

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BOYAR MADDELERİN ELEKTROKOAGÜLASYON İLE
ARITILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**MESUT ÖZDEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2016**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOYAR MADDELERİN
ELEKTROKOAGÜLASYON İLE
ARITILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

MESUT ÖZDEN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. NİHAL BEKTAŞ

GEBZE
2016

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF DYE
WASTEWATER TREATABILITY USING
ELECTROCOAGULATION**

MESUT ÖZDEN

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. NİHAL BEKTAŞ

GEBZE

2016

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/01/2016 tarih ve 2016/14 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/05/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mesut ÖZDEN'in tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ

ÜYE

: Doç. Dr. Salim ÖNCEL

ÜYE

: Doç. Dr. Mahir İNCE

ONAY

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..15.../07.../2016 tarih ve ...2016.../47... sayılı kararı.

Prof. Dr. Nihal Bektaş
İMZA/MUHÜR

ÖZET

Tekstil endüstrisi kaynaklı boyar madde içeren atıksular, önemli bir çevre kirliliği kaynağı olarak bilinmektedirler. Bu atıksuların sucul alıcı ortama arıtılmadan ulaşması, ışık geçirgenliğinin azalmasına ve çözülmüş oksijen miktarının düşmesine dolayısıyla flora ve faunanın tahrip olmasına yol açmaktadır. Elektrokoagülasyon (EK), elektrik akımı altında iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltildiği veya indirildiği iyon transferi tepkimeleri sonucu kirleticilerin kimyasal reaksiyon ve çöktürme veya flotasyonla giderimini içeren bir proses olarak tanımlanabilir. Ayrıca elektrokoagülasyon tarafından oluşturulan floklar büyük ve az su bağları içerir dolayısıyla floklar daha kararlı ve süzme işlemi daha verimlidir. Diğer atıksu arıtma teknolojileri içinde, düşük maliyet ve kolay işletilebilir ekipmanları, kısa işletme süreleri, düşük kimyasal ihtiyacı ve çamur miktarı ile öne çıkan bir arıtma prosesidir.

Bu çalışmada, tekstil endüstrisinde kullanılan Dispers Brown 1 boyar maddesi ile sentetik olarak hazırlanmış boya çözeltisinin, farklı elektrot türleri ve çeşitli işletme şartlarında elektrokoagülasyon prosesi ile yürütülen arıtım sonucu giderim verimleri incelenmiştir. Bu amaçla tasarlanan reaktörde renk giderimi üzerine konsantrasyon, pH, iletkenlik ve akım gibi parametreler ile farklı elektrotların etkisi araştırılmıştır.

Farklı konsantrasyonlarda yapılan çalışmalarda boya konsantrasyonu arttıkça renk giderim veriminin düştüğü ve giderim zamanının uzadığı gözlemlenmiştir. Sabit konsantrasyonda, farklı akım ve iletkenlik değerlerinde yapılan çalışmalarda iletkenlik ve akım artırılması ile giderim veriminin arttığı görülmüştür. Farklı elektrot materyallerin etkisini görmek için Al ve Fe elektrotlar da kullanılmıştır. Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak yapılan çalışmada KOİ giderim verimi %68 olarak belirlenmiş ve enerji tüketim değeri hesaplanmıştır.

Bu çalışma ile sentetik olarak hazırlanmış sulu çözeltilerden boyar madde giderimi için Elektrokoagülasyon prosesinin başarılı olduğu sonucuna ulaşılmış ve optimum şartlar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tekstil Atıksuyu, Renk Giderimi, Elektrokoagülasyon.

SUMMARY

Textile industry wastewater, containing colorant, is known as source of an important environmental pollutant. The wastewater reaching the aquatic environment without treated leads to decrease light transmittance, dissolved oxygen concentration and so that flora and fauna deterioration as well. Electrocoagulation (EC) can be described as a process that contains removal of pollutants with chemical reactions and coagulation or flotation as a result of ion transfer reactions, ionic compounds oxidized or reduced on anode and cathode under electrical current. Flocs generated by EC are big and contains less water bonds so that the flocs are more stable and the filtration are more efficient. EC is a featuring treatment process with low cost, easy-to-operate equipment, short operation time, low chemical necessity and less sludge quantity among other wastewater treatment technologies.

In this study, removal efficiency of the synthetic dye solution, prepared with the colorant of Dispers Brown 1 that can be using in textile industries, was investigated as a results of the treatment carried out via EC process with different electrode types and operational conditions. Effects of concentration, pH, electrical conductivity, current and different electrode on colour removal were studied in the designed reactor for this purpose.

Longer removal time and decreasing the removal efficiency were observed by increasing the dye concentration in studies carried out with different concentrations. Studies performed at constant concentration and different current and electrical conductivity, increase in removal efficiency was observed with current and electrical conductivity increment. Al and Fe electrodes were also used in order to see the efficiency of different electrode materials. COD removal efficiency of 68% was determined and the value of energy consumption was calculated in the study of using real textile induced wastewater at optimum conditions.

It is concluded that EC process was successful for removal of colorant from the solutions prepared synthetically and determined the optimum conditions.

Keywords: Textile induced wastewater, Colour removal, Electrocoagulation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans programım süresince, her aşamada desteklerini esirgemeyen kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ'a,

Laboratuvar çalışmalarım ve tez hazırlama aşamasında yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Mesut TEKBAŞ, Arş. Gör. Emin Ender ÇELEBİ ve Yakup MEYDANLIOĞLU'na,

Bugünlere gelmemde maddi manevi destek olmaktan kaçınmayarak her zaman yanımda olduklarını bildiğim, güç aldığım büyük emeği geçen aileme ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Serpil ÖZDEN'e,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu proje, Atıksulardan elektrokimyasal olarak boyar madde gideriminde farklı elektrot malzemelerin etkisinin belirlenmesi, GYTE BAP birimi PROJE NO: 2012-A-21 ile desteklenmiş olup, verilen destek için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. BOYAR MADDELER ve TEKSTİL ATIKSULARI	4
2.1. Boyalar ve Boyarmaddelerin Özellikleri	4
2.2. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması	4
2.2.1. Boyarmaddelerin Çözünürlüklerine Göre Sınıflandırılması	5
2.2.2. Boyarmaddelerin Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırılması	6
2.2.3. Boyarmaddelerin Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırılması	6
2.3. Tekstil Atıksuları ve Atıksu Arıtma Yöntemleri	7
2.3.1. Tekstil Atıksuları Kaynakları ve Özellikleri	7
2.3.2. Tekstil Atıksularında Kullanılan Boyar Maddeler ve Boyar Maddelerin Çevresel Riskleri	9
2.3.3. Tekstil Atıksuları Arıtma Yöntemleri	11
3. ELEKTROKİMYASAL ARITMA YÖNTEMLERİ	14
3.1. Elektrokimyasal Arıtma Proseslerinin Avantaj ve Dezavantajları	15
3.2. Atıksularda Elektrokimyasal Arıtma Türleri	16
3.2.1. Elektrooksidasyon (EO)	16
3.2.2. Elektroflotasyon (EF)	17
3.2.3. Elektrokoagülasyon (EK)	18
3.3. Elektrokoagülasyonun Teorisi	19
3.4. Elektrokoagülasyon Prosesini Etkileyen Faktörler	24
3.5. Elektrokoagülasyonun Atıksulara Uygulanması	26

4. MATERYAL ve METOD	28
4.1. Materyal	28
4.2. Deney Düzenegi	28
4.3. Deneysel Metod	30
4.4. Analiz Metodu	31
4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi	31
4.4.2. Kullanılan Eşitlikler	32
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	35
5.1. Renk Giderimi Üzerine Konsantrasyonun Etkisi	35
5.2. Renk Giderimi Üzerine pH'ın Etkisi	37
5.3. Renk Giderimi Üzerine İletkenliğin Etkisi	39
5.4. Renk Giderimi Üzerine Akımın Etkisi	41
5.5. Renk Giderimi Üzerine Elektrotların Etkisi	43
5.6. Optimum Sonuçlara Göre Gerçek Tekstil Atıksuyu Çalışması	44
5.7. Çalışılan Gerçek Tekstil Atıksuyu ile Yapılan Hesaplamalar	45
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Acıklamalar</u>
<u>Kisaltmalar</u>	
μ	: Mikro
dak	: Dakika
g	: Gram
sa	: Saat
sn	: Saniye
Al	: Alüminyum
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
EF	: Elektroflotasyon
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrokoksidasyon
Fe	: Demir
GSMH	: Gayri Safi Milli Hasıla
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
NaCl	: Sodyum Klorür
TOK	: Toplam Organik Karbon

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Elektrokoagülasyon reaktörü düzeneği.	20
3.2: Sulu ortamda alüminyum kompleksleri ve pH değeri ile ilişkisi.	22
4.1: Dispers Brown 1 moleküler yapısı.	28
4.2: Deney düzeneğinin şematik görünümü.	29
4.3: Çalışmada kullanılan güç kaynağı ve manyetik karıştırıcı.	29
4.4: Spektrofotometre cihazı ve dalga boyu taraması sonucu.	31
4.5: Fotometre cihazı.	32
4.6: Absorbans - Dispers Brown 1 Kalibrasyon Eğrisi.	32
5.1: Farklı konsantrasyonlardaki renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	36
5.2: Farklı konsantrasyonlarda renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	37
5.3: Sabit konsantrasyon ve farklı pH'larda renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	38
5.4: Sabit konsantrasyon ve farklı pH'larda renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	39
5.5: Sabit konsantrasyon ve farklı iletkenlik koşullarında renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	40
5.6: Sabit konsantrasyon ve farklı iletkenlik koşullarında renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	41
5.7: Sabit konsantrasyon ve farklı akım koşullarında renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	42
5.8: Sabit konsantrasyon ve farklı akım koşullarında renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	43
5.9: Optimum şartlarda farklı elektrot türleri kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	44
5.10. Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi.	45
5.11. Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak zamana karşı renk giderim (pt-co) veriminin incelenmesi.	45

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Çeşitli tekstil endüstrilerine ait işlem basamakları ve atıksu bileşimleri	8
2.2: Tekstil endüstrisi atıksularını arıtma prosesleri değerlendirmesi	12
3.1: Al^{+3} sulu ortamdaki hidroksi kompleks türleri.	21
4.1: Kullanılan boyarmadde çözeltisi özellikleri.	28



1. GİRİŞ

İlk çağlardan beri insan, çevresinden faydalanarak onu güzelleştirmeye ve korumaya çalışmıştır. Süslenme içgüdüğü nedeniyle taş devri zamanlarında dahi doğadan birçok boya ve boyarmadde elde etme ihtiyacı duymuştur. Milattan yüzlerce yıl öncesine ait bulunan mağara duvarlarındaki resimleri ve ölü kemiklerinin kırmızı renkli olması da ilgi çekicidir. Bunun ölümlerine üzerine sürülen demir oksitten ileri geldiği düşünülmektedir. İlk kullanılan boyalarının metal oksit karışımı, killi toprak ve bazı bitki ve böceklerdeki özularının su ile karıştırılarak boyanacak yere sürüldüğü sanılmaktadır. Boyalara sağlamlık ve parlaklık vermek için eski mısırlıların zambak karıştırdığına mısır mumyalarında rastlanılabilir [Bahn, 2007].

Doğada sağlanan çeşitli kaynaklardan yararlanılarak yapılan boyamacılık işlemine doğal boyamacılık denir ve günümüzden yaklaşık 5000-6000 yıl önce başlayan doğal boyamacılığın 1856 yılında William Henry Perkin tarafından ilk sentetik boyarmaddenin bulunmasına kadar değişmeden sürdüğünü söyleyebiliriz. XIX. yüzyılın ikinci yarısına bakıldığında bir yandan yeni boyarmaddeler bulunurken bir diğer yandan bitkilerdeki boyarmaddelerin sentezi gerçekleşmiştir. XIX. yüzyılın sonunda doğal boyamacılığı ortadan kaldıran, boyarmaddelerin büyük miktarlarda ve ucuz olarak sentezidir.

Tekstil malzemesinin kalıcı olarak renklendirilmesi işlemine boyama denirken, malzemeyi renklendiren maddelere boyarmadde denir. İnsanlar kullandıkları boyarmaddeleri bitkilerden, hayvanlardan ve topraktan elde etmek suretiyle, doğal elyaf olan yünü, pamuğu ilk çağlardan bu yana boyamaktadırlar. İlk sentetik boyarmadde olan Movein'i sentezi sonrasında, sentetik boyarmaddelerin üretimi başlamış ve üretimin büyük hızla arttığı gözlenmiştir. Bunun yanında doğal boyarmaddelerin kullanılması büyük ölçüde azalmaya başlamıştır. Günümüzde ise sentetik boyarmaddeler ağırlıklı olarak kullanılmakta; halı, kilim ve yazma gibi el sanatlarında doğal boyarmaddeler hala uygulanmaktadır.

Bir yandan teknolojinin hızla gelişmesi ve bir yandan nüfus artışı ile birlikte yeni endüstri dalları ortaya çıkmış, mevcut endüstri dalları ise kapasitelerini artan nüfus ile genişletmişlerdir. Mevcut doğal kaynakların ve bu kaynakların en önemlisi olan suyun kullanımını bu durum arttırmaktadır. Kullanılan sular kirlenmiş olarak doğal su ortamlarına verilir. Evsel atıksulara göre endüstri kaynaklı atıksular, kaynak, miktar ve karakter açısından büyük farklılıklar gösterir. Endüstriyel

atıksuların ise doğaya etkileri çok daha önemli seviyede olmakla birlikte doğal dengeyi değiştirici ve bazı durumlarda geri dönölmez nitelikte olabilir. Doğal kaynakların korunması gerekliliğinin çevre bilincini ortaya çıkarması; doğal kaynak sınırlılığı ve bizden sonraki nesillerin de bu kaynaklardan faydalanması gerektiğindedir. Çevre kirliliğine neden olan etkenlerin kontrol altında tutulması ve endüstri tesislerinin atıksularının doğal su ortamlarını kirletmesini engelleyecek tedbirlerin alınması gerekmektedir. Türkiye’de 1974 yılına kadar endüstriyel kirlenme kontrolü konusunda bir yasal düzenleme bulunmamaktayken, aynı yıl 1380 sayılı Su Ürünleri Kanunu çerçevesinde endüstriler için deşarj standartları getirilmiş ve 1983 yılında da Çevre Kanunu’nda endüstriyel kirlenme kontrolü, genel kirlenme kontrolü kapsamında belirli esaslara bağlanmıştır. Bunun yanında daha sonra bazı ön arıtma standartları da belediyelerce yürürlüğe girmiştir.

İhracat, istihdam ve GSMH üzerindeki katkıları bakımından tekstil sektörü Türkiye ekonomisinde lokomotif sektörlerdendir. Son yıllarda ülke ihracatının çok önemli bir parçası olan Türk Tekstil Sanayisinin sağladığı milli hâsıla ve oluşturduğu istihdam bakımından ülke ekonomisine katkısı büyük olmaktadır. Bu nedenle tekstil sanayisinin kısa ve orta vadede çevre açısından gerekliliklerinin ve önceliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Ekonomideki yerinin yanı sıra tekstil sektörü, su ve enerji tüketimi yoğun bir sektör olması nedeniyle de çevresel kaygıların odağında olmaya devam etmektedir. Su ve enerji başta buhar eldesinde, yıkama/durulama devrelerinde ve boyama endüstrisinde tüketilir. Türkiye’de tekstil boyama ve son işlem proseslerinden kaynaklanan atıksuyun toplam yıllık hacmi yaklaşık 150 milyon m³ton’dur. Bu atıksuyun büyük bir kısmı boyahane çıkışlarından kaynaklanan renkli atıksulardır.

Tekstil endüstrisi kaynaklı boyar kirleticiler, önemli bir çevre kirliliği kaynağıdır. Boyama ve son işlemler sırasında boyanın %1-15’inin atıksu akımına bırakıldığı düşünölmektedir. Bu renkli atıksuların alıcı ortamlara deşarjı, estetik bozunmanın yanı sıra içerikleri ve karakterleri bakımından da çevreyi tehdit etmektedirler. Işık geçirgenliğinin azalması ve çözünmüş oksijen miktarının düşmesi canlıların yok olmasına sebep olarak, suyun yeniden kullanım imkânlarını da kısıtlamıştır. Aynı zamanda çoğu boyar maddelerin içeriğinde toksik maddeler bulunduğu da bilinmektedir.

Literatürde tekstil atıksularından renk giderilmesi ve arıtılması konusunda geliştirilen birçok yöntem mevcuttur. Daha önce denenmiş olan biyolojik

oksidasyon, kimyasal çöktürme, klorlama, ozon, adsorpsiyon, kimyasal oksidasyon, membran prosesler yanında son yıllarda boyarmadde içeren tekstil atıksularının arıtılması konusunda elektrokimyasal yöntemler başarı ile kullanılmaktadır. 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 Dispers Brown 1 boyar maddesi ile sentetik olarak hazırlanmış sulu çözeltinin, farklı elektrot türleri ve çeşitli işletme şartlarında elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması sonucu giderim verimleri incelenmiştir.

Bu amaçla tasarlanan reaktörde renk giderimi üzerine konsantrasyon, pH, iletkenlik ve akım gibi parametreler ile farklı elektrotların etkisi araştırılmıştır. Bunun yanında optimum sonuçlarla gerçek tekstil atıksuyu KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatı hesaplanmıştır.

2. BOYAR MADDELER ve TEKSTİL ATIKSULARI

2.1. Boyalar ve Boyarmaddelerin Özellikleri

Boyama, cisimlerin renklendirilmesini ifade eder. Cisimlerin yüzeyleri üzerinde güzel bir görünüm sağlanması veya dış tesirlerden korunabilmesi için renkli bir görünüme getirilmesi işleminde kullanılan maddelere boya denir. Boyalar bağlayıcı aracılığıyla karışmış ancak çözünmemiş karışımlardır. Boya kuruyan yağ ile bir yüzeye uygulanır. Fırça ya da boyama tabancaları yardımıyla yüzeylere uygulanır. Yağın kuruması ile beraber boyanan yüzey oldukça kalın görünüme sahip yeni bir tabaka ile kaplanmış olur. Yapılan bu işlem aslında bir boyama işlemi değildir, bu bir örtmedir. Uygulandıkları yüzeylerde hiçbir değişikliğe sebep olmazlar. Buldukları yüzeylerden kazımak suretiyle büyük parçalar şeklinde uzaklaştırılabilirler.

Boyarmadde ise kumaş, elyaf gibi cisimlerin renkli hale getirilmesinde uygulanan maddelere denir. Boyarmaddelerle yapılan renklendirme işlemi boyalarla yapılan renklendirme işlemine benzemez. Çoğunlukla süspansiyonlar veya çözeltiler halinde farklı boyama metotlarıyla uygulanırlar. Boyarmadde ile boyanacak olan cisimler dayanıklı ve devamlı bir şekilde birleşerek cismin dış yüzeyini yapı bakımından değiştirirler. Boyarmadde çoğunlukla cismin yüzeyi ile fizikokimyasal veya kimyasal bir ilişkiye girerek birleşmişlerdir. Boyarmadde ile boyanan yüzey silme, kazıma, yıkama gibi işlemlerle başlangıçtaki işlem görmemiş haldeki renksiz durumunu geri alamaz.

2.2. Boyarmaddelerin Sınıflandırılması

Boyarmaddeleri çözünürlüklerine göre, boyama özelliklerine göre, kimyasal yapılarına göre ve benzeri karakteristikler göz önünde bulundurulmak suretiyle sınıflandırmak mümkündür [Özcan, 1978], [Başer ve İnanıcı, 1990].

2.2.1. Boyarmaddelerin Çözünürlüklerine Göre Sınıflandırılması

Boyar maddeler suda çözünen ve çözünmeyen olarak iki grupta incelenebilir [Başer ve İnancı, 1990].

Suda çözünenlerde, boyarmadde molekülü en az bir tane tuz oluşturabilen grup taşır. Boyarmaddenin sentezi işleminde kullanılan başlangıç maddeleri suda çözüdürücü grup içermiyorsa, bu grubu boyarmadde molekülüne daha sonradan eklemek suretiyle de istenilen çözünürlük sağlanabilir. Ancak, boyarmadde sentezinde tercih edilen yöntem başlangıç maddelerinin iyonik grup içermesidir. Tuz teşkil edebilen grubun karakterine göre suda çözünebilir boyarmaddeler anyonik, katyonik ve zwitter suda çözünen boyarmaddeler olarak üçe ayrılırlar.

Suda Çözünmeyen boyar maddeler ise, genel olarak tekstilde ve diğer alanlarda kullanılır. Suda çözünmeyen boyarmaddeleri çeşitli gruplara ayırmak mümkündür:

- Substratta Çözünen Boyarmaddeler;

Suda çok ince süspansiyonlar halinde dağıtılarak, özellikle sentetik elyaf üzerine uygulanan dispersiyon boyarmaddelerdir.

- Organik Çözücülerde Çözünen Boyarmaddeler;

Her türlü organik çözücüde çözünebilirler. Sprey veya lak halinde uygulanabilen bu boyarmaddelere solvent boyarmaddeleri de denilir. Vaks, matbaa mürekkebi ve petrol ürünlerinin renklendirilmesinde bu boyarmaddeler kullanılırlar.

- Geçici Çözünürlüğü Olan Boyarmaddeler;

Çeşitli indirgenme maddeleri ile suda çözünebilir hale getirilirler. Yeni halinde elyafa uygulanabilirler. Sonrasında elyaf içinde iken yeniden yükseltgenerek suda çözünmez hale getirilirler. Kükürt ve küpe boyarmaddeleri bu yöntemlere göre uygulanırlar.

- Polikondensasyon Boyarmaddeleri;

Son dönemlerde geliştirilen boyarmaddelerdir ve elyaf üzerine uygulanması sırasında veya uygulandıktan sonra birbirleriyle ya da başka moleküllerle kondense olarak daha büyük moleküller oluşturan boyarmaddelerdir.

- Elyaf İçinde Oluşturulan Boyarmaddeler;

Kimyasal bir reaksiyonla iki ayrı bileşenden elyaf içinde oluşturulan boyarmaddelerdir. Bu boyarmaddeler suda çözünmeyen pigmentlerdir. Ftalosiyaninler ve azoik boyarmaddeler bu sınıfa girer.

- Pigmentler;

Diğer substratlara ve elyafa karşı affinitesi olmayan, boyar maddelerden farklı yapıda bileşiklerdir. Pigmentler süspansiyon halinde kuruyan reçineler ve yağlar içinde uygulanırlar.

2.2.2. Boyarmaddelerin Boyama Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Boyama uygulayıcıları için, boyarmaddeler kimyasal yapısından ziyade boyarmaddenin hangi yöntemlerle elyafı boyayabildiklerine önemlidir. Bu sebeple boyarmaddeleri boyama özelliklerine göre de sınıflandırılırlar [Özcan, 1978], [Başer ve İnanıcı, 1990].

- Bazik
- Asit
- Direkt
- Mordan
- Reaktif
- Küp
- İnkişaf
- Metal-Kompleks
- Dispersiyon
- Pigment

2.2.3. Boyarmaddelerin Kimyasal Yapılarına Göre Sınıflandırılması

Yapısal olarak boyarmaddeleri sınıflandırırken, molekülün temel yapısı esas alınır. Bunun yanında molekülün kromojen ve renk verici özellikteki kısmı da esas alınabilir [Başer ve İnanıcı, 1990].

Sentez ve pratik uygulamalarının göz önüne alındığı bir kimyasal sınıflandırma çerçevesinde boyarmaddeler 7 gruba ayrılır;

- Azo,
- Nitro ve nitrozo,
- 3 . Polimetin,
- Arilmetin,
- Aza (18) annulen,
- Karbonil,
- Kükürt.

2.3. Tekstil Atıksuları ve Atıksu Arıtma Yöntemleri

2.3.1. Tekstil Atıksuları Kaynakları ve Özellikleri

Dünyada hızlı endüstrileşme ile tekstil endüstrisi atıksu miktarlarının her geçen gün artmaktadır. Tekstil endüstrisi, farklı alt sektörlerden kaynaklanan karma bir yapıya sahip olduğundan, tekstil atıksuları, genel olarak miktar ve bileşim açısından değişiklik gösterirler ve oldukça toksik ve zararlı oldukları bilinmektedir. Her gün gelişen teknoloji, yenilenen işletme prosesleri ve uygulanan teknolojilerdeki değişiklikler, oluşan atıksuların bileşimini etkilemektedir. Örneğin; haşılama işleminde ortaya çıkan atıksu miktarının düşük olup, kirlilik yükünün yüksek olması; yüksek hacimli, renkli ve düşük organik madde içeren atıksuların meydana gelmesine neden olarak yıkama, boyama ve ağartma işlemlerinin çok miktarda su kullanımı gerektirdiği söylenebilir [TTSD, 2002].

Tekstil endüstrisi atıksuları içeriği boyama ve diğer bazı işlemlerde kullanılan organik ve inorganik yapıdaki kimyasalların çeşitliliğine, uygulanan işletme şartlarına, ıslak ve kuru proses aşamalarında kullanılan farklı organik kökenli bileşiklere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu da atıksuların standart bir arıtma yöntemi ile arıtılmasını zor hale getirmektedir. Genel olarak bu tip atıksularda renk, pH, BOİ, KOİ ve tuzluluk gibi birçok parametre değeri yüksektir. Çeşitli tekstil prosesleri sırasında oluşan atıksu miktarları ve atıksuların bileşimi Tablo 2.1’de verilmiştir [Bisschops and Spanjers, 2003].

Tablo 2.1: Çeşitli tekstil endüstrilerine ait işlem basamakları ve atıksu bileşimleri.

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
KOİ (mg/L)	Yün	-	5000-90000	-	7920	-
	Pamuk	950-20000	8000	288-13500	1115-4585	-
	Sentetik	-	-	-	620	1515
BOİ ₅ (mg/L)	Yün	-	2270-60000	400	400-2000	-
	Pamuk	-	100-2900	90-1700	970-1460	-
	Sentetik	-	500-2800	-	530	-
Renk (ADMI)	Yün	-	2000	-	2225	-
	Pamuk	64-1900	694	153	1450-4750	-
	Sentetik	-	-	-	1750	-
Toplam Katı (mg/L)	Yün	-	28900-49300	910	-	-
	Pamuk	-	-	2300-14400	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	150-250
Toplam Askıdaki Katı (mg/L)	Yün	-	1000-26200	900	-	-
	Pamuk	18-800	184-17400	130-25000	120-190	-
	Sentetik	-	600-3300	-	140	-
Toplam Çözünmüş Katı (mg/L)	Pamuk	530-6900	-	4760-19500	-	-
Çözünmüş Organik Karbon (mg/L)	Yün	-	5800	-	-	-
	Pamuk	250-2750	-	320	-	-
Toplam Kjeldahl Azotu (mg/L)	Yün	70	-	40	-	-
	Pamuk	-	-	-	-	164
	Sentetik	-	604	-	-	-
Amonyum Azotu (mg/L)	Pamuk	9-19	-	8-19	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	129
Toplam Fosfor (mg/L)	Pamuk	4-10	-	6-60	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	21
Fosfat (mg/L)	Yün	-	89	-	-	-
Sülfür (mg/L)	Yün	-	0-2	-	-	-
	Pamuk	-	-	-	325-900	-
Sülfat (mg/L)	Pamuk	-	-	-	1750-2690	-
Klorür (mg/L)	Genel Elyaf lar	-	-	90-100	26000	-
Yağ-Gres (mg/L)	Yün	-	580-55000	-	-	-
Cr ²⁺ (mg/L)	Yün	-	50	-	-	-
pH	Yün	-	7.6-10.4	6	4.6-8	-
	Pamuk	8.8-9.2	7.2-13	6.5-13.5	9.2-10.1	-
	Sentetik	-	8-10	-	11.7	-
Su Tüketimi (L.kg ⁻¹ elyaf)	Yün	-	4-77.5	-	40-150	280-520
	Pamuk	-	2.5-43	30-50	38-143	-
	Sentetik	-	17-67	-	38-143	-

2.3.2. Tekstil Atıksularında Kullanılan Boyar Maddeler ve Boyar Maddelerin Çevresel Riskleri

Tekstil sanayisinde elyafa renk vermek sebebiyle boyama prosesinde çeşitli boyar maddeler kullanılır. Elyafa yapışmayıp atıksuya karışan boyaların arıtılmadan alıcı ortama verilmesi sebebiyle renk oluşmakta, estetik görünüm bozulmakta ve suyun ışık geçirgenliği azalmaktadır. Bu da fotosentezi olumsuz yönde etkiler. Bunun yanında arıtılmalarını zorunlu kılan bir diğer etken, boyar maddeler ve yan ürünlerinin toksik etkisi olması, insanlar üzerinde mutajenik ve kanserojenik etki göstermesidir [Rajaguru et al., 2002], [Weisburger, 2002], [Pandey et al., 2007].

Boyar maddeler, organik bir molekül içinde renkli görünümü sağlayan atom, atom grubu veya elektronlar olarak tanımlanan kromoforlardan ve kromofor grubunun özelliklerini artıran ve destekleyen oksokrom isimli gruplardan oluşur. Azo (-N=N-), karbonil (-C=O), metil (-CH=) ve nitro (-NO₂) kromofor gruplarıdır. Söz konusu boyar maddeler içinde üretilen yıllık boya miktarının ağırlıkça %70'ini oluşturan boyar madde, bir veya daha fazla azo bağı (-N=N-) içermeleri ile karakterize edilen azo boyalardır. Kromojen; boyar maddelerin yapısında bulunan ve kromofor içeren aromatik halkalı bileşikler olarak tanımlanır. Kromojenlerin renkleri soluk olması sebebiyle oksokrom ismi verilen kromofor grubunun çevresinde bulunan ve boyar maddenin rengini, boyama özelliklerini etkileyen ikincil gruplar eklenebilir. Oksokromların en önemlileri, amin (-NH₃), karboksil (-COOH), sülfonat (-SO₃H) ve hidroksil (-OH)'dir. Boyalara suda çok yüksek çözünürlük sağlayan sülfonat gruplarıdır. Oksokrom gruplar; reaktif, direkt, asit, bazik, mordan, dispers, pigment, anyonik ve kök, sülfür, solvent ve dispers boyalarda yer alırlar. Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları ve hidrofobik etkileşimler sonucunda boyar maddelerin elyaf üzerine bağlanması işlemi gerçekleşir. Boyar maddenin elyafı tutunmasını boyanın yapısı ve boyanın kimyasal bileşenleri etkiler ve en güçlü boyar madde-elyaf bağlanması, boya ve elyafın zıt yüklere sahip olduğu elektrostatik etkileşimler ile kovalent bağ oluşturması neticesinde gerçekleşir. Boyama prosesinde boyar madde tipine bağlı olarak elyafa yapışmayan boyaların oranı tekstil endüstrisinde %50'ye çıkabilir [Welham, 2000], [Cing, 2001]

Elyafın (pamuk, naylon, yün, ipek) içerisindeki OH⁻, NH⁻ veya SH grupları ile kovalent bağ oluşturan reaktif gruplarla karakterize edilen azo boyar maddeler çoğu zaman sarı, kırmızı ve turuncu renk elde etmek amacıyla kullanılırlar ve

istenilen rengi yakalayabilmek için genellikle bu renkler karıştırılarak boya banyosunda uygulanmaktadır. Renkleri elde etmek için kullanılan boyar maddeler aynı kimyasal yapıda olmayabilir. Azo, ftalosiyanın ve antrakınonlar en yaygın kullanılan gruplardır. Tekstil boyaları içerisinde azo boyalardan sonra gelen ikinci önemli boya gurubu antrakınon boyalarıdır. Antrakınon boya gurubu çoğunlukla violet, yeşil ve mavi renkler için uygulanır [Dos Santos et al., 2007], [Hao et al., 2000]

Genellikle 10-20 mg/L konsantrasyon aralığında boyar madde içeren ve oldukça renkli atıksular olan tekstil atıksuları, herhangi bir arıtma işlemi uygulanmadan alıcı ortama direkt deşarj edildiklerinde bazı problemlere neden olurlar. Boyaların doğada biyo-akümülyasyona neden olmaları ve toksik etki göstermeleri bunların en önemlileridir. Kimyasal ve fotolitik olarak stabil olması sebebiyle boyar maddeler, doğal çevrede kalıcıdır. Bütün bu sebepler dolayısıyla, arıtılmadan çevreye deşarj edilmesi ekotoksik risk oluşturur ve estetik problemleri de beraberinde getirir. Aşağıda bu ekotoksik etkilerden bahsedilmiştir [O'Neill et al., 2000], [Wong and Yuen, 1996]

Boya kompleksi besin zincirine kadar girmiş, sucul canlılar yanı sıra insan vücuduna kadar ulaşabilmiştir. İnsan sağlığına zararlı bileşikler olarak azo bağının indirgenmesi sonucu oluşan benzidin aromatik aminin, o-toluidinin ve fenilendiamininden bahsedilebilir. Sindirim sisteminin anaerobik bölgesindeki bakteriyel aktiviteler ile memelilerde azo boyaların indirgenmesi gerçekleşmektedir. Azo boyaların indirgenmesi sonucu bağırsaklarda açığa çıkan aromatik aminler, absorplanarak idrarla dışarı atılmaktadır [Chung and Stevens, 1993], [Lourenço et al., 2001]

Alıcı ortamda bulanıklığa neden olan boyar maddeler güneş ışınlarının geçişine engel olurlar. Bununla birlikte fotosentezin yavaşladığı ve çözülmüş oksijen seviyesinin düşerek suda yaşayan canlılar arasındaki doğal dengenin bozulduğu gözlemlenir. Sucul ortam sedimentlerinde boya bileşiklerinin indirgenmesi ve kanserojen özellikli aromatik aminler üretmek suretiyle ekosisteme yayıldığı bilinir. Boyar maddelerin akut toksisitelerinin genellikle düşük olduğu, boyar maddelerin toksik etki göstermelerinin araştırıldığı çalışmalarda, suda yaşayan canlılardan (alg, balık, bakteri vb.) insanlara kadar uzanan geniş çaplı testler sonucu tespit edilmiştir. Ancak boyar maddelere karşı akut hassasiyet reaksiyonlarına insanlarda genellikle

karşılaşmaktadır. Bazı dispers boyar maddelerin özellikle egzama gibi alerjik reaksiyonlara sebep olduğu bilinir.

2.3.3. Tekstil Atıksuları Arıtma Yöntemleri

Tekstil endüstrisinde farklı kullanım amaçlarına göre ürünler üretildiğinden dolayı farklı proses akışları mevcuttur. Bu nedenle tekstil endüstrisi atıksularını genel anlamda karakterize etmek mümkün değildir. Her işletmenin kendine özgü prosesi ve bu prosese bağlı atık karakteri bulunmaktadır. Bu bağlamda tekstil kaynaklı atıksuların arıtım yöntemlerini geniş bir yelpazede değerlendirmek gerekir. Tekstil atıksularının arıtımında biyolojik, kimyasal, mekanik, fizikokimyasal ve elektrokimyasal arıtma yöntemleri uygulanabilir. Tekstil endüstrisi atıksularını arıtma prosesleri değerlendirmesi Tablo 2.2’de verilmektedir [Şensoy, 2008].

Tablo 2.2: Tekstil endüstrisi atıksuları arıtma prosesleri değerlendirmesi.

Proses	Kullanım yeri	Statü	Performans	Limitler
Fenton Oksidasyonu	Ön arıtma	G. Afrika'da bazı tam ölçekli tesis	Tam renk giderimi, düşük sermaye ve işletme maliyeti	
Elektroliz	Ön arıtma	Pilot ölçek	Tam renk giderimi, ucuz	Köpürme ve elektrot ömrü
Köpük flotasyonu	Ana yada ileri arıtma	Laboratuvar ölçek	%90 renk, %40 KOI giderimi, ucuz	
Filtrasyon	Ana arıtma	G. Afrika'da yaygın kullanım	Yüksek performans; su, tuz ve ısı tekrar kullanılabilir	Boşaltma ve konsantre akış arıtımı
Biyolojik bozunma Aktif Çamur	Ana arıtma	Geniş kullanım	KOI, N giderimi	Yüksek artakalan KOI, N, renk, surfaktan
Ardışık anaerobik – aerobik	Ana arıtma	Çok az bilgi	KOI, renk ve toksik gideriminde iyi giderim	Yüksek artakalan KOI, renk
Sabit yatak	Ana arıtma	Çin'de bazı pilot denemeler	KOI ve renkte iyi giderim	
Fungi/H ₂ O ₂	Ana arıtma	Laboratuvar ölçek	Tam renk giderimi	
Koagülasyon – flokülasyon	Ön, ana yada ileri arıtma	Yaygın kullanım	Tam renk giderimi, su tekrar kullanılabilirliği	Her zaman etkili olmaması, çamur bertarafı
Ozon	İleri arıtma	Tam ölçek	Tam renk giderimi, su tekrar kullanılabilirliği	Pahalı, aldehit formları
Tutunma (Karbon, kil, biyomas)	Ön yada ileri arıtma	Laboratuvar yada tam ölçek (adsorbant tipine bağlı)	Teni adsorbantlar etkili ve ucuz, su tekrar kullanılabilirliği	Bertaraf yada rejenerasyon maliyeti yüksek
Fotokataliz	İleri arıtma	Pilot ölçek	Yüksek renk giderimi, detoksikasyon	Sadece son adımda yapılması

Alıcı ortama deşarj limitlerini sağlayacak şekilde ya da arıtılmış atıksuyun kullanılacağı yerin talebine göre çıkış suyunun karakteri ve en uygun arıtma yöntemleri belirlenir. Biyolojik olarak parçalanamayan maddeleri içerdiği bilinen

atıksuların ilk olarak biyolojik arıtmaya sokulmaması gerekir aksi takdirde sistem başka amaçlarla da kullanılamaz hale gelebilir.



3. ELEKTROKİMYASAL ARITMA YÖNTEMLERİ

En fazla kirliliğe maruz kalan hayatın temel bileşenlerinden biri sudur. Sanayileşme, atıksu oluşumunu ve çeşitliliği artmıştır. Hızla gelişen tekstil sanayisi de bunlardan biridir. Alıcı su ortamlarındaki flora ve fauna üzerinde olumsuz etkilere sebep olacak kompleks atıksuların çok fazla miktarda ortaya çıkması üzerine tekstil atıksularının arıtımının yapılarak deşarjı öngörülmektedir. Tekstil atıksularının arıtımı konusunda birçok arıtım prosesi geliştirilmiştir. Bu atıksuların arıtımında kullanılan fiziko-kimyasal ve biyolojik arıtım proseslerinin birçok dezavantajları bulunmaktadır. Mikroorganizmalar üzerine toksisite, arıtım proses kontrolü, çamur miktarı, kimyasal madde tüketiminin veya maliyetinin yüksekliği, arıtım tesis alanı büyüklüğü gibi birçok sınırlandırıcı dezavantaj mevcuttur. Bu nedenledir ki, söz konusu dezavantajları ortadan kaldıracak daha etkili, ekonomik ve işletme kolaylığı olan arıtım sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Alıcı ortam deşarj standartlarının sıkılaştırılması, daha etkili ve giderim verimi yüksek ileri atıksu arıtım proseslerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Özellikle toksik ve tehlikeli atıksuların arıtımında pratikte kullanılacak ileri atıksu arıtım proseslerinden en önemli olanı “elektrokimyasal atıksu arıtım prosesleri” olarak göze çarpmaktadır [Saraç, 1995], [Hamann et al., 2007].

Elektrokimyasal arıtma yöntemleri; içme suyu arıtımı, evsel atıksu, tekstil atıksuları, restoran atıksuları, boyalı atıksular, mezbaha atıksuları, süt endüstrisi atıksuları, sızıntı suları, kağıt endüstrisi atıksuları, deterjan atıksuları ve maden atıksuları arıtımında basit ve verimli bir yöntem olarak uygulanmaktadır [Chen, 2004], [Mollah et al., 2001]. Ayrıca elektrokimyasal arıtma yöntemlerinin, askıda katı madde giderimi, deflorinasyon, yağ giderimi, ağır metal giderimi, organik madde giderimi, renk giderimi, fenol giderimi, nitrat giderimi, arsenik giderimi, lignin ve organik kirlilik, poliaromatik organik kirliliğin gideriminde kullanıldığı bilinmektedir.

3.1. Elektrokimyasal Arıtma Proseslerinin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokimyasal arıtmanın diğer arıtma yöntemlerine göre bazı avantajları ve dezavantajları mevcuttur [Mollah et al., 2001].

- Elektrokimyasal Arıtmanın Avantajları:

- Basit araç gereç ve basit işletme parametreleri ile çok daha iyi bir verim elde edilebilir.
- Renk ve koku gideriminde daha verimlidir.
- Bu proseslerle birçok kirleticinin bir arada giderildiği görülmektedir; diğer proseslerde bir kaç prosesin bir arada kullanılması gerekirken, elektrokimyasal proseslerde tek bir prosesle giderilebilir.
- Düşük bakım maliyeti ve iş gücüyle gerçekleştirilir.
- Bu proseslerde gereken enerji, enerji ihtiyacı az olması dolayısıyla daha kolay karşılanır.
- Prosesin aşamalarında yüksek sıcaklıkların herhangi bir problem oluşturmadığı gözlemlenmiştir.
- Diğer proseslere oranla daha az kimyasal madde kullanılarak işlem gerçekleştirilir.
- Elektrokoagülasyon prosesinde flok formları daha büyük ve kararlı olmasının yanında bu flokların filtrasyonla ayrılması daha kolaydır.
- İşlem sonrası oluşan çamur formu genellikle metal hidroksitler şeklinde olur.
- Eğer su yeniden kullanılmak istenirse, toplam çözünmüş katının az olması tercih edilir. EK sonucu oluşan toplam çözünmüş katıların içeriği kimyasal arıtıma oranla daha düşük olur.
- EK prosesi küçük kolloidal partiküllere karşı diğer yöntemlere oranla daha etkilidir.
- EK prosesinde kimyasal madde kullanımı yüksek kirleticili konsantrasyonlarında yapılabilir, ancak çöktürme işlemi nötralizasyon esasına göre olduğundan kullanılmaz.

- Elektroflotasyon prosesinde gaz kabarcıkları elektroliz süresince kirleticileri taşımak suretiyle daha küçük kirletici konsantrasyonlarını bile flotasyon mekanizmasıyla giderebilir.
 - Elektroflotasyon prosesinde kabarcık sayısı ve boyutunu kontrol etmek için bir parametre olarak akım yoğunluğuna bakılır.
- Elektrokimyasal Arıtmanın Dezavantajları:
- Elektrokimyasal arıtma yöntemlerinde atık su içindeki çözülmüş maddelerin oksidasyonu sonucu elektrotun oksitlendiği gözlenebilir.
 - Bu proseslerde genellikle elektrik maliyeti yüksektir (Fakat kullanılması gereken enerjinin düşük olması sebebiyle yüksek bir maliyet oluşturmaz).
 - Prosese giren atıksudaki süspansiyon maddelerinin iletkenliğinin yüksek olması istenmektedir.

3.2. Atıksularda Elektrokimyasal Arıtma Türleri

Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektrooksidasyon prosesleri kullanılır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilir. Atıksuda bulunan kirleticiler bu prosesler ile okside, adsorbe veya reaktör yüzeyinde birikerek ayrımı sağlanmaktadır [Saraç, 1995], [Hamann et al., 2007]. Elektrokimyasal atıksu arıtım proseslerini birbirinden ayıran en önemli özellik kirleticilerin giderimini sağlayan elektrokimyasal prosesin şekli ve yapısıdır.

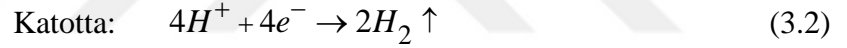
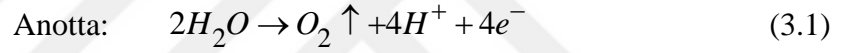
3.2.1. Elektrooksidasyon (EO)

Çözünmeyen metal/metal oksit elektrotlar (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 [Rajeshwar et al., 1994], [Scott, 1995]. RuO₂, Co₃O₄ ve MnO₂, titanyum bazı üzerine tatbiki ile oluşturulan anot, diğer anotlara oranla daha iyi katalitik aktivite gösterir. Bunun yanında, kurşun ve grafit anotlar da çok iyi sonuçlar vermektedir. Elektrotların bulunduğu ortam çok önemli olup, iki tip oksidasyon söz

konusudur. Bunlar anodik (direkt) ve dolaylı (indirekt) oksidasyondur. 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 yanısıra uygun deşarj standartlarını da sağlaması gerekmektedir [Hamann et al. 2007], [Scott, 1995].

3.2.2. Elektroflotasyon (EF)

Atıksu arıtımında en fazla kullanılan bir diğer elektrokimyasal arıtım prosesi elektroflotasyondur. Elektroflotasyon, elektrolitik şartlara göre oluşan gaz kabarcıkları (H₂, O₂ gibi) tarafından kolloidal partiküllerin adsorplanarak su yüzeyine doğru hareket etmesi ve yüzeyde toplanması işlemidir. Bu gazların oluşum reaksiyonları aşağıda verilmiştir:



Bu kabarcıklar 5-100 µm çapında olup, oldukça yüksek dispersiyona sahiptir. Elektrot yüzey alanına bağlı olarak kabarcıkların sayısı 10-20 milyon/cm² 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 yoğunluğunun, elektrot materyali, pH ve sıcaklık değiştirilerek kabarcıkların sayısı ve büyüklüğü kontrol edilebilmekte olup, bu sayede elektroflotasyonun hızı arttırılabilmektedir [Romanov vd., 2000].

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 ayırım 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 bir araya 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, çözülmüş hava flotasyonu (DAF) veya elektroflotasyon ile oluşturulan ince gaz kabarcıkları ile çözümlenebilir. Elektroflotasyon, çözeltilerden çözülmüş 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 bir araya gelme olasılığı artırılmış olunur. Bu durumda ayırma verimi ve etkinliği artırılır. Elektroflotasyon hücrelerinde tercih edilen akım yoğunlukları genellikle 0.1-10 mA/cm² dir [Pletcher and Walsh, 1990].

Elektroflotasyon; yağ-su emülsiyonları, metal kaplama atölyeleri, mandıra, konserve, yemek üretim, çiftlik, kağıt, resturant, 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 eldesi ve ayrılma işlemlerinde de kullanılmaktadır [Müller et al., 1992], [Matis and Zouboulis, 1994].

3.2.3. Elektrokoagülasyon (EK)

Atıksuların arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin kullanımı önceki yıllarda sınırlı iken, özellikle son zamanlarda popülaritesi ve etkinliği arttığını görmekteyiz. Bir elektroliz hücresindeki elektrolit içerisindeki iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleri elektrokimyasal tepkimeler olarak tanımlanabilir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yan iletken elektrot kullanılmaktadır [Rajeshwar, 1994]. Bir elektroliz işleminin oluşması için birbirine bağlantısı olan anot ve katot ile iletken bir elektroliz çözeltisi olması gerekir.

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

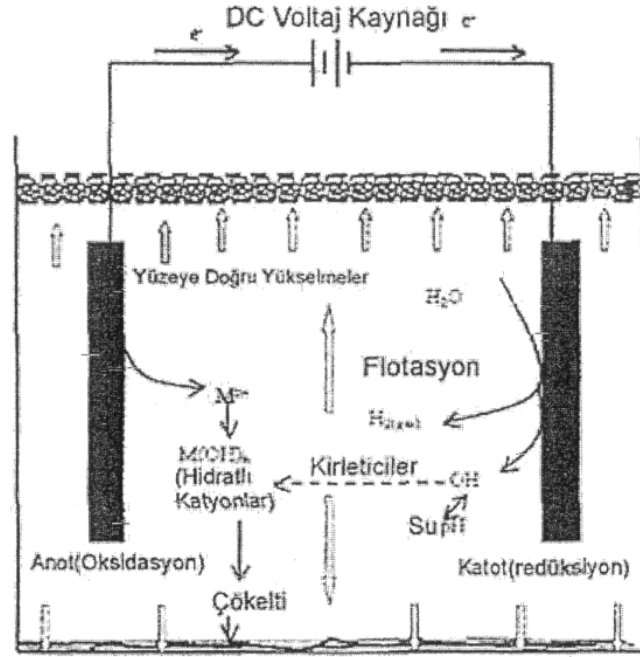
Koagüle edilen partiküller atıksularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorbe etmektedir. Oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Bu yöntem renk, COD, toplam organik karbon, askıda madde ve ağır metallerin tekstil atıksularından giderilmesinde kullanılmaktadır [Romanov vd., 2000].

Kimyasal koagülasyon, koloidal 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 koloidal 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 prosesinde, koagülant, uygun anot materyalinin elektrolitik oksidasyonu sonucu oluşur. Bu proseste yüklü iyon türleri ile anottan çözülmüş olan metal iyonları metal hidroksit floklarını oluşturur [Mollah et al., 2001].

3.3. Elektrokoagülasyonun Teorisi

Elektrokoagülasyon prosesi, atıksulardaki askıda, koloidal ya da çözülmüş halde bulunan kirleticilerin elektrik akımı altında kirleticilerin kimyasal reaksiyon ve çöktürme veya flotasyonla giderimini içeren bir proses olarak tanımlanabilir [Martinez-Huitl and Brillas, 2009]. Elektrokoagülasyon prosesin genel mekanizmasında koagülasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon prosesleri bulunur [Rajeshwar, 1994]. Genellikle bu proses alüminyum ya da demir elektrotların elektriksel olarak çözünmesi ile koagülantların üretilmesini de kapsar.

Elektrokoagülasyon reaktörü, en genel olarak bir elektrolit içine daldırılmış anot ve katottan oluşmaktadır. Çözünen anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Bu durumda anotta elektrokimyasal olarak çözünerek oksidasyona uğrayacaktır. Aynı şekilde katot ise pasivasyona maruz kalacaktır.



Şekil 3.1: Elektrokoagülasyon reaktörü düzeni.

Şekil 3.1'den de görülebileceği gibi EK ünitesi temel olarak 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 reaktörlerinde doğru akım veya alternatif akım uygulanmaktadır [Cocke et al., 2004].

Elektrokoagülasyon reaktörlerindeki iletken metal plakalar 'tükenen elektrotlar' olarak bilinmektedir. Anot elektrotların çözünmesi veya tükenmesi ile anodun çözünme potansiyeli düşmekte ve sonuçta katodun pasivasyonu minimize olmaktadır. Çözünen anot tipleri Fe, Al gibi çeşitli metallere yapılabilir. Anotta yükseltgenme, katotta ise indirgenme olacaktır. Metal iyonları üretimi anotta oluşur, hidrojen gazı katottan serbest bırakılır.

Elektrokoagülasyon prosesinde genellikle art arda üç aşamanın olduğu bilinmektedir;

- Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile koagülant türlerin oluşumu

- Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması
- Destablize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

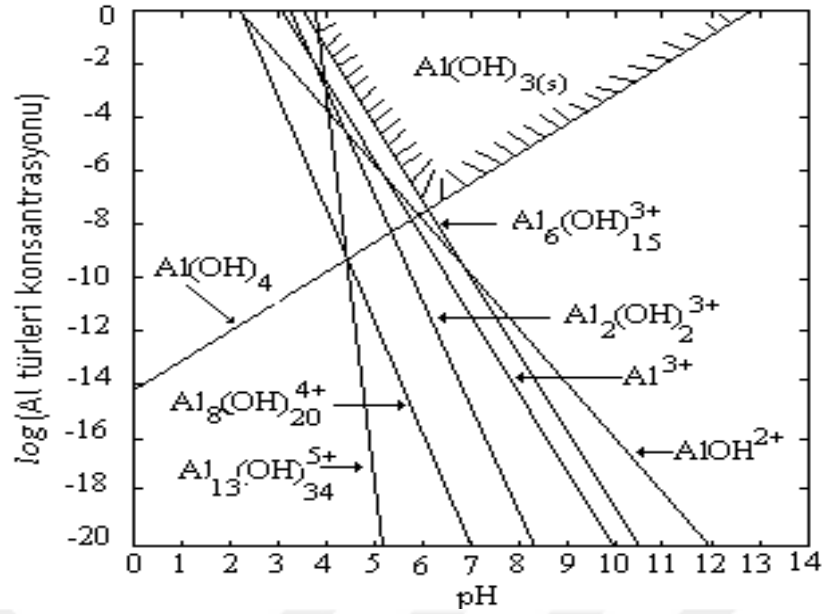
Kirleticilerin destabilizasyon mekanizması, partikül süspansiyonu ve emülsiyon kırılması şu şekilde tanımlanır;

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

EK mekanizması, ortamın kimyasal özelliğine ve iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH, ortamdaki koloidal partiküllerin boyutu ve kimyasal türlerin konsantrasyonu gibi özellikler de elektrokoagülasyon prosesi üzerine etki etmektedir. Elektrokoagülasyonda çok sık kullanılan çözünen alüminyum elektrot kullanıldığında sulu ortamda oluşturacağı Al kompleksleri önemlidir. Sulu ortamda Al^{+3} 'ün oluşturduğu hidroksil kompleksleri ve bu komplekslerin oluşum sabitleri Tablo 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Tabloda gösterilen reaksiyonlardan da görüleceği gibi sudaki hidroksil iyonları elektrotlardan çözünmüş olan Al^{+3} iyonları ile birleşerek ortamın pH değerine göre komplekslerin oluşumuna yol açacaktır [Benefield et al., 1981].

Tablo 3.1: Al^{+3} Sulu ortamdaki hidroksi kompleks türleri (I: 0, 25°C).

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

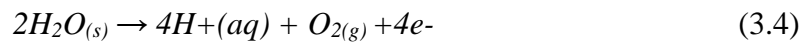


Şekil 3.2: Sulu ortamda alüminyum kompleksleri ve pH değeri ile ilişkisi.

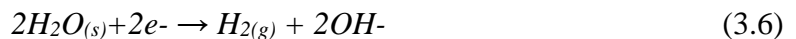
- Elektrotlarda Meydana Gelen Reaksiyonlar ve Sık Kullanılan Elektrot Tipleri

Elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan metal kaplı anotlar elektrik akımının etkisi ile çözünürler ve kaplandıkları metal türünü ortama iyonik şekilde verirler. Çözünen metalleri “M” ile gösterecek olursak, elektrotlarda gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz.

Anotta oluşan reaksiyonlar aşağıdaki şekildedir.



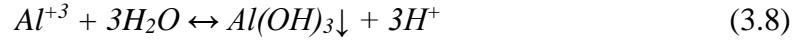
Katotta oluşan reaksiyonlar aşağıdaki şekildedir.



Bir elektrokimyasal proste en önemli parametrelerden biri elektrotun türüdür. Elektrokoagülasyonda yaygın olarak alüminyum(Al^{3+}) ve demir (Fe^{+2} , Fe^{+3}) elektrotlar kullanılmaktadır [Le-change, 1985].

- Alüminyum Elektrot

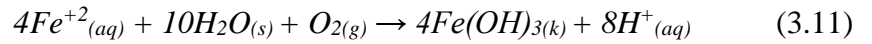
Alüminyumun anotta elektrolitik olarak çözünmesi sonucunda, düşük pH'larda Al^{+3} ve $Al(OH)^{+2}$ gibi katyonik monomerik türler meydana gelir ve sonuçta aşağıdaki reaksiyonların takibinde $Al_n(OH)_{3n}$ oluşur:



- Demir Elektrot

Elektrokimyasal arıtımda Fe^{+2} ve Fe^{+3} oksidasyonu ile $Fe(OH)_n$ oluşur. Aşağıda gösterilen her iki mekanizma da demir hidroksitin üretimi için önemlidir:

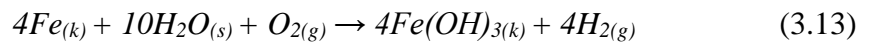
- 1. Mekanizma (Anot):



- 1. Mekanizma (Katot):

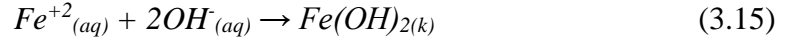


- Toplam:

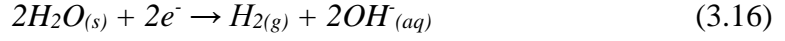


- 2. Mekanizma (Anot):

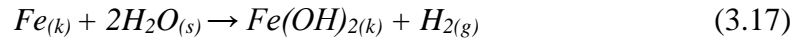




- 2. Mekanizma (Katot):



- Toplam:



Elektrokoagülasyon, demir ve alüminyumdan kaplı olan çözünebilir elektrotların ortama verdikleri metal iyonları ile atık suyun reaksiyona girmesiyle metal hidroksit floklarının oluşmasını içeren bir prosesdir. Sistemin arıtım mekanizması bu flok oluşumu ile başlamış olur. Atıksu içindeki kolloidal kirleticilerin net yüzey yükünün azaltılması sonucu, elektrostatik itme kuvvetiyle sıkışarak, Van der Waals kuvvetiyle bir araya gelmesiyle elektrokoagülasyon gerçekleştirilir. Elektrokoagülasyon prosesin genel mekanizmasında koagülasyon, adsorbsiyon, absorpsiyon, çöktürme ve flotasyon olayları gerçekleşebilir. Ortak olarak oluşan bu reaksiyon topluluğu neticesinde atıksuda kirletici konsantrasyonu ve kirletici parametrelerine bağlı olarak yüksek bir giderim verimi elde edilebilmektedir [Mollah et al., 2004].

3.4. Elektrokoagülasyon Prosesini Etkileyen Faktörler

- Proseste Kullanılan Elektrot Materyali

Elektrot tipi seçimi elektrokoagülasyonda sonucu etkileyen en önemli parametrelerin başındadır. Elektrokimyasal arıtmanın türünü belirler ve kirletici giderim verimini de doğrudan etkilediği gözlenir. Elektrot tipinin çok önemli olmasının sebebi farklı prosesler için farklı oluşumlar gerçekleşmesidir. Örnek verilecek olursa; elektrokoagülasyon için seçilen elektrot türleri akım ile birlikte ortamda çözünür, fakat elektrooksidasyonda OH⁻ radikalleri oluşturup herhangi bir

çözünme olmaz. EK yöntemi için genellikle demir ve alüminyum elektrotlar kullanılır, ancak elektrooksidasyon yönteminde bu elektrotların yerini, titan, platin, rutenyum vb. elektrotlar alır [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

- Elektrotların Reaktör İçerisinde Yerleşimi ve Elektrotlar Arası Mesafe

Bir anot ve bir katottan oluşmasına rağmen elektrotlar farklı şekillerde yerleştirilebilir ki monopolar ve bipolar elektrotlar kullanılarak seri veya paralel bağlamak suretiyle farklı giderim verimleri sağlanabilir. Dolayısıyla elektrot tipi seçiminin yanı sıra elektrotların reaktör içerisinde yerleşimi de büyük önem arz etmektedir. Elektrotlar arası mesafe, elektrokoagülasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamakla birlikte elektrotlar arası mesafe arttığı zaman proses verimi de az miktarda artmaktadır [Chen, 2004], [Mollah, 2004].

- Proseste Uygulanan Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğu; elektrokimyasal arıtma yöntemlerinde önemli işletme şartlarından biridir. Optimizasyonu elektrokimyasal arıtma yöntemi için çok önemli bir husustur. Proseste gerekenden fazla akım yoğunluğu uygulanırsa maliyet artışı oluşabilir ve elektrokoagülasyon yöntemi uygulanıyor ise akım yoğunluğuna paralel olarak çamur oluşumu artışı da gözlenir. Bunun yanında arıtma çalışmalarında arıtma süresi ile akım yoğunluğu ilişkilidir. Eğer arıtmada yüksek akım yoğunluğu uygulanırsa daha kısa süreli bir arıtım gerçekleşir [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

- pH Değeri

Ortamda oluşan elektrolitik reaksiyonları direkt olarak etkilemesi sebebiyle pH çok önemlidir. Elektrooksidasyon için hidroksil radikallerinin oluşumu ve elektrokoagülasyon için metal hidroksitlerin oluşumunda pH direkt etki etmektedir. Koagülantlar belli pH değerleri dışında oluşmaz ve hidroksil radikallerinin oluşum yüzdesi de büyük oranda azalır. Proseslerin sonucunda pH'ın değişimi söz konusu olur. Örneğin; elektrooksidasyonun baskın olduğu durumlarda pH giderek düşer, fakat elektrokoagülasyon uygulamalarında pH'ın giderek arttığı gözlenir. Giderim verimleri, başlangıç pH'ı kadar son durumdaki pH değerleriyle de ilişkilidir [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

- Arıtma Süresi

Tüm arıtma proseslerinde olduğu gibi elektrokimyasal arıtmada da arıtım süresi önemlidir. Eğer arıtım süresinin optimizasyonu olmazsa, gerekenden az bir arıtım süresi uygulandığında ihtiyaç duyulan verim sağlanamaz ve uzun süreli arıtmalarda maliyet açısından, çamur ve köpük oluşumu bakımından uygun olmaz.

Farklı atıksuların arıtma süreleri de çok farklı olması muhtemeldir. Bir çalışmada; battaniye fabrikası atıksuyundan renk giderimi ile organik kirliliğin giderimi konusunda çeşitli işletme şartlarının etkisi araştırılmıştır. Atıksuyun iletkenliği yeterli olmadığından NaCl ilave edilmiş ve sonuç olarak 5 dakikalık bir arıtım süresinde 60-80 A/m² akım yoğunluğunda %75'lik bir KOİ giderimi ve %99'luk bir renk giderimi gözlemlenmiştir [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

- İletkenlik

İletkenliği arttırmak amacıyla su ve atıksu arıtımında genellikle elektrik yüküne katkı sağlaması ve diğer anyonik türlerin olumsuz etkilerini önemli derecede azaltması sebebiyle sofr tuzu kullanılır. Karbonat ve sülfat iyonları olması Ca⁺² ve Mg⁺² iyonlarında çökelmeye sebep olur ve akım verimi azalır. Bu sebeple elektrokoagülasyon hücrelerinde %20 Cl⁻ iyonlarının bulunması gerekir. NaCl ilave edilmesi, güç tüketiminin de azalmasına sebep olur [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

- Sıcaklık

Sıcaklığın etkisiyle ilgili elektrokoagülasyon çalışmalarında yapılan araştırmalarda; 60°C'ye kadar maksimum akım verimi olduğu gözlemlenmiş, fakat daha yüksek sıcaklıklarda akım veriminin azaldığı tespit edilmiştir. Elektrot yüzeyindeki alüminyumoksit filminin ayrılma aktivitesinin artması dolayısıyla sıcaklık artar. Akabinde iletkenlik de artacağından enerji tüketimi azalır [Chen, 2004], [Mook et al., 2014].

3.5. Elektrokoagülasyonun Atıksulara Uygulanması

Literatürde özellikle son zamanlarda elektrokoagülasyon prosesi ile endüstriyel atıksu arıtımı üzerine birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Gerek sentetik gerekse

gerçek atıksular ile yapılmış çalışmalar proses değişkenlerinin incelenmesi için oldukça yararlı ve yol gösterici olmaktadır.

Özyonar ve Karagözoğlu, elektrokoagülasyon (EK) ile bir tekstil atıksuyunun arıtımı üzerine çalışmıştır. Sistemde monopolar paralel bağlı alüminyum elektrotlar kullanılarak, prosesin performansı incelenmiştir. Akım yoğunluğu, başlangıç pH ve elektroliz süresinin toplam organik karbon (TOK), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), renk ve bulanıklık giderimine etkisi araştırılmıştır. Deneyle neticesinde ulaşılan veriler değerlendirilerek EK prosesinin optimum şartları belirlenmiş olup, belirlenen koşullar; akım yoğunluğu 100 A/m², başlangıç pH 3 ve elektroliz süresi 20 dakika olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak %82,6 TOK, %72,5 KOİ, %97,7 renk ve bulanıklık giderim verimleri elde edilmiştir. Böylece tekstil atıksuyu arıtımında EK yönteminin etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır [Özyonar ve Karagözoğlu, 2012].

Akbaş, çalışmasında bir iplik boyama işletmesinin boyama banyosu atıksuyu ve bu banyoda kullanılan boyarmadde ile hazırlanan sentetik boyarmadde çözeltilerinin Al ve Fe elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile optimum şartlar belirlenmek suretiyle arıtımını incelemiştir. Sentetik boyarmadde çözeltileri için Fe elektrotlarla yapılan çalışmalar sonucu %99 renk ve %61 KOİ giderimi, Al elektrotlarla ise %96 renk ve %57 KOİ giderimi sağlanmıştır. Boyama banyosu atıksuları için ise Fe elektrotlarla %89 renk ve %55 KOİ giderimi, Al elektrotlarla %87 renk ve %55 KOİ giderimi sonucuna ulaşılmıştır [Akbaş, 2014].

Bayar ve ark., çalışmalarında Direct Red 23 boyar maddesinin sentetik olarak hazırlanan çözeltilerinin elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak giderimi araştırılmıştır. Çalışmada alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Çözeltinin başlangıç pH'ı, karıştırma hızı ve destek elektrolit türünün renk giderimi üzerine etkileri üzerinde çalışılmıştır. Akım yoğunluğu ve sıcaklık sırası ile 0.1 mA/cm² ve 20 °C'de sabit tutulmuştur. Alüminyum elektrotlar arasında 0.5 cm mesafe belirlenmiştir. Optimum şartlar 30 dakikalık deney süresi ile; başlangıç pH'ı 5, 150 devir/dakika'lık karıştırma hızı ve 5 mM NaCl tuzunun kullanılarak belirlenmiş ve giderim verimi %98 olarak gerçekleşmiştir. Destek elektrolit türünün ise renk giderim verimine etkili bir parametre olmadığı sonucuna varılmıştır. Tüm çalışmalar sonucunda Direct Red 23 boyar maddesi içeren atıksuların arıtımında alüminyum elektrot içeren elektrokoagülasyon prosesinin uygulanabileceği görüşü rapor edilmiştir [Bayar vd., 2012].

4. MATERİYAL ve METOD

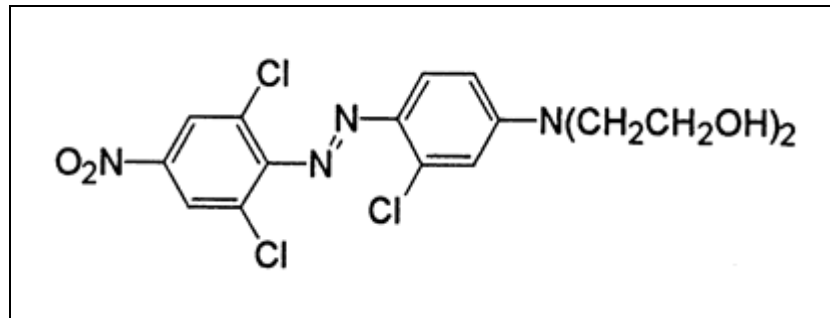
4.1. Materyal

Tekstil endüstrisinde ticari bir boya olarak kullanılan Dispers Brown 1 boyar maddesi ile sentetik olarak hazırlanmış sulu çözeltinin, farklı elektrot türleri ve çeşitli işletme şartlarında elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılması sonucu giderim verimleri incelenmiştir.

Çalışmalarda DyStar firmasından temin edilen tekstil boyası Dianix Brown S-3R kullanılmıştır. Çalışmalar için 1000 mg/L stok sentetik boya atıksuyu hazırlanmıştır. Deneyler sırasında kullanılan boyar madde çözeltisinin özellikleri Tablo 4.1’de ve boyar maddenin moleküler yapısı Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kullanılan boyarmadde çözeltisi özellikleri.

Boya İsmi	C.I. Numarası	Molekül Formülü	CAS No	Ölçüm Sonucu Dalga Boyu (nm)	pH	İletkenlik (µS/m)
Dianix Brown S-3R	Dispers Brown 1 C.I. 11152	C ₁₆ H ₁₅ Cl ₃ N ₄ O ₄	12236-00-9	456	7,5	64

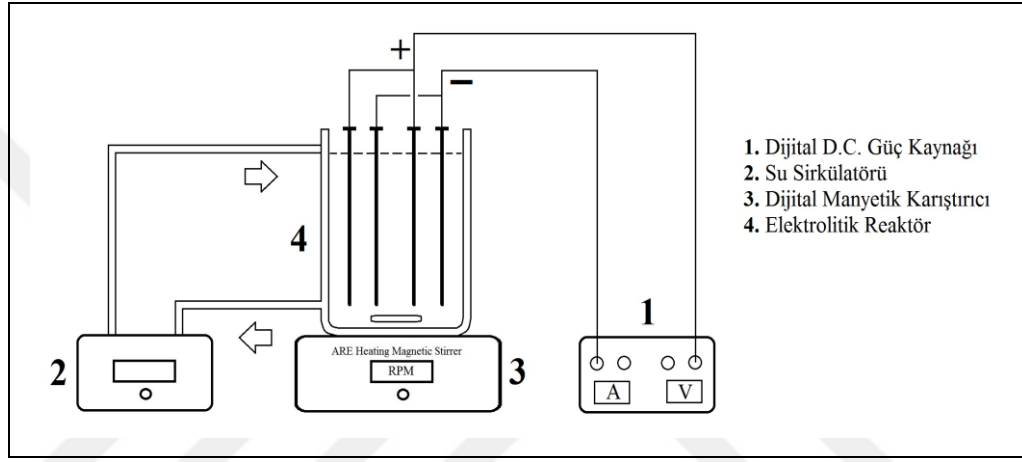


Şekil 4.1: Dispers Brown 1 moleküler yapısı.

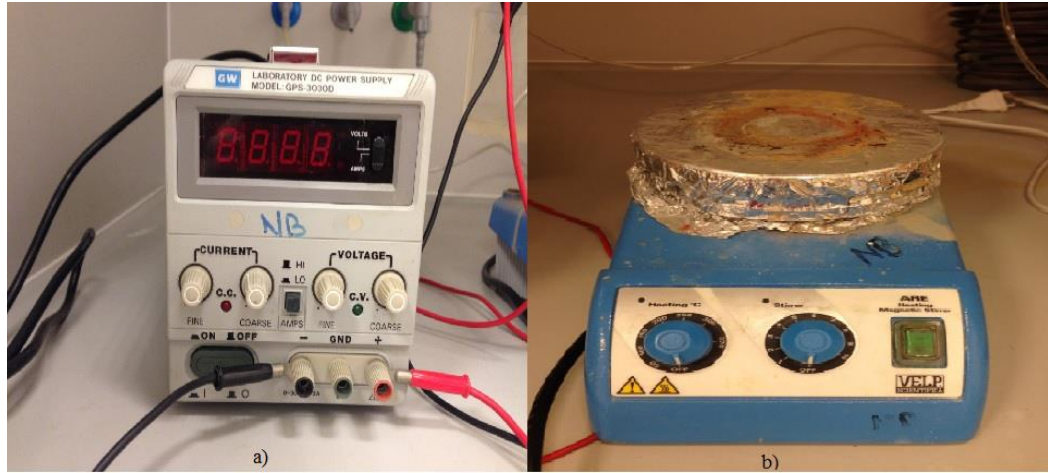
4.2. Deney Düzenegi

Deneyler Şekil 4.2’de gösterilen deney düzenegi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Dijital bir güç kaynağı olan “GW Laboratory DC GPS-3030D” ile akım ve voltaj kontrolü sağlanmıştır. “ARE Heating Magnetic Stirrer” marka manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir ve Şekil 4.3’te

gösterilmiştir. Deneyleerde kullanılan reaktör 95 x 95 x 105 mm boyutlarında sabit sıcaklık ceketli olup, plexiglas malzemesinden yapılmıştır. Her deney, reaktörde 600 ml çözelti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Reaktörde monopolar ve paralel bağlı 2 anot ve 2 katot olmak üzere toplam 4 adet elektrot kullanılmıştır. Bu elektrotlar 30 mm aralıklarla yerleştirilerek tamamı elektrolite batırılmıştır. Elektrot materyali olarak 73 x 105 x 46 mm boyutlarında, 33,58 cm² aktif yüzey alanına sahip demir plakalar ve 50 x 90 x 40 mm boyutlarında, 20 cm² aktif yüzey alanına sahip alüminyum plakalar kullanılmıştır.



Şekil 4.2: Deney düzeneğinin şematik görünümü.



Şekil 4.3: Çalışmada kullanılan a) Güç kaynağı, b) Manyetik karıştırıcı.

4.3. Deneysel Metod

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, sentetik olarak hazırlanmış boyar maddenin elektrokoagülasyon prosesiyle renk giderimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Dispers Brown 1 sentetik boyar maddeden 1000 mg/L konsantrasyonunda 1L'lik stok çözelti hazırlanmış ve karanlıkta saklanmıştır. Çalışmanın çeşitli aşamalarında kullanılmak üzere 50 mg/L, 100 mg/L ve 250 mg/L'lik konsantrasyonlarında boya çözeltileri saf su ile seyreltilerek hazırlanmıştır.

Elektrokoagülasyon deneylerinde belirlenen konsantrasyonda 600 ml boya çözeltisi pleksiglas reaktöre konulmuştur. Daha sonra optimum şartları belirlemek için pH, iletkenlik, boyar madde konsantrasyonu ve akım arasındaki ilişki incelenmiştir. pH ayarlamaları için H_2SO_4 ve NaOH kullanılmıştır. İletkenlik ayarlamaları için ise NaCl kullanılmıştır.

Çalışmalarda öncelikle boyar maddenin spektrofotometrede dalgaboyu taraması yapılarak absorbansı bulunmuş, daha sonra belirlenen dalga boyunda farklı boya konsantrasyonları hazırlanıp absorbans konsantrasyon ilişkisi belirlenerek kalibrasyon eğrisi hazırlanmıştır. Hazırlanan kalibrasyon eğrisine göre boya giderim verimleri hesaplanmıştır.

Deneysel çalışma süresi ilk çalışmalardan sonra belirlenmiştir. Her bir deney 10 dakikalık deney süresince 1, 3, 5, 7 ve 10. dakikalarda reaktörden alınan 10 ml'lik boya çözeltisi numunesindeki çamuru ayırmak için kaba filtre kullanılarak filtrasyona tabi tutularak süzölmüş ve başka bir numune kabına aktarılmıştır. Numuneler anlık analiz edilmişlerdir. Ayrıca EK prosesinde yapılan deneylerde alınan numunelerin pH ve iletkenlik ölçümleri pH metre vasıtasıyla anlık ölçülmüştür.

Kullanılan elektrotlar deneylerden önce yüzeyleri aseton ile yıkandıktan sonra yüzeyinde biriken kir ve pasları gidermek için, daha önce hazırlanan temizleme çözeltisinde (%35'lik 100 ml HCl ve % 2.8'lik 200 ml heksametilen tetramin $((CH_2)_6N_4)$ 10 dakika bekletilmiştir.

4.4. Analiz Metodu

4.4.1. Boya Konsantrasyonunun Belirlenmesi

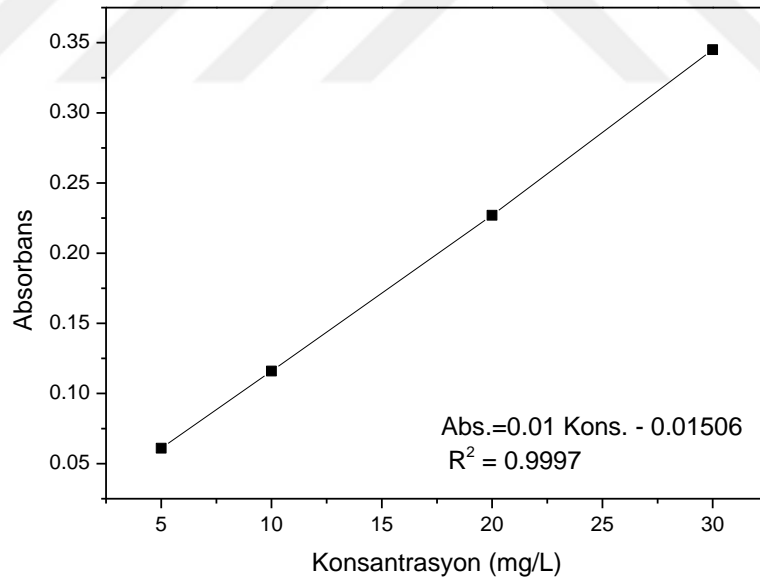
Dispers Brown 1 boyar madde çözeltilisinin dalga boyu taraması Şekil 4.4'de gösterilen Hach Lange DR 6000 marka spektrofotometre cihazında 456 nm olarak belirlenmiştir. Dalga boyu belirlenen boyar maddenin konsantrasyon belirlemeleri hacmi 10 ml olan quartz hücrede Şekil 4.5'te gösterilen Hach Lange DR 2800 marka fotometrede okunmuştur. Daha sonra belirlenen dalga boyunda farklı boya konsantrasyonları hazırlanıp absorbans konsantrasyon ilişkisi belirlenerek kalibrasyon eğrisi hazırlanmış ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4: a) Spektrofotometre cihazı, b) Dalga boyu taraması sonucu.



Şekil 4.5: Fotometre cihazı.



Şekil 4.6: Absorbans - Dispers Brown 1 Kalibrasyon Eğrisi.

4.4.2. Kullanılan Eşitlikler

- Akım Yoğunluğu Hesaplaması

Aşağıdaki eşitlik akım yoğunluğunu hesaplamada kullanılmıştır.

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

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

- Akım Verimi Hesaplaması

Elektrolizin faraday kanunuyla anotta çökecek maddenin mol miktarı (m) hesaplanır.

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

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

Daha sonra anot elektrottaki teorik çözünme miktarı, M_{ATe} (g) hesaplamasına geçilir.

$$M_{ATe} = m . (M_A) \quad (4.3)$$

- M_A: Molekül ağırlığı'dır.

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

- E: Akım verimi,
- M_A: Pratikte anot elektrottaki çözünme miktarı (g) 'olarak tanımlanır.

Toplam çözünen alüminyum miktarı (M_T) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

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

- M_K : pratikte katot elektrottaki çözünmeye miktarı (g) 'dır.
- Enerji Sarfıyatı Hesaplanması

Enerji tüketimi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$W = \frac{V.I.t}{v} \quad (4.6)$$

- W : Enerji Tüketim Değeri (kW.saatt/m³),
- V : Sistemde Oluşan Potansiyel Fark,
- I : Uygulanan Akım Şiddeti,
- T : zaman (saat) 'dır.
- v : Reaktördeki Toplam Çözelti Hacmi

- Faraday/m³ Hesaplaması

Faraday ise aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

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

- I : akım şiddeti, Amper,
- t : Zaman, sn.,
- v : Elektrolit hacmi, m³

Bu çalışmada grafiklerin çizimi ve korelasyonlarda Excel ve OriginLab OriginPro 2015 programları kullanılmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Dispers boyalar noniyonik (nötral) karakterde olduklarından sudaki çözünürlükleri çok düşüktür.

Elektrokoagülasyon (EK) ile atıksulardan kirleticileri giderim prosesinin dayandığı prensip koagülasyon, adsorpsiyon, çöktürme ve flotasyon mekanizmalarının bir veya bir kaçını içermektedir. Elektrokoagülasyon tekniğinde atıksuda bir akımda çözünen demir ve alüminyum anot kullanılır. Ortam pH'ına bağlı olarak metal iyonların Fe^{+2} , Fe^{+3} veya Al^{+3} farklı türlerle hidroksit ($Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$) ürünleri oluşturur.

EK prosesinde, kimyasal koagülasyona göre oluşan flokların su oranı daha azdır. Floklar zayıf dirence sahip olduğundan kolay bir şekilde filtre edilebilmektedir [Woytowich, 1993], [Mollah et al., 2001].

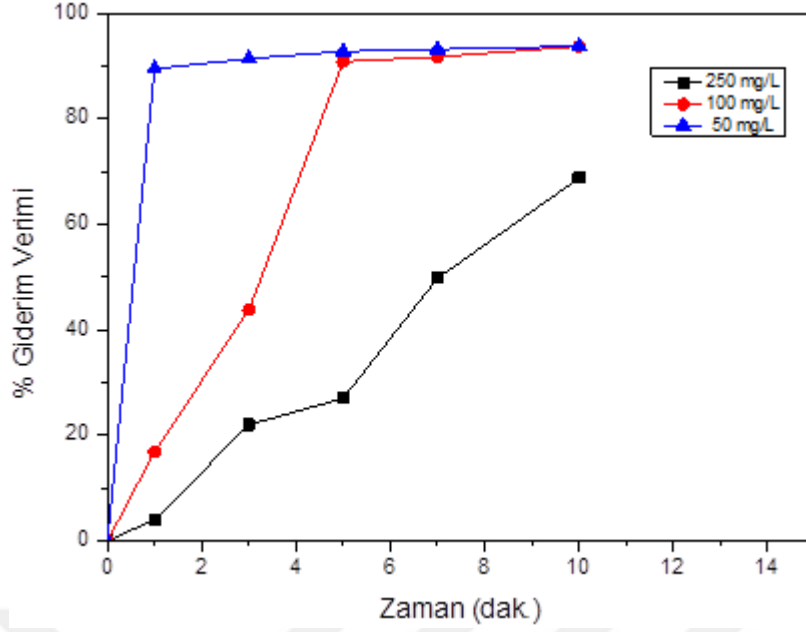
EK prosesi aşağıdaki safhalardan oluşmaktadır.

- Elektrokimyasal anodik çözünme ile koagülant türlerinin oluşumu,
- Kirleticiyi oluşturan maddelerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
- Destabilize edilen flokların çözeltilerden ayrılması [Mollah et al., 2001].

5.1. Renk Giderimi Üzerine Konsantrasyonun Etkisi

- Fe Elektrot

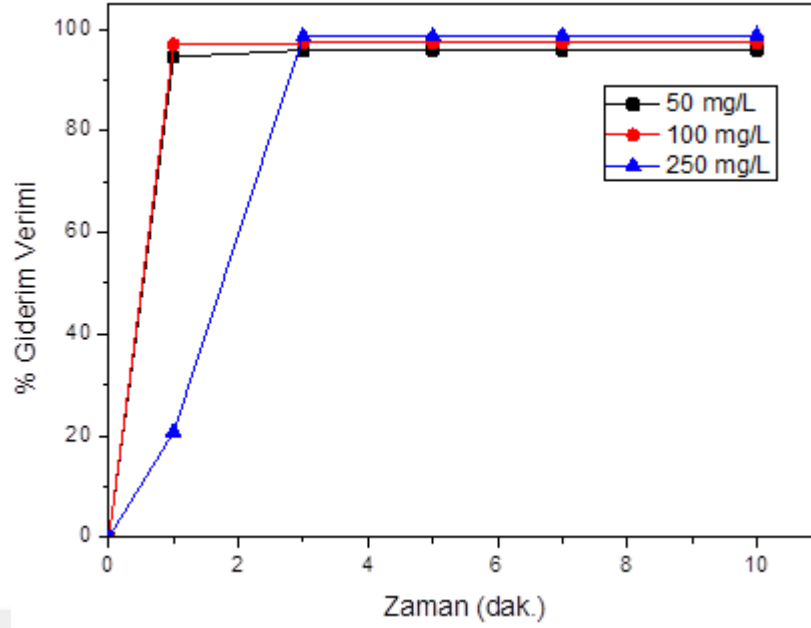
DeneySEL çalışmalar ile öncelikle hazırlanan çözelti sentetik boya çözeltisinin pH değerinde farklı konsantrasyonlardaki renk giderim verimleri Şekil 5.1'de ayrıntıları ile verilmiştir. Dispers Brown 1 için anotta elektrot tüketimi pH artışı ile sürekli olarak yükselmektedir. Boya konsantrasyonu 50 mg/L'den 250 mg/L'ye artması ile renk giderim veriminin %98'den %68'e düştüğü ve giderim zamanının uzadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de yüksek boya konsantrasyonlarında ortamda yeterli miktarda demir hidroksit floklarının bulunmaması olarak açıklanmıştır. Kim ve ark. tarafından yapılan dispers boyaların EK ile giderim çalışmasında da konsantrasyon artıkça, giderim veriminin benzer şekilde yüksek konsantrasyon için düştüğü, diğer değerler için yakın bir değerde kaldığı rapor edilmiştir [Kim et al., 2002].



Şekil 5.1: Farklı konsantrasyonlardaki renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 7.5, İletkenlik: 1 mS/cm, Akım: 300 A/m²).

- Al Elektrot

Hazırlanan sentetik boya çözeltisinin pH değerinde, farklı boya konsantrasyonlarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sentetik tekstil atıksuyu çalışmasının ilk dakikalarında; düşük konsantrasyonda yapılan çalışmalara oranla yüksek konsantrasyonlarda boya gideriminin düşük olduğu gözlemlenmiş, zamanın artması ile; giderim veriminin arttığı ve tüm konsantrasyon değerlerinde yapılan çalışmalarda eşitlendiği görülmüştür. Farklı konsantrasyonlardaki sentetik boya atıksuyunun elektrokoagülasyon prosesi ile arıtılabilirlik çalışmasında, reaksiyon süresi sonunda renk giderim verimindeki farklılıkların önemli düzeyde olmadığı gözlemlenmiştir. Farklı konsantrasyon etkisi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Farklı konsantrasyonlarda renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 7.5, İletkenlik: 0.5 mS/cm, Akım: 375 A/m²)

5.2. Renk Giderimi Üzerine pH'ın Etkisi

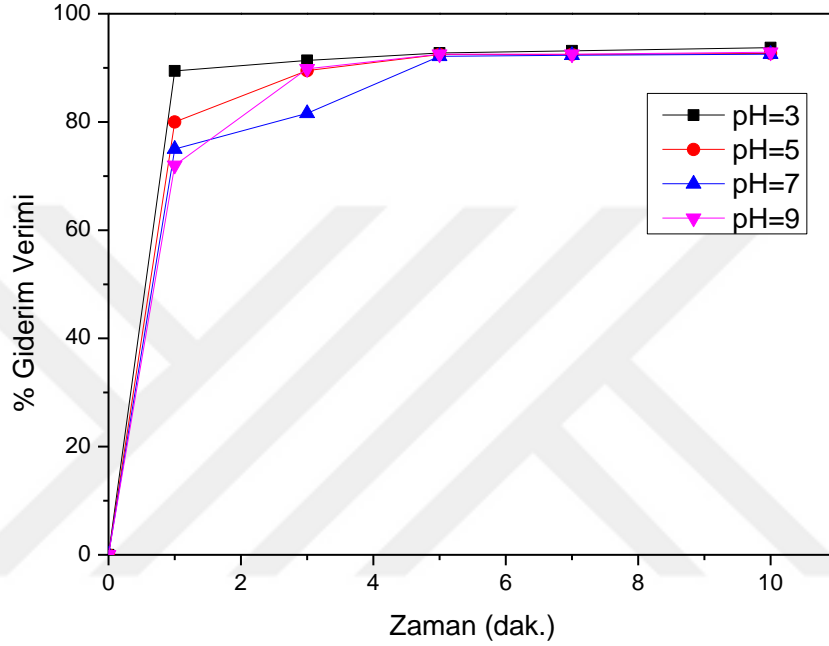
Sentetik boya çözeltisine pH değerinin etkisi, elektrokoagülasyon proseslerinin çalışmaları sırasında incelenmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesidir. Çözelti veya atıksuyun pH'ı hidroksit türleri etkilediğinden proses sürecinde boyar madde giderimi üzerine etki etmektedir.

Elektrokoagülasyon proseslerinde dispers partiküllerin destabilizasyonu için demir ve alüminyum elektrotlar kullanılmıştır, elektrotlar yardımı ile koagülant üretimi için, elektrokoagülasyon mekanizması ile kimyasal koagülasyondaki mekanizma birbirine benzemektedir. Fe⁺³ ve Al⁺³'ün hidrolizi ile çeşitli alüminyum ve demir hidroksit kompleksleri meydana gelmektedir.

• Fe Elektrot

Hazırlanan sentetik boya çözeltisi ile sabit konsantrasyonda farklı başlangıç pH değerlerinde zamana karşı arıtılabilirlik çalışmaları gerçekleştirilmiş ve çalışmanın ilk dakikalarında düşük pH değerlerinde yüksek verim gözlemlenmiştir. Zaman ile birlikte diğer başlangıç pH değerlerinde de giderim veriminin eşitlendiği görülmüştür. Dolayısıyla sentetik boya çözeltisi pH değişimlerinin boya giderimi

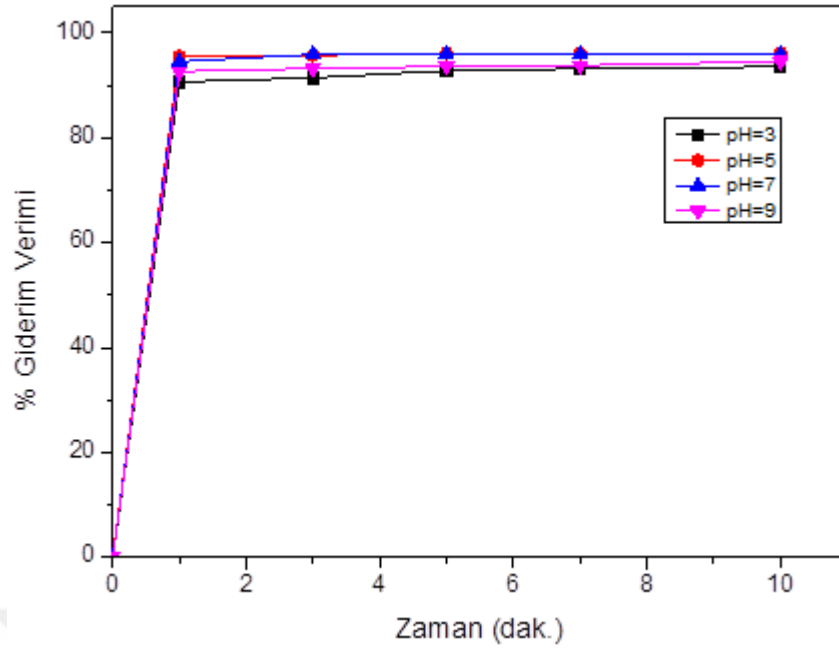
üzerine sistem parametresini reaksiyon süresi sonunda önemli düzeyde etkilemediği görülmüştür. Bu bağlamda arıtım şartlarında sentetik boya çözeltisinin pH değerinde olması daha uygun görülmüş ve şekil 5.3'te gösterilmiştir. Phalakornkule ve arkadaşları çalışmasında da Dispers Red 1 boyarmaddesi giderim verimini pH değişiminin önemli düzeyde etkilemediği benzer şekilde rapor edilmiştir [Phalakornkule et al., 2010].



Şekil 5.3. Sabit konsantrasyon ve farklı pH'larda renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, C: 50 mg/L, İletkenlik: 1 mS/cm, Akım: 300 A/m²)

- Al Elektrot

Hazırlanan sentetik boya çözeltisi ile sabit konsantrasyonda farklı başlangıç pH değerlerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş, alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmada başlangıç pH değişimlerinin zamanla sistem parametresini önemli düzeyde etkilemediği görülmüştür. Dolayısı ile arıtım şartlarında sentetik boya çözeltisinin pH değerinde olması daha uygun görülmüş ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Sabit Konsantrasyon ve farklı pH'larda renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T: 25 °C, C: 50 mg/L, İletkenlik: 0.5 mS/cm, Akım: 375 A/m²)

5.3. Renk Giderimi Üzerine İletkenliğin Etkisi

Elektrokoagülasyon proseslerinde yaygın olarak su ve atıksudaki iletkenliği arttırmak için tuz ilavesi yapılmaktadır. Tuz ilavesi iletkenliği arttırdığı gibi aynı zamanda elektrotlar ve güç ihtiyacı arasındaki omik (ohm) kaybı azaltmaktadır. Çalışmanın bu kısmında hazırlanan atıksuyun iletkenliği ve iyonik kuvveti NaCl eklenerek ayarlanmıştır. Çalışmalar 0.5 mS/cm ile 2 mS/cm arasında gerçekleştirilmiştir.

Elektrokimyasal prosesler için çözeltilerin iletkenlikleri önemli bir faktördür. Sentetik çözeltilerin iletkenlikleri elektrolit çözeltilerinin konsantrasyonu ve türüne kuvvetli derecede bağlıdır. Bu nedenle yüksek iletkenlik, yüksek çözünürlük, klorürün düşük maliyeti ve aktif klorün kuvvetli oksidatif özellikleri NaCl'nin elektrokimyasal proseslerde genellikle kullanılmasını sağlar. Elektrolit konsantrasyonunun artması ile boya giderim oranı, reaksiyon zamanı ve reaksiyon sabiti artmıştır.

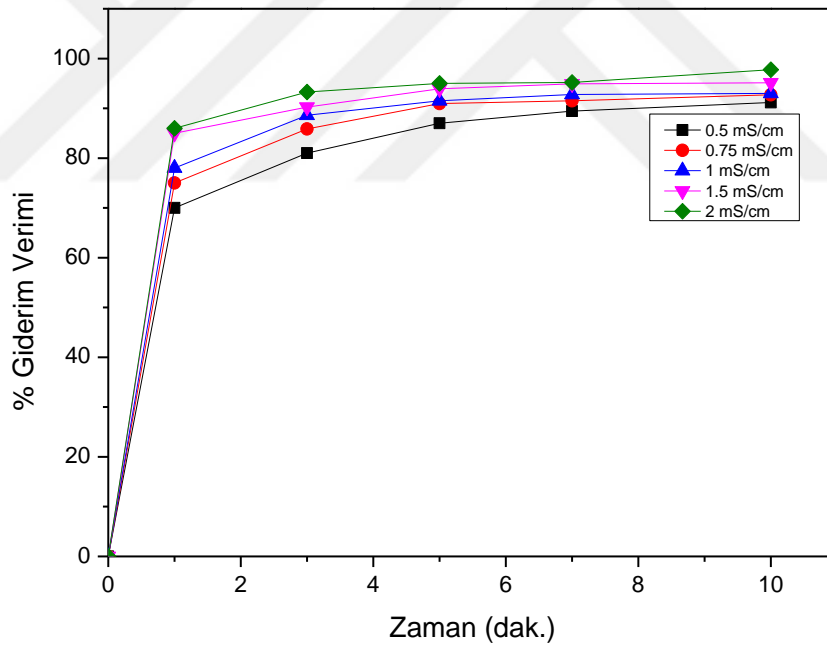
NaCl iletkenlik arttırıcı olarak kullanılması yanında HCO₃⁻, SO₄⁻² gibi anyonların olumsuz etkilerini azalmaktadır. Karbonat ve sülfat iyonları elektrotların

yüzeyinde yalıtkan bir tabaka oluşturan kalsiyum ve magnezyum iyonlarının çökmesini sağlamaktadır.

Elektriksel iletkenlik, elektrotların kesit alanı ile doğru orantılıdır. Akım kaynağı için kesit alanının artması elektrotların sayılarının artması ile doğru orantılıdır. Elektrotların büyük yüzey alanına sahip olması yüksek akım verimi sağlar.

- Fe Elektrot

Boya çözeltisi ile sentetik boya çözeltisi pH değerinde ve sabit konsantrasyonda, farklı başlangıç iletkenliklerde renk giderim çalışmaları gerçekleştirilmiş, hazırlanan sentetik tekstil atıksuyun iletkenliğinin artırılması ile giderim veriminin arttığı görülmüştür. Sistem parametresi için en uygun iletkenlik şartının 1 mS/cm olduğu görülmüş ve Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

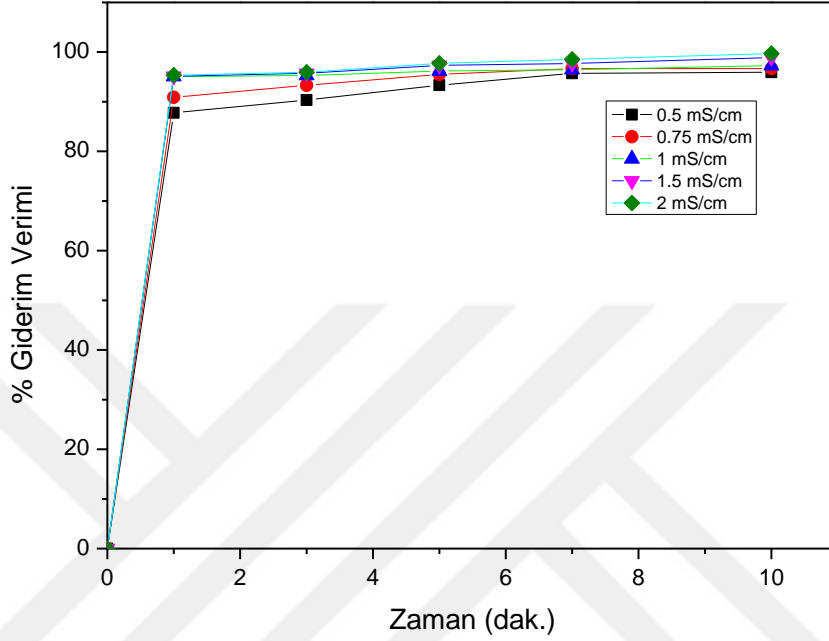


Şekil 5.5. Sabit konsantrasyon ve farklı iletkenlik koşullarında renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T: 25 °C, pH: 7.5, C: 50 mg/L, Akım: 300 A/m²).

- Al Elektrot

Boya çözeltisi ile sentetik boya çözeltisi pH değerinde ve sabit konsantrasyonda, farklı başlangıç iletkenliklerde çalışmalar gerçekleştirilmiş, hazırlanan sentetik tekstil atıksuyunun iletkenliğinin artırılması ile giderim veriminin

arttığı görülmüştür. Dolayısıyla sistem parametresi için en uygun iletkenlik şartı 1 mS/cm olarak belirlenmiş ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Pajootan ve arkadaşları da çalışmada boya çözeltisinin iletkenliğinin artırılması ile giderim veriminin arttığını rapor etmişlerdir [Pajootan et al., 2000].



Şekil 5.6. Sabit konsantrasyon ve farklı iletkenlik koşullarında renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T: 25 °C, pH: 7.5, C: 50 mg/L Akım: 375 A/m²).

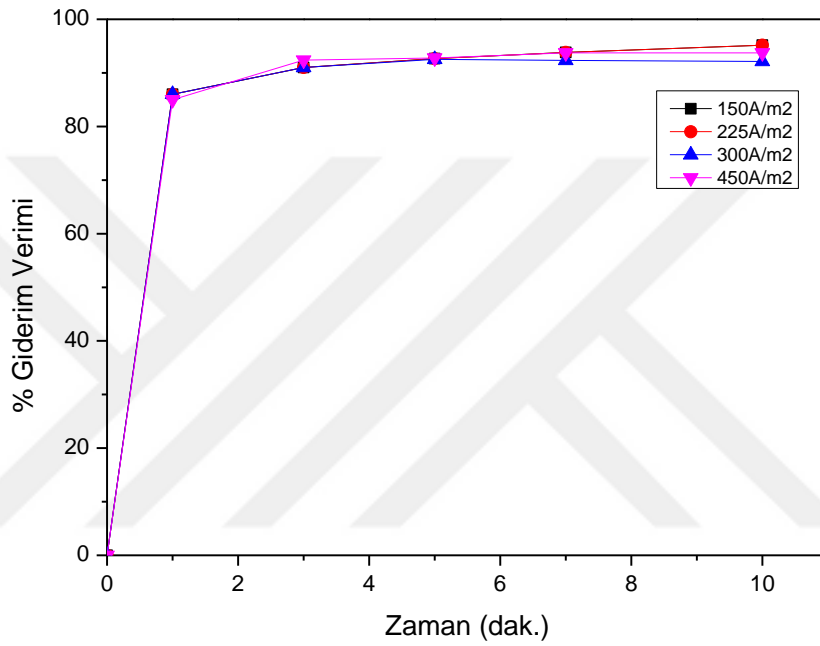
5.4. Renk Giderimi Üzerine Akımın Etkisi

EK prosesinde akım yoğunluğunun artması ile giderim verimi artar. Bunun sebebi yüksek akım yoğunluğu ile alüminyum ve demir elektrotların proses üzerinde anodik çözünmesiyle flokların oluşumunun artmasıdır. Bu da EK prosesinin kirleticiler üzerinde giderim veriminin artmasını sağlamaktadır. Akım yoğunluğunun artması Faraday Kanunu ile şu şekilde açıklanır; Akım yoğunluğu arttıkça elektrotlarda üretilen iyon miktarı artar. Bu da oluşan flokların miktarını artırır ve kirleticilerin giderimi artar.

• Fe Elektrot

Boya çözeltisi ile sentetik boya çözeltisi pH değerinde ve sabit konsantrasyonda, farklı akım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan sentetik

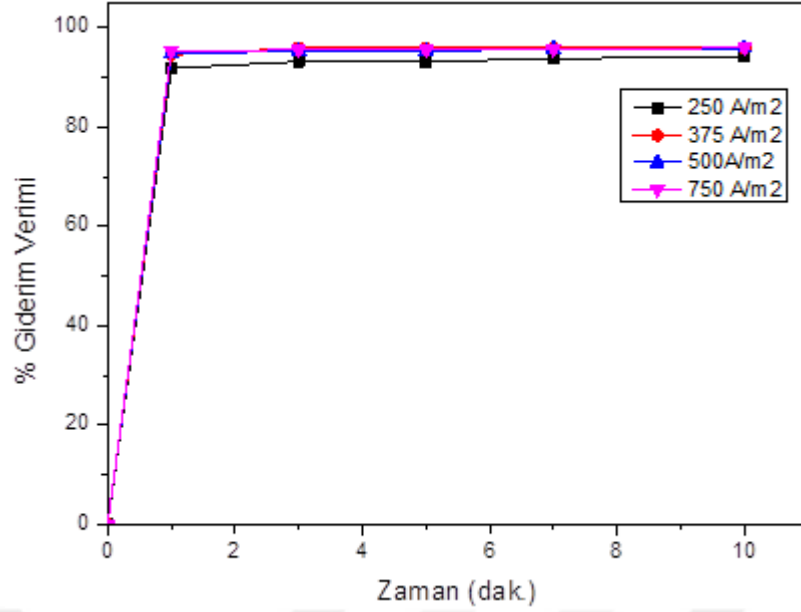
tekstil atıksuyunun boya giderim veriminin, uygulanan akımın artması ile arttığı ancak verim farklılıklarının fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple sistem parametresi için en uygun akım şartının 300 A/m^2 olduğu görülmüş ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Phalakornkule ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da Dispers Red 1 boyarmaddesi giderim veriminin akımın artması ile arttığı, ancak verim farklılıklarının önemli düzeyde olmadığı benzer şekilde rapor edilmiştir [Phalakornkule et al., 2010].



Şekil 5.7. Sabit konsantrasyon ve farklı akım koşullarında renk parametresinin Fe elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T: 25 °C, pH: 7.5, İletkenlik: 1 mS/cm, C: 50 mg/L).

- Al Elektrot

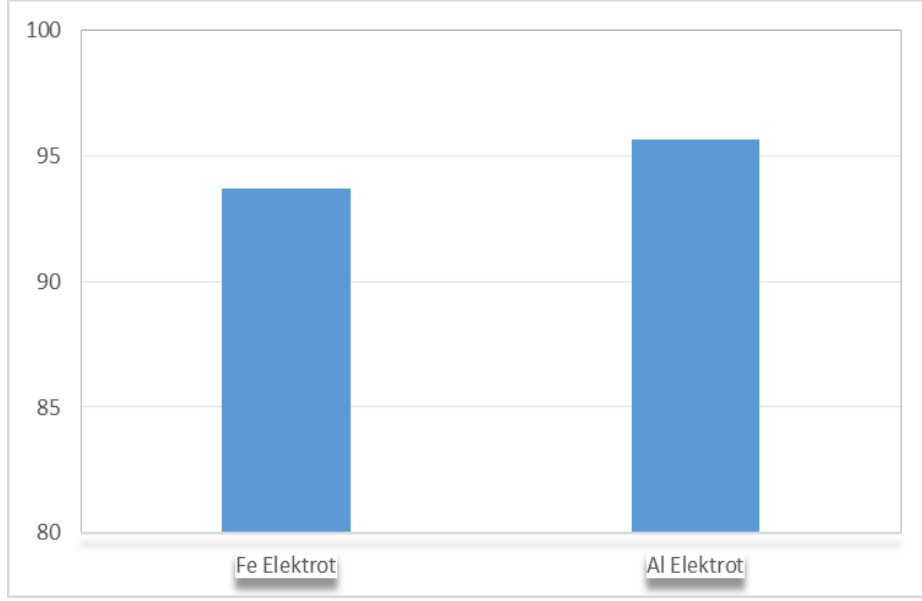
Boya çözeltisi ile sentetik boya çözeltisi pH değerinde ve sabit konsantrasyonda, farklı akım çalışmaları gerçekleştirilmiş, hazırlanan sentetik tekstil atıksuyunun boya giderim veriminin uygulanan akımın artması ile arttığı ancak verim farklılıklarının fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple sistem parametresi için en uygun akım şartının 375 A/m^2 olduğu görülmüş ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Phalakornkule ve arkadaşları çalışmasında Dispers Red 1 boyarmaddesi giderim veriminin akımın artması ile arttığını, ancak verim farklılıklarının önemli düzeyde olmadığını benzer şekilde rapor etmişlerdir [Phalakornkule et al., 2010].



Şekil 5.8. Sabit konsantrasyon ve farklı akım koşullarında renk parametresinin Al elektrot kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 7.5, İletkenlik: 1 mS/cm, C: 50 mg/L).

5.5. Renk Giderimi Üzerine Elektrotların Etkisi

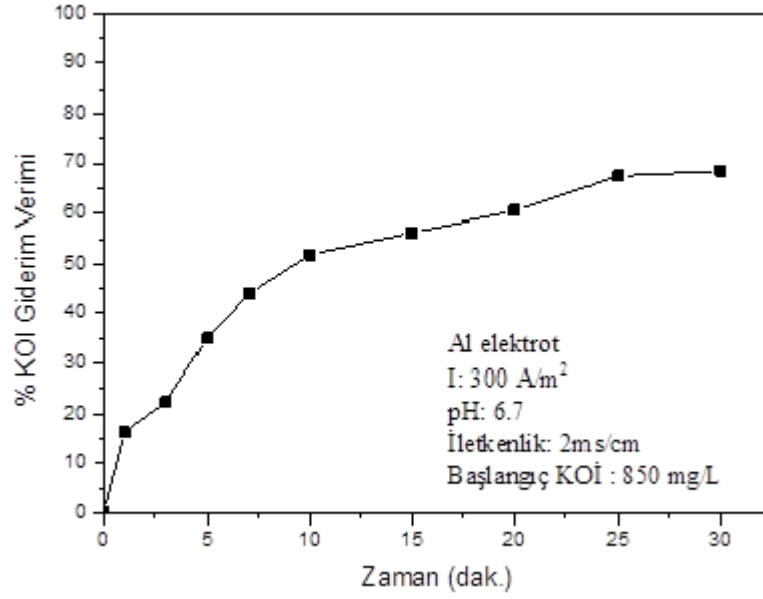
Elektrokoagülasyon üzerine farklı elektrot metaryallerin etkisi incelenmiştir. Al ve Fe elektrotlar anot ve katot olarak kullanılmıştır. Optimum şartlarda alüminyum elektrotlar ile yapılan çalışmada, demir elektrotlar ile yapılan çalışmaya göre giderim veriminin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.9'da boya giderim verimleri gösterilmiştir. Kim ve arkadaşları, çalışmalarında sürekli düzendeki elektrokoagülasyon prosesi ile dispers ve reaktif boya çözeltilerinden boya giderimini incelemiştir. Bu kapsamda elektrot malzemesi cinsinin renk giderimi üzerine etkisini belirlemek üzere Al, Fe ve paslanmaz çelik elektrotlar kullanmıştır. Bu çalışmada da boyarmadde gideriminde en iyi verim alüminyum elektrotlar ile elde edildiği rapor edilmiştir [Kim et al., 2002].



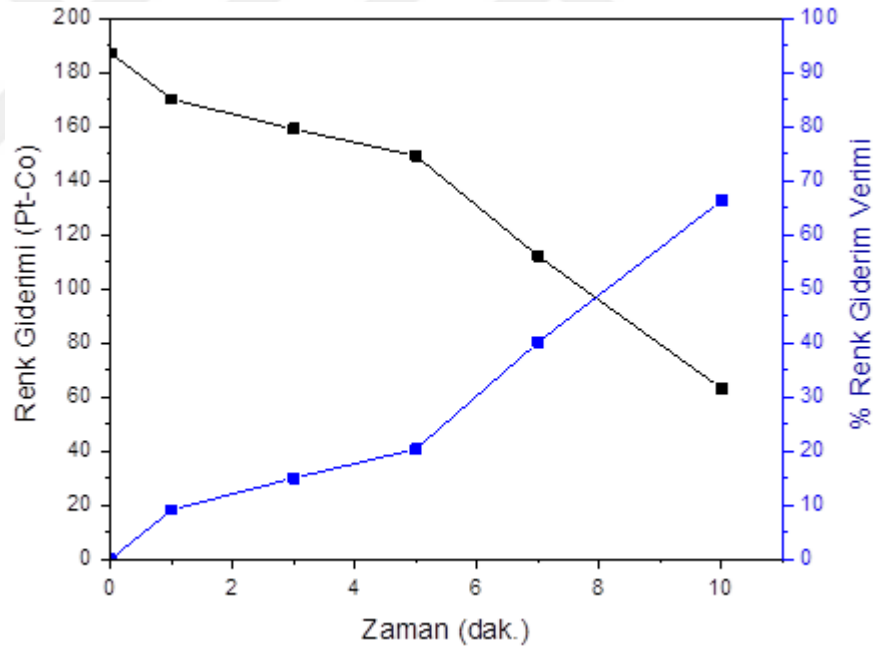
Şekil 5.9. Optimum şartlarda farklı elektrot türleri kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 7.5, İletkenlik: 1 mS/cm, C: 50 mg/L, Akım: 300 A/m²).

5.6. Optimum Sonuçlara Göre Gerçek Tekstil Atıksuyu Çalışması

Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyundan KOİ giderimi ve Pt-Co cinsinden renk giderimi çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak KOİ giderim verimi %68 olarak belirlenmiş ve Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Renk Giderimi ise (Pt –Co) 187’den (Pt-Co) 63’e düşürülmüş olup, giderim verimi %63 olarak belirlenmiş ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Renk giderim oranının zamanla Pt-Co cinsinden düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5.10. Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak zamana karşı giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 6.7, İletkenlik: 1 mS/cm, Başlangıç KOİ:850 mg/L, Akım: 300 A/m²).



Şekil 5.11. Optimum şartlarda gerçek tekstil atıksuyu kullanılarak zamana karşı renk giderimi(Pt-Co) ve % renk giderim veriminin incelenmesi (T:25°C, pH: 6.7, İletkenlik: 1 mS/cm, Akım: 300 A/m²).

5.7. Çalışılan Gerçek Tekstil Atıksuyu ile Yapılan Hesaplamalar

- Akım Yoğunluğu Hesaplaması

$$J = \frac{I}{A} \quad (5.1)$$

- J: Akım Yoğunluğu,
- I: 1 A = 1000 mA
- A : 50mm x 40mm = 20cm²

Formül 5.1'den yararlanılarak akım yoğunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

- J = 50 mA/cm²

- Akım Verimi Hesaplaması

$$m = \frac{I.t}{n.F} \quad (5.2)$$

- m : Anotta çökecek maddenin mol miktarı,
- I : 1 A
- t : 30 dak = 1800 sn
- n : 3
- F : 96485 C mol⁻¹
- m = 0.00622 mol olarak hesaplanır.

$$M_{ATe} = m . (M_A) \quad (5.3)$$

- M_{ATe} : Anot elektrottaki teorik çözünme miktarı,
- m : 0.00622 mol
- M_A : 26.9815 g/mol
- M_{ATe} = 0.167825 g

$$E = \frac{M_A}{M_{ATe}} \quad (5.4)$$

- E : Akım verimi,
- M_A : 0,15 g
- M_{ATe} : 0.167825 g

Formül 5.4'ten akım verimi aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $E = 0.89$

- Toplam Çözünen Alüminyum Miktarı Hesaplaması

$$M_T = M_A + M_K \quad (5.5)$$

- M_T : Toplam çözünen alüminyum miktarı
- M_A : 0.15 g
- M_K : 0 g

Formül 5.5'ten pratikte toplam çözünen alüminyum miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $M_T = 0.15$ g

- Faraday/m³ Hesaplaması

$$(\text{Faraday}/m^3) = \frac{I.t}{F.v} \quad (5.7)$$

- I: 1 A
- t: 1800 sn
- v: 600 ml = 0.0006 m³

Formül 5.7'den faydalanarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $(\text{Faraday}/m^3) = 31.093$

- Enerji Sarfiyatı ve Maliyet Hesaplaması
 - Çalışılan gerçek tekstil atıksuyu enerji tüketim değeri;

$$W = \frac{V.I.t}{v} \quad (5.8)$$

- W : Enerji Tüketim Değeri,
- V : 11 V
- I: 1 A
- t : 30 dakika = 0,5 sa
- v : 600 ml = 0,0006 m³

Enerji tüketim değeri formül 5.8'den yararlanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

- W = 9,16 kW.saat/m³.

Gerçek tekstil atıksuyu ile yapılan arıtılabilirlik çalışmasında hesaplanan enerji tüketim sarfiyatı Nisan 2016 sanayi perakende (0,2038 TL/kWh) birim enerji bedellerine göre hesaplanarak 1 m³ tekstil atıksuyunun arıtılabilmesi için gerekli olan enerji maliyeti 1,86 TL/m³ olarak belirlenmiştir [Web 1, 2016]

KAYNAKLAR

- Akbaş H., (2014), “Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi.
- Bahn P.G., (2007), “Cave Art: A Guide to the Decorated Ice Age Caves of Europe”, Revised and updated edition, Frances Lincoln Ltd.
- Başer İ., İnanıcı Y., (1990), “Boyarmadde Kimyası”, Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayın 482 (2), 207.
- Bayar S., Boncukcuoğlu R., Fil B.A., Yılmaz A.E., (2012), “Elektrokoagülasyon Yöntemi Kullanılarak Direct Red 23 Boyar Maddesinin Gideriminin İncelenmesi”, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2 (2), 21-28.
- Benfield L.D., Judkins J.F., Weand L.B., (1981), “Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment”, 1st edition, Englewood Cliffs : Prentice-Hall.
- Bisschops I., Spanjers H., (2003), “Literature Review On Textile Wastewater Characterisation”, Environmental Technology, 24 (11), 1399-1411.
- Chen G., (2004), “Electrochemical Technologies in wastewater treatment”, Separation and Purification Technology, 38, 11-41.
- Chung K.T., Stevens S.E.J., (1993), “Degradation of azo dyes by environmental microorganisms and helminthes”, Environmental Toxicology and Chemistry, 12, 2121-2132.
- Cing, S. (2001), “Tekstil Boyalarının Renginin Gideriminde Mikroorganizma Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- Dos Santos A.B., Cervantes F.J., Van Lier J.B., (2007), “Review paper on current technologies for decolourization of textile wastewaters perspectives for anaerobic biotechnology”, Bioresearch Technology, 98 (12), 2369-2385.
- Hamann C.H., Hamnett A., Vielstich W., (2007), “Electrochemistry”, 2nd completely revised and updated edition, Wiley-VCH.
- Hao O.J., Kim H., Chang P.C., (2000), “Decolorization of wastewater”, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 30 (4), 449-505.
- Kim T.H., Park C., Shin E.B., Kim S., (2002), “Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process”, Desalination, 165-175.
- Le-change S., (1985), Electro-chemical method to remove fluoride from drinking water, Water Supply, 3, 177-186.

Lourenço N.D., Novais J.M., Pinheiro H.M., (2001), “Effect of some operational parameters on textile dye biodegradation in a sequential batch reactor”, *Journal of Biotechnology*, 89, 163-174.

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

Matis K.A., Zouboulis A.I., (1994), “Electrolytic Flotation: An Unconventional Technique”, *Flotation Science and Engineering*, 1st edition, Marcel Dekker, INC.

Mollah M.Y., Morkovsky P., Gomes J.A., Kesmez M., Parga J., Cocke D.L., (2004), “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation”, *Journal of Hazardous Materials*, B114, 199-210.

Mollah M.Y., Schennach R., Parga J.R., Cocke D.L., (2001), “Electrocoagulation (EC) – science and application”, *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.

Müller K., (1992), “Electroflotation from the double layer to troubled waters”, *Electrochemistry in Transition*, 21-37, Plenum Press.

O’Neill C., Lopez A., Esteves S., Hawkes F.R., Hawkes D.L., Wilcox S., (2000), “Azo-dye degradation in an anaerobic-aerobic treatment system operating on simulated textile effluent”, *Applied Microbiology Biotechnology*, 53, 249-254.

Özcan, Y., (1978), “Tekstil Elyaf Boyama Tekniği”, 1. baskı, Fatih Yayınevi.

Özyonar F., Karagözoğlu B., (2012), “Elektrokoagülasyon Prosesi ile Tekstil Sanayi Atıksuyunun Arıtımı”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (1), 29-37.

Pajootan E., Arami M., Mahmoodi N. M., (2012), “Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 282–290.

Pandey A., Singh P., Iyengar L. (2007), “Bacterial decolorization and degradation of azo dyes”, *International Biodeterioration and Biodegradation*, 59, 73-84.

Phalakornkule C., Polgumhang S., Tongdaung W., Karakat B., Nuyut T., (2010), “Electrocoagulation of Blue Reactive, Red Disperse and Mixes Dyes and application in treating textile effluent”, *Journal of Environmental Management* 91, 918-926.

Pletcher D., Walsh FC., (1990), *Industrial Electrochemistry*, 2nd edition, Springer Netherlands.

Rajaguru P., Vidya L., Baskarathupathi B., Kumar P.A., Palanivel M., Kalaiselvi K., (2002), “Genotoxicity evaluation of polluted ground water in human peripheral blood lymphocytes using the comet assay”, *Mutation Research*, 517, 29-37.

Rajeshwar K., Ibanez J.G., Swain G.M., (1994), "Electrochemistry and the environment", Journal of Applied Electrochemistry, 24,1077-1091.

Romanov A., Kobya M., Dimoglu A., (2000), "Atıksulardaki Kolloidal Partiküllerin Elektroflotokoagülasyonla Giderimi", İstanbul Teknik Üniversitesi 7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, 67-74.

Saraç A. S., (1995), "Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler", 1. baskı, Çağlayan Kitabevi.

Scott V.K., (1995), "Electrochemical Processes for Clean Technology", The Royal Society of Chemistry, 307.

Şensoy M.T., (2008), "Sürekli akış kontrollü bir elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil atıksularının arıtımı", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

TTTSD, (2002), "IPPC Tekstil Sanayi için En Uygun Teknikler (MET) Referans Dokümanı ve İlgili Yönetmelikler", META Basım Matbaacılık Hizmetleri, 747, Türkiye Tekstil Terbiye Sanayicileri Derneği.

Web 1, (2016), <http://enerjienstitusu.com/elektrik-fiyatlari/>, (Erişim Tarihi: 03/05/2016).

Weisburger J.H., (2002), "Comments on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health", Mutation Research, (506-507), 9–20.

Welham A., 2000, "The theory of dyeing (and the secret of life)", Journal of the Society of Dyers and Colourists, 116, 140-143.

Wong P.K., Yuen P.Y., (1996), "Decolorization and biodegradation of methyl red by Klebsiella pneumonia RS-13", Water Research, 30, 1736-1744.

Woytowich D.L., Dalrymple C.W., Gilmore F.W., Britton M.G., (1993), "Electrocoagulation (CURE) treatment of ship bilgewater for the US coast guards in Alaska", Marine Technology Society Journal, 27, 62–67.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Şişli’de doğan Mesut ÖZDEN, ilk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı ve 2008 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Çevre Koruma Müdürlüğü’nde Çevre Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2009 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2014 yılında İBB Atık Yönetimi Müdürlüğü’ne atandı. Halen aynı Müdürlükte Kontrol Mühendisi olarak çalışmaktadır. Ayrıca çevre görevlisi ve C sınıfı iş güvenliği uzmanı olan ÖZDEN, iyi derecede İngilizce ve başlangıç düzeyinde Arapça bilmektedir. ÖZDEN, evli ve bir çocuk babasıdır.