

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYONLA ARITILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çev.Müh. B. Nihan GÜR

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet İŞLEYEN

Ocak 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON İLE ARITILABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çev.Müh. B.Nihan GÜR

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 21 / 01 /2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Yrd. Doç. Dr.
Mehmet İŞLEYEN
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
İ. Ayhan ŞENGİL
Üye**

**Yrd. Doç. Dr.
Abdil ÖZDEMİR
Üye**

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezimin hazırlanması süresince her türlü yardım ve fedakarlığı gösteren, değerli fikirleriyle beni her zaman destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet İŞLEYEN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Lisans ve Yüksek Lisans eğitimlerim sırasında bilgilerini bizden esirgemeyen, bizlere yakın ilgi ve alaka gösteren, Çevre Mühendisliği Bölümü' nün kıymetli hocalarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan, laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nden Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet KOBYA' ya teşekkür ederim.

Yüksek Lisans çalışmam süresince, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, bana çalışma hırsı aşıl原因an anneme ve en zor zamanlarımda yanımda olan başta Ezgi Oğur olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

B. Nihan GÜR

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------|------|
| TEŞEKKÜR..... | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | vi |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | ix |
| ÖZET..... | x |
| SUMMARY..... | xi |

BÖLÜM 1.

| | |
|------------|---|
| GİRİŞ..... | 1 |
|------------|---|

BÖLÜM 2.

| | |
|--|---|
| TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ | 2 |
| 2.1. Boyar Maddeler..... | 2 |
| 2.2. Boyar Maddelerin Sınıflandırılması..... | 2 |
| 2.2.1. Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırma..... | 2 |
| 2.2.2. Kimyasal yapısına göre sınıflandırma..... | 2 |
| 2.2.3. Boyama özelliklerine göre sınıflandırma..... | 3 |
| 2.3. Boyama Atıksularının Özellikleri..... | 3 |
| 2.4. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler..... | 4 |
| 2.4.1. Biyolojik oksidasyon..... | 4 |
| 2.4.2. Kimyasal oksidasyon..... | 4 |
| 2.4.3. Kimyasal indirgeme ile arıtımı..... | 5 |
| 2.4.4. Membran proseslere arıtımı..... | 5 |
| 2.4.5. Adsorpsiyon ile arıtımı..... | 5 |
| 2.4.6. Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon ile arıtımı..... | 5 |

BÖLÜM 3.

| | |
|--|----|
| ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESLERİ | 7 |
| 3.1. Elektrokimyasal Prosesin Esasları..... | 7 |
| 3.1.1. Faraday kanunu ve akım verimi..... | 9 |
| 3.2. Elektrokoagülasyon Teknolojisi..... | 10 |
| 3.3. Elektrokoagülasyon Teorisi..... | 13 |
| 3.4. Elektrokoagülasyon Avantaj ve Dezavantajları..... | 14 |
| 3.5. Elektrokoagülasyon Uygulama ve Prosesleri..... | 16 |

BÖLÜM 4.

| | |
|---|----|
| MATERYAL VE METOD..... | 17 |
| 4.1. Materyal..... | 17 |
| 4.2. Deney Düzenegi..... | 17 |
| 4.3. Deneysel İşlem..... | 18 |
| 4.4. Analitik Metod..... | 19 |
| 4.4.1. Boya konsantrasyonunun belirlenmesi..... | 19 |
| 4.4.2. Kullanılan eşitlikler..... | 21 |

BÖLÜM 5.

| | |
|--|----|
| DENEYSEL SONUÇLAR..... | 23 |
| 5.1. Boya Çözeltisinin Alüminyum Elektrot ile Elektrokoagülasyonu..... | 23 |
| 5.1.1. Elektrokoagülasyon üzerine pH'ın etkisi..... | 23 |
| 5.1.2. Elektrokoagülasyon üzerine iletkenliğin etkisi..... | 28 |
| 5.1.3. Elektrokoagülasyon üzerine akım yoğunluğunun etkisi..... | 31 |
| 5.1.4. Elektrokoagülasyon üzerine zamanın etkisi..... | 33 |
| 5.1.5. Elektrokoagülasyon üzerine boya konsantrasyonunun etkisi..... | 36 |

BÖLÜM 6.

| | |
|----------------------------|----|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 39 |
| 6.1. Sonuçlar..... | 39 |
| 6.2. Öneriler..... | 40 |

| | |
|----------------|----|
| KAYNAKLAR..... | 41 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 43 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|------------------|---|
| A | : Aktif anot yüzey alanı |
| AC | : Alternatif akım |
| AKM | : Askıda katı madde |
| BOI ₅ | : Biyolojik oksijen ihtiyacı |
| C _o | : Boyanın deneye başlangıç konsantrasyonu |
| C _s | : Boyanın deneyden sonraki konsantrasyonu |
| CE | :Faraday değerindeki kayıp veya akım verimi |
| CI | :Colour index |
| COD | :Kimyasal oksijen ihtiyacı |
| ÇO | :Çözünmüş oksijen |
| DC | :Direkt akım |
| E | :Akım verimi |
| <i>E</i> | :Elektrik enerjisi |
| F | :Faraday sabiti ve 96485 C/mol |
| I | :Akım şiddeti |
| I _j | :Bir elektrottaki toplam akım |
| J | :Akım yoğunluğu |
| M | :Teorik olarak çözünen metalin (mol olarak) miktarı |
| m _{act} | :Pratikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı |
| M _A | :Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı |
| M _{Ate} | :Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı |
| M _K | :Pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı |
| M _T | :Toplam çözünen alüminyum miktarı |
| MA | :Molekül ağırlığı |
| N | :Çözünen metalin tesir değeri |
| pH | :Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonu |

| | |
|----------------|--|
| q | :Akımın miktarı (yük) |
| q _b | :Birim alüminyum başına giderilen boya miktarı |
| q _p | :Oluşan ürünün harcadığı yük |
| q _T | :Toplam harcanan yük değerini |
| R | :Boya giderme verimi |
| T | :Sıcaklık |
| t | :Zaman |
| V | :Volt |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 3.1. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü..... | 9 |
| Şekil 3.2. Paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü..... | 11 |
| Şekil 3.3. Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü..... | 12 |
| Şekil 3.4. Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü..... | 12 |
| Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik diyagramı..... | 17 |
| Şekil 4.2. Deney düzeneğinin görünüşü..... | 18 |
| Şekil 4.3. Deneyden sonra süzülen numune..... | 19 |
| Şekil 4.4. Boyanın 390-1000 nm arası absorbans değerleri..... | 20 |
| Şekil 4.5. Absorbans-Konsantrasyon arasındaki kalibrasyon eğrisi..... | 20 |
| Şekil 5.1. pH 'ın giderme verimine etkisi..... | 24 |
| Şekil 5.2. pH 'ın enerji tüketimine etkisi..... | 27 |
| Şekil 5.3. pH 'ın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi..... | 28 |
| Şekil 5.4. İletkenliğin giderme verimine etkisi..... | 29 |
| Şekil 5.5. İletkenliğin enerji tüketimine etkisi..... | 30 |
| Şekil 5.6. İletkenliğin alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi..... | 30 |
| Şekil 5.7. Akım yoğunluğunun giderme verimine etkisi..... | 32 |
| Şekil 5.8. Akım yoğunluğunun enerji tüketimine etkisi..... | 32 |
| Şekil 5.9. Akım yoğunluğunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi..... | 33 |
| Şekil 5.10. Zamanın giderme verimine etkisi..... | 34 |
| Şekil 5.11. Zamanın enerji tüketimine etkisi..... | 35 |
| Şekil 5.12. Zamanın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi..... | 35 |
| Şekil 5.13. Boya başlangıç konsantrasyonunun giderme verimine etkisi..... | 37 |
| Şekil 5.14. Boya başlangıç konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisi..... | 37 |
| Şekil 5.15. Boya başlangıç konsantrasyonunu alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi..... | 38 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 3.1. Al ³⁺ sulu ortamda oluşan hidroksi kompleks türleri | 14 |
| Tablo 5.1. pH etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları..... | 23 |
| Tablo 5.2. İletkenlik etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları..... | 29 |
| Tablo 5.3. Akım yoğunluğu etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları..... | 31 |
| Tablo 5.4. Zaman etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları..... | 34 |
| Tablo 5.5. Boya konsantrasyonu etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları..... | 36 |

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Tekstil Endüstrisi Atıksuları, Elektrokoagülasyon ile Arıtım

Bu çalışmada, elektrokoagülasyon ile tekstil boyası çözeltilerinden (Dispersol Red C-4G 150) boya giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotların kullanıldığı bir elektrokimyasal reaktör tasarlanmıştır. Boya giderimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, zaman, konsantrasyon gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca enerji tüketimi ve çözülmüş elektrotun giderme kapasiteleri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyonun boya gideriminde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

TREATMENT OF WASTEWATER GENERATED FROM TEXTILE INDUSTRY BY THE ELECTROCOAGULATION

SUMMARY

Key Words: Textile industry, Dispersol Red C-4G 150, Electrocoagulation, Treatment

Dispersol Red C-4G 150 is used dye in textile industries. In this research, removal of Dispersol Red C-4G 150 from wastewater generated from textile industries has been studied by electrocoagulation using aluminium electrodes. The effects of pH, conductivity, current density, time, and initial dye concentrations on removal efficiency were investigated. Based upon our study, electrocoagulation can be used as alternative treatment technologies for treatment of wastewater produced from textile industries.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Artan nüfus sonucuna bağlı olarak mevcut endüstri dalları kapasitelerini arttırmış ve böylelikle üretilen atıksu miktarı da artmıştır.

Bu endüstri dallarından biri olan tekstil endüstrisindeki büyümeye bağlı olarak boya tüketiminin de artacağı için sonuçta tekstil boyalarını içeren atıksu probleminin etkisi de büyüyecektir. Toksik madde de içerebilen boyarmaddeler; suyun estetik görünümünde bozukluğa, ışık geçirgenliğinin azalmasına, çözülmüş oksijen miktarının düşmesine ve canlı hayatının olumsuz etkilenmesine neden olmakla beraber suyun yeniden kullanım imkanlarını kısıtlamaktadır.

Bu atıksuların arıtımı için daha az yer kaplayan, ekonomik, verimli, çamur miktarı az olan, daha az kimyasala gereksinim duyan sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle son yıllarda elektrokoagülasyonun, başta tekstil endüstrisi olmak üzere çeşitli endüstrilere uygulanması araştırılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan bir tekstil boyasının (Dispersol Red C-4G 150) alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile arıtımı araştırılmıştır. Demir ve alüminyum tuzları atıksu arıtımında kullanılan en yaygın koagülant türlerindedir. Aynı zamanda elektrokoagülasyonda kullanılan alüminyum elektrotları koagülant görevi görmektedir.

Elektrokoagülasyonla renk giderimi üzerine; pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, zaman, konsantrasyon gibi parametrelerin tesirleri incelenmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu, Faraday, elektrik ve elektrot tüketimleri değerleri hesaplanmıştır.

BÖLÜM 2. TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARI VE ARITIM TEKNOLOJİLERİ

Tekstil atıksularının bileşimi, kullanılan boyanın çeşidine ve seçilen prosesin türüne göre değişir. Gelişen teknolojiyle birlikte kullanılan tekstil boyalarının özellikleri de değişmektedir. Örneğin son yıllarda geliştirilen yeni boyalarda daha az yardımcı kimyasal maddelerin kullanılması ile çevreye olan olumsuz etkilerin azaltılması hedeflenmiştir.

2.1. Boyarmaddeler

Boyarmaddenin renkliliği ve elyaf üzerine bağlanabilmesi proses seçiminde önemli rol oynar. Bu proseslerde kullanılan boyarmaddeler aşağıda açıklandığı gibi sınıflandırılır.

2.2. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması

2.2.1. Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırma

- a) Suda çözünen boyarmaddeler
- b) Suda çözünmeyen boyarmaddeler
- c) Substratta çözünen boyarmaddeler

2.2.2. Kimyasal yapısına göre sınıflandırma

- a) Azo boyarmaddeleri
- b) Nitro ve nitrozo boyarmaddeleri
- c) Polimetin boyarmaddeleri

d) Arilmetin boyarmaddeleri

2.2.3. Boyama özelliklerine göre sınıflandırma

- a) Bazik (katyonik) Boyarmaddeler
- b) Asit Boyarmaddeler
- c) Direkt Boyarmaddeler
- d) Reaktif Boyarmaddeler
- e) Sülfür Boyarmaddeler
- f) Küpe Boyarmaddeler
- g) Mordan Boyarmaddeler
- h) Metal-Kompleks Boyarmaddeler
- i) Pigment Boyarmaddeler
- j) Dispers Boyarmaddeler

Molekül ağırlıkları düşük olan ve amino ve hidroksil grupları içeren boyarmaddelerdir. boyama esnasında dispersiyon ortamından elyafın üzerine difüzyon yolu ile tutulur ve elyaf içerisinde çözünme meydana gelir. Bu tür boyarmaddeler poliester poliamid akrilik gibi elyafların boyanmasında kullanılabilir. Bu çalışmada Dispersol C 4-G 150 boyası kullanılmıştır.

2.3. Boyama Atıksularının Özellikleri

Tekstil endüstrisinde çıkan atıksular; farklı renk , yüksek KOİ, değişik pH aralığına, yüksek iletkenlik ve alkaliniteye sahiptirler [1]. Ayrıca bu atıksuların sıcaklığı yüksek olduğu için (40-90° C) çözülmüş katı madde muhtevası da yüksektir.

Tekstil atıksularının pH 'ı 2-12 arasında değişebilir ve bu değişim kimyasal ve biyolojik arıtım proseslerini olumsuz yönde etkiler. Bu nedenle proseslerde önceden boya atıksuyunun pH'ı uygun değere ayarlanmalıdır.

Boyama atıksuları kullanılan kimyasallar ve boyarmaddelerden kaynaklanan toksik bileşikler ve ağır metaller içerebildiğinden atıksu arıtma tesislerinde; çamurda

kabarma, renkte süreklilik, pH 'da, sıcaklıkta, ağır metallerde aşırılık ve hidrolik akış hızında değişiklikler gibi problemlere neden olmaktadır.

2.4. Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Yöntemler

Tekstil atıksularının arıtımında kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

2.4.1. Biyolojik oksidasyon

Tekstil atıksularının arıtımında aktif çamur yöntemi en yaygın kullanılan biyolojik prosestir. Bu prosesin sonucunda çıkan atıksudaki renk giderme verimi oldukça düşüktür.

Son yıllarda, anaerobik ve/veya aerobik sistemlerin beraber kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Anaerobik sistemde öncelikle çift azo bağları parçalanır ve bu parçalanma ürünleri aerobik bir sistem tarafından son ürünlere oksitlenir. Anaerobik ortamda, azo boyar maddelerin parçalanması sonucu aromatik aminler oluşur [2]. Aerobik biofilm sistemler ise tekstil atıksularının arıtımında yaygın bir şekilde kullanılır.

2.4.2. Kimyasal oksidasyon

Atıksudaki kimyasal türler arasındaki elektron transferi sonucunda redoks reaksiyonları oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda boyarmaddedeki kimyasal bileşikler oksitlenerek diğer yan ürünlere veya biyolojik parçalanabilen maddelere dönüşebilir. Bunun için en yaygın kullanılan oksidantlar;

1. ozon
2. klor
3. klordioksit
4. hidrojenperoksit
5. potasyumpermanganat

2.4.3. Kimyasal indirgeme ile arıtımı

Kimyasal indirgeme, azo boyarmadde için yaygın olarak kullanılır. En çok kullanılan kimyasal maddeler sodyum hiposülfid (sodyum ditionit), thioüre dioksit (formamidin sülfirik asit), sodyum borhidrit, sodyum formaldehit sülfid oksalat ve SnCl_2 'dir [2].

2.4.4. Membran proseslerle arıtımı

Ters osmoz, ultrafiltrasyon, elektrodializ gibi membran prosesleri uygulanmaktadır. Arıtmadan çıkan suyun yeniden kullanılması ve bazı boyarmaddelerin geri kazanımı gibi avantajlarının yanında membranlarda tıkanma gibi dezavantajı da vardır.

2.4.5. Adsorpsiyon ile arıtımı

Tekstil atıksularının adsorpsiyon ile arıtımında en yaygın olarak aktif karbon kullanılır. Atıksuyun pH aralığı, sıcaklığı, adsorbantın yüzey alanı verimi etkileyen en önemli parametrelerdir. Aktif karbon asidik, bazik ve dispers boyalar için uygulanabilir.

2.4.6. Kimyasal koagülasyon ve flokülasyon ile arıtımı

Sudaki çökemeyen kolloidal maddelerin alüminyum ve demir tuzları gibi koagulantların ilavesi ile çökebilir flokların oluşturulması işlemidir. Bazen oluşan bu flokların hava kabarcıkları yardımıyla yüzeyde toplanması işlemine ise flotasyon denir.

Koagülasyon işlemi esnasında koloidal taneciklerin etrafındaki elektriksel çift tabakanın nötralizasyonu ile kolloidlerin yük dengesi bozularak birbirleriyle çarpışması sonucu daha büyük çökelebilen flokların oluşturulması sağlanır. Flokülasyon ise stabilliği bozulmuş kolloidlerin bir araya getirilip yumak teşkili ve yumakların büyütülmesi işlemidir [3].

Son zamanlarda boyarmaddelerin yapısının değişmesiyle demir ve alüminyum tuzlarının bu boyarmaddeleri uzaklaştırması zorlaşmıştır. Bu amaçla organik polimerler kullanılmaya başlanmıştır ancak bunlar tam bir renk giderimi sağlayamaktadır. Katyonik boyalar ayrıca 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 ilave edilmesi bile çökeltme verimini pek arttırmamaktadır. Bu bakımdan yukarıda bahsedilen tipteki boyarmaddelerin koagülasyon–flokülasyon işlemi ile uzaklaştırılmasında pek iyi sonuç alınamamaktadır. Diğer yandan sülfür ve dispers boyalar çok iyi koagüle olmakta, son derece kolay çökmekte olup buna bağlı olarak renk giderimi oldukça yüksektir. Bundan dolayı koagülasyon - flokülasyon işlemi bu tür boyalar için son derece uygundur [2].

Tekstil endüstrisinde son yıllarda az yer kaplaması, koagülanta gereksinim duymaması, ekonomik ve verimli olması nedeniyle elektrokoagülasyon tercih edilebilmektedir.

BÖLÜM 3. ELEKTROKİMYASAL ARITIM PROSESLERİ

Son yıllarda tekstil sanayisinin gelişmesiyle atıksu miktarı da artmıştır. Tekstil atıksularının alıcı ortama olan olumsuz etkilerinden dolayı alıcı ortamsa vermeden önce deşarj standartlarını sağlaması gerekmektedir. Günümüzde tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılabilir arıtım teknolojilerinden birisi “elektrokimyasal arıtım prosesleri”dir.

3.1. Elektrokimyasal Prosesin Esasları

Elektrokimyasal tepkimeler, anotta ve katottaki elektron transferiyle oluşan redoks reaksiyonlarıdır. Boya atıksuları gibi elektrolit ortamına koparılan iyonik bileşikler anot veya katotta indirgeme veya yükseltgenme reaksiyonlarına sebep olabilir.

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 [4].

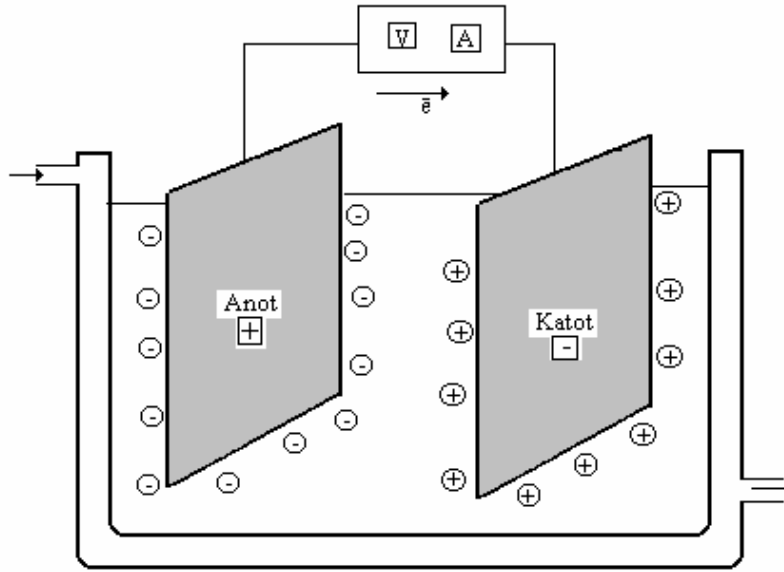
Elektrokimyasal deneylerde kullanılabilir bir elektroliz hücresinin görünüşü Şekil 3.1 de verilmiştir. Bu şekilde iletkenliği olan bir elektroliz çözeltisine daldırılmış elektrotlar iletken bir ortam ile birbirine bağlanmıştır. Bu deney düzeneğinde, anot ve katotta oluşabilecek reaksiyonlar aşağıda, elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü ise Şekil 3.1’de verilmiştir.

Anot reaksiyonları:

- a) Anot elektron verir
- b) Anotta yükseltgenme
- c) Anodik çözünme ($\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$)
- d) Anyonlar anotta toplanır
- e) Anolit bölge oluşur
- f) Anotta oksijen: $2\text{H}_2\text{O} - 4\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+$
- g) Klor var ise anotta klor: $2\text{Cl}^- - 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 \uparrow$

Katot reaksiyonları:

- a) Katot elektron alır
- b) Katotta indirgenme
- c) Katodik birikme ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$)
- d) Katyonlar katotta toplanır
- e) Katolit bölge oluşur
- f) Katotta hidrojen: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$
- g) Gazın indirgenmesi: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$



Şekil 3.1. Elektrokimyasal hücrenin şematik görünüşü

3.1.1. Faraday kanunu ve akım verimi

Faraday Kanunu ve akım verim eşitlikleri elektrokimyasal proseslerde kullanılmaktadır. Elektrokimyasal hücrede geçen akımın miktarı q ve akım şiddeti I ile t zamanı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

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

Eşitlik (3.1) de çözünen metalin (mol olarak) miktarı Faraday kanunu ile:

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

şeklinde ifade edilir. Burada;

n : çözünen metalin tesir değeri,

F : Faraday sabiti ve 96485 C/mol değerine eşittir.

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

Bir elektrokimyasal sistemde; Faraday değerindeki 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

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 ,

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

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

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

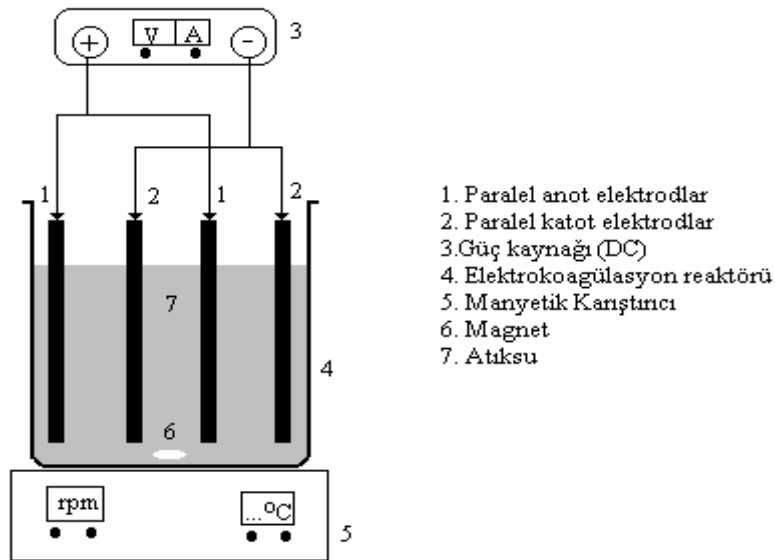
şeklinde ifade edilir.

3.2. Elektrokoagülasyonun Teknolojisi

Elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış çözünen ve bir güç kaynağına bağlanan bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Bu proses sonucunda anotta oksidasyon oluşacağından anot elektrokimyasal olarak çözünecektir. bunun sonucunda katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Atıksu arıtımında metal

elektrotlarının çözünmesi için geniş yüzey alanına sahip olması gerektiğinden bu durum istenmez.

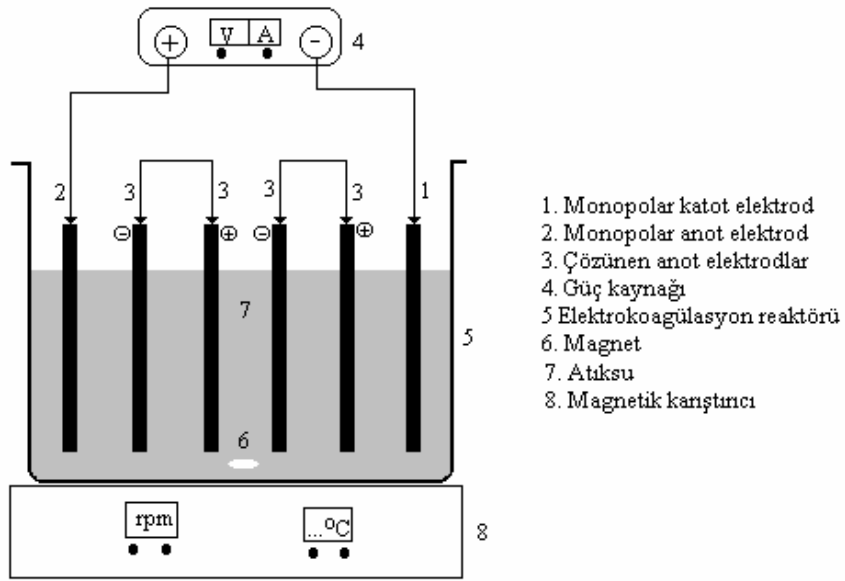
Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Çift anot ve katotdan ibaret paralel bağlı bir monopolar elektrokoagülasyon reaktörü Şekil 3.2 'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Paralel bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü

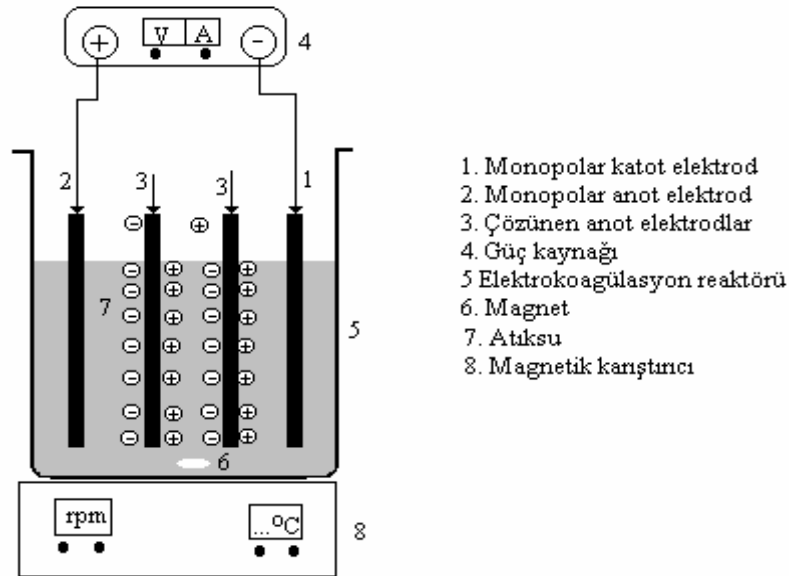
Şekilden de görülebileceği gibi iki adet paralel iletken metal plaka paralel elektrotları oluşturmaktadır. Bu elektrotlar bir güç kaynağına bağlanmaktadır. Bu güç kaynağı üzerinden elektrokoagülasyon reaktöründeki akım ve voltaj değeri ayarlanır ve dijital olarak okunmaktadır. Elektrokoagülasyon reaktörlerindeki 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 metallere yapılabilir.

Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 3.3 'de gösterilen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.3 Seri bağlı monopolar elektrokoagülasyon reaktörü

Bir diğer elektrokoagülasyon reaktöründe ise elektrotlar paralel çift kutuplu (bipolar) olarak bağlanmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Paralel bağlı bipolar elektrokoagülasyon reaktörü

3.3. Elektrokoagülasyonun Teorisi

Elektrokoagülasyon prosesinde genellikle art arda üç aşamanın olduğu kabul edilmektedir.

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

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

- a) Çözelti içinden geçen akımdan dolayı çözünen elektrodun çözünmesiyle meydana gelen iyonların etkileşimleri sonucu yüklü türlerin, oluşan iyonlar etrafındaki dağınık çift tabakanın sıkıştırılması sağlanır.
- b) 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 elektrotlar en çok tercih edilen ve kullanılan elektrod materyalleridir [5].

Alüminyum Elektrot:

Alüminyum elektrodu sulu çözeltilerde al kompleksleri oluşturabilir ve bu kompleksler Tablo 3.1 'de verilmiştir.

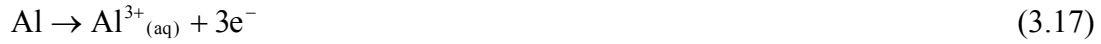
Tablodan anlaşılacağı gibi alüminyum kompleksleri ortamın pH'ının bir fonksiyonudur. pH'ın değişmesiyle ya alüminyum hidroksitler oluşur veya ortamdaki alüminyum çözünür.[6]

Tablo 3.1 Al³⁺ sulu ortamda oluşan hidroksi kompleks türleri (I: 0, 25°C)

| Reaksiyon | LogK |
|---|--------|
| 1. Al ³⁺ ⇌ Al(OH) ²⁺ + H ⁺ | -5.02 |
| 2. 2Al ³⁺ ⇌ Al ₂ (OH) ₂ ⁴⁺ + 2H ⁺ | -6.27 |
| 3. 6Al ³⁺ ⇌ Al ₆ (OH) ₁₅ ³⁺ + 15H ⁺ | -47.00 |
| 4. 8Al ³⁺ ⇌ Al ₈ (OH) ₂₀ ⁴⁺ + 20H ⁺ | -68.70 |
| 5. 13Al ³⁺ ⇌ Al ₁₃ (OH) ₃₄ ⁵⁺ + 34H ⁺ | -97.39 |
| 6. Al ³⁺ ⇌ Al(OH) ₄ ⁻ + 4H ⁺ | -23.57 |
| 7. Al(OH) _{3(s)} ⇌ Al ³⁺ _(aq) + 3OH ⁻ _(aq) | -32.34 |

Alüminyum anodun elektrolitik çözeltideki düşük pH lardaki reaksiyonları aşağıdaki gibidir.

Anotta:



Katotta:



Ayrıca sulu ortamın pH değerine bağlı olarak Al(OH)²⁺, Al₂(OH)₂⁴⁺ ve Al(OH)₄⁻ gibi diğer iyonik türlere de rastlanabilir.

3.4. Elektrokoagülasyonun Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokoagülasyonda 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, TOC, askıda madde ve ağır metallerin tekstil atıksularından giderilmesinde kullanılmaktadır [5]. Diğer atıksu arıtım işlemlerine göre ec prosesinin dezavantaj ve avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:[5]

Elektrokoagülasyonun avantajları:

- a) Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
- b) Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
- c) Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
- d) Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağıl su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- e) Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katılar içerir.
- f) 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.
- g) Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, daha kolay ayrılmaları sağlanır.
- h) Elektrokoagülasyon hücresi içindeki elektrodlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.
- i) Elektrokoagülasyon prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese ilave edilen güneş panellerinden temin edilebilir.

Elektrokoagülasyonun Dezavantajları:

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

3.5. Elektrokoagülasyonun Uygulama ve Prosesleri

Elektrokoagülasyon yöntemiyle C.I. Basic Yellow 28 içeren bir boya çözeltisinden renk giderimi araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda en yüksek renk giderme veriminin 7 dakikada, 5-8 pH aralığında ve 80 A/m²'de elde edildiği gözlenmiştir[7].

Yağ ve gres içerikli restaurant atıksuları için etkisi incelenmiştir. Elektrokoagülasyon işletme parametreleri atıksu karakterine göre 1,67-9,95 F/m³ ve 30-80 A/m² alınmıştır. Alüminyum tüketimi 17,7-106,4 g/m³ arasında değişmekte ve güç gereksinimi genellikle 1,5 kWh/m³'ten küçüktür. Bu çalışmada yağ ve gres gideriminde %94'ün üzerinde verim elde edilmiştir [8].

Diğer bir çalışma mandıra atıksuyundan yağ-gres ve COD giderimi için yapılmıştır. COD'de %98, yağ-gresde %99 giderim verimi elde edilmiştir. Optimum değerler akım yoğunluğu için 0,6 mA/cm², pH 7, süre 1 dakika olarak tespit edilmiştir [9].

Elektrokoagülasyon yüksek boya ve COD içerikli tekstil boyalarının arıtımında etkili bir yöntemdir. Renk ve COD gideriminde %84-100 değerleri arasında verim elde edilmiştir [10].

BÖLÜM 4. MATERYAL VE METOD

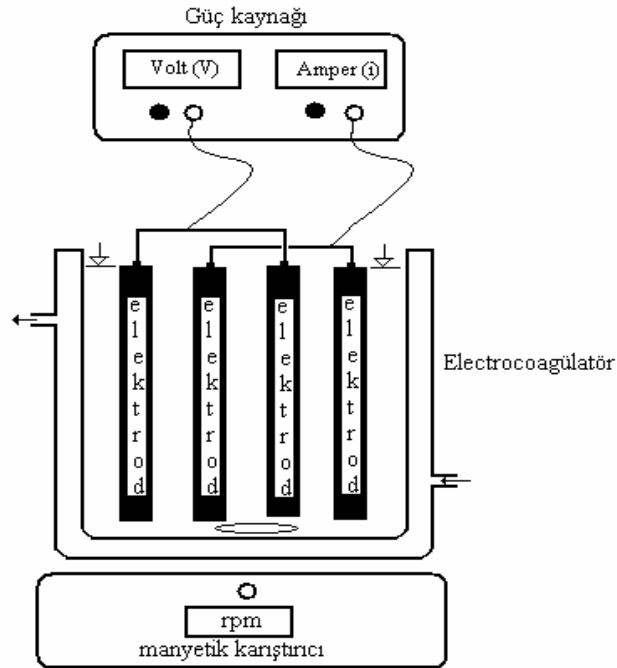
4.1. Materyal

Bu çalışmada ticari olarak kullanılan bir boya çözeltisinin (Dispersol Red C-4G 150), elektrokoagülasyonla arıtımı ele alınmıştır.

Deneylerde DyStar firmasından temin edilen tekstil boyası Dispersol Red C-4G 150 kullanılmıştır.

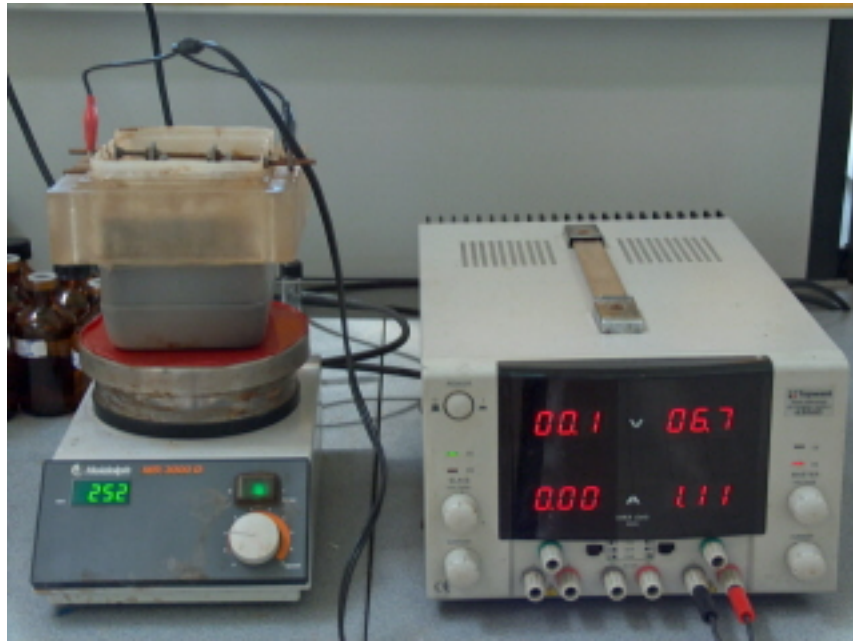
4.2. Deney Düzenegi

Elektrokoagülasyon deneyleri Şekil 4.1 'de gösterilen deney düzeneginde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrolü dijital bir güç kaynağı (Topward Dual-Tracking DC Power Supply model, 0-30V, 0-6A) ile sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Deney düzeneginin şematik diyagramı

Karıştırma bir manyetik karıştırıcı (VWR 205 Auto Stirrer) ile sağlanmıştır. Elektrokoagülasyon deneylerinde kullanılan 110 x 110 x 100 mm boyutlarında reaktör çift cidarlı olup, plexiglas 'tan yapılmıştır. Reaktörde her bir deneyde 750 ml çözelti kullanılmıştır. Reaktörde monopolar paralel bağlı şekilde 4 elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 20 mm aralıklarla yerleştirilmiş ve tamamen elektrolite batmış durumdadır. Elektrot materyali olarak 45x52x3 mm boyutlarında, 140 cm² aktif yüzey alanına sahip alüminyum plakalar kullanılmıştır.



Şekil 4.2. EC deney düzeneğinin görünüşü

4.3. Deneysel İşlem

Elektrotlar, elektrokoagülasyon reaktörüne yerleştirildikten sonra hücreye 750 ml. elektrolit (boya çözeltisi) konulmuştur. Güç kaynağı üzerinde istenen akım ve voltaj ayarlaması yapıldıktan sonra çalıştırılmıştır. Elektrokoagülasyon esnasında oluşan hidrojen gazı yardımıyla floklar reaktörün üst kısmında toplanmış olup, net bir katı-sıvı ayırımı gözlenmiştir. Deney bitiminden hemen sonra reaktörden alınan numuneler çift kat kaba filtre kağıtından süzlmüştür. Şekil 4.3 süzülen numuneyi göstermektedir. Süzlmüş numuneler daha sonra analiz edilmiştir.



Şekil 4.3. Deneiden sonra süzülen numune

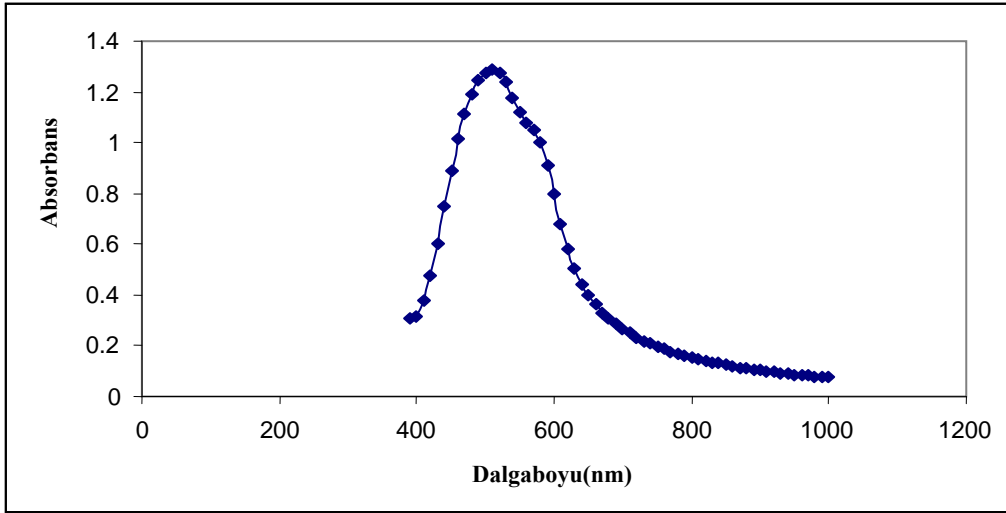
Her deneyden önce elektrotlar yüzeyleri aseton ile yıkandıktan sonra deney süresince elektrot yüzeyinde biriken kir ve pasları gidermek için, elektrotlar, önceden hazırlanan temizleme çözeltisinde 1 dakika bekletilmiştir. Temizleme çözeltisi %35 'lik 100 ml HCl ve % 2.8 'lik 200 ml heksametilen tetramin ($(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) çözeltisinden oluşmaktadır.

pH ayarlaması için HCl veya NaOH çözeltileri kullanılmıştır. İletkenlik ayarlaması NaCl veya saf su ile yapılmıştır.

4.4. Analitik Metod

4.4.1. Boya konsantrasyonunun belirlenmesi

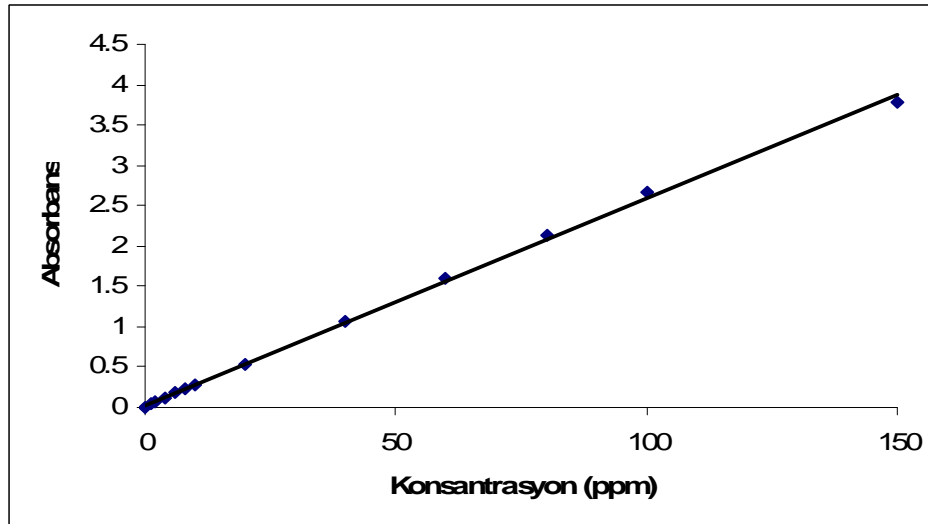
Çalışmalarda kullanılan farklı konsantrasyonlarda boya çözeltileri (Dispersol Red C-4G 150.) saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle Unicam Marka UV-Vis Spektrofotometrede, boyanın maksimum absorbanstığı dalga boyu 200 nm ile 900 nm arasında araştırılmış olup λ_{max} 510 nm tesbit edilmiştir. Sonuç Şekil 4.4' de verilmiştir.



Şekil 4.4. Boyanın 390-1000 nm arası absorptans değerleri

Bu dalga boyunda bir konsantrasyon-absorptans kalibrasyon eğrisi çıkarılmış olup Şekil 4.5 'de verilmiştir. Deneylelerden önce ve sonra yukarıda açıklandığı şekilde UV-Vis Spektrofotometre ile boya konsantrasyonu llmüştür. Bu iki değer arasındaki fark esas alınarak boya giderme verimi, R_B , aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$R_B = \frac{C_{0B} - C_B}{C_{0B}} \quad (4.1)$$



Şekil 4.5. Absorptans-Konsantrasyon arasındaki kalibrasyon eğrisi ($Abs = 0.0257 + 0.0281 C$; $r^2 = 0.999$)

4.4.2.Kullanılan eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

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

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

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

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

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

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

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

MA: Molekül ağırlığı (alüminyum için 26.982 g, demir için 55,84 g) 'dır.

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

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

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

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

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

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

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

Burada; E : Elektrik enerjisi (Wh) , V : volt, I : akım şiddeti (A), t . zaman (saat) ‘dir.

Faraday/ m^3 : Faraday aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

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

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

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1.Boya Çözeltilisinin Alüminyum Elektrot ile Elektrokoagülasyonu

Bu çalışmada bir tekstil boyası olan Dispersol Red C-4G 150 çözeltisinin alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyonla arıtılabilirliği araştırılmıştır. Elektrokoagülasyonda arıtma verimi üzerine pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, zaman, boya konsantrasyonu gibi parametrelerin etkisi araştırılmış olup, bu parametrelerin etkileri aşağıda gösterildiği şekilde detaylı olarak ele alınmıştır.

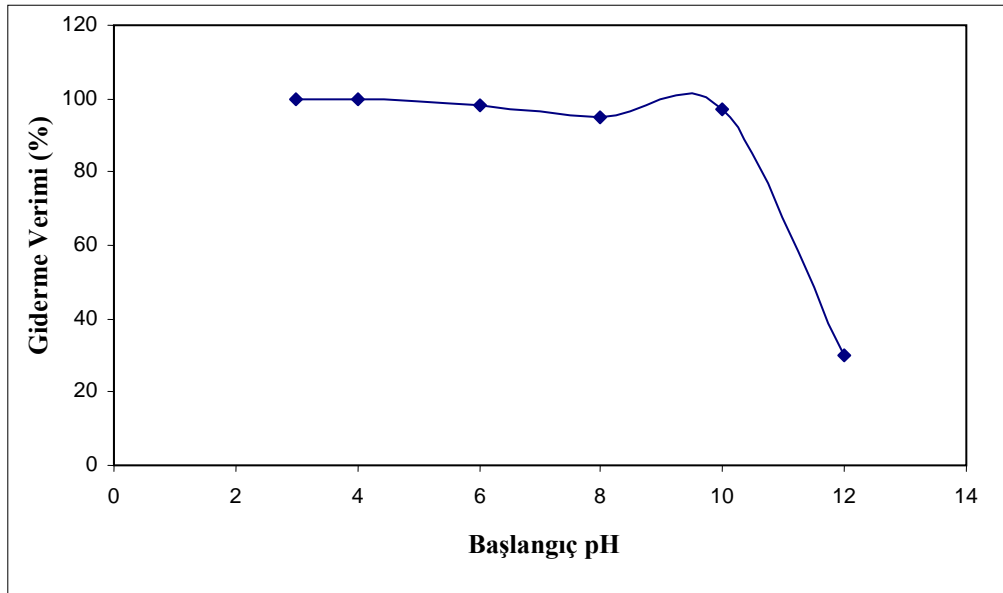
5.1.1 Elektrokoagülasyon üzerine pH 'ın etkisi

Boya giderimi üzerine başlangıç pH 'sının etkisi pH 3-12 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 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Akım , (A) | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Akım Yoğunluğu, (A/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Voltaj, (V) | 19,5 | 8,2 | 10,55 | 9,7 | 9,9 | 19,3 |
| Boya Konsantrasyonu, (mg/l) | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| İletkenlik, (mS/cm) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| Süre,(dak) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Son pH | 6,85 | 7,72 | 8,91 | 9,2 | 9 | 9,19 |
| Akım Verimliliği, (%) | 125 | 100 | 114 | 115 | 127 | 87 |
| Çözünen anod miktarı, (g) | 0,117 | 0,094 | 0,107 | 0,108 | 0,118 | 0,082 |
| Çözünen katot miktarı, (g) | 0,091 | 0,076 | 0,068 | 0,07 | 0,120 | 0,05 |
| Toplam Çözünen Al Miktarı, (g) | 0,208 | 0,170 | 0,175 | 0,178 | 0,238 | 0,132 |
| 1 m ³ atıksu için harcanan Al, (g) | 277 | 227 | 233 | 239 | 319 | 175 |
| Enerji Tüketimi, (Wh) | 5,5 | 2,3 | 2,95 | 2,72 | 2,77 | 5,4 |
| Faraday , (F/m ³) | 13,93 | 13,93 | 13,93 | 13,93 | 13,93 | 13,93 |
| Boya Giderme Verimi, (%) | 99,72 | 99,71 | 98 | 95 | 97 | 30 |
| Elektrot Maliyeti, (\$/m ³) | 0,500 | 0,408 | 0,419 | 0,428 | 0,574 | 0,314 |
| Enerji Maliyeti, (\$/m ³) | 0,436 | 0,184 | 0,236 | 0,217 | 0,222 | 0,432 |
| Toplam Maliyet, (\$/m ³) | 0,936 | 0,592 | 0,655 | 0,645 | 0,796 | 0,746 |
| Kg Boya/Kg Al | 1,19 | 1,46 | 1,4 | 1,32 | 1,01 | 0,57 |
| kWh/kgBoya | 22,06 | 9,22 | 12,01 | 11,43 | 11,41 | 72 |

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



Şekil 5.1. pH 'ın giderme verimine etkisi

Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotlar kullanılarak disperse partiküllerin destabilizasyonu söz konusu olup, koagülant üretim mekanizması kimyasal koagülasyondaki mekanizmaya benzemektedir. Bu proseste de Al^{3+} 'ün hidrolizi ve bunun sonunda çeşitli alüminyum hidroksit polimer kompleks ve çökeltileri meydana gelmektedir [5].

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.



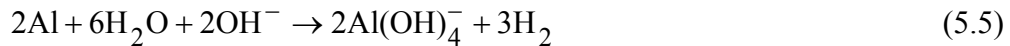
Katotta suyun indirgenmesi sonrası hidrojen oluşumu ve hidroksit birikmesi sonucu pH artmaktadır (5.3 eşitliği)

Al(OH)_3 çok yüksek pH 'larda amfoterik metal hidroksit özelliğinden dolayı mevcut OH^- iyonlarıyla reaksiyona girerek ortamın pH 'sını düşürmektedir [8].



Alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon deneylerinde düşük pH değerlerine sahip çözeltilerin pH 'ları bir süre sonra 8-10 civarına artmakta (5.3), bu değer 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 H_2 çıkışı sırasında üretilen OH^- iyonlarının kimyasal atakları sonucu elektrotlarda kimyasal çözünme meydana gelmektedir [11].



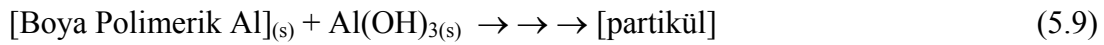
Alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrolizle üretilen alüminyum iyonları, pH 'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturur [12]. Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler. Bir çok monomerik ve polimerik alüminyum türleri ortaya çıkmaktadır. En çok bilinen monomerik türler; Al(OH)^{2+} , Al(OH)_2^+ , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, Al(OH)_4^- , ve en çok bilinen polimerik türler; $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ 'dır [13]. Değişik türlerin oluşma oranları renk giderme prosesinde önemli bir rol oynar. Boya molekülleri ve hidroliz ürünleri arasında, mevcut iyon çeşidine ve ortamın pH 'sına bağlı olarak bunların oranları arasında aynı zamanda birkaç etkileşme mekanizması mümkündür. Son yıllarda var olduğu düşünülen asıl etkileşme mekanizması farklı pH aralıkları için çökeltme ve adsorpsiyon olduğu ifade

edilmektedir. Düşük pH aralığında flokülasyonla çökeltme, $\text{pH} > 6.5$ olduğu aralılarda adsorbsiyonla renk giderimi gerçekleşir [13,14].

Çökeltme:



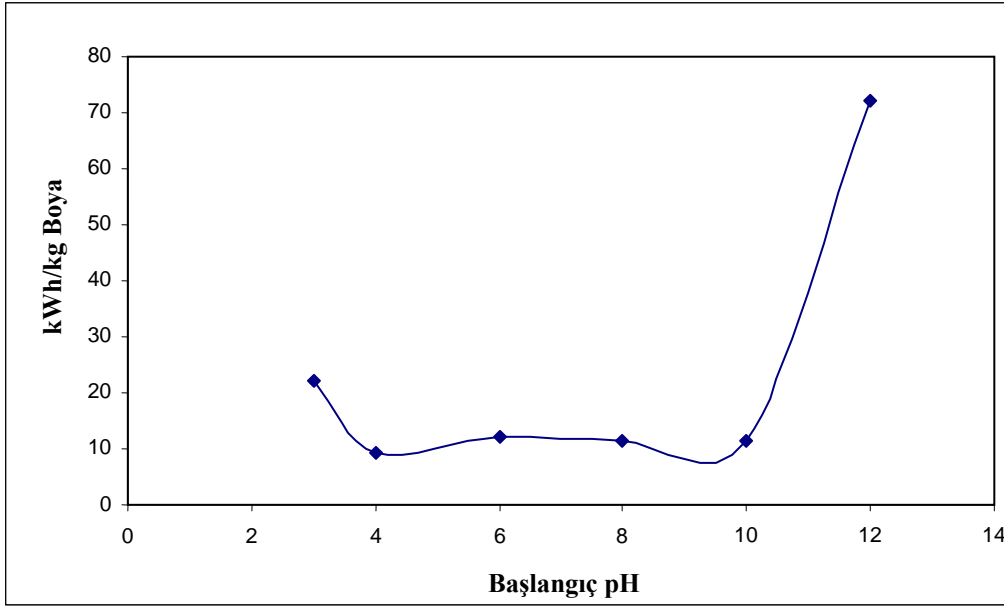
Adsorbsiyon:



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

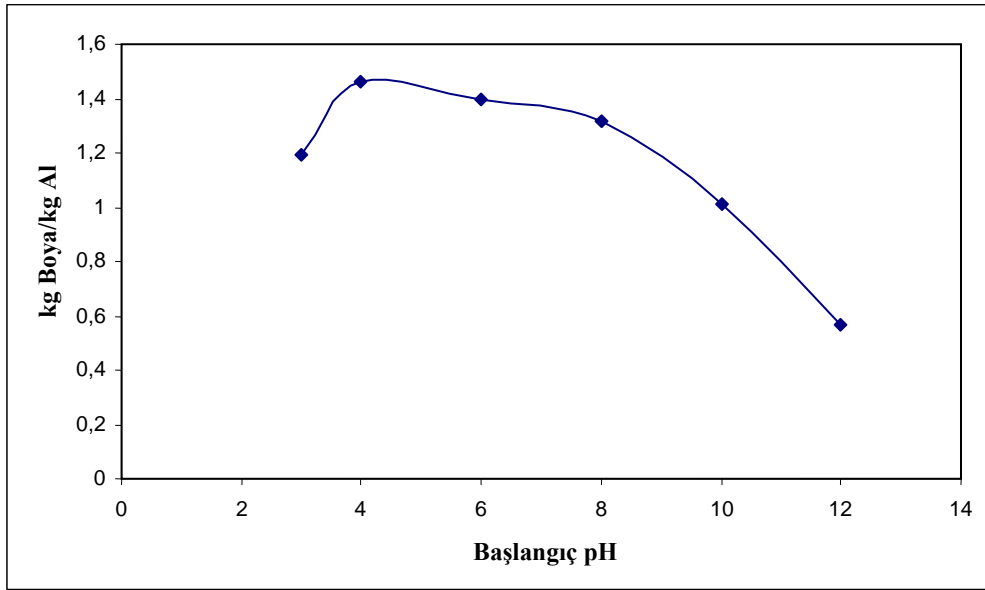
Şekil 5.1' de görüldüğü gibi giriş pH 'ın 3 olduğu durumda boya giderme veriminin %99.71 olduğu görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: Deney esnasında pH 3'den 6,85'e artarken sırasıyla (5.6), (5.7), (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden boya gideriminde hepsi etkisini gösterebilmektedir. Giriş pH 'sının 4 olduğu durumda boya giderme verimi %99,7 'ile en iyi ikinci değeri sağlamış ve pH 'nın artarak 7,72 olarak son bulunduğu görülmüştür. Bu durum şöyle açıklanmıştır: Deney pH 4 'ten 7,72 'ye artarken sırasıyla (5.7), (5.8) ve (5.9) nolu denklemlerinin oluşma pH 'larından geçtiğinden boya gideriminde (5.6) nolu denklemin etkisi görülmemektedir. Giriş pH 'sının 6, 8 ve 10 olduğu durumda boya giderme verimi %98-95 dolaylarında gerçekleşmiş ve pH 'nın artarak 9 civarında son bulunduğu görülmüştür. Giriş pH 'sının 12 olduğu durumda boya giderme veriminde önemli derecede bir düşüş olduğu ve sadece %30' luk bir giderimin gerçekleştiği, pH 'nın ise önceki durumlardan farklı olarak azaldığı ve 9,19 'a 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 boya giderme veriminin düşmesine neden olmuştur.

Şekil 5.2’ de pH ‘ın kWh/kg Boya oranına etkisi gösterilmiş olup, enerji tüketiminin 3 kWh/m^3 ile $7,3 \text{ kWh/m}^3$ arasında değiştiği görülmüştür. Başlangıç pH 3 ve 12 için kg giderilen boya başına kWh enerji tüketimi sırasıyla 22,06 ve 72 olmuştur. pH arttıkça enerji tüketiminin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.2. pH ‘ın enerji tüketimine etkisi

Şekil 5.3’ te pH ’ın alüminyumun boya giderme kapasitesi üzerine etkisi gösterilmiştir. pH 3 ve 12 ‘de sırasıyla alüminyumun boya giderme kapasitesi 1,19 ve 0,57 olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. pH 'ın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi

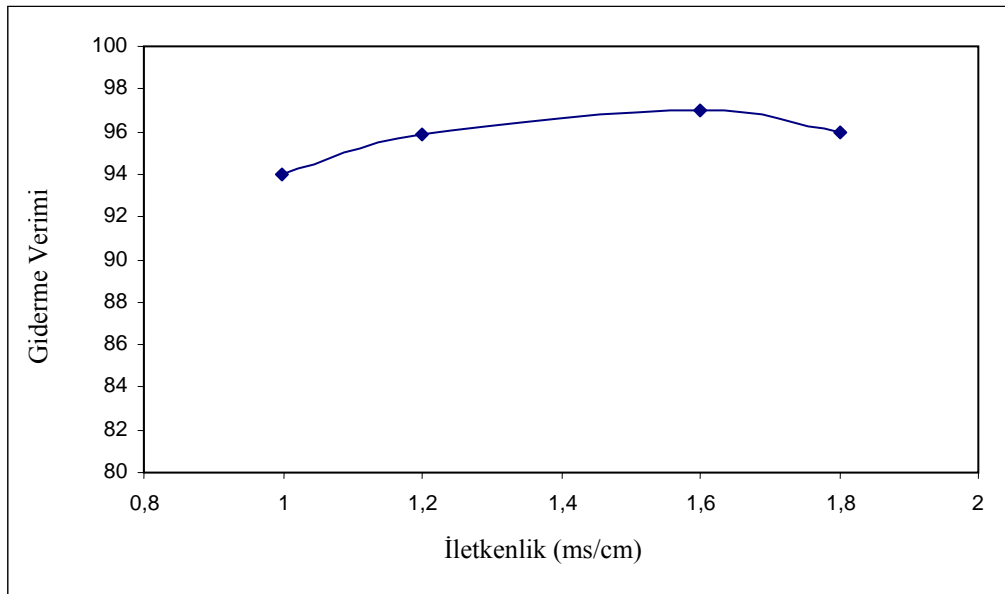
5.1.2. Elektrokoagülasyon üzerine iletkenliğin etkisi

Atıksuların arıtımında çözeltilerin iletkenliği elektrokimyasal prosesler için önemli bir faktördür. Çünkü böyle prosesler elektrot yüzeyinden çözeltilere ve çözelti içinde heterojen iyon transfer reaksiyonlarına dayanmaktadır [15].

Çözelti iletkenliğinin boya giderme verimine etkisini incelemek amacıyla boya çözeltilerinin iletkenliği, NaCl destek elektroliti ilavesi ile 1-1,8 mS/cm aralığında incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.2. ve Şekil 5.4. 'de gösterilmiştir. Şekilden 5.4.'de görüldüğü gibi çözelti iletkenliğinin 1mS/cm iletkenlik değerinde 1.2 mS/cm 'e göre düşük giderme verimleri izlenmiştir. 1.6 mS/cm 'nin üstündeki iletkenlik değerlerinde giderim verimindeki düşüş bir dengeli bir şekilde devam etmiştir.

Tablo 5.2. İletkenlik etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları

| İletkenlik(mS/cm) | 1 | 1.2 | 1.6 | 1.8 |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Akım , (A) | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Akım Yoğunluğu, (A/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Voltaj (V) | 25,9 | 30,15 | 23,75 | 23,15 |
| Boya Konsantrasyonu, (mg/l) | 300 | 300 | 300 | 300 |
| İlk pH | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| Süre,(dak) | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Son pH | 9,58 | 9,80 | 9,53 | 9,64 |
| Akım Verimliliği, (%) | 116,651 | 106,717 | 102,176 | 178,808 |
| Çözünen anod miktarı (g) | 0,082 | 0,075 | 0,072 | 0,126 |
| Çözünen katot miktarı (g) | 0,033 | 0,052 | 0,063 | 0,068 |
| Toplam Çözünen Al Miktarı, (g) | 0,115 | 0,127 | 0,135 | 0,194 |
| 1 m ³ atıksu için harcanan Al, (g) | 153,60 | 169,6 | 180 | 258,667 |
| Enerji Tüketimi, (Wh) | 5,439 | 6,332 | 4,987 | 4,862 |
| Faraday , (F/m ³) | 10,45 | 10,45 | 10,45 | 10,45 |
| Boya Giderme Verimi, (%) | 93,96 | 95,87 | 97 | 95,96 |
| Elektrot Maliyeti(\$/m ³) | 0,276 | 0,305 | 0,314 | 0,466 |
| Enerji Maliyeti | 0,435 | 0,506 | 0,399 | 0,388 |
| Toplam Maliyet(\$/m ³) | 0,711 | 0,811 | 0,713 | 0,854 |
| Toplam Maliyet(\$/m ³) | 1,146 | 1,317 | 1,112 | 1,242 |
| KgBoya/KgAl | 2,448 | 2,261 | 2,158 | 1,484 |
| kWh/kgBoya | 26,577 | 31,345 | 25,619 | 24,196 |

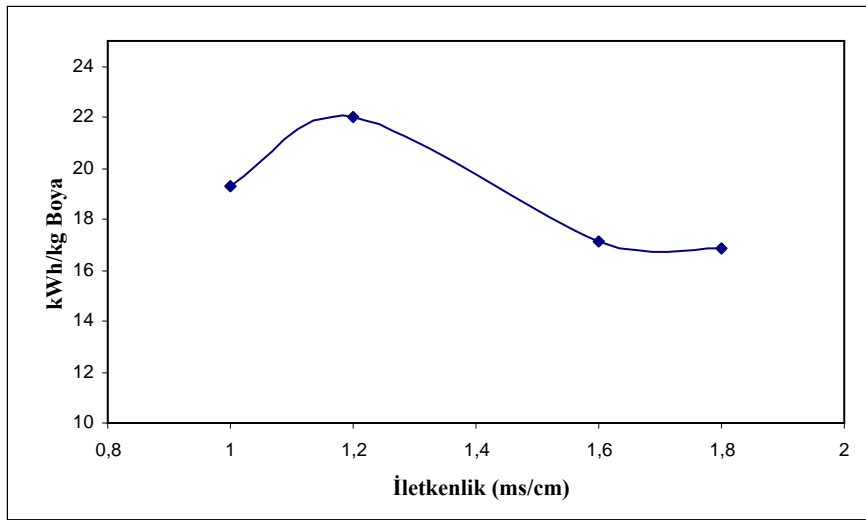


Şekil 5.4. İletkenliğin giderme verimine etkisi

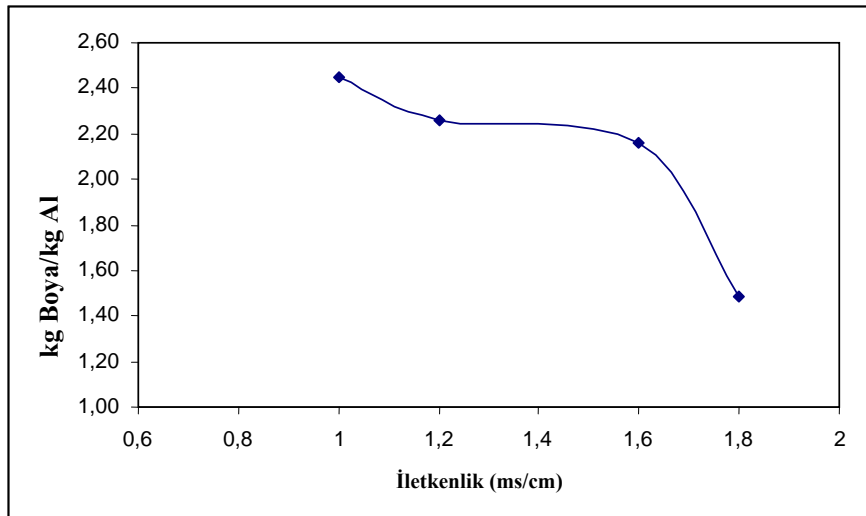
Eşit akım şiddeti, eşit süre ve farklı çözelti iletkenliğinde yapılan deneylerde, iletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalmasından dolayı her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Şekil 5.5 'te açıkça görüldüğü gibi iletkenlik 1' den 1,8 mS/cm 'e artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 25,9' dan 23,15 V 'a, enerji tüketimi ise 7,25' den 6,48 kWh/m³ 'e azalmaktadır. Çözelti

iletkenliği elektrotlar arası potansiyele etki ettiğinden enerji tüketimini indirekt etkilemektedir. Bunun yanında iletkenliğin giderme verimine etkisinden dolayı, kg boya giderimi için enerji tüketimi 26,57' den 24,196 kWh/kg boya gibi farklı olabilmektedir.

Şekil 5.6' da iletkenliğin alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. İletkenliğe bağlı olarak alüminyumun giderme kapasitesi önemli sayılabilecek bir değişim göstermemiştir.



Şekil 5.5 İletkenliğin enerji tüketimine etkisi



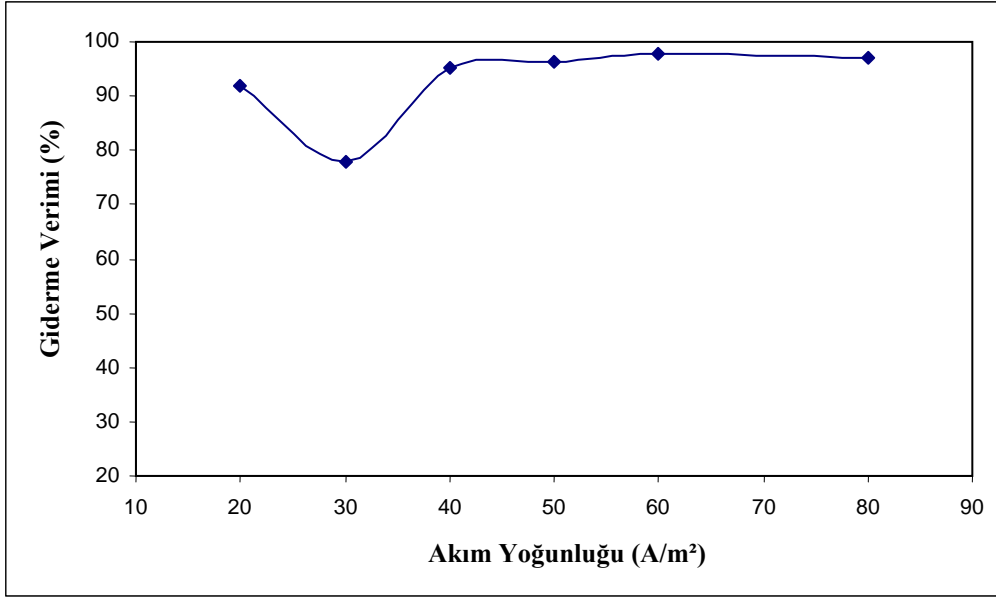
Şekil 5.6. İletkenliğin alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi

5.1.3. Elektrokoagülasyon üzerine akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğunun renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla elektrokoagülatöre 20-80 A/m² aralığında akım yoğunlukları uygulanmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.3.' de ve Şekil 5.7.' da gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi akım yoğunluğunun 40 A/m² olduğu noktaya kadar giderme veriminde hızlı bir artış olduğu, 40-80 A/m² arasında bu artışın yavaşladığı ve sonuçta 60 A/m² de en yüksek değere ulaştığı ve bundan sonra giderme veriminde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Enerji tüketimi ve alüminyum tüketimi göz önüne alınarak optimum akım yoğunluğu 60 A/m² alınmış olup, diğer tüm deneyler bu akım yoğunluğunda yürütülmüştür.

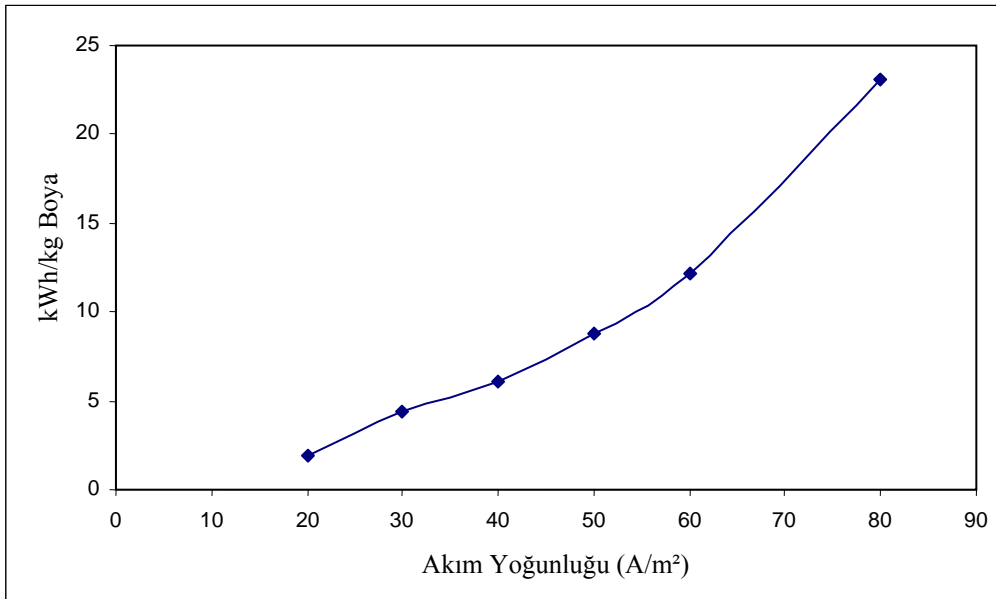
Tablo 5.3. Akım yoğunluğu etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları

| Akım Yoğunluğu, (A/m ²) | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 80 |
|---|--------|---------|-------|--------|--------|---------|
| Akım , (A) | 0,28 | 0,42 | 0,56 | 0,7 | 0,84 | 1,12 |
| İlk pH | 7,18 | 7,18 | 7,18 | 7,18 | 7,18 | 7,18 |
| Voltaj. (V) | 6,15 | 8,25 | 10,4 | 12,1 | 14,1 | 19,95 |
| Boya Konsantrasyonu, (mg/l) | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| İletkenlik, (mS/cm) | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| Süre,(dak) | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Son pH | 8,54 | 8,67 | 8,83 | 8,77 | 9,03 | 9,69 |
| Akım Verimliliği, (%) | 126,44 | 102,176 | 115,8 | 172,33 | 193,07 | 100,048 |
| Çözünen anod miktarı (g) | 0,030 | 0,028 | 0,054 | 0,101 | 0,137 | 0,091 |
| Çözünen katot miktarı (g) | 0,029 | 0,021 | 0,037 | 0,068 | 0,083 | 0,024 |
| Toplam Çözünen Al Miktarı, (g) | 0,059 | 0,049 | 0,092 | 0,169 | 0,220 | 0,115 |
| 1 m ³ atıksu için harcanan Al, (g) | 78,4 | 76,8 | 122,3 | 225,87 | 292,08 | 157,6 |
| Enerji Tüketimi, (Wh) | 0,43 | 0,87 | 1,46 | 2,12 | 2,96 | 5,6 |
| Faraday , (F/m ³) | 3,48 | 5,22 | 6,96 | 8,71 | 10,45 | 13,93 |
| Boya Giderme Verimi, (%) | 92 | 77,74 | 95,24 | 96,2 | 97,63 | 97,09 |
| Elektrot Maliyeti(\$/m ³) | 0,141 | 0,153 | 0,220 | 0,406 | 0,527 | 0,382 |
| Enerji Maliyeti | 0,034 | 0,069 | 0,117 | 0,169 | 0,237 | 0,448 |
| Toplam Maliyet(\$/m ³) | 0,175 | 0,222 | 0,337 | 0,575 | 0,764 | 0,83 |
| kgBoya/kgAl | 3,91 | 3,37 | 2,59 | 1,42 | 1,11 | 2,05 |
| kWh/kgBoya | 1,87 | 4,43 | 6,13 | 8,81 | 12,12 | 23,07 |



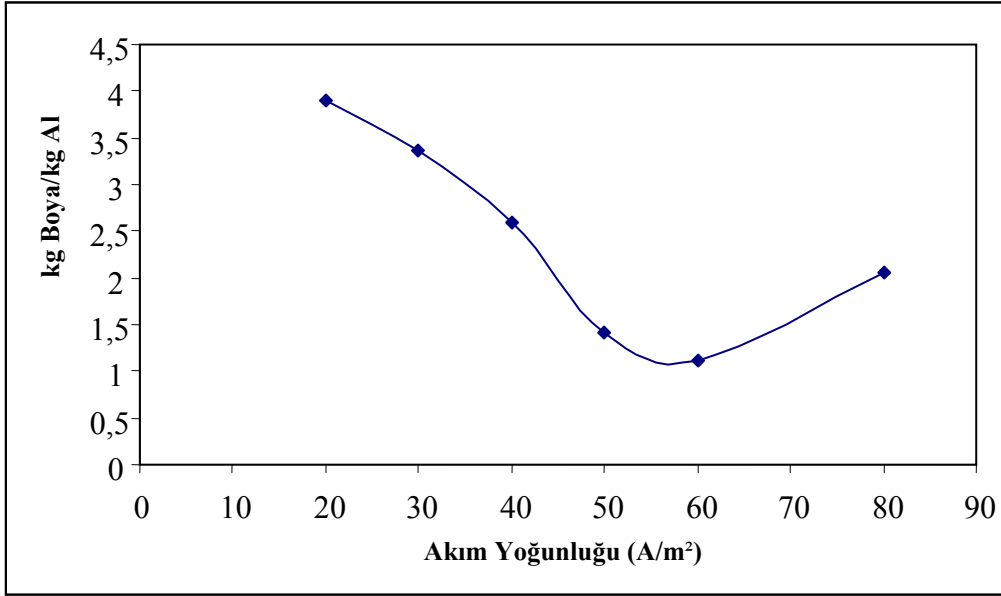
Şekil 5.7. Akım yoğunluğunun giderme verimine etkisi

Şekil 5.8’ de eşit çözelti iletkenliği, eşit süre ve farklı akım yoğunluğunda yapılan deneylerde akım yoğunluğundaki artışla elektrotlar arası potansiyel farkının artmasından dolayı her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Akım yoğunluğu 20’ den 80 A/cm² e artarken elektrotlar arası potansiyel farkı 6,15 ‘ten 19,95 V ‘a, enerji tüketimi ise 0,57’ den 7,46 kWh/m³’ e artmaktadır.



Şekil 5.8. Akım yoğunluğunun enerji tüketimine etkisi

Şekil 5.9' da akım yoğunluğunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan akım yoğunluğu arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.9. Akım yoğunluğunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi

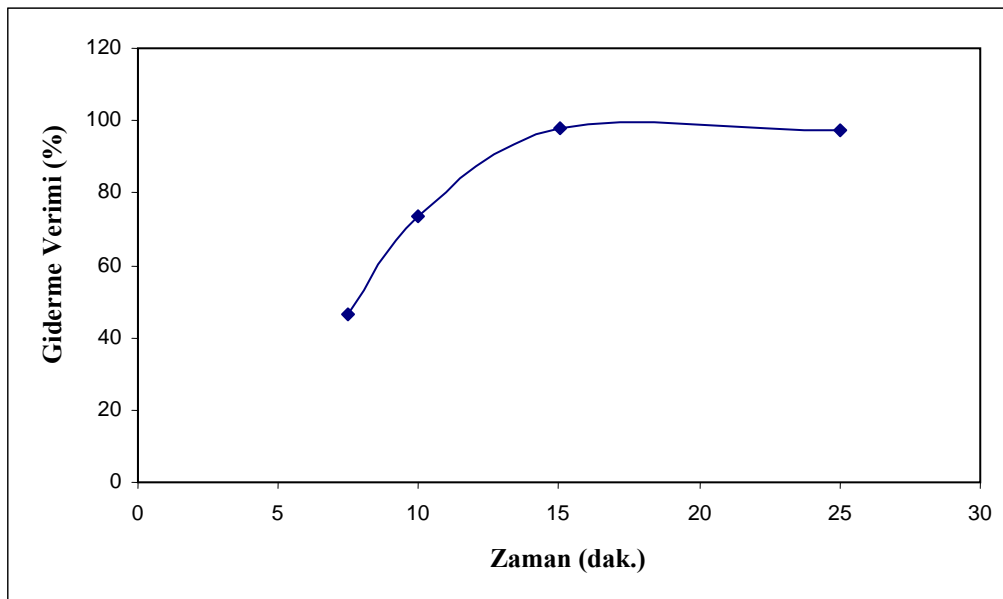
5.1.4. Elektrokoagülasyon üzerine zamanın etkisi

Zamanın renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 7,5-25 dakikalar arasında çeşitli sürelerde deneyler yapılmıştır. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.4. 'de ve Şekil 5.10.' de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 7,5-10 dakikalar arası giderme veriminde hızlı bir artış olduğu, 10-15 dakikalar arasında bu artışın yavaşladığı ve sonuçta 15 dakikada de en yüksek değere ulaştığı görülmektedir.

Enerji tüketimi ve alüminyum tüketimi göz önüne alınarak optimum süre 15 dakika alınabilir. Buda % 97,63'lük boya giderimi için 3,95 kWh/m³ enerji tüketimi, 12,63 kWh/kg boya ve 1,06 kg boya/kg Al değerleri bu deney süresinin sonuçlarıdır.

Tablo 5.4. Zaman etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları

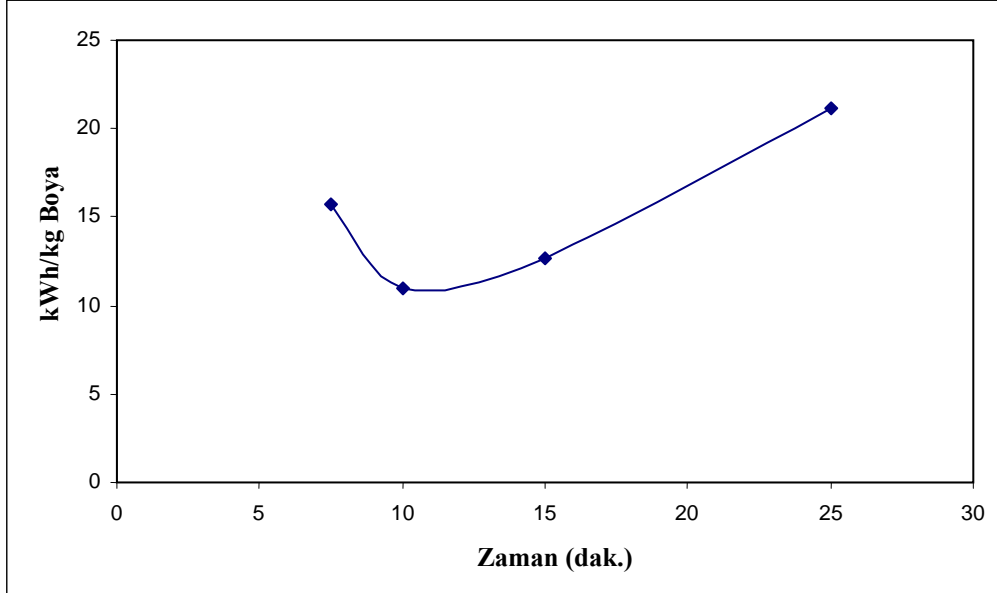
| EC Süresi (dk) | 7,5 | 10 | 15 | 25 |
|---|-------|--------|-------|-------|
| Akım , (A) | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Akım Yoğunluğu, (A/m ²) | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Voltaj, (V) | 16,75 | 13,85 | 14,1 | 14,1 |
| Boya Konsantrasyonu, (mg/l) | 240 | 240 | 240 | 240 |
| İletkenlik, (mS/cm) | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| İlk pH | 7,14 | 7,14 | 7,14 | 7,14 |
| Son pH | 8,51 | 8,97 | 9,03 | 9,23 |
| Akım Verimliliği, (%) | 128,3 | 139,85 | 193,7 | 117,5 |
| Çözünen anod miktarı (g) | 0,045 | 0,066 | 0,137 | 0,138 |
| Çözünen katot miktarı (g) | 0,011 | 0,032 | 0,083 | 0,050 |
| Toplam Çözünen Al Miktarı, (g) | 0,056 | 0,098 | 0,22 | 0,188 |
| 1 m ³ atıksu için harcanan Al, (g) | 75,07 | 130,67 | 293 | 251 |
| Enerji Tüketimi, (Wh) | 1,759 | 1,939 | 2,961 | 4,935 |
| Faraday , (F/m ³) | 5,22 | 6,96 | 10,44 | 17,41 |
| Boya Giderme Verimi, (%) | 46,67 | 73,75 | 97,63 | 97,17 |
| Elektrot Maliyeti(\$/m ³) | 0,135 | 0,235 | 0,527 | 0,451 |
| Enerji Maliyeti | 0,141 | 0,155 | 0,237 | 0,395 |
| Toplam Maliyet(\$/m ³) | 0,276 | 0,39 | 0,764 | 0,846 |
| kgBoya/kgAl | 1,98 | 1,8 | 1,06 | 1,23 |
| kWh/kgBoya | 15,71 | 10,96 | 12,63 | 21,18 |



Şekil 5.10 Zamanın giderme verimine etkisi

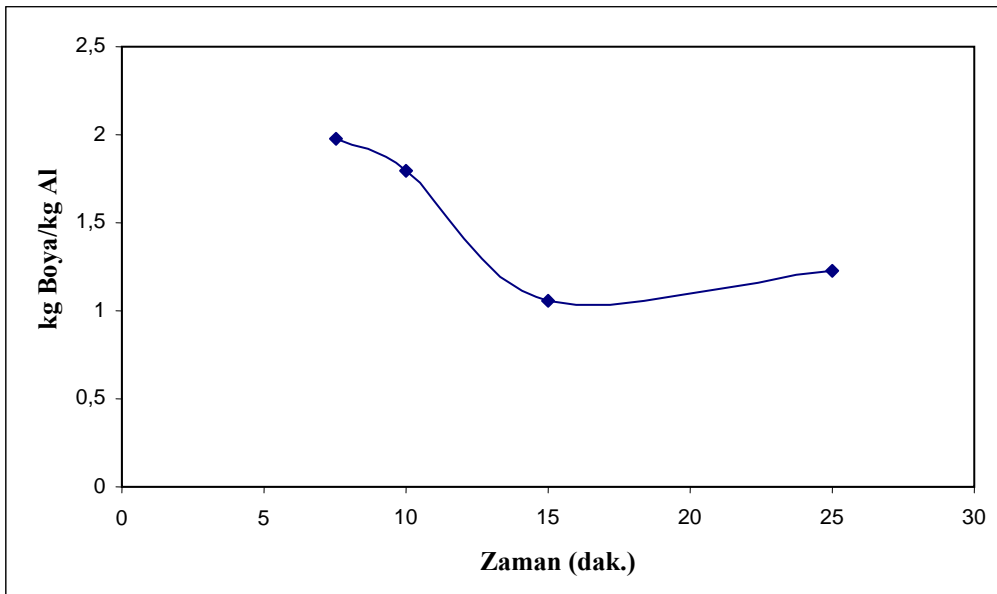
Eşit çözelti iletkenliği, eşit akım yoğunluğu ve farklı sürelerde yapılan zaman deneylerinde süredeki artışa bağlı olarak her bir deney için enerji tüketimi farklı gerçekleşmiştir. Zaman 7,5'dan 25 dak.'ya artarken enerji tüketimi 0,63 'dan 6,58 kWh/m³ 'e artmaktadır. Zaman enerji tüketimini direkt etkilemektedir. Bunun

yanında kg boya giderimi için enerji tüketimi 15,71 ve 21,18 kWh/kg boya değerleri gibi farklı olabilmektedir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Zamanın enerji tüketimine etkisi

Şekil 5.12’ de zamanın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan zaman arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin azaldığı görülmektedir.



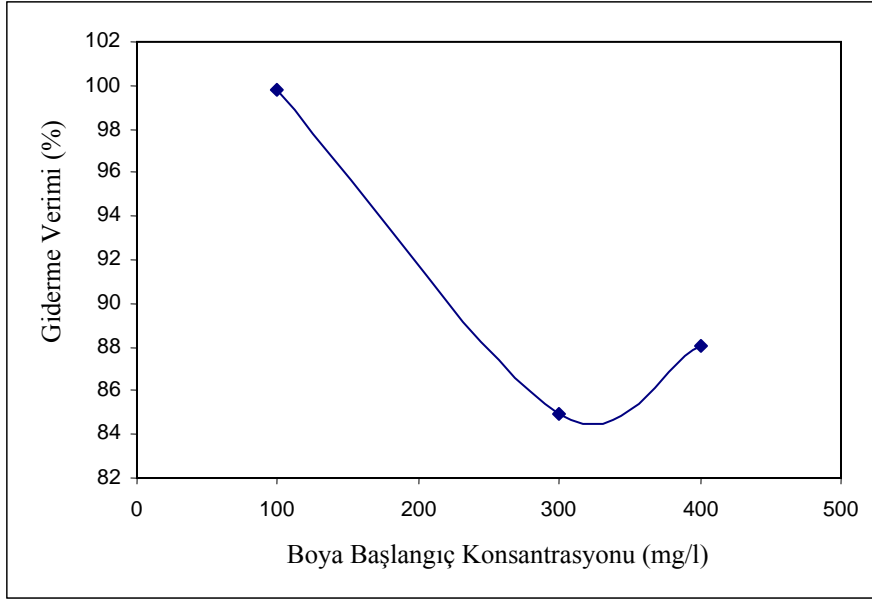
Şekil 5.12. Zamanın alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi

5.1.5. Elektrokoagülasyon üzerine boya konsantrasyonunun etkisi

Elektrokoagülasyonun verimi üzerine boya konsantrasyonunun etkisi 100-400 mg/l boya konsantrasyon aralığında incelenmiştir. Deney şartları ve sonuçlar Tablo 5.5 'de ve Şekil 5.13' de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 100 mg/l konsantrasyonda %99,77 boya gideriminin sağlandığı görülmektedir. 300 mg/l' de giderme veriminin %85 'e düştüğü görülmektedir.

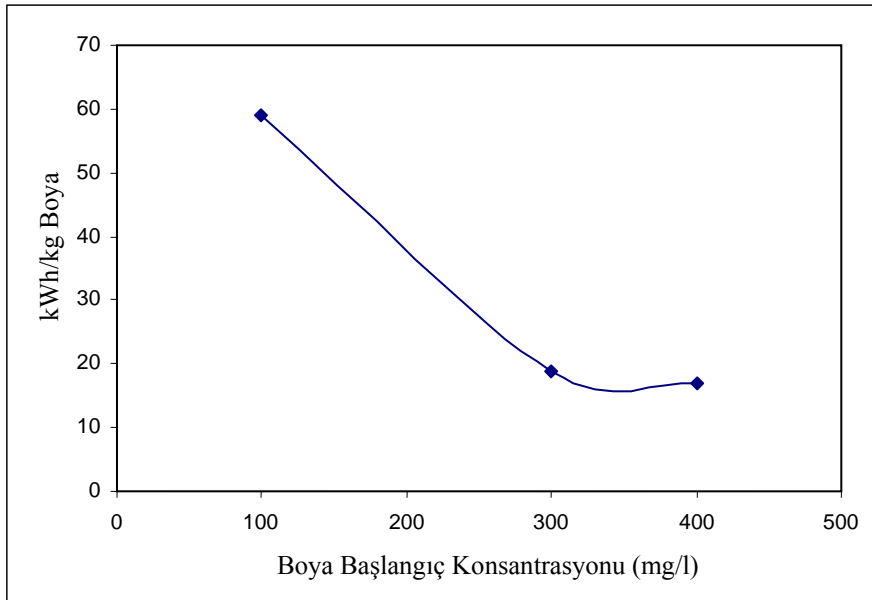
Tablo 5.5. Boya konsantrasyonu etkisinin araştırıldığı deneylerin şart ve sonuçları

| Konsantrasyon (mg/l) | 100 | 300 | 400 |
|---|--------|---------|--------|
| Akım , (A) | 0,84 | 0,84 | 0,84 |
| Akım Yoğunluğu, (A/m ²) | 60 | 60 | 60 |
| Voltaj. (V) | 28,1 | 23 | 28,3 |
| İlk pH | 7 | 7 | 7 |
| İletkenlik, (mS/cm) | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| Süre,(dak) | 15 | 15 | 15 |
| Son pH | 8,80 | 9,75 | 9,18 |
| Akım Verimliliği, (%) | 120,77 | 113,920 | 117,08 |
| Çözünen anod miktarı (g) | 0,085 | 0,060 | 0,083 |
| Çözünen katot miktarı (g) | 0,031 | 0,063 | 0,028 |
| Toplam Çözünen Al Miktarı, (g) | 0,116 | 0,123 | 0,111 |
| 1 m ³ atıksu için harcanan Al, (g) | 154,8 | 164,4 | 147,87 |
| Enerji Tüketimi, (Wh) | 5,901 | 4,83 | 5,943 |
| Faraday , (F/m ³) | 10,45 | 10,45 | 10,45 |
| Boya Giderme Verimi, (%) | 99,77 | 85 | 88 |
| Elektrot Maliyeti(\$/m ³) | 0,278 | 0,343 | 0,266 |
| Enerji Maliyeti | 0,472 | 0,386 | 0,475 |
| Toplam Maliyet(\$/m ³) | 0,75 | 0,729 | 0,741 |
| KgBoya/KgAl | 0,85 | 2,06 | 3,17 |
| kWh/kgBoya | 59,13 | 18,96 | 16,86 |



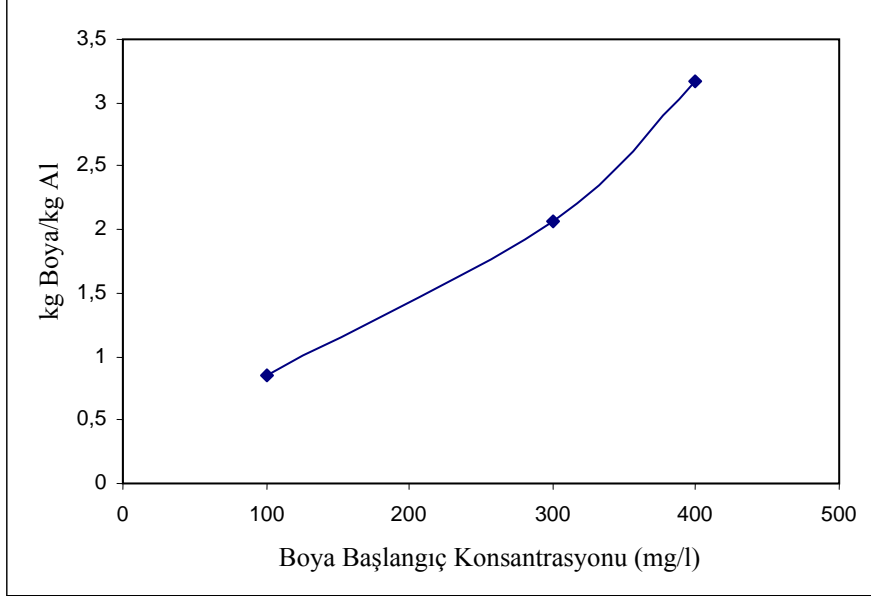
Şekil 5.13 Boya başlangıç konsantrasyonunun giderme verimine etkisi

Eşit akım şiddeti, eşit süre ve eşit çözelti iletkenliğinde yapılan boya konsantrasyonu deneylerinde ortalama enerji tüketimi $7,4 \text{ kWh/m}^3$ olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.14 Boya başlangıç konsantrasyonunun enerji tüketimine etkisi

Şekil 5.15’ de başlangıç boya konsantrasyonunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Buradan boya başlangıç konsantrasyonu arttıkça alüminyumun giderme kapasitesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.15. Boya başlangıç konsantrasyonunun alüminyumun boya giderme kapasitesine etkisi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Dispersol Red C-4G 150 boyasının elektrokoagülasyon çalışmalarında başlangıç pH'ı 3 için %99,72 boya giderme verimi elde edilirken, pH 12 için %30 elde edilmektedir. Elektrokoagülasyonda alüminyum elektrotlar kullanıldığında pH'ı etkileyen önemli iki mekanizma; katotta oluşan OH^- iyonları ile pH ta artışa ve pH 9' un üstündeki pH değerlerinde $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ üretimi için OH^- iyonlarının tüketilmesi pH ta azalışa neden olmaktadır. Böylece reaksiyon süresi boyunca artan veya azalan bir pH aralığı söz konusu olmaktadır. Boya giderme verimi açısından alüminyumun monomerik türlerinin çökelme aralığı pH 4-5 ve polimerik türlerinin çökelme aralığı pH 5-6 aralığını kapsayacak pH 3-6 aralığının giderme verimi açısından en iyi pH aralığı olduğu görülmektedir. Fakat maliyetler bakımından ve atıksu pH değerine yakın olduğundan pH 6 tercih edilebilir. pH 3-6 aralığında giderimin %99-98 ve toplam maliyetin 0,94-0,66 \$/m³ olduğu belirlenmiştir.

İletkenlik artışıyla elektrotlar arası potansiyel farkının azalması sonucu anodik oksidasyon azalmakta ve boya giderme veriminde düşüş gözlenmektedir. En iyi verim 1,2-1,6 mS/cm aralığında sağlanmıştır.

Akım yoğunluğu çalışmalarında akım yoğunluğunu arttırmanın verimi arttırdığı fakat bir noktadan sonra bunun bir dengeye ulaştığı görülmüştür. 20-80 A/m² aralığında çalışıldığında %92-97 giderim verimi elde edilmekte ve toplam maliyet 0.34\$/m³ olmaktadır. Akım yoğunluğunun enerji tüketimi ve işletme maliyetine etkisinden dolayı zaman denemesinde 60 A/m² akım yoğunluğu yeterli görülmüştür.

EC süresi için ise $t = 15-25$ dakika yeterli olacağı, verimin %97 civarında ve toplam maliyetin $0.76 \$/m^3$ olduğu bulunmuştur.

Boya giderme verimi boya konsantrasyonu arttıkça düşmektedir.

Alüminyum elektrotların bir avantajı, bakımının ve proses sonrasında temizlenmesinin kolay olmasındadır

6.2. Öneriler

- a) Farklı türdeki boyalar ve farklı özellikteki tekstil atıksuları için elektrokoagülasyon araştırılabilir..
- b) Farklı türde elektrotlar (demir anot- alüminyum katot, alüminyum anot - demir katot) için elektrokoagülasyonun verimi araştırılabilir.
- c) Değişik Elektrokoagülasyon reaktörleri (seri bağlı monopolar, paralel bağlı bipolar) için verim araştırılabilir
- d) Farklı konsantrasyonlarda, molekül ağırlıklarında ve sınıflardaki boyaların karışımları için EC ile giderme verimleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] LİN S.H, PENG C.F., Treatment of textile wastewater by electrochemical method. Water Res; 28:277-82. (1994)
- [2] BAŞIBÜYÜK M., YÜCEER A., YILMAZ T., Tekstil Atıksularında Renk Giderilmesinde Kullanılan İleri Teknolojiler, Kayseri I. Atıksu Sempozyumu, S. 82-86, Kayseri, (1998)
- [3] AMIRTHARAJAH A., O'MELIA C.R., Water Quality and Treatment, American Water Works Association, Fourth Edition, McGraw-Hill,1990
- [4] PLETCHER D. , WALSH F.C., Industrial Electrochemistry, The Universty Press, Cambridge, (1990)
- [5] MOLLAH M.Y.A., SCHENNACH R., PARGA JR., COCKE D.L., Elektrocoagulation (EC)-Science and Applications, Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41, (2001)
- [6] BENEFIELD L.D., JUDKINS J.F Jr, WEAND L.B., Prosess Chemistry for Water and Wastewater Treatment.,Pretice-Hall, INC.,Englewood Cliffs, New Jersey 07632; (1982)
- [7] DANESHVAR N., KHATAEE A.R., DJAFARZADEH N., The use of artificial neural networks (ANN) for modeling of decolorization of textile dye solution containing C. I. Basic Yellow 28 by electrocoagulation process, Journal of Hazardous Materials, B137, 1788-1795, (2006)
- [8] CHEN G., CHEN X. and YUE P.L., Seperation of Pollutants from Restaurant Wastewater by Electrocoagulation. Seperation and Purification Technology., 19. 65-76 (2000)
- [9] ŞENGİL İ.A., ÖZACAR M., Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. Journal of Hazardous Materials, B137, 1197-1205, (2006)
- [10] ZAROUAL Z., AZZİ M., SAİB N., CHAİNET E., Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent, Journal of Hazardous Materials, B131, 73-78, (2006)

- [11] 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)
- [12] JOHNSON P.N., AMIRTHARAJAH A., Ferric Chloride and Alum as Single and Dual Coagulants. *J. AWWA* 5, 232-39, (1983)
- [13] REBHUN M., LURIE M., Control of Organic Matter by Coagulation and Flocculation. *Wat. Sci. Tech.* 27,1-20, (1993)
- [14] GÜRSES G., YALÇIN M., DOĞAN C., Electrocoagulation of Some Reactive Dyes: A Statistical Investigation of Some Electrochemical Variables, *Waste Management*, 22, 491-99. (2002)
- [15] ÖĞÜTVEREN B.Ü., 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

B. Nihan GÜR, 26.05.1981' de İzmit' te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul' da tamamladı. 2001 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü' nden 2005 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü' nde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen, Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.