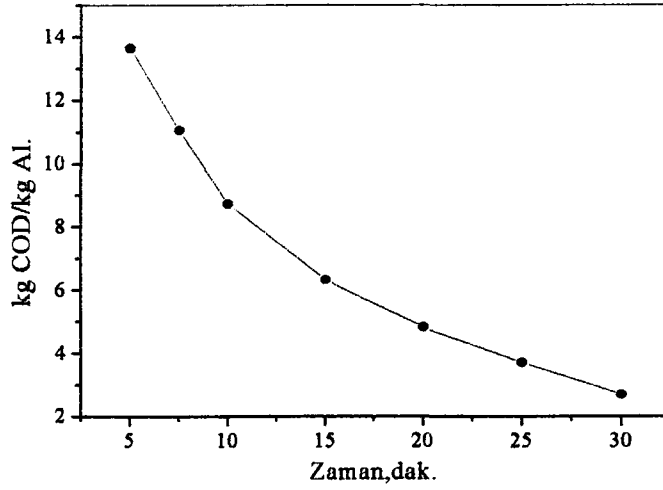
verilerden görüleceği gibi alüminyum klorür ilavesinin elektrokoagülasyonda daha kısa sürelerde daha yüksek verimler elde edilmesini sağlamış böylece enerji tüketimini oldukça düşürmüştür. COD giderimi için enerji tüketimi 5. dakikada polielektrolitsiz durumda 1.26 kWh/kg COD iken, alüminyum klorür ilaveli durumda 0.36 kWh/kg COD dir. Bu da enerji tüketiminde kg COD için yaklaşık %71 'lik bir enerji tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 5.48. Elektrokoagülasyona PAC İlavesinin Etkisi (800 mg/l)



Şekil 5.49. PAC İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi



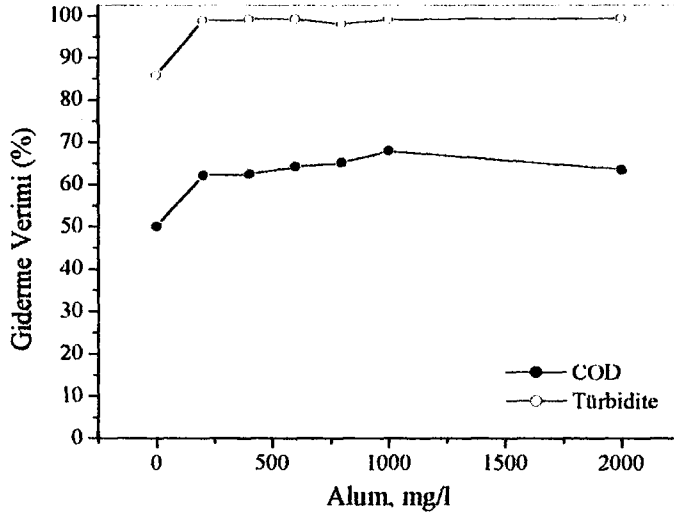
Şekil 5.50. PAC İlavesinin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

5.2.5.2. Alüm İlavesi Etkisi

Alüminyum sülfat ilavesinin elektrokoagülasyonun giderme verimi üzerine etkilerini incelemek amacıyla deneylerden önce elektrokoagülasyon hücresine çeşitli miktarlarda alüminyum sülfat ilave edildi. Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.18. 'de ve Şekil 5.51. 'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi alüminyum sülfat miktarını arttırmanın COD ve türbidite giderme veriminde etkili olduğu ancak ilave edilen alüminyum sülfat miktarındaki artışla bunun artmadığı görülmektedir.

Tablo 5.18. Alüm İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

İlave edilen alüm (mg/l)	0	200	400	600	800	1000	2000
Akım. A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	4.0-3.9	3.8	3.8	3.9	3.8	3.8	3.6
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	3990	4010	4050	4090	4100	4200	4570
Akım yoğunluğu, mA/cm^2	10	10	10	10	10	10	10
Süre, dak.	10	10	10	10	10	10	10
Başlangıç pH- Son pH	6.9-7.8	6.4-6.5	6.1-6.3	5.9-5.9	5.5-5.8	5.0-5.3	4.4-4.4
Akım verimliliği (%)	118	120	119	118	118	114	130
Toplam çözünen Al, g (EK)	0.057	0.063	0.061	0.065	0.056	0.055	0.078
g. Al/ m^3 (EK)	228	525	244	260	224	220	312
Toplam çözünen Al, g (EK+K)	0.057	0.067	0.069	0.078	0.072	0.075	0.118
g. Al/ m^3 (EK+K)	228	268	276	312	288	300	472
Enerji tüketimi, Wh	0.512	0.494	0.494	0.512	0.494	0.494	0.475
Faraday (F/m^3)	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40
KgCOD/kgAl	7.51	7.93	7.73	7.04	7.74	7.75	4.60
KWh/kg COD	1.20	0.93	0.93	0.93	0.89	0.85	0.88
COD giderme verimi (%)	50.00	62.08	62.34	64.14	65.13	67.92	63.36
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	85.79	98.83	99.12	99.12	98.00	99.02	99.30



Şekil 5.51. Giderme Verimine İlave Edilen Alum Miktarının Etkisi

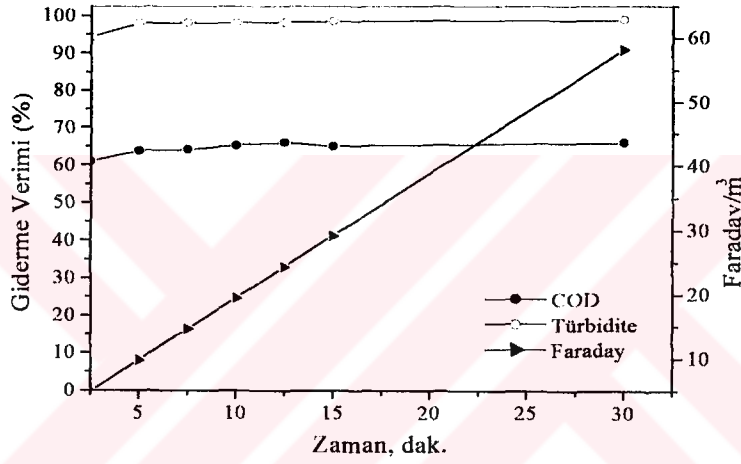
Alüminyum sülfat ilavesinin elektrokoagülasyon süresi ile COD ve türbidite giderme verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneylerde alüminyum klorür ile karşılaştırma yapılması amacıyla burada da 800 mg/l alüminyum sülfat alınmıştır. Deney şartları ve sonuçları Tablo 5.19. 'da ve Şekil 5.52. 'de gösterilmiştir.

Tablo 5.19 800 mg/l Alum İlavesi Etkisinin Araştırıldığı Deneylerin Şart ve Sonuçları

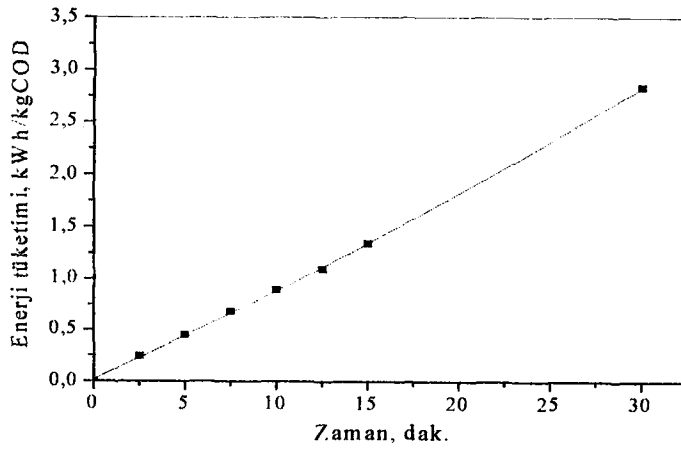
t, dak.	2.5	5	7.5	10	12.5	15	30
Akım, A	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
Voltaj, V	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8-4.4
İletkenlik, $\mu\text{S}/\text{cm}$	4100	4100	4100	4100	4100	4100	4100
Süre, dak.	2.5	5	7.5	10	12.5	15	30
Başlangıç pH- Son pH	5.5-6.3	5.5-5.9	5.5-5.9	5.5-5.8	5.5-5.9	5.5-5.7	5.5-5.1
Akım verimliliği (%)	100	123	118	122	118	118	119
Toplam çözünen Al, g (EK)	0.011	0.027	0.039	0.056	0.101	0.086	0.255
gAl/m^3 (EK)	44	108	156	224	404	344	1020
Toplam çözünen Al, g (EK+K)	0.027	0.043	0.055	0.072	0.117	0.102	0.271
$\text{g.Al}/\text{m}^3$ (EK+K)	108	172	220	288	468	408	1084
Enerji tüketimi, Wh	0.124	0.247	0.371	0.494	0.618	0.741	1.599
Faraday (F/m^3)	4.85	9.70	14.55	19.40	24.25	29.10	58.20
$\text{KgCOD}/\text{kg Al}$	19.26	12.68	9.96	7.74	4.83	5.44	2.08
KWh/kgCOD	0.24	0.45	0.68	0.89	1.09	1.34	2.83
COD giderme verimi (%)	60.75	63.68	64.00	65.13	66.01	64.85	65.96
Türbidite (NTU) giderme verimi (%)	94.12	97.95	98.07	98.00	98.25	98.42	98.85

Buradan da görüleceği gibi giderme veriminin zamanla çok fazla artmadığı, polielektrolitsiz durumdan farklı olarak gidermenin daha kısa sürelerde gerçekleştiği ancak elektrokoagülasyonun 15. Dakikasından itibaren giderme verimlerinin eşitlendiği görülebilir. Bu durumuyla deneyin 5. dakikasından itibaren COD

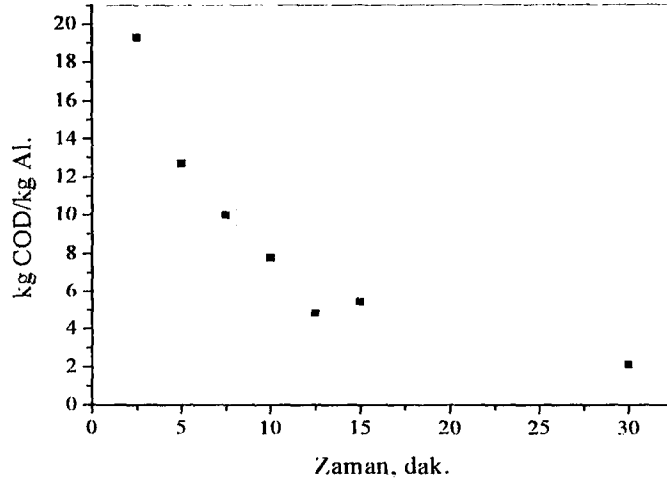
giderme veriminin %63.68 'e vardığı bundan sonraki dakikalarda da bunun çok fazla değişmediği görülmektedir. Bu durumda COD 1243 mg/l gibi değerlere düşmekte, ancak atıksu deşarj standardını sağlayamamaktadır. Tüm bu verilerden görüleceği gibi alüminyum sülfat ilavesinin elektrokoagülasyonda daha kısa sürelerde sonuca gidilmesi sağlamış böylece enerji tüketimini oldukça düşürmüştür. COD giderimi için enerji tüketimi 5. dakikada polielektrolitsiz durumda 1.26 kWh/kg COD iken, alüminyum sülfat ilaveli durumda 0.45 kWh/kg COD dir. Bu da enerji tüketiminde kg COD için yaklaşık %64 'lük bir enerji tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 5.52. Elektrokoagülasyona Alüm İlavesinin Etkisi (800 mg/l)

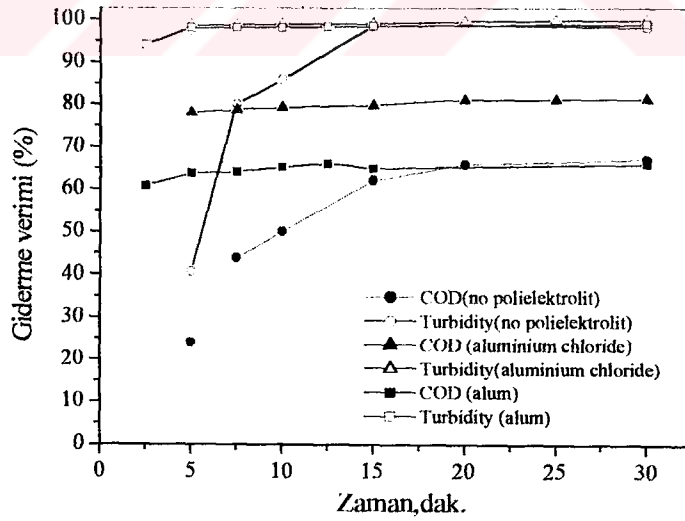


Şekil 5.53. Alüm İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

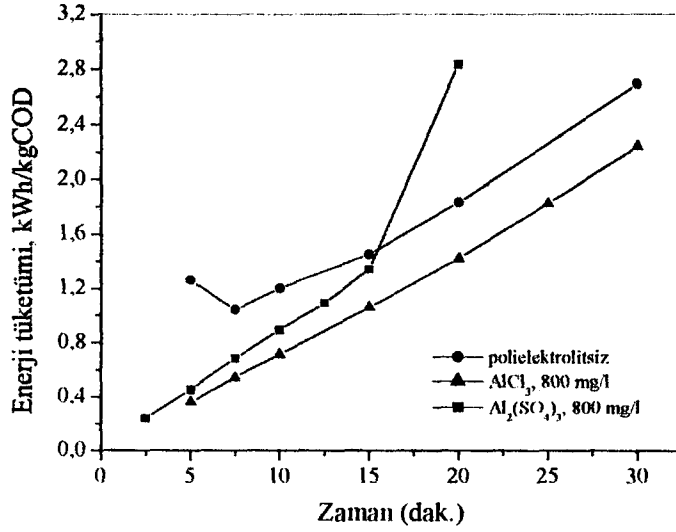


Şekil 5.54. Alum İlavesinin Alüminyumun COD Giderme Kapasitesine Etkisi

5.2.6. PAC ve Alumun Karşılaştırılması



Şekil 5.55. Polielektrolitlerin Etkisinin Karşılaştırılması (giderme verimi açısından)



Şekil 5.56. Polielektrolitlerin Etkisinin Karşılaştırılması (enerji tüketimi açısından)

Tablo 5.20. Atıksu Arıtma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney	Alüminyum Dozajı (mg/250ml)			kgCOD kgAl	kWh kgCOD	pH		Süre Dak.	COD Gid. (%)	Türb. Gid. (%)
	E.K.	K.	Top.			Baş.	Son			
E.K.	30	-	30	6.86	1.26	6.9	7.4	5	24.04	40.67
E.K.	57	-	57	7.51	1.20	6.9	7.8	10	50.00	85.79
E.K.	95	-	95	5.59	1.45	6.9	7.3	15	62.09	98.39
E.K.+ (PAC)	27	22	49	13.63	0.36	5.2	5.2	5	78.00	98.57
E.K.+ (PAC)	56	22	78	8.70	0.71	5.2	5.4	10	79.25	98.88
E.K.+ (PAC)	86	22	108	6.32	1.06	5.2	5.4	15	79.70	98.98
E.K.+ (Alum)	27	16	43	12.68	0.45	5.5	5.9	5	63.68	97.95
E.K.+ (Alum)	56	16	72	7.74	0.89	5.5	5.8	10	65.13	98.00
E.K.+ (Alum)	86	16	102	5.44	1.34	5.5	5.7	15	64.85	98.42

Şekil 5.52 'de görüldüğü gibi polielektrolit ilavesi elektrokoagülasyonda sonuca daha çabuk gidilmesini sağlamaktadır. Alüminyum klorür ilavesiyle COD giderme verimi artmıştır. Polielektrolitsiz durumda ve alum ilave edilen durumlarda COD giderimi en fazla %62 ve %65 gerçekleşirken Alüminyum klorür ilave edildiğinde %80 gibi gerçekleşmiştir. Bu durum alüminyum klorürden gelen Cl^- iyonlarının indirekt oksidasyonu sonucu OCl^- , Cl_2 gibi kimyasal oksidantları oluşturarak COD gidermesi şeklinde yorumlanmıştır. Deneylerin 5. dakikası için

durumda %24.04 COD giderimi gerçekleşirken, alüminyum klorür ilave edildiğinde %78.00, alum ilave edildiğinde %63.68 COD giderimi gerçekleşmiştir. Bu durumda giderilen kgCOD için enerji tüketimi ise; polielektrolitsiz durumda 1.26 kWh, alüminyum klorür ilave edildiğinde 0.36 kWh ve alum ilave edildiğinde 0.45 kWh şeklinde gerçekleşmiştir. Böylece Alüminyum klorür ilave edildiğinde %71 'lik, alum ilave edildiğinde %64 'lük bir enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Sonuç olarak Alüminyum klorür iştiva ettiği Cl^- iyonun oksidantları oluşturması bakımından elektrokoagölasyonda alümandan daha başarılı olmuştur.



5.3. Arıtma Maliyetlerinin Hesaplanması

Elektrokoagülasyonda harcanan elektrotlar, tüketilen elektrik ve kullanılan polielektrolit miktarları baz alınarak arıtma maliyeti tahmin edilmiştir. Maliyet hesapları yapılırken;

Alüminyum levha (hurda)	2 000 000 TL/kg
Elektrik (arıtma tesisleri için)	100 000 TL/kWh
PAC	800 000 TL/kg
Alum	300 000 TL/kg
kabul edilmiştir	

Tablo 5.21. Renk Giderme Maliyeti *

Deney	Alüminyum Dozajı (mg/250ml)		Elk. Tük.	Alüminyum mal.		Elektrik maliyeti	Toplam Maliyet	Süre	Renk Gid.
	E.K.	K.		E.K.	K.				
E.K. pH = 3	86	-	0.793	688000	-	317200	1005200	10	98.25
E.K. pH = 6	83	-	0.754	664000	-	301600	965600	10	84.82
E.K.+ (PAC)	9	3	0.165	72000	80000	66000	218000	1.0	91.31
E.K.+ (PAC)	13	3	0.244	104000	80000	97600	281600	1.5	98.89
E.K.+ (PAC)	16	3	0.328	128000	80000	131200	339200	2.0	99.92
E.K.+ (PAC)	6	3	0.060	48000	80000	24000	152000	1.25	81.57
E.K.+ (PAC)	12	3	0.120	96000	80000	48000	224000	2.5	97.68
E.K.+ (PAC)	21	3	0.237	168000	80000	94800	342800	5.0	99.22
Kimyasal koa.	-	86	-	-	2456000	-	2456000	-	46.09

* 1\$ = 1600000 TL. (28.06.2002)

Tablo 5.21. 'de görüldüğü gibi renk giderimin de kimyasal koagülasyon yeterli başarıyı sağlamamış, buna karşılık elektrokoagülasyon oldukça başarılı olmuş ve kimyasal koagülasyondan daha ekonomik olmuştur. Elektrokoagülasyonda polielektrolit kullanılması durumunda renk giderme maliyetinin oldukça düştüğü görülmektedir. Polielektrolit ilavesi elektrokoagülasyonda sonuca daha erken gidilmesini sağlamıştır, bu durum gerekli tesis alanı ihtiyacının düşmesini sağlayarak işletme maliyeti yanında ilk yatırım maliyetinin de düşürülebileceğini göstermektedir.

Tablo 5.22. Tekstil Atıksuyu Arıtma Maliyeti *

Deney	Alüminyum Dozajı (mg/250ml)		Elk. Tük.	Alüminyum mal.		Elektrik maliyeti	Toplam Maliyet	Süre	COD Gid.	Türb. Gid.
	E.K.	K.		E.K.	K.					
			E.K.	K.	Wh	TL/m ³	TL/m ³	TL/m ³	TL/m ³	Dak.
E.K.	30	-	0.260	240000	-	104000	344000	5	24.04	40.67
E.K.	57	-	0.512	456000	-	204800	660800	10	50.00	85.79
E.K.	95	-	0.770	760000	-	308000	1068000	15	62.09	98.39
E.K. + (PAC)	27	22	0.241	216000	640000	96400	952400	5	78.00	98.57
E.K. + (PAC)	56	22	0.481	448000	640000	192400	1280400	10	79.25	98.88
E.K. + (PAC)	86	22	0.722	688000	640000	288800	1616800	15	79.70	98.98
E.K. + (Alum)	27	16	0.247	216000	240000	98800	554800	5	63.68	97.95
E.K. + (Alum)	56	16	0.494	448000	240000	197600	885600	10	65.13	98.00
E.K. + (Alum)	86	16	0.741	688000	240000	296400	1224400	15	64.85	98.42

* 1\$ = 1600000 TL. (28.06.2002)

Tablo 5.22. 'den de görüldüğü gibi alum kullanıldığı durumda COD giderme verimi polielektrolitsiz duruma göre aynı kalırken arıtma maliyeti yaklaşık %50 azalmaktadır. PAC kullanıldığı durumda COD giderme verimi polielektrolitsiz duruma göre %62 'den %78 'e artarken, arıtma maliyetinin yaklaşık %10 azaldığı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Boya Çözeltisi :

Remazol Red RB 133 boyasının elektrokoagülasyon çalışmalarında başlangıç pH' sı 3 için %98.25 renk giderme verimi elde edilirken, pH 11 için %41.49 elde edilmektedir. Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotlar kullanıldığında pH 1 etkileyen önemli iki mekanizma; katotta oluşan OH^- iyonları ile pH ta artışa ve pH 9' un üstündeki pH değerlerinde $\text{Al}(\text{OH})_3$ üretimi için OH^- iyonlarının tüketilmesi pH ta azalışa neden olmaktadır. Böylece reaksiyon süresi boyunca artan veya azalan bir pH aralığı söz konusu olmaktadır. Renk giderme verimi açısından alüminyumun monomerik türlerinin çökelme aralığı pH 4-5 ve polimerik türlerinin çökelme aralığı pH 5-6 aralığını kapsayacak pH 4-6 aralığın renk giderme verimi açısından en iyi pH aralığı olduğu görülmektedir.

İletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalması sonucu anodik oksidasyon azalmakta ve renk giderme veriminde düşüş gözlenmekte iletkenlik 250 den 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e artarken elektrotlar arasındaki potansiyel 31.9 'dan 3.4 V 'a azalmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak renk giderme verimi değerlendirildiğinde; 31.9-4.7 V aralığındaki düşüşle birlikte renk giderme veriminde düşüş, %94 ten %72.28 'e, 4.7 V 'un altındaki değerlerde bu düşüşün bir dengeye vardığı, %72.28-%73 görülmektedir.

Karıştırma hızının alüminyum hidroksit türlerinin çözelti içinde homojen dispersiyonu, kolloidlerle çarpışma sayısının artması ve oluşan flokların büyümesi açısından önemli olduğu görülmüştür. Ancak yüksek miktardaki karıştırma hızları flok yapısının bozulup dağılmasına neden olabilmektedir. Renk giderme deneylerinde 200 rpm karıştırma hızında %84.82 bunun üstündeki hızlarda verimin %81.09 'a kadar düştüğü görülmüştür.

Akım yoğunluğu ve elektrokoagülasyon süresinin giderme verimi üzerine etkilerinin aynı olduğu, akım yoğunluğu veya zamanı artırmanın verimi arttırdığı ancak bir noktadan sonra bunun bir dengeye vardığı görülmüştür. Sonuçta bu her iki parametreyle çözünen alüminyum konsantrasyonu kontrol edilmektedir. Bu durum

akımın ve zamanın birlikte ifade edildiği tek parametreyi Faraday 'ı önemli kılmaktadır. Akım yoğunluğu ve zaman deneyleri sonuçlarından görüleceği gibi eşit Faraday için aynı renk giderme verimleri elde edilmiştir. Ancak optimum Faraday belirlenirken düşük akım yoğunluğu uzun elektrokoagülasyon süresi seçildiğinde enerji tüketimi azalacağı için işletme maliyetinin düşeceği, bekleme süresi arttığı için ilk yatırım maliyetinin artacağı düşünülmelidir.

Genel bir ifadeyle sabit elektrokoagülasyon şartlarında renk giderme verimi boya konsantrasyonu arttıkça düşmektedir. Boya konsantrasyonu arttırıldığı zaman boyanın koagülasyonu için gerekli koagülant türlerinin miktarı da arttırılmalıdır.

Elektrokoagülasyona yardımcı olması amacıyla polielektrolit kullanılması durumunda, daha kısa sürelerde yüksek renk giderme verimleri elde edilirken, alüminyum tüketiminde %83 'lük, enerji tüketiminde ise %85 'lik tasarruf elde edilmiştir. Polielektrolitlerin elektrokoagülasyondaki bir diğer faydası, pH 'ı düşürmeleridir, böylece elektrokoagülasyon sırasındaki pH artışı yavaşlatılmış olmakta ve istenen optimum pH aralığı büyük ölçüde sağlanmış olacaktır.

Tekstil Atıksuları:

Tekstil atıksuyunun Elektrokoagülasyonu çalışmalarında pH, boyar madde renk giderimi deneylerinde olduğu gibi elektrokoagülasyonunun verimi üzerine oldukça etkili olmuştur. Renk giderme deneylerinde anlatılan pH artış-azalış mekanizması atıksu deneyleri için de gerçekleşmiş ancak burada atıksuyun pH nötralizasyonu karakterinden dolayı artış ve azalış miktarları daha az olmuş hatta pH 11 'de azalış olmayıp küçük bir artış olmuştur. Bu durum atıksuyun özelliğine bağlanmıştır.

Yukarıda anlatılan monomerik ve polimerik Al türlerinin etkili olduğu pH 4-6 aralığı burada da kendisini göstermiştir. Başlangıç ve bitiş pH aralığı 3-6.6 olduğu elektrokoagülasyon deneylerinde COD ve türbidite giderme verimleri sırasıyla %62 ve %99 gibi gerçekleşirken pH 11-11.4 aralığında COD ve renk giderme verimleri %33 ve %71 gibi gerçekleşmiştir.

Tekstil atıksuyunun iletkenliğinin COD ve türbidite giderme verimi üzerine çok büyük etkisinin olmadığı görülmüştür. 1000 ile 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığında COD ve renk giderme veriminin pek fazla değişmediği, 3500-4000 aralığında giderme veriminin biraz düştüğü görülmektedir.

Akım yoğunluğu ve zamanın atıksudan COD ve türbidite gidermedeki etkisi, renk giderme deneylerinde olduğu gibidir. Akım yoğunluğu veya zamanı arttırmanın verimi arttırdığı ancak bir noktadan sonra bunun bir dengeye vardığı görülmektedir. Sonuçta bu her iki parametreyle çözünen alüminyum konsantrasyonu kontrol edilmektedir. Bu durum akımın ve zamanın birlikte ifade edildiği tek parametreyi Faraday 'ı önemli kılmaktadır. Akım yoğunluğunu ve zaman deney sonuçlarından görüleceği gibi eşit Faraday için aşağı yukarı eşit giderme verimleri elde edilmiştir. Ancak optimum Faraday belirlenirken düşük akım yoğunluğu, uzun elektrokoagülasyon süresi seçildiğinde enerji tüketimi azalacağı için işletme maliyetinin düşeceği, bekleme süresi arttığı için ilk yatırım maliyetinin artacağı düşünülmelidir.

Polielektrolit ilavesi elektrokoagülasyonda sonuca daha çabuk gidilmesini sağlamaktadır. Alüminyum klorür ilavesiyle COD giderme verimi artmıştır. Polielektrolitsiz durumda ve alum ilave edilen durumlarda COD giderimi en fazla %62 ve %65 gerçekleşirken Alüminyum klorür ilave edildiğinde %80 gibi gerçekleşmiştir. Bu durum alüminyum klorürden gelen Cl^- iyonlarının oksidantları oluşturmaya bağlanmıştır. Bu bakımdan elektrokoagülasyonda polielektrolit kullanılmı gerektiğinde alüminyum klorür aluma tercih edilmelidir.

Öneriler:

- Farklı türdeki boyalar ve farklı özellikteki tekstil atıksuları için elektrokoagülasyon araştırılmalıdır.
- Farklı türde elektrotlar (demir anot katot, demir anot alüminyum katot, alüminyum anot demir katot) için elektrokoagülasyonun verimi araştırılabilir.
- Değişik Elektrokoagülasyon reaktörleri (seri bağlı monopolar, paralel bağlı bipolar) için verim araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tünay, O., Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, İTÜ Yayınları, İstanbul, (1996)
- [2] Yokovlev, S. V., Krosnoboradko, S. G. and Svetoshova, E. S., Electrochemical Decolourization of Organic Dye Containing Wastewaters, *Khim Tekhnol Vody*. 10 (37), 226. (1988)
- [3] Naumezyk, J., Szpyrkowicz, L. and Zilio-Grandi, F., Electrochemical Treatment of Textile Wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, 11, 17-24, (1994)
- [4] Özcan, Y., Tekstil Elyaf Boyama Tekniği, İ.Ü. Yayınları, Kimya Fakültesi Fatih Yayınevi Matbaası, İstanbul, (1978)
- [5] Arıcı, Y., Tekstil Endüstrisinde Reaktif Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi İle Giderilmesi, *Yük. Lis. Tezi*, İTÜ Çevre Müh. A.B.D., İstanbul, (2000)
- [6] Gezerger Asma, S., Tekstil Sanayi Atıksularının Arıtılması Üzerine Bir Araştırma, *Yük. Lis. Tezi*, GYTE Çevre Müh. A.B.D., Gebze, (1998)
- [7] Lin SH, Peng CF. Treatment of textile wastewater by electrochemical method. *Water Res*; 28:277-82. (1994)
- [8] Buckley, C.A., Membrane Technology For The Treatment Of Dyehouse Effluents. *Water Sci. And Tech.*, V.25, n.10. (1992)
- [9] Su Kirlenmesi Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı:19919, 4 Eylül (1988)
- [10] İSKİ atıksuların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliği, (1997)
- [11] Pagga, U., Brown, DC., The Degradation of Dyestuffs-Part II: Behaviour of Dyestuffs in Aerobic Biodegradation Test, *Chemosphere*, 15(4), 479, (1986)

- [12] Pagga, U., Taeger, K., Development of a method for Adsorption of Dyestuffs on Activated Sludge, *Wat. Res.* 28(5), 1051, (1994)
- [13] Owen, WF., Stuckey, DC., Healy, JB., Young, LY., Mc Carty, PL., Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity, *Wat. Res.*, 13, 483-92, (1979)
- [14] Laszlo, JA., Removing Acid Dyes from Textile Wastewater Using Biomass for Decolorization, *American Dyestuff Reporter*, 83(8), 17, (1994)
- [15] Carliell, CM., Barclay, SJ., Naidoo, N., Buckley, CA., Mulholland, DA., Senior, E., Anaerobic Decolorisation of Reactive Dyes in Conventional Sewage Treatment Processes. *Water SA*, 20(4), 47, (1994)
- [16] Hu, TL., Decolourization of Reactive Azo Dyes by Transformation with *Pseudomonas Luteola*, *Bioresource Technology*, 49,47,(1994)
- [17] Başıbüyük, M., Yüceer, A., Yılmaz, T., Tekstil Atıksularında Renk Giderilmesinde Kullanılan İleri Teknolojiler, *Kayseri I. Atıksu Sempozyumu*, S. 82-86, Kayseri, (1998)
- [18] Takımcı, F., Azo Boyası İçeren Tekstil Atıksuyunun Anaerobik Olarak Arıtılması ve Renk Giderimi, *Yük. Lis. Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul, (1996)
- [19] Shu, H.Y., and Huang, C.R., Ultraviolet Enhanced Oxidation for Color Removal of Azo Dye Wastewater, *American Dyestuff Reporter*, 30-34, (1995)
- [20] Namboodri, C.G., Perkins, W, and Walsh, W. K., Decolorizing Dyes with Chlorine and Ozone-Part II. *American Dyestuff Reporter*, 83 (4), 17, (1994)

- [21] Gregor, K.H. and Schwarzer, H., Oxidative Decolourization of Textile Wastewater with Advanced Oxidation Processes, *A paper presented at symposium, Varstvo voda in ciscenje odpadnih voda*, Portoroz, (1993)
- [22] Pittroff, M, Gregor, KH., Decolorisation of Waste Waters by UV-Radiation with Hidrogen Peroxside, *Melliand English 6, Translation of Melliand Textilberichte* 73,526, (1992)
- [23] Strickland, AF., Perkins, WS., Decoloration of Continuous Dyeing Wastewater by Ozonation, *Textile Chemist and Clorist*, 27(5), 11, (1995)
- [24] Namboodri, CG., Walsh, WK., Ultraviolet Light/Hidrogen Peroxide System for Decolorizing Spent Reaktive Dyebath Waste Water, *American Dyestuff Reporter*, 15, (1996)
- [25] Ölmez, T., Tekstil Endüstrisinde Reaktif Banyolarda Ozon ile Renk Giderimi, *Yük. Lis. Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul, (1999)
- [26] Külünk, A., Tekstil Endüstrisinde Asit Boyarmaddelerden Kaynaklanan Rengin Fenton Prosesi ile Giderilmesi, *Yük. Lis. Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul, (2000)
- [27] Kural, E., Tekstil Boyahane Atıksularının Nanofiltrasyon Membranları ile Geri Kazanımı ve Renk Giderimi, *Yük. Lis. Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul, (2000)
- [28] Yalçın, F., Membran Proseslerle Endüstriyel Atıksularda Renk Giderimi, *Yük. Lis. Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul, (1998)
- [29] Keskinler, B., Çakıcı, A., Yıldız, E., Çevre Mühendisliği Temel İşlemler ve Prosesler, Atatürk Üniv. Müh. Fak. Çev. Müh. Böl. Ders Notları Sayı No:35, Erzurum, (1994)

- [30] Pletcher, D. And Walsh FC., *Industrial Electrochemistry*, The Universty Press, Cambridge, (1990)
- [31] Rajeshwar K., Ibanez JG., Swai GM., Electrochemistry and the environment. *Journal of Applied Electrochemistry*; 24:1077-91. (1994)
- [32] Scott, K., *Electrochemical Processes For Clean Technology*. University of Newcastle upon Tyne, (1995)
- [33] Pulgarin, J., Adler, N., Peringer, P., Commnellis, C., Electrochemical Detoxification of A 1,4 – Benzoquinone Solution in Wastewater Treatment., *Wat. Res.* 28, 4, 887-93, (1994)
- [34] Szpyrkowicz, I., Naumcazyk, J., Zilio Grandi F., Electrochemical Treatment of Tannery Wastewater., *Wat. Res.*, 29, 2, 517-24, (1995)
- [35] Vlyssides, AG., Karlis, PK., Zorpas, AA., Electrochemikal Oxidation of Noncyanide Strippers Wastes. *Environmental International*., 25, 5, 663-70, (1999)
- [36] Vlyssides, AG., Papaioannou, D., Laizidoy, M., Karlis, PK., Zorpas, AA., Testing an Electrochemical Method for Treatmant of Textile Dye Wastewater., *Waste Management*., 20, 569-74, (2000)
- [37] Vlyssides, A., Karlis, P., Laizidoy, M., Zorpas, A., Arapoglou, D., Treatment of Leachate from a domestic solid Waste Sanitary Landfill By an Electrolysis System., *Environmental Tech.*, 22, 1467-76, (2001)
- [38] Ögütveren, Ü.B., Koparal, S., Electrochemical Treatment of Water Containing Dye-Substs: Anodic Oxidation of Congo Red and Xiron Blau 2RHD, *Journal of Environmental Studies*, Vol.42, pp. 41-52. (1992)

- [39] Romanov, A., Kobya, M., Dimoğlu, A., Atıksulardaki Kolloidal Partiküllerin Elektroflotokoagülasyonla Giderimi, *İTÜ 7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu 2000*, S. 67-74, İstanbul, (2000)
- [40] Müller K., Electroflotation from the double layer to troubled waters, in Oliver J., Murphy et al. (eds.), *Electrochemistry in Transition*, Plenum Press, New York, USA. (1992)
- [41] Matis, K. A. And Zouboulis, A.I., Electrolytic Flotation: An Unconventional Technique, *Flotation Science and Engineering*, University of Newcastle upon Tyne, (1995)
- [42] Balasubramanian, N., Madhavan, K., Arsenic Removal from Industrial Effluent Through Electrocoagulation., *Chem. Eng. Tech.*, 24, 5, 519-21, (2001)
- [43] Mollah, MYA., Schennach, R., Parga, JR., Cocke, DL., Elektrocoagulation (EC)-Science and Applications, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41, (2001)
- [44] Chen, G., Chen, X., and Yue, PL., Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater. *Journal of Environmental Engineering.*, Vol. 126, No. 9, (2000).
- [45] Ciorba, GA., Radovan, C., Vlaicu, I., Pitulice, L., Correlation Between Organic Component and Electrode material: Consequences on Removal of Surfactants from Wastewater. *Electrochimica Acta.*, 46, 297-303, (2000)
- [46] Do, J.-S., Chen, M.-L., Decolourization of dye-containing solutions by electrocoagulation., *Journal of Applied Electrochemistry.*, 24, 785-790. (1994)



- [47] Benefield, LD., Judkins, JF, Jr, Weand, LB., *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment*, Pretice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey 07632; (1982)
- [48] Rebhun, M., Lurie, M., Control of Organic Matter by Coagulation and Floc Separation. *Wat. Sci. Tech.* 27,1-20, (1993)
- [49] APHA, AWWA, WPCF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Edition, American public Health Association, Washington D. C., (1995)
- [50] Chen, G., Chen, X., and Yue, PL., Separation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. *Seperation and Purification Technology*, 19. 65-76 (2000)
- [51] Picard, T., Cathalifaund-Feuillade, G., Mazet, M., Vandensteendam, C., Cathodic Dissolution in the Electrocoagulation Process Using Aluminium Electrodes, *J. Environ. Monit.*, 2, 77-80. (2000).
- [52] Johnson, PN., Amirtharajah, A., Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants. *J. AWWA* 5, 232-39, (1983)
- [53] Gürses, G., Yalcin, M., Dogan, C., Electrocoagulation of Some Reactive Dyes: A Stastical Investigation of Some Electrochemical Variables, *Waste Management*, 22, 491-99. (2002).
- [54] Ögütveren, BÜ., Gönen, N., Koparal, S. Removal of Dye Stuffs from Wastewater: Electrocoagulation of Acilan Blau Using Soluble Anode, *Journal of Environmental Science and Health*, A27(5), 1237-47, (1992)



ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Adıyaman 'ın Kahta ilçesinde doğan Orhan Taner CAN, ilk ve orta Öğrenimini Kahta 'da tamamladı. 1998 yılında Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 1999 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen aynı bölümde öğrenimine devam etmektedir.

