

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI SINIF TEKSTİL BOYALARININ ALÜMİNYUM ELEKTROTLARIN
KULLANILDIĞI ELEKTROKOAGÜLASYON İLE SUDAN GİDERME
VERİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk Muhammed ÖZ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2018

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI SINIF TEKSTİL BOYALARININ ALÜMİNYUM ELEKTROTLARIN
KULLANILDIĞI ELEKTROKOAGÜLASYON İLE SUDAN GİDERME
VERİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ufuk Muhammed ÖZ
(162082104)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Orhan Taner CAN

TEMMUZ 2018

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162082104 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ufuk Muhammed ÖZ ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "FARKLI SINIF TEKSTİL BOYALARININ ALÜMİNYUM ELEKTROTLARIN KULLANILDIĞI ELEKTROKOAGÜLASYON İLE SUDAN GİDERME VERİMİNİN İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. S. Sıddık CİNDORUK**
Uludağ Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AYGÜN
Bursa Teknik Üniversitesi

Savunma Tarihi :

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

İNTİHAL BEYANI

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

Ufuk Muhammed ÖZ

İmzası :

ÖNSÖZ

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

TEMMUZ 2018

Ufuk Muhammed ÖZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEKSTİL SANAYİSİNDE KULLANILAN BOYAR MADDELER VE BOYAMA ATIKSULARININ ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1 Tekstil Sanayisinde Kullanılan Boyar Maddeler ve Sınıflandırılması	3
2.1.1 Boyar maddeler.....	3
2.1.2 Boyar maddelerin sınıflandırılması	3
2.1.3 Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırılması.....	3
2.1.3.1 Suda çözünür boyar maddeler	3
2.1.3.2 Suda çözünmez boyar maddeler	4
2.1.4 Boyama özelliklerine göre sınıflandırılması.....	4
2.1.4.1 Direkt boyar maddeler	4
2.1.4.2 Vat boyar maddeler	4
2.1.4.3 Kükürt boyar maddeler	4
2.1.4.4 Asit boyar maddeler	4
2.1.4.5 Dispers boyar maddeler	5
2.1.4.6 Bazik (katyonik) boyar maddeler	5
2.1.4.7 Solvent boyar maddeler	5
2.1.4.8 Reaktif boyar maddeler	5
2.1.5 Kimyasal yapısına göre sınıflandırılması	5
2.2 Tekstil Sanayi Boyama Atıksularının Özellikleri.....	6
2.2.1 Tekstil boyama işlemi.....	6
2.2.2 Tekstil atıksuyunun karakterizasyonu	6
2.2.3 Çevresel etkisi	8
3. TEKSTİL SANAYİ BOYAMA ATIKSULARININ ARITIMI	9
3.1 Elektrokimyasal Arıtım Prosesleri.....	9
3.1.1 Elektrokoagülasyon (EK)	10
3.1.1.1 Elektrokoagülasyon teknolojisi	10
3.1.1.2 Çeşitli parametrelerin elektrokoagülasyon prosesine etkisi	13
3.1.2 Elektroflotasyon (EF)	14
3.1.3 Elektrokoksidasyon (EO)	15
3.2 UV Görünür Bölge Absorbsiyon Spektroskopisi	15

3.2.1 Lambert-Beer yasası	16
3.2.2 Spektroskopik enstrümanların temel bileşenleri.....	17
4. MATERYAL VE METOD	18
4.1 Kullanılan Boyar Maddeler ve Özellikleri	18
4.2 Deney Düzenegi.....	20
4.3 Deneysel İşlem.....	20
4.4 Analitik Yöntem	21
4.4.1 Kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması	21
4.4.2 Boya konsantrasyonlarının belirlenmesi	23
4.4.3 Kullanılan eşitlikler	23
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
5.1 Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi	25
5.2 İşletme Maliyeti	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52



KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
CI	: Colour İndex
ÇKM	: Çözünmüş Katı Madde
DC	: Doğru Akım
EF	: Elektroflotasyon
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektrokoksidasyon
GB	: Görünür Bölge
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TÇM	: Toplam Çözünmüş Madde
UV	: Ultraviyole

SEMBOLLER

A	: Aktif anot yüzey alanı
A	: Absorbans
C	: Çözelti konsantrasyonu
E	: Akım verimi
E	: Elektrik Enerjisi
F	: Faraday sabiti
I	: Akım şiddeti
I₀	: Gelen ışın demetinin şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
l	: Işın demetinin içinden geçtiği çözeltinin kalınlığı
M	: Teorik olarak çözünen metalin (mol olarak) miktarı
m_{act}	: Pratikte çözünen metalin (mol olarak) miktarı
m_{metal}	: Çözünen elektrot materyali miktarı
M_A	: Pratikte anotta elektrottaki çözünme miktarı
MA	: Molekül ağırlığı
M_T	: Toplam çözünen alüminyum miktarı
N	: İyon yükü
pH	: Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonunun negatif logaritması
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
q	: Akımın miktarı (yük)
t	: Zaman
t_s	: Arıtma süresi
T	: Geçirgenlik
v	: Elektrolit hacmi
V	: Volt
W	: Watt
Z	: Elektrot materyali iyonlarının valansı
λ	: Dalga boyu
ε	: Molar sönüm katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tekstil üretim tesisinin çeşitli aşamalarında başlıca kirletici bileşenleri (Verma ve diğ., 2012).	7
Çizelge 3.1 : Tekstil sanayi atıksularının arıtımı için kullanılan yöntemler (Vandevivere ve diğ., 1998).....	9
Çizelge 4.1 : Acid Blue 324 özellikleri.	18
Çizelge 4.2 : Dispers Orange 30 özellikleri.....	18
Çizelge 4.3 : Basic Yellow 28 özellikleri.....	19
Çizelge 4.4 : Vat Brown 1 özellikleri.....	19
Çizelge 4.5 : Reaktif Black 5 özellikleri.....	19
Çizelge 5.1 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	25
Çizelge 5.2 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	26
Çizelge 5.3 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	26
Çizelge 5.4 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	27
Çizelge 5.5 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	27
Çizelge 5.6 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	29
Çizelge 5.7 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	29
Çizelge 5.8 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	30
Çizelge 5.9 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	30
Çizelge 5.10 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	30
Çizelge 5.11 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	33
Çizelge 5.12 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	33
Çizelge 5.13 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	33
Çizelge 5.14 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	34
Çizelge 5.15 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	34
Çizelge 5.16 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	36

Çizelge 5.17 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.....	37
Çizelge 5.18 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	37
Çizelge 5.19 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	37
Çizelge 5.20 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	38
Çizelge 5.21 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	40
Çizelge 5.22 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	40
Çizelge 5.23 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	41
Çizelge 5.24 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	41
Çizelge 5.25 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.	41
Çizelge 5.26 : Akım yoğunluğunun EK prosesine etkisi.....	44
Çizelge 5.27 : Elektrokoagülasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti. ..	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Paralel olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi	11
Şekil 3.2 : Seri olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi	11
Şekil 3.3 : Bipolar (çift kutuplu) ve paralel bağlı elektrokoagülasyon hücresi	11
Şekil 3.4 : Tek ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı.....	17
Şekil 3.5 : Çif ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı.....	17
Şekil 4.1 : Acid Blue 324'ün moleküler yapısı	18
Şekil 4.2 : Dispers Orange 30'un moleküler yapısı.....	18
Şekil 4.3 : Basic Yellow 28'in moleküler yapısı	19
Şekil 4.4 : Vat Brown 1'in moleküler yapısı	19
Şekil 4.5 : Reaktif Black 5'in moleküler yapısı.....	19
Şekil 4.6 : Elektrokoagülasyon deney düzeneği.....	20
Şekil 4.7 : Acid Blue 324 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.....	21
Şekil 4.8 : Dispers Orange 30 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi	21
Şekil 4.9 : Basic Yellow 28 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi	22
Şekil 4.10 : Vat Brown 1 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi	22
Şekil 4.11 : Reaktif Black 5 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi.....	22
Şekil 4.12 : Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer	23
Şekil 5.1 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi	28
Şekil 5.2 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)	28
Şekil 5.3 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi	28
Şekil 5.4 : 0,052 mA/cm ² akım yoğunluğunda toplam maliyet.....	29
Şekil 5.5 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi	31
Şekil 5.6 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)	31
Şekil 5.7 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi	32
Şekil 5.8 : 0,104 mA/cm ² akım yoğunluğunda toplam maliyet.....	32
Şekil 5.9 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda olduğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi	35
Şekil 5.10 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g).....	35
Şekil 5.11 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda enerji tüketimi.....	35
Şekil 5.12 : 0,208 mA/cm ² akım yoğunluğunda toplam maliyet.....	36
Şekil 5.13 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyarmaddelerin giderimi	38
Şekil 5.14 : 0,416 mA/cm ² akım yoğunluğunda toplam maliyet.....	39

Şekil 5.15 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi	42
Şekil 5.16 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)	42
Şekil 5.18 : 0,83 mA/cm ² akım yoğunluğunda toplam maliyet.....	43
Şekil 5.19 : DO30 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi	43



FARKLI SINIF TEKSTİL BOYALARININ ALÜMİNYUM ELEKTROTLARIN KULLANILDIĞI ELEKTROKOAGÜLASYON İLE SUDAN GİDERME VERİMİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Tekstil boyama endüstrisi, günümüzde temel sektörlerden olup, su kirliliğinin en önemli kaynaklarından biri haline gelmiştir. Tekstil boyama endüstrisi, yüksek miktarda atıksu üretmektedir. Boyama işleminde değişik boya sınıfından boyalar kullanılmaktadır. Tekstil boyamada kullanılan boyalar kumaş veya elyafi renklendirmede kullanılan organik bileşiklerdir. Tekstil boyaları su ortamda çok kararlıdır, biyolojik bozunma oranları düşüktür. Boyalar birçok zehirli maddeden oluşur ve alıcı su ortamlarında bazı ciddi zararlı etkilere neden olabilirler. Alıcı su ortamında atık boyanın oluşturacağı renk nedeniyle ışık geçirgenliği azalarak fotosentez faaliyetleri engellenir ve oksijen tükenmesi meydana gelir. Bu nedenle boyar madde içeren atıksuların su sistemlerine bırakılmadan önce arıtılmaları için yenilikçi, uygun maliyetli ve etkili atıksu arıtım teknolojilerine ihtiyaç vardır. Literatürde, az sayıdaki geleneksel ve biyolojik yöntemin tekstil boyama endüstrisinden gelen atık suların arıtılmasında yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Elektrokoagülasyon (EC) prosesi bu tür atık suların arıtımı için daha iyi bir seçenek olabilir.

Bu tez çalışmasında farklı sınıflardaki tekstil boyalarının alüminyum anotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesinde sulardan giderme verimleri incelendi. Anot ve katotta alüminyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde, akım yoğunluğu arıtma verimine etkisi de incelendi. Bu amaçla, Asit (Acid Blue 324), Dispers (Disperse Orange 30), Katyonik/Bazik (Basic Yellow 28), Vat (Vat Brown 1) ve Reaktif (Reactive Black 5) tekstil boyaları seçildi. Deneyler için hazırlanan boya çözeltileri 50 mg/l boya ve 1000 mg/l NaCl elektrolit konsantrasyonuna sahip olacak şekilde hazırlandı. Deneyler 500 ml çözelti kullanılarak kesikli sistem ile gerçekleştirildi. Elektrokoagülasyon deneyleri, 3 anot ve 2 katot alüminyum elektrottan oluşan elektrokoagülasyon reaktörü, manyetik karıştırıcı ve güç kaynağı kullanılarak yürütüldü. Elektrokoagülasyon prosesinde farklı sınıftaki boyaların sudan giderim performansları ile birlikte akım yoğunluğunun etkisi de incelendi. Giderim verimleri UV/Vis spektrofotometre ile ölçülen absorbans değerlerinden boya konsantrasyonların hesaplanması ile bulundu.

Çalışma sonuçlarından; Kullanılan boya sınıfının elektrokoagülasyon yöntemi ile sulardan boya giderimine etki ettiği görüldü. Giderme verimlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralandığında boya sınıfı dispers, vat, asit, reaktif ve katyonik/bazik şeklinde gerçekleşti. Tüm akım yoğunluklarında dispers boya yüksek bir giderme verimi ile neredeyse boyanın tümü ortamdaki giderilirken, en kötü giderme verimine sahip katyonik/bazik boya ancak konsantrasyonunun yarısı ortamdaki giderilebildi.

Anahtar Kelimeler: Elektrokimyasal arıtım, elektrokoagülasyon, tekstil boyası, tekstil atıksuyu, boya sınıfı.

THE EFFECT OF ELECTROLYTE TYPE AND AMOUNT ON COLOR REMOVAL BY ELECTROCOAGULATION USING IRON AND ALUMINIUM ELECTRODES

SUMMARY

The textile dyeing industry is now one of the main sectors and has become one of the most important sources of water pollution. Textile dyeing industry produces a high amount of wastewater. Different dye classes are used in the dyeing process. The dyes used in textile dyeing are organic compounds used for dyeing fabrics or fibers. Textile dyes are very stable in aquatic environment, and biological degradation rates are low. Dyes consist of many toxic substances and can cause some serious harmful effects on the receiving water environment. Due to the color that the waste dye will form in the receiving water environment, the light permeability decreases, and the photosynthesis activities are prevented, and oxygen depletion occurs. Therefore, there is a need for innovative, cost-effective and efficient wastewater enhancement technologies for the treatment of wastewater containing stains before they are released to water systems. It has been observed in the literature that a small number of conventional and biological methods are inadequate for the treatment of wastewater from the textile dyeing industry. The electrocoagulation (EC) process may be a better option for the treatment of such wastewater.

In this thesis study, the removal efficiencies of the different classes textile dyes from the water by the electrocoagulation process using aluminum anodes were investigated. The effect of current density treatment efficiency on the electrocoagulation process using aluminum electrodes at anode and cathode was also investigated. For this purpose, Acid (Acid Blue 324), Disperse (Disperse Orange 30), Cationic/Basic (Basic Yellow 28), Vat (Vat Brown 1) and Reactive (Black 5) textile dyes were selected. The dye solutions prepared for the experiments were made to have an electrolyte concentration of 50 mg/l dye and 1000 mg/l NaCl. Experiments were performed with the cut-off system using a 500 ml solution. Electrocoagulation experiments were carried out using an electric coagulation reactor consisting of 3 anodes and 2 cathodes aluminum electrodes, using magnetic stirrer and power supply. In the electrocoagulation process, the influences of current density along with the removal performance of the dyes in different classes were also studied. The recovery efficiencies were found by calculating the dye concentrations from absorbance values measured with UV / Vis spectrophotometer.

From the study results; It was observed that the dye class used had an effect on the dye removal by electrocoagulation method. When sorted according to their removal efficiency, the dye class was dispersed, vat, acid, reactive and cationic/basic. At all current densities, the disperse dye was removed from the medium almost entirely with a high removal efficiency, the cationic/basic dye with the worst removal efficiency, but half of the concentration could be removed from the medium.

Keywords: Electrochemical treatment, electrocoagulation, textile dyes, textile wastewater, dye class.

1. GİRİŞ

Boyarmaddeler tekstil, kâğıt ve baskı sanayinde oldukça fazla kullanılmaktadır. 100.000'in üzerinde boya proseslerde kullanılmakta ve yıllık 700.000 ton boya üretilmektedir (Kaptan, 2002). Yüksek derecede kirlilik ve renk tekstil sanayinden kaynaklı atıksuların özelliğidir. Tekstil sanayinde 10.000'in üzerinde boyar madde kullanılır ve dünyada yıllık 280.000 ton boya içeriğine sahip atıksu alıcı ortama deşarj edilmektedir (Maas ve Chaudhari, 2005). Kirleticilerin büyük çoğunluğu boyarmadde kaynaklıdır (Can ve Gazigil, 2017). Atıksuyun içeriği prosese ve boyamanın sürekli veya kesikli olmasına göre değişiklik göstermektedir (Şahin, 2006). Yüksek renk içeriğine sahip atıksular ışığın su ortamına geçmesine engel olur ve fotosentez faaliyetleri olumsuz etkilenir. Sucul organizmalarda birikim oluşur ve toksik ve kanserojenik ürünlerin meydana gelmesi riskini de artırır (Kocaer ve Alkan, 2002). Tekstil sanayi atıksularından renk giderimi için biyolojik oksidasyon, kimyasal çöktürme, klorlama, ozon, adsorbsiyon, kimyasal oksidasyon, membran prosesler ve elektrokimyasal yöntemler kullanılmaktadır.

Elektrokimyasal yöntemler boyarmadde gideriminde oldukça etkilidir (Aoudj ve diğ., 2010). Elektrokoagülasyon yöntemi, az miktarda çamur oluşumu, gözle görünmeyen ve biyolojik olarak bozunmayan organik maddelerin çözünmesi veya atıksuyun biyolojik arıtıma uygun duruma getirilmesi, koagülant miktarının kolay bir şekilde kontrolü, hidroksit içeriğine sahip çökelekler veya floklar üzerinde adsorpsiyonla ağır metal iyonlarının uzaklaştırılabilmesi, sürekli pH kontrolüne gerek duyulmaması, %90 civarında yüksek verim elde edilmesi, 10 dakika temas süresi ve düşük yatırım maliyeti gibi özellikleri ile alışılmış koagülasyon-flokülasyon yöntemlerine göre, elektriksel alan sebebiyle en küçük tanecikleri uzaklaştırabilme gibi avantajlara sahiptir. Ancak katotta üretilen H₂ gazının çökelmeyi engellemesi, arıtılan sudaki demir ve alüminyum iyon derişimlerinin fazla olması, çözünmeyen hidroksitlerin elektrotlar arasında birikmesi gibi dezavantajları da vardır. Bu dezavantajların azaltılabileceği ve geleneksel atıksu arıtım proseslerine alternatif olabileceği düşünülmektedir (Solak, 2007).

Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılan bir çalışmada Reactive Blue 21 boyası giderilmiştir. 30 A/m² akım yoğunluğu, 7 dakikalık deney süresi sonunda %95 renk giderimi elde edilmiştir (Ardhan ve diğ., 2015). Demir elektrotlar kullanılarak kesikli ve tam karıştırmalı elektrokoagülasyon reaktöründe Brilliant Green boyası giderilmiştir. 100 mg/l boya konsantrasyonu ve 4,0 pH giriş değeri, 41.7 A/m² akım yoğunluğu ve 30 dakikalık deney süresi sonunda %99,59 renk giderimi elde edilmiştir (Nandi ve Patel, 2013).

Bu tez çalışmasında farklı sınıflardaki tekstil boyalarının alüminyum anotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesinde sulardan giderme verimleri incelenmiştir. Anot ve katotta alüminyum elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokoagülasyon prosesinde, Acid Blue 324, Disperse Orange 30, Basic Yellow 28, Reaktif Black 5, Vat Brown 1 kullanılarak farklı akım yoğunluklarında giderim davranışları incelenmiştir.

2. TEKSTİL SANAYİSİNDE KULLANILAN BOYAR MADDELER VE BOYAMA ATIKSULARININ ÖZELLİKLERİ

2.1 Tekstil Sanayisinde Kullanılan Boyar Maddeler ve Sınıflandırılması

2.1.1 Boyar maddeler

Elyaf ve kumaşı renklendirmek için boyarmaddeler kullanılmaktadır. Organik yapıları ile çözelti veya süspansiyon halinde cismin yüzeyi ile kimyasal veya fizikokimyasal olarak birleşmekte ve renk oluşmaktadır (Başer ve İnancı, 1990).

2.1.2 Boyar maddelerin sınıflandırılması

Boyar maddeler kimyasal yapılarına, uygulama yöntemlerine, çözünürlüklerine vb. birçok şekilde sınıflandırılabilirler. Boyacılar Topluluğu tarafından İngiltere, Bradford'ta geliştirilen Colour Index ile boyar maddeler ve pigmentler sınıflandırılmıştır. Bilinen ticari boyar madde ve pigmentlerin kapsamlı bir listesini içerir ve her yıl düzenli olarak güncellenmektedir. Her renk, uygulama sınıfını yansıtan C.I genel ismi ve rengin ticari olarak piyasaya sunulduğu kronolojik sırayı gösteren numara içerir (Christie, 2001). Bu çalışmada da yer alan boyar maddelerin Colour Index isimleri kullanılmıştır.

2.1.3 Çözünürlük özelliklerine göre sınıflandırılması

2.1.3.1 Suda çözünür boyar maddeler

Boyarmadde molekülü en az bir tane tuz oluşturabilen grup içerir. Boyarmaddenin sentezinde kullanılan başlangıç maddeleri iyonik gruba sahip değilse, sonradan eklenerek çözünürlük sağlanabilir. Tercihen boyarmadde sentezinde başlangıç maddeleri iyonik grup içermelidir. Tuz içeren grubun karakterine göre üçe ayrılır;

- Anyonik boyarmaddeler
- Katyonik boyarmaddeler
- Zwitter iyona sahip boyarmaddeler (Bahadır, 2012).

2.1.3.2 Suda çözünmez boyar maddeler

Suda çözünmeyen boyarmaddeler aşağıdaki gibi gruplandırılarak incelenebilmektedir (Fakı, 2007).

- Substratta çözünen boyarmaddeler
- Organik çözücülerde çözünen boyarmaddeler
- Geçici çözünürlüğe sahip boyarmaddeler
- Polikondensasyon boyarmaddeler
- Elyaf içinde oluşturulan boyarmaddeler
- Pigmentler

2.1.4 Boyama özelliklerine göre sınıflandırılması

2.1.4.1 Direkt boyar maddeler

Suda çözünebilir ve ekstra bir işlem gerekmeden lif tarafından alınabilmektedir. Sülfü grupları ve karboksil grupları suda çözünebilme özelliğini sağlar. Bu sebeple direkt boyarmaddeler, anyonik boyarmaddelerdir (İçoğlu, 2006). Düşük haslık özellikleri ve bazılarının ekolojik sorunlar oluşturması sebebiyle günümüzde kullanımları azalmıştır (Fakı, 2007).

2.1.4.2 Vat boyar maddeler

Vat boyar maddeler, genellikle pamuk ve selülozik elyafın boyanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca naylon ve polyester-selülozik elyafın boyanmasında, nadiren yün ve asetat boyanmasında da kullanılırlar (Sevimli, 2000).

2.1.4.3 Kükürt boyar maddeler

Kükürt içeren karmaşık yapıları organik bileşiklerdir. Selülozik elyafın boyanmasında kullanılmaktadır. Renkleri parlak değildir, yaş haslıkları çok yüksektir, ucuzdurlar (Şahin, 2006).

2.1.4.4 Asit boyar maddeler

Yün, ipek, naylon gibi nitrojenik elyafa ve asit veya nötr boyalardan modifiye edilen akrilik elyafa uygulanabilmektedir. Boya ile elyaf arasındaki çekim, boyanın sülfonik asit kısmı ile yün, ipek ve naylon elyafların amino grupları arasındaki iyonik bağın bir

sonucudur. Çoğunluğu parlak olan çok miktarda renk tonları elde edilmektedir (Sevimli, 2000).

2.1.4.5 Dispers boyar maddeler

Dispers boyarmaddeler, sudaki çözünürlükleri çok az olan organik bileşiklerin çok ince öğütülmüş süspansiyonları şeklinde kullanılmaktadır. Boyarmadde, boyama işlemi sırasında dispersiyon ortamından hidrofobik elyaf üzerine difüzyon yolu ile çekilmektedir (Başer ve İnanıcı, 1990).

2.1.4.6 Bazik (katyonik) boyar maddeler

Bazik boyarmaddelerin çoğu diarilmetan, triarilmetan, antraquinone veya azo bileşiklerini içerir. İndekste bulunan boyarmaddelerin yaklaşık %5'i bazik boyarmaddeler sınıfına girmektedir (Van Der Zee, 2002). Su ortamında fazla miktarda zararlı etkisi vardır. Ancak uygun şartlarda boyar maddenin %100'e yakın kısmı boyanacak materyale geçer (Sevimli, 2000).

2.1.4.7 Solvent boyar maddeler

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

2.1.4.8 Reaktif boyar maddeler

Reaktif boyarmaddeler uygun koşullarda lif ile kimyasal reaksiyona giren, kovalent bağ özelliğine sahip tek boyarmadde sınıfıdır. Küçük ve basit molekül yapısına sahiptir. Suda kolay çözünürler. Molekül ağırlıkları genellikle 69-221 g/mol'dür. Küçük partikül özelliği life hızlı bir şekilde geçmesini sağlar. Çok parlak renklere sahip oldukları için spektrumlarında çok dar ve yüksek pikler gösterirler. En çok mavi, kırmızı, turuncu ve sarı renklerin elde edilmesi için kullanılırlar (Keleş, 2008).

2.1.5 Kimyasal yapısına göre sınıflandırılması

Boyarmaddeleri yapısal olarak sınıflandırırken, molekülün temel yapısı, kromojen ve renk verici kısmı da esas kabul edilebilir. Buna göre boyarmaddeler;

- Azo boyarmaddeler
- Nitro ve nitrozo boyarmaddeler
- Polimetin boyarmaddeler
- Arilmetin boyarmaddeler
- Azaanulen boyarmaddeler
- Karbonil boyarmaddeler
- Kükürt boyarmaddeler (Başer ve İnanıcı, 1990).

2.2 Tekstil Sanayi Boyama Atıksularının Özellikleri

2.2.1 Tekstil boyama işlemi

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

2.2.2 Tekstil atıksuyunun karakterizasyonu

Tekstil sanayi atıksularının içeriği belirlenirken KOİ, AKM, yağ ve gres, renk, toplam krom, fenoller, toplam sülfür, yüzey aktif maddeler, pH ve sıcaklık değerleri kullanılmaktadır. Genellikle gri renkli veya boyamada kullanılan esas boyanın rengindedir. Atıksulardaki kirleticiler çözülmüş ya da süspansiyon halde olabilir. BOİ, toplam çözülmüş madde, alkalinite ve sıcaklık değerleri yüksektir. Tekstil sanayi atıksuları, sodyum hidroksit, sodyum klorür, asetik asit, sodyum bikromat ve benzeri gibi boyamada kullanılan yardımcı kimyasal maddeler ile birlikte sülfür, küp, reaktif, dispers ve diğer boya tiplerinin tüm renk aralıklarını kapsayan boyar maddeleri içerir. Ayrıca, bu tür atıksular ıslatma ve yıkama maddeleri olarak kullanılan non-iyonik,

anyonik ve katyonik yüzey aktif maddeleri içerebilir. Ayrıca tekstil mamullerinin terbiyesinde kullanılan çeşitli kimyasal maddeleri de bulundurabilir (Özdemir, 2007).

Çizelge 2.1 : Tekstil üretim tesisinin çeşitli aşamalarında başlıca kirletici bileşenleri (Verma ve diğ., 2012).

Üretim Alanı	Kirletici Adı	Kirletici Parametreleri
Haşılama	İplik atıkları, kullanılmamış nişasta bazlı haşıklar	Yüksek BOİ, Orta KOİ
Yıkama	Dezenfektanlar ve insektisit kalıntıları, NAOH, yüzey aktif madde, sabunlar	BOİ (Toplamın %34-50'si), Yüksek KOİ ve Sıcaklık (70-80 °C)
Ağartma	H ₂ O ₂ , AO _x , NaOCl, organikler	Yüksek pH, TÇM
Merserizasyon	NAOH	Yüksek BOİ, yüksek pH, AKM
Boyama	Renk, metaller, sülfid, tuzlar, asidite/alkalinite, formaldehit	Yüksek toksisite, BOİ (Toplamın %6'sı), yüksek ÇKM, yüksek pH
Baskı	Üre, Solventler, renk, metaller	Yüksek toksisite, yüksek KOİ, yüksek BOİ, yüksek ÇKM, yüksek pH, kuvvetli renk
Apri İşlemi	Klorlu bileşikler, reçineler, solventler, yumuşatıcılar, waksar, asetat	Düşük alkalinite, düşük BOİ, yüksek toksisite

Pamuklu tekstil atıksularının özellikleri: Pamuklu tekstil sanayi atıksularının en önemli kirlilik parametreleri; KOİ, yüksek pH, sıcaklık, toksik maddeler, yüzey aktif maddeler, yağ, gres, sülfürler, AKM ve alkalinitedir. Orta büyüklükte bir tesis için, nişastalı atıklar toplam atıksu hacminin %16'sını, BOİ'nin %53'ünü, toplam katıların %36'sını ve alkalinitenin ise %6'sını kapsar. Kostik soda; toplam atıksu hacminin %19'unu, BOİ'nin %37'sini, toplam katıların %43'ünü ve toplam alkalinitenin ise %60'unu kapsar. Yıkama, ağartma, boyama ve apri atıkları; kompozit atık hacminin %65'ini, BOİ'nin %10'unu, toplam katı maddenin %2'sini ve toplam alkalinitenin ise %34'ünü kapsar (Koby ve diğ., 2008).

Yünlü tekstil atıksularının özellikleri: Yün atıksularında, saman, diken, pıtrık, toprak, kum, alkali maddeler, organik asitler, yağ, H₂S, boyalar, deterjanlar, kimyasal ve organik maddeler bulunur. Yapak yıkama atıkları; kum ve toprak, pıtrık, yün gresi ve organik asitler içerir. Bu atıklar kahverengi ve bulanıktır. Gres emülsiyonları ve diğer organik bileşikleri içerir. Çıkış suyu gres miktarı 25 g/l gibi yüksek değerlerde olabilir. Kuvvetli alkalidirler, yüksek miktarda organik bileşik ve AKM içerirler. Diğer proseslerden gelen atıklar; boyları, organik çözücüler, asitleri içerirler. Bileşimleri ve konsantrasyonları, kullanılan kimyasal maddelere ve hammaddenin saflığına bağlıdır. Boya atıklarında krom, meta kromel asit ve sülfür boyları bulunabilir. Yünlü tekstil atıksularının özellikleri; yüksek asidite, çeşitli organik maddeler, boylar, aktif

yıkama maddeleri, tuzlar ve yüksek konsantrasyonda yağlar içerirler (Koby ve diğ., 2008).

Sentetik tekstil atıksularının özellikleri: Sentetik tekstil sanayi atıksularının yüksek KOI ve toksisite içeriğine sahiptir (Koby ve diğ., 2008).

2.2.3 Çevresel etkisi

Tekstil atıksuları 10-20 mg/l aralığında boyar madde içerirler (O'Neill ve diğ., 2000). Fazla miktarda renk içeriğine sahiptir. Alıcı ortama direk deşarj edilirse problemlere sebep olabilir. Toksik etkiye ve biyoakümülyasyona sebep olurlar. Boyar maddeler kimyasal ve fotolitik olarak bozunmadıklarından kalıcı etki yaratır. Bu sebeple, arıtılmadan alıcı ortama deşarjı ekotoksik risk oluşturur (Işık ve Sponza, 2004).

Toksisite: Boyar maddeler, canlılar üzerinde toksik etki oluştururlar (Işık ve Sponza, 2004). Boyarmaddenin besin zinciri içerisinde besin maddesi olarak kullanıldığı, sucul canlılarla birlikte insan vücuduna kadar ulaşabildiği rapor edilmiştir (Chung ve Stevens, 1993). Özellikle azo bağının indirgenmesi sonucu oluşan benzidin aromatik aminin, o-toluidinin ve fenilendiaminin insan sağlığı için zararlıdır (Lourenço ve diğ., 2001). Memelilerde azo boyaların indirgenmesi, sindirim sisteminde anaerobik kısımda bakteriyel olaylar ile gerçekleşir. Bağırsaklarda azo boyaların indirgenmesi sonucu oluşan aromatik aminler, bağırsakta absorplanır ve idrarla dışarı atılır.

Boyar maddeler, suda bulanıklığa sebep olarak güneş ışınlarının geçişini engellerler. Fotosentez yavaşlar ve çözünmüş oksijen seviyesi düşerek su canlıları arasındaki denge bozulur. Boya bileşikleri sucul ortam sedimentlerinde indirgenir ve kanserojen özellikli aromatik aminler üreterek ekosisteme yayılır. Boyar maddelerle ilgili toksik etki araştırmalarında, suda yaşayan canlılardan (balık, alg, bakteri vb.) insanlara kadar deneyler yapılmış ve boyar maddelerin akut toksisitelerinin genellikle düşük olduğu bulunmuştur. Fakat boyar maddeler insanlarda akut hassasiyete sebep olur. Özellikle bazı dispers boyar maddeler egzamaya sebep olmaktadır.

3. TEKSTİL SANAYİ BOYAMA ATIKSULARININ ARITIMI

Tekstil sanayi atıksuyunda boyar madde dışındaki kimyasalların konsantrasyonları düşüktür. Ancak düşük konsantrasyonlarda bile kuvvetli renk içerikleri alıcı ortamda ciddi problemlere sebep olur (Chatzisyneon ve diğ., 2006).

Tekstil sanayi atıksularının arıtımı için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler dışında elektrokimyasal yöntemler de kullanılmaktadır. Seçilecek yöntemin ekonomik ve teknik açıdan uygunluğuna boyar madde türü, atıksu kompozisyonu ve maliyet göz önüne alınarak karar verilir.

Çizelge 3.1 : Tekstil sanayi atıksularının arıtımı için kullanılan yöntemler (Vandevivere ve diğ., 1998).

Proses	Uygulama Alanı	Performans	Dezavantajları
Fenton Oksidasyonu	Ön arıtma	Tam renk giderimi, düşük maliyet ve işletme maliyeti	Asidik pH, çamur oluşumu
Elektroliz	Ön arıtma	Tam renk giderimi, düşük maliyet	Köpüklenme
Filtrasyon	Ana veya son arıtma	Yüksek performans, su ve tuz geri kazanımı	Konsantre akımın ele alınması ve bertarafı
Biyolojik	Ana arıtma	KOİ, N giderimi	Yüksek artan KOİ, N, renk ve deterjan
Koagülasyon/ Flokülasyon	Ön, ana ve son arıtma	Tam renk giderimi, suyun geri kullanımı	Her zaman etkili değil, çamur bertarafı
Ozonlama	Son arıtma	Tam renk giderimi, suyun geri kullanımı	Pahalı, aldehit oluşumu
Adsorpsiyon	Ön ve son arıtma	Yeni adsorbentler etkili ve ucuz, suyun geri kullanımı	Yüksek bertaraf veya rejenerasyon maliyeti
Fotokataliz	Son arıtma	Renk ve toksik giderimi	Sadece son arıtma amaçlı

3.1 Elektrokimyasal Arıtım Prosesleri

Elektrokimyasal proseslerin çoğu elektrot yüzeyinde doğrudan reaksiyonun ile gerçekleşir. Bu proseslere direkt (doğrudan) elektroliz denilmektedir. Dolaylı elektroliz, elektrotta aktif türlerin oluşması ve hedef kirleticilerle reaksiyonunu içerir.

Elektrokoagülasyon, elektroflotasyon ve elektroflokülasyon dolaylı proseslerdir (Rajeshwar ve diğ., 1994).

3.1.1 Elektrokoagülasyon (EK)

Elektrokoagülasyon prosesi koagülasyon, adsorpsiyon, flotasyon ve oksidasyonun bir arada gerçekleştiği ve sanayi atık suların arıtımı için başarılı sonuçlar verir. Kimyasal ilavesi yoktur. İkincil bir kirlilik oluşmamaktadır. Basit ekipman ve az iş gücü ile küçük alanlarda uygulanabilir (Bayar ve diğ., 2012). Elektrokoagülasyon kolloidlerin, süspansiyonların ve emülsiyonların elektriksel yüklerden etkilenmesi ile gerçekleşir. Anotun çözünmesi ile metal iyonları açığa çıkar ve metal iyonları ile oluşan metal hidroksit flokları koagülasyon, adsorpsiyon ve çöktürme proseslerini gerçekleştirerek kirletici giderimi sağlar (Özyonar ve Karagözoğlu, 2012).

Elektrokoagülasyon yöntemi 3 aşamadan oluşur;

- Elektrotlardaki reaksiyonlar
- Metalik iyonların oluşumu
- Kirleticilerin adsorpsiyon, koagülant, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilmesi (Mollah ve diğ., 2001).

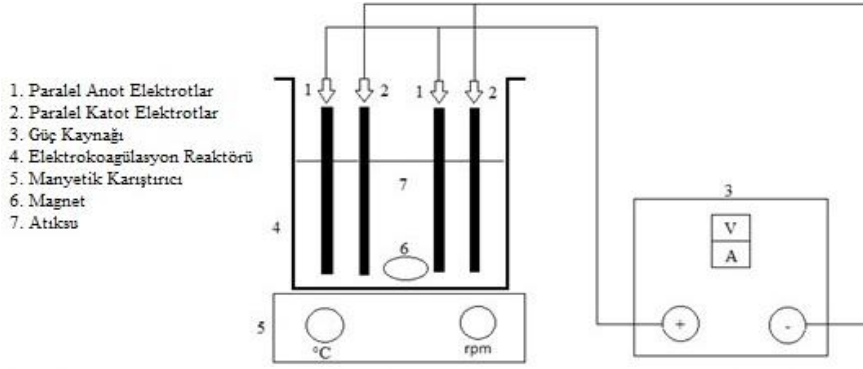
3.1.1.1 Elektrokoagülasyon teknolojisi

Elektrokoagülasyon reaktörü, anot ve katottan oluşan elektrolitik bir hücreden oluşur. Bu hücre bir güç kaynağına bağlandığında anot materyali elektrokimyasal oksidasyon sonucu aşınırken katotta pasivasyon gerçekleşir. Şekil 3.1’de bir çift anot ve katodun paralel olarak basit bir şekilde yerleşimi bulunmaktadır. İki paralel elektrotun arasına yerleştirilen iletken metal plaka çifti ve DC güç kaynağından oluşur. İletken metal plakalar “tükenen elektrotlar” olarak bilinir. “Tükenen anot”, anodun çözünme potansiyelini düşürür, katodun pasivasyonu en aza indirir. Anot ile katot aynı veya farklı malzemelerden olabilir (Mollah ve diğ., 2001).

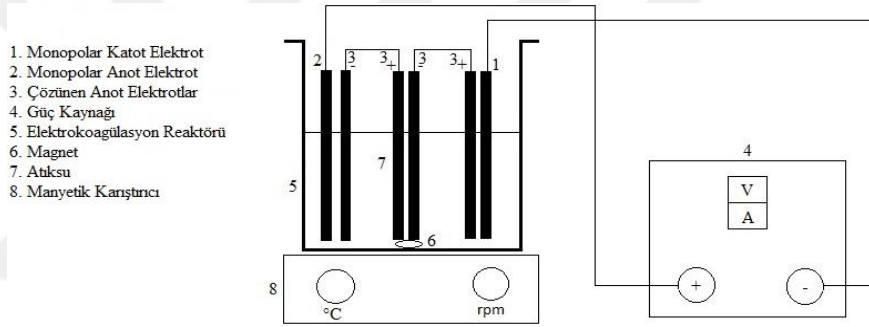
Şekil 3.2’de monopolar olarak bağlanmış elektrot serilerinin yerleşimi görülmektedir. Her bir çift “tükenir elektrot” içten birbirine bağlıdır ve dış elektrotlarla herhangi bir bağlantısı bulunmamaktadır.

Elektrotlar bipolar (çift kutuplu) ve paralel olarak ta yerleştirilebilir (Şekil 3.3). Tükenen elektrotlar elektriksel bağlantısı olmayan iki paralel elektrot arasına

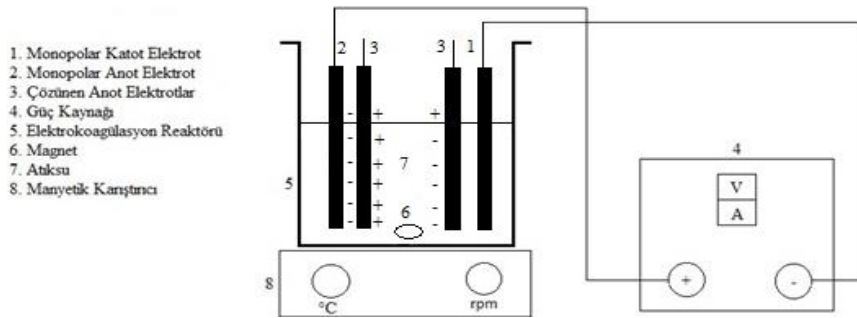
yerleştirilir. Sadece iki monopolar elektrot tükenen elektrotlarla bağlantısı olmadan güç kaynağına bağlıdır. İki elektrottan elektrik akımı geçtiğinde, iletken plakanın nötr tarafları, yanındaki paralel tarafa göre zıt yüke sahip yüklü taraflara dönüşeceklerdir. Tükenen elektrotlar bipolar elektrotlar olarak da isimlendirilir (Mollah ve diğ., 2004).



Şekil 3.1 : Paralel olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi

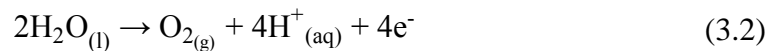


Şekil 3.2 : Seri olarak bağlanmış monopolar elektrokoagülasyon hücresi



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

Elektrotlarda aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşir. Anodik reaksiyonlar:

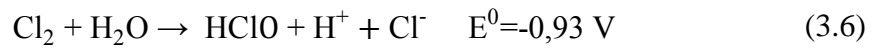
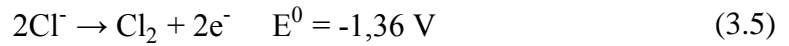


Katodik reaksiyonlar:



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

Eğer klorit mevcut ve anot potansiyeli yeteri kadar yüksekse, aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşebilir (Chen, 2004):



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

$$m_{\text{metal}} = \frac{I \times t_s \times M}{z \times F} \quad (3.8)$$

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

I: uygulanan akım (A)

t_s : arıtma süresi (s)

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

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

F: Faraday sabiti (96485 C/mol)

Yapılan çalışmalarda gerçek EK uygulamalarında anodik çözünmenin teorik değeri aşıldığı görülmüştür. Sebebi özellikle klor iyonları varlığında paslanma sonucu çözünmenin de gerçekleşmesi olduğu düşünülmektedir (Chen, 2004).

Elektrokoagülasyon prosesi kirleticileri atıksudan tamamen yok etmez. Elektroflotasyon, çöktürme, filtreleme vb. yöntemlerle ayırmayı kolaylaştırır. Ayırma, reaktörde veya daha sonraki birimlerde gerçekleşebilir. Elektrokoagülasyon prosesi kirleticilerin uzaklaşması için kum filtrasyonu, elektroflotasyon ve mikro filtreleme ile birleştirilebilir (Mickova, 2015). Bir çalışmada, Cr(VI) giderimi için EK ile birlikte tanecikli aktif karbon prosesi pH 8'de çalışılmıştır. Optimum ayrılma, 26,7

mA/cm^2 'lik bir akım yoğunluğunda 100 dakikalık çalışma süresinde elde edilmiştir (Vivek ve Ganesan, 2009).

3.1.1.2 Çeşitli parametrelerin elektrokoagülasyon prosesine etkisi

Elektrokoagülasyon prosesi işletme parametrelerine bağlıdır. En çok etki eden parametreler solüsyonun pH'ı ve akım yoğunluğudur.

Elektrotların yerleşimi: Monopolar ve bipolar yerleşimlerin giderim verimleri ve işletme maliyetleri daha önce birkaç çalışmada karşılaştırılmıştır (Golder ve diğ., 2007). Bipolar ve monopolar yerleşimde elektrokoagülasyon prosesi ile içme suyundan florür gideriminde, bipolar yerleşimde daha verimli olduğu ancak işletme maliyetlerinin monopolar elektrotlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Ghosh ve diğ., 2008). Laboratuvar ölçeğinde petrol sintine suyunun giderimi için alüminyum ve demir elektrotları monopolar ve bipolar yerleşimde çalışılmıştır. Optimum koşullarda giderim verimleri; %93 BOİ, %95,6 yağ ve gres, %99,8 TÇM ve %98,4 bulanıklık olarak bulunmuştur (Asselin ve diğ., 2008).

pH Etkisi: Başlangıç pH'ı elektrokoagülasyonda oluşan metal hidroksitlerin çözünürlüğünü belirler (Vardar, 2006). Alüminyum elektrot kullanıldığında çözelti pH'ı asidik ise çıkış suyunda pH daha yüksek, çözelti pH'ı bazik ise çıkış suyu pH'ı daha düşük olmaktadır. Demir elektrot kullanıldığında çıkış suyu pH'ı başlangıç pH'ından her zaman daha yüksektir. Sonuçlar elektrokoagülasyon prosesinin alkali ortamda bir miktar tampon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Chen, 2004).

Akım yoğunluğunun etkisi: Birim elektrot alanından geçen akım olarak ifade edilir. Genellikle mA/cm^2 ve A/m^2 birimleri ile ifade edilir. Akım yoğunluğunun miktarı, anotta çözünen metal iyonlarının üretim hızını ve katotta oluşan kabarcık hızı ile büyüklüğü etkilediği için oluşan flokların miktarı, yapısı ve oluşumunu da etkiler. Fazla oksijenin ve sıcaklık artışının önlenmesi için akım yoğunluğu kontrol altında tutulmalıdır (Şengil ve Özacar, 2009).

İletkenliğin etkisi: Yüksek iyonik güç, sabit voltajda akım yoğunluğunda artışa neden olur veya sabit akım yoğunluğunda iletkenliğin artışıyla hücre voltajı düşer (Koby ve diğ., 2003). Solüsyonun iletkenliği elektrolitin türü ve konsantrasyona bağlıdır. NaCl, BaCl₂, KCl, Na₂SO₄ ve KI gibi farklı elektrolit türleri bulunur. İletkenliği arttırmak için NaCl ilave edilir (Ghosh ve diğ., 2008). Solüsyonda klorürlerin varlığında anottaki ürünler Cl² ve OCl⁻ olur. OCl⁻ tek başına boya moleküllerini oksidize edebilecek güçlü

bir oksidandır. Elektroliz sırasında aktif klorür iyonları oluşur ve suyun dezenfeksiyonunu sağlar. Cl⁻ ilavesi CO₃²⁻ ve SO₄²⁻ nin olumsuz etkilerini azaltır. CO₃²⁻ ve SO₄²⁻ varlığı Ca²⁺ ve Mg²⁺ birikimine ve akım verimini hızlı düşürecek oksit tabakasının oluşumuna sebep olur (Sahu ve diğ., 2014). Demir ve alüminyum elektrotlar ile yapılan bir çalışmada çözünmeye iletkenliğinin etkisinin olduğu bulunmuştur (Kobyta ve diğ., 2003). Alüminyum için enerji tüketimi fazla iken elektrot tüketiminin de fazla olduğu ve her iki elektrot için enerji ve elektrot tüketimi iletkenliğin artması ile azaldığını bildirmişlerdir.

Elektrot materyalinin etkisi: Genellikle alüminyum, çelik, demir ve hurda malzeme kullanılır. Demir elektrot, halojen organik bileşikler oksitlemede test edilmiş bir yeteneğe sahiptir. Tekstil sanayinde ve tuz içeriği yüksek atıksularda başarılı kullanımı mevcuttur. Elektrooksidasyon için diğer anot malzemelerine göre daha düşük maliyetli olması tercih edilmesini sağlar (Bejankiwar, 2002). Alüminyum elektrotlar Al³⁺ iyonunun yüksek verimi sebebiyle tek başına veya demir elektrotlarla birlikte kullanılır. Suda önemli miktarda Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonları varsa katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılması tavsiye edilir (Chen, 2004).

Elektrotlar arası mesafe: Atıksuyun aşırı ısınmasına sebep olan elektrot aşırı potansiyeli ile ohmic direncin azaltılması için elektrotlar arası mesafe az olmalıdır. Elektrot yüzeyinin pürüzlülüğü oluşan askıdaki katı maddelerin elektrot kanallarını engelleyecek şekilde olmamalıdır. Proses hava sıcaklığında gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıklarda büyük hidrojen kabarcıkları oluşur ve sıvı yüzeyine çıkış hızları artar. Prosesin elektroflotasyon etkisi azalır. Sıcaklık, geri devir veya atıksuyun sirkülasyonu ile birkaç dereceyle sınırlı Joule etkisi nedeniyle artacaktır. Sıcaklık artışı tüketilen elektrik ve sıvı akış hızı ile değişir (Kobyta ve diğ., 2008).

3.1.2 Elektroflotasyon (EF)

Elektroflotasyon, elektrolitik şartlara göre oluşan gaz kabarcıkları (H₂, O₂ gibi) tarafından koloidal partiküllerin adsorplanarak su yüzeyine doğru hareket ederek toplanması işlemidir. Yüksek dispersiyona sahip kabarcıklar 5-100 µm çapındadır. Elektrot yüzey alanına bağlı olarak kabarcıkların sayısı 10-20 milyon/cm² arasında değişir (Müller, 1992). Reaktöre elektroflotatör denilmektedir. Elektroflotatör yüzeyinde toplanan yumaklar köpük sıyrıcılar yardımıyla filtrasyona gönderilir. Verim; oluşan kabarcıkların hacmine ve sayısına, oluşan kabarcıkların boyutu ise;

akım yoğunluğu, elektrot cinsi ve şekline bağlıdır. Akım yoğunluğu, elektrot materyali, pH ve sıcaklık değiştirilerek kabarcıkların sayısı ve büyüklüğü kontrol edilip elektroflotasyonun hızı arttırılabilmektedir (Romanov ve diğ., 2000). Elektroflotasyon; yağ-su emülsiyonları, metal kaplama atölyeleri, mandıra, konserve, yemek üretim, çiftlik, kâğıt, lokanta, tekstil, boya, kimya, deri sanayi 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, 1992).

3.1.3 Elektrooksidasyon (EO)

Elektrooksidasyon çözünmeyen bir anot malzemesi kullanılarak organik maddelerin doğrudan veya dolaylı olarak oksitlenmesi ile gerçekleşir (Avcu, 2010). Aktif rolü oynayan elektrot anottur. Proseste etkili olan parametrelerin en önemlisi anodun katalitik aktivitesidir. Ayrıca akım, sıcaklık, pH ve organik bileşiklerle diğer oksidantların difüzyon hızı da önemlidir. Anodun yüksek potansiyeli nedeni ile atıksuda bulunan klorür iyonları klora dönüşebilmekte veya organik bileşiklerin doğrudan oksidasyonu gibi ikincil reaksiyonlar da gerçekleşmektedir (İlhan ve diğ., 2007). Klorlu organik bileşiklerin ara veya son ürüne dönüşümleri bu tekniğin uygulamasını engellemektedir (Vardar, 2006). Atıksuyun klorür içeriğinin düşük olması durumunda proses verimini artırmak için yüksek miktarda tuz ilavesi gerekmektedir (Chen, 2004). Elektrooksidasyon prosesleri genellikle Ti/Pt-Ir, Ti/RhO_x-TiO₂, Ti/PdO-CO₃O₄, TiO₂/TiRuO₂, Ti/Pt, PbO₂/SnO₂, PbO₂/Ti, SnO₂, PbO₂, BDD vb. anot elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çamur oluşumu az ve giderim yüksek olduğu için tercih edilen bir yöntemdir (İlhan ve diğ., 2007).

3.2 UV Görünür Bölge Absorbsiyon Spektroskopisi

160-780 nm dalga boylarındaki ışığın b ışın yolunu içeren çözeltinin geçirgenliğinin (T) veya absorbansının (A) ölçümü işlemidir.

$$T = \frac{P_T}{P_0} \quad (3.9)$$

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

$$A = -\log T = -\log \frac{P_T}{P_0} = \frac{P_0}{P_T} \quad (3.10)$$

Absorpsiyon bağ elektronların uyarılması sebebiyle oluşur ve moleküler absorpsiyon spektroskopisi bir moleküldeki fonksiyonel grupların tanımlanmasında, fonksiyonel grupları taşıyan bileşiklerin nicel tayininde kullanılır. Çok sayıda organik ve inorganik bileşiğin analizinde kullanılır (Saygılı, 2009).

3.2.1 Lambert-Beer yasası

Maddeye giren ve maddeden çıkan ışımının şiddetleri arasındaki ilişki ilk defa 1760 yılında araştırılmış olup 1852 yılında yapılan çalışmalar ile Lambert-Beer yasası oluşturulmuştur.

Bir çözülden geçen monokromatik bir ışımın şiddeti, çözeltinin derinliğiyle logaritmik üstel veya geometrik olarak azalır.

$$I = I_0 \cdot 10^{-al} \quad (3.11)$$

şeklinde gösterilir. I_0 gelen ışımın şiddeti, a çözeltiden geçen ışımın dalga boyuna bağlı bir sabit, l çözeltinin kalınlığıdır.

Aynı derinlikteki bir çözülden geçen ve absorblanan monokromatik ışımın şiddeti çözeltinin konsantrasyonuyla logaritmik, üstel veya geometrik olarak azalır.

$$I = I_0 \cdot e^{-ac} \quad (3.12)$$

$a = b / 2,303 = \epsilon$ olduğuna göre yukarıda açıklanan iki bağıntı birleştirilecek olursa;

$$I = I_0 \cdot 10^{-\epsilon l C} \quad (3.13)$$

şeklinde verilir. Buna göre eşitlikte;

I_0 = Gelen ışım demetinin şiddeti

I = Çözeltiden çıkan ışım demetinin şiddeti

ϵ = Molar sönüm katsayısı ($\text{mol}^{-1} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{cm}^{-1}$)

l = Işım demetinin içinden geçtiği çözelti kalınlığı (cm)

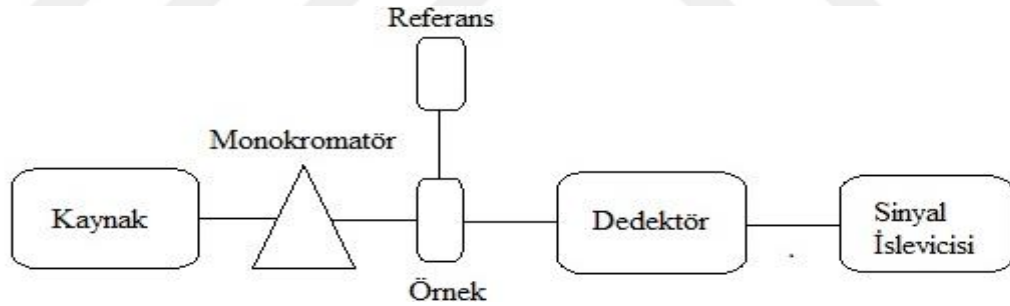
c = Çözelti konsantrasyonu (Molarite)

eşitliğin – logaritması alınır;

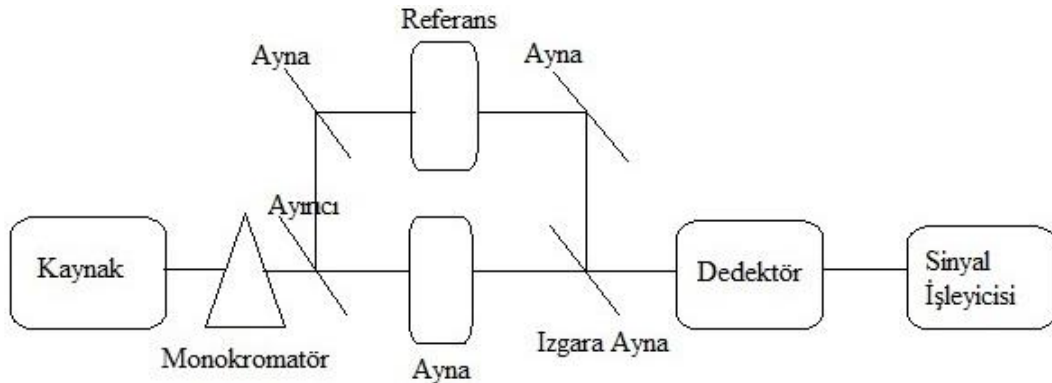
$$\log I_0 / I = A = \epsilon l C \text{ elde edilir.} \quad (3.14)$$

3.2.2 Spektroskopik enstrümanların temel bileşenleri

UV- GB cihazları tek ışın yollu ve çift ışın yollu olmak üzere ikiye ayrılır. Tek ışık yollu cihazlarda, aynı dalga boyundaki çözeltinin absorpsiyonu ölçülür. Çift ışık yollu cihazlar her dalga boyu için, monokromatörden çıkan ışık eşit şiddette iki demete bölünüp örnek ve çözücü bulunan kaba gönderilerek, ölçüm süresi kısaltılır ve örneğin geçirgenliği çözücü karşılaştırılır. UV-GB cihazlarında Döteryum, W, H₂, Cıva buhar ve Xe lambası gibi sürekli ışık kaynakları kullanılır. Tungsten (W) lambası görünür ve yakın kızılötesi arasında ışık yayar. Xe ark lambası 150-700 nm’de, cıva buhar lambası her iki bölgede de ışımaya yarar. UV bölgede en çok hidrojen ve döteryum lambaları kullanılır (Mutlutürk, 2016). Çift ışık yollu cihazlar içerisinde, örnek ve referanstan geçen iki ışık yolu bulunur ve dalga boyu taraması yaparken ikisi arasında geçiş yapar (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 : Tek ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı



Şekil 3.5 : Çift ışık hüzmeli spektrofotometre diyagramı

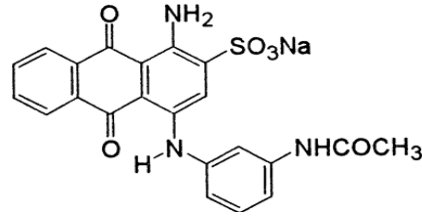
4. MATERYAL VE METOD

4.1 Kullanılan Boyar Maddeler ve Özellikleri

Çalışmada kullanılmak üzere Colour Index isimleri Acid Blue 324 (AB 324), Dispers Orange 30 (DO30), Basic Yellow 28 (BY28), Vat Brown 1 (VB1), Reaktif Black 5 (RB5) olan ve molekül ağırlıkları sırasıyla 473,435 g/mol, 450,276 g/mol, 433,523 g/mol, 646,614 g/mol, 991,82 g/mol olan beş farklı boyar madde seçilmiştir. Kullanılan boyar maddelerin bazı temel özellikleri çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Acid Blue 324 özellikleri.

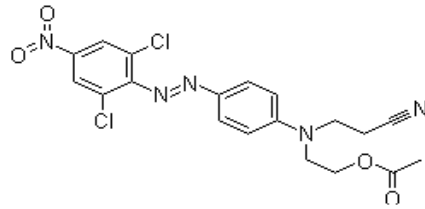
Ticari İsmi	Colour Index Numarası	Kimyasal Formül	Molekül kütlesi (g/mol)	λ max (nm)	CAS numarası
Telon Blue BRL Micro	Acid Blue 324 (AB324)	$C_{22}H_{16}N_3NaO_6S$	473,435	609	88264-80-6



Şekil 4.1 : Acid Blue 324'ün moleküler yapısı

Çizelge 4.2 : Dispers Orange 30 özellikleri.

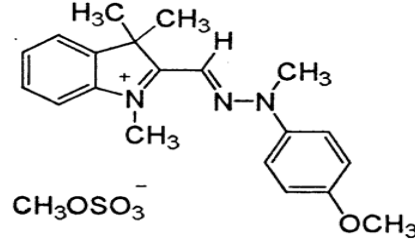
Ticari İsmi	Colour Index Numarası	Kimyasal Formül	Molekül kütlesi (g/mol)	λ max (nm)	CAS numarası
Dianix Yellow Brown SR-2 150%	Dispers Orange 30 (DO30)	$C_{19}H_{17}Cl_2N_5O_4$	450,276	462,51	12223-23-3



Şekil 4.2 : Dispers Orange 30'un moleküler yapısı

Çizelge 4.3 : Basic Yellow 28 özellikleri.

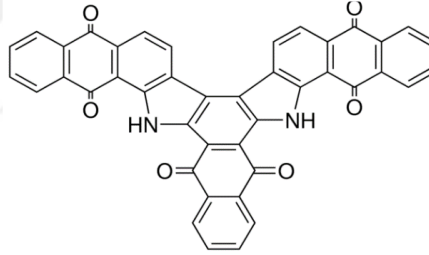
Ticari İsmi	Colour Index Numarası	Kimyasal Formül	Molekül kütlesi (g/mol)	λ max (nm)	CAS numarası
Astrazon Golden Yellow G-LE Conc.	Basic Yellow 28 (BY28)	$C_{21}H_{27}N_3O_5S$	433,523	440	54060-92-3



Şekil 4.3 : Basic Yellow 28'in moleküler yapısı

Çizelge 4.4 : Vat Brown 1 özellikleri.

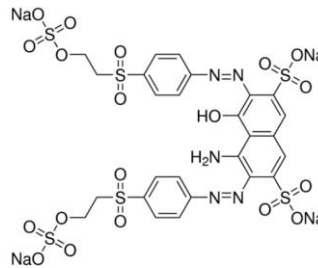
Ticari İsmi	Colour Index Numarası	Kimyasal Formül	Molekül kütlesi (g/mol)	λ max (nm)	CAS numarası
Indanthren Brown BR Collosiol	Vat Brown 1 (VB1)	$C_{42}H_{18}N_2O_6$	646,614	277,8	2475-33-4



Şekil 4.4 : Vat Brown 1'in moleküler yapısı

Çizelge 4.5 : Reaktif Black 5 özellikleri.

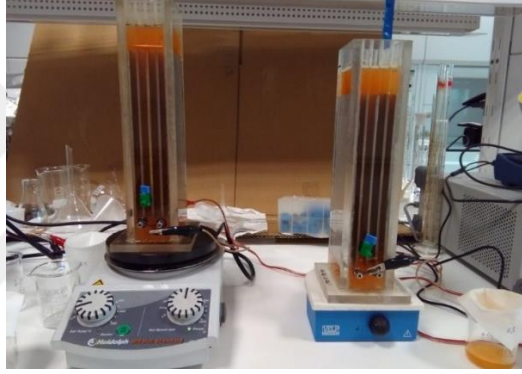
Ticari İsmi	Colour Index Numarası	Kimyasal Formül	Molekül kütlesi (g/mol)	λ max (nm)	CAS numarası
Remazol Black B 133%	Reaktif (RB5)	$C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$	991,82	595	17095-24-8



Şekil 4.5 : Reaktif Black 5'in moleküler yapısı

4.2 Deney Düzenegi

Elektrokoagülasyon deneylerinde Şekil 4.6'da gösterilen plexiglas malzemeden yapılan 29 x 7,5 cm boyutlarında reaktörler kullanıldı. Elektrot materyali olarak 200 x 60 mm boyutlarında 120 cm² yüzey alanlı alüminyum elektrotlar kullanıldı. Reaktör içerisine 3 adet anot ve 2 adet katot elektrot monopolar düzeninde paralel bağlantılı yerleştirildi. Aktif yüzey alanı sayısı 4 olan anot elektrotların toplam aktif yüzey alanı (4 x 120) 480 cm²'dir. Elektrotlar arası mesafe 10 mm olup elektrotlar reaktör içerisine tamamen batmış haldedir. Akım ve voltaj, RIGOL DP382 marka güç kaynağı kullanılarak kontrol edildi. Reaktör içerisindeki karışım manyetik karıştırıcı kullanılarak sağlandı.



Şekil 4.6 : Elektrokoagülasyon deney düzenegi

4.3 Deneysel İşlem

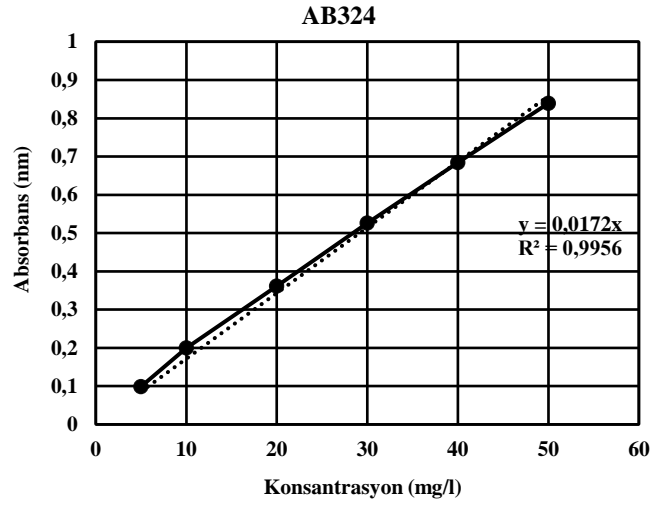
Elektrokoagülasyon prosesinde laboratuvar ölçekli reaktörler kesikli sistemde çalıştırıldı (Şekil 4.7). Çalışmalarda kullanılmak üzere 50 mg/l stok sentetik boya atıksuyu hazırlandı. Her deney setinde reaktör içerisine konulan boya çözeltisi hacmi 500 ml'dir. Reaktör içerisinde iletkenliği arttırmak için 1000 mg/l NaCl çözeltisi eklendi. Elektrolit çözeltisine tamamen batmış haldeki elektrotlar anot ve katot olarak güç kaynağındaki (+) ve (-) kutuplara bağlandıktan sonra istenilen akım ve voltaj ayarlamaları yapıldı. Deney süresince reaktör içerisinde karışımı sağlamak için 100 rpm hızında çalışan manyetik karıştırıcı kullanıldı. Toplam 15 dakikalık deney süresi boyunca 2,5 dakikalık aralıklarla reaktör üzerindeki musluk yardımı ile alınan numuneler kaba filtreden geçirilerek UV-Spektrofotometrede her bir boyanın

minimum pik verdiği kendi dalga boyunda analiz edildi. Deneyler 0,025; 0,05; 0,1 ve 0,2; 0,4 Amper olmak üzere farklı akım değerlerinde tekrar edildi.

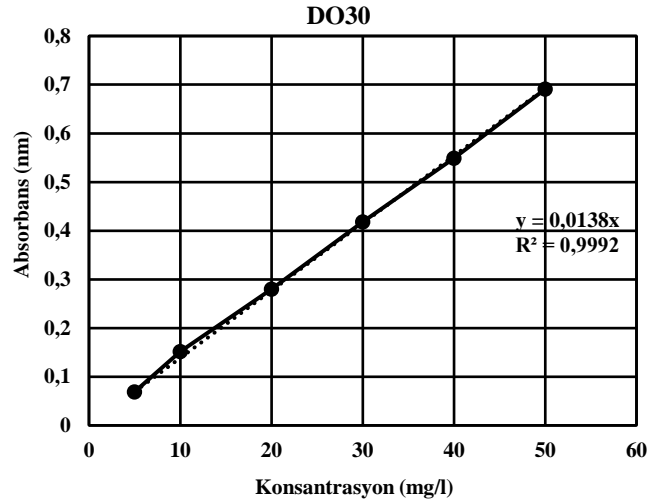
4.4 Analitik Yöntem

4.4.1 Kalibrasyon eğrilerinin oluşturulması

Çalışmalarda öncelikle boyar maddelerin spektrofotometrede dalga boyu taraması yapılarak λ max değerleri bulundu.



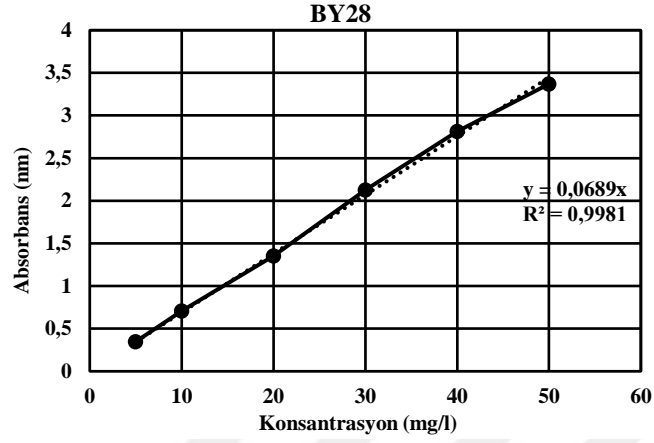
Şekil 4.7 : Acid Blue 324 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi



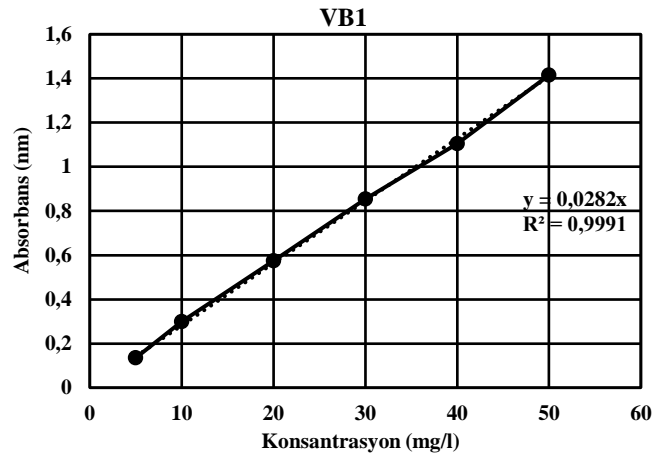
Şekil 4.8 : Dispers Orange 30 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi

Kalibrasyon eğrilerini oluşturmak için her boyar maddeden 5, 10, 20, 30, 40 ve 50 mg/l standart çözeltiler hazırlandı. Hazırlanan standart çözeltilerden Acid Blue 324 boyar maddesi 609 nm, Dispers Orange 30 boyar maddesi 462,51 nm, Basic Yellow

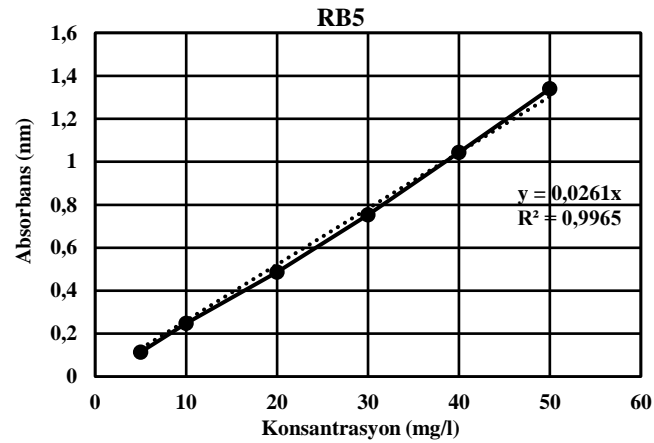
28 boyar maddesi 440 nm, Vat Brown 1 boyar maddesi 277,8 nm, Reaktif Black 5 595 nm dalga boyunda UV/Vis spektrofotometrede analiz edildikten sonra Konsantrasyon-Absorbans grafikleri oluşturuldu.



Şekil 4.9 : Basic Yellow 28 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi



Şekil 4.10 : Vat Brown 1 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi



Şekil 4.11 : Reaktif Black 5 boyar maddesi kalibrasyon eğrisi

4.4.2 Boya konsantrasyonlarının belirlenmesi

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

Absorbans değerleri Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer cihazı kullanılarak yapıldı (Şekil 4.13). Giderim verimi aşağıdaki eşitlik yardımı ile belirlendi.

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

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



Şekil 4.12 : Thermo Scientific Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer

4.4.3 Kullanılan eşitlikler

Akım Yoğunluğu: Akım yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

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

Burada, J: Akım yoğunluğu (mA/cm^2), I: Akım şiddeti (mA), A: Aktif anot alanı (cm^2) dir.

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

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

Burada, I: Akım şiddeti (Amper), t: Zaman (sn), n: İyon yükü (Alüminyum için 3+),

F: Faraday sabiti (96485 C mol⁻¹) olarak tanımlanır.

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

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

M_A: Molekül ağırlığı (Alüminyum için 26,982 g)'dir.

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

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

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

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

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

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

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

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

Faraday/m³: Faraday aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

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

Burada, I: akım şiddeti (Amper), t: zaman (sn), v: Elektrolit hacmi (m³)'dir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada farklı sınıf tekstil boyar maddelerinin renk giderim verimleri elektrokoagülasyon yöntemi ile incelenmiştir.

5.1 Akım Yoğunluğunun Renk Giderme Verimine Etkisi

Tüm elektrokimyasal proseslerde, akım yoğunluğu elektrokimyasal reaktörde reaksiyon hızını etkileyen en önemli parametredir. Akım yoğunluğunun koagülant oluşum hızını, kabarcık oluşumunu ve flokların gelişimi etkilediği bilinmektedir (Mollah ve diğ., 2001). Farklı molekül ağırlıklarına sahip boyar maddelerin elektrokoagülasyon ile giderilmelerinde akım yoğunluğunun etkisi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde 5 farklı akım yoğunluğunda (0,052; 0,104; 0,208; 0,416; 0,83 mA/cm²) alüminyum elektrotlar kullanılarak farklı molekül ağırlıklarına sahip boyaların sudan giderimi incelenmiştir. 15 dakika deney süresi boyunca Faraday kanunu kullanılarak her akım yoğunluğu için çözünen deneysel ve teorik alüminyum miktarı solüsyondan boyar madde gidermek için gerekli enerji tüketimi Wh/g olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Asit (Acid Blue 324) (AB324)						
Akım (A)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Voltaj (V)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0024	0,0029
Boya giderme verimi (%)	17,79	22,21	23,26	27,33	32,91	37,33
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,004	0,006	0,006	0,007	0,008	0,009
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,110	0,176	0,252	0,286	0,297	0,315
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,281	0,450	0,645	0,732	0,760	0,804
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,198	0,317	0,454	0,516	0,535	0,566
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,028	0,045	0,064	0,073	0,076	0,080
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,226	0,362	0,519	0,589	0,611	0,647

Şekil 5.1’de 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda AB324, DO30, BY28, VB1, RB5 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi 10. dakikaya kadar renk giderme verimi yavaş iken, 10. dakikadan sonra renk giderme veriminde bir artış meydana gelmiştir. AB324 boyar maddesi ilk 7,5

dakikada %35,83 giderim verimine ulaşırken BY28 boyar maddesi 15 dakika deney süresi sonunda %31,58 giderim verimine ulaşabilmiştir. 7,5 ile 15. dakikalar arasında renk giderme verimleri sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) % 35-96 > VB1 (646,614 g/mol) % 9-88 > RB5 (991,82 g/mol) % 34-44 > AB324 (473,435 g/mol) % 23-37 > BY28 (433,523 g/mol) % 24-31 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.2 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Dispers (Disperse Orange 30) (DO30)						
Akım (A)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Voltaj (V)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0024	0,0029
Boya giderme verimi (%)	16,83	19,86	35,83	92,66	96,69	96,69
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,004	0,005	0,009	0,023	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,116	0,197	0,164	0,084	0,101	0,121
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,297	0,504	0,419	0,216	0,259	0,310
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,209	0,355	0,295	0,152	0,182	0,219
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,030	0,050	0,042	0,022	0,026	0,031
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,239	0,405	0,337	0,174	0,208	0,250

Çizelge 5.3 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Katyonik-Bazik (Basic Yellow 28) (BY28)						
Akım (A)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Voltaj (V)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0024	0,0029
Boya giderme verimi (%)	20,44	22,79	24,59	27,52	29,64	31,58
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,008
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,096	0,172	0,239	0,285	0,330	0,372
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,245	0,439	0,610	0,727	0,844	0,950
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,172	0,309	0,430	0,512	0,594	0,669
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,024	0,044	0,061	0,073	0,084	0,095
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,197	0,353	0,491	0,585	0,679	0,764

Şekil 5.2’de 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Giderim verimi en düşük olan BY28 boyar maddesi için harcanan alüminyum miktarı en fazla iken giderim verimi en yüksek olan DO30 boyar maddesi için harcanan alüminyum miktarı en az olmuştur. 7,5 ile 15. dakikalar arasında gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,164-0,121 g < VB1 (646,614 g/mol) 0,662-0,133 g < RB5 (991,82 g/mol) 0,170-0,268

g < AB324 (473,435 g/mol) 0,252-0,315 g < BY28 (433,523 g/mol) 0,239-0,372 g olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.3'te 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 7,5 ile 15. dakikalar arasında gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,419-0,310 Wh/g < VB1 (646,614 g/mol) 1,692-0,340 Wh/g < RB5 (991,82 g/mol) 0,435-0,683 Wh/g < AB324 (473,435 g/mol) 0,645-0,804 Wh/g < BY28 (433,523 g/mol) 0,610-0,950 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.4 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

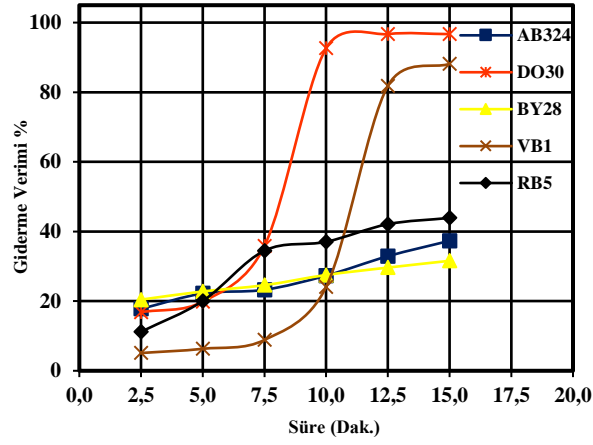
Vat (Vat Brown 1) (VB1)						
Akım (A)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Voltaj (V)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0024	0,0029
Boya giderme verimi (%)	5,11	6,31	8,87	24,11	81,84	88,16
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,001	0,002	0,002	0,006	0,020	0,022
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,383	0,620	0,662	0,325	0,120	0,133
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,979	1,584	1,692	0,829	0,305	0,340
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,690	1,116	1,192	0,584	0,215	0,240
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,098	0,158	0,169	0,083	0,031	0,034
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,788	1,275	1,361	0,667	0,246	0,274

Çizelge 5.5 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

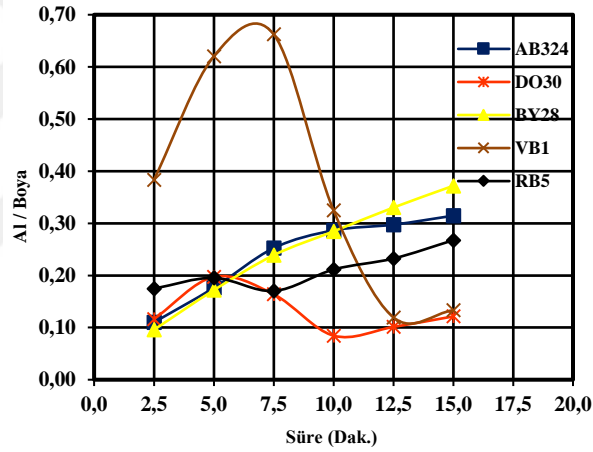
Reaktif (Reactive Black 5) (RB5)						
Akım (A)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Voltaj (V)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0003	0,0007	0,0010	0,0014	0,0017	0,0021
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0005	0,0010	0,0015	0,0020	0,0024	0,0029
Boya giderme verimi (%)	11,20	20,05	34,50	37,05	42,10	43,90
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,003	0,005	0,009	0,009	0,011	0,011
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,175	0,195	0,170	0,211	0,232	0,268
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,446	0,499	0,435	0,540	0,594	0,683
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,315	0,351	0,306	0,380	0,418	0,482
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,045	0,050	0,043	0,054	0,059	0,068
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,359	0,401	0,350	0,434	0,478	0,550

Şekil 5.4'te 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda alüminyum ve elektrik maliyetinden hareketle giderilen gram boyar madde başına toplam maliyet süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 7,5 ile 15. dakikalar arasında kilogram boyar madde başına toplam maliyet sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,337-0,250 \$/kg < VB1 (646,614 g/mol)

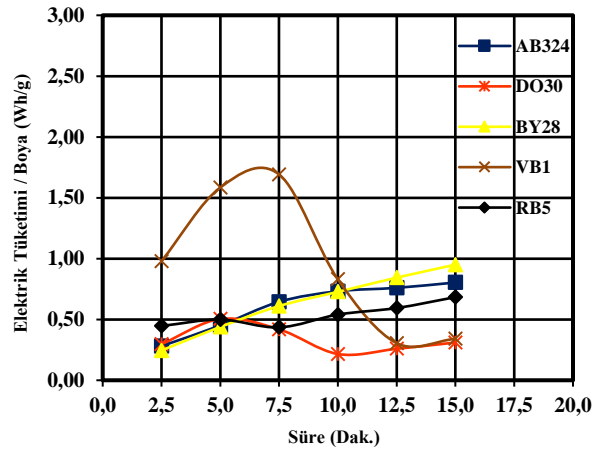
1,361-0,274 \$/kg < RB5 (991,82 g/mol) 0,350-0,550 \$/kg < AB324 (473,435 g/mol)
0,519-0,647 \$/kg < BY28 (433,523 g/mol) 0,491-0,764 \$/kg olarak gerçekleştirilmiştir.



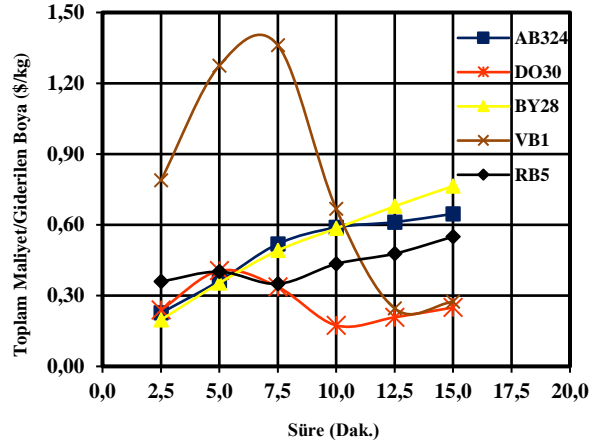
Şekil 5.1 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boya maddelerinin giderimi



Şekil 5.2 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)



Şekil 5.3 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi



Şekil 5.4 : 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda toplam maliyet

Çizelge 5.6 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Asit (Acid Blue 324) (AB324)						
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,004	0,009	0,013	0,018	0,022	0,026
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0010	0,0020	0,0029	0,0039	0,0049	0,0059
Boya giderme verimi (%)	21,86	24,30	26,63	32,21	36,86	41,86
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,179	0,322	0,441	0,486	0,531	0,561
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,801	1,440	1,971	2,173	2,374	2,508
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,322	0,580	0,794	0,875	0,956	1,010
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,080	0,144	0,197	0,217	0,237	0,251
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,402	0,724	0,991	1,092	1,193	1,261

Çizelge 5.7 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Dispers (Disperse Orange 30) (DO30)						
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,004	0,009	0,013	0,018	0,022	0,026
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0010	0,0020	0,0029	0,0039	0,0049	0,0059
Boya giderme verimi (%)	20,72	32,23	93,67	96,12	96,55	96,98
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,008	0,023	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,189	0,243	0,125	0,163	0,203	0,242
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,845	1,086	0,560	0,728	0,906	1,083
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,340	0,437	0,226	0,293	0,365	0,436
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,084	0,109	0,056	0,073	0,091	0,108
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,425	0,546	0,282	0,366	0,456	0,544

Şekil 5.5’de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda renk giderme verimleri gösterilmiştir. DO30 boyar maddesi 7,5 dakikaya kadar, VB1 boyar maddesinin de 5. dakikaya kadar giderim verimleri artmış daha sonra yatay seyir göstermiştir. AB324, BY28 ve RB5 boyar maddesi ise 15. dakikaya kadar giderim verimi artmaya devam ettiği

görülmektedir. 7,5 ile 15. dakikalar arasında renk giderme verimleri sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) % 21-97 > VB1 (646,614 g/mol) % 8-91 > RB5 (991,82 g/mol) % 23-54 > AB324 (473,435 g/mol) % 22-42 > BY28 (433,523 g/mol) % 21-36 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.8 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

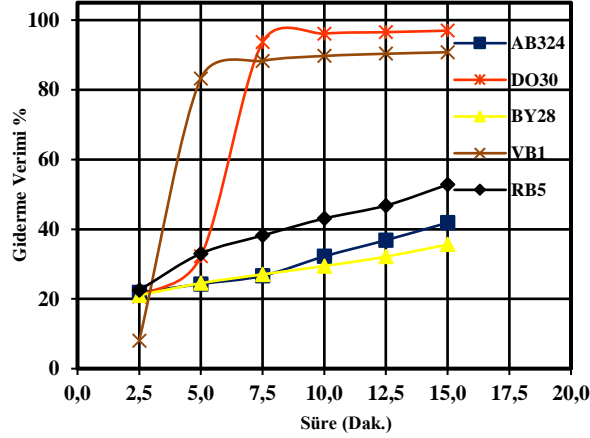
Katyonik-Bazik (Basic Yellow 28) (BY28)						
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,004	0,009	0,013	0,018	0,022	0,026
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0010	0,0020	0,0029	0,0039	0,0049	0,0059
Boya giderme verimi (%)	21,04	24,53	27,05	29,43	32,13	35,62
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,005	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,186	0,319	0,434	0,532	0,609	0,659
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,832	1,427	1,941	2,378	2,723	2,948
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,335	0,575	0,781	0,958	1,096	1,187
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,083	0,143	0,194	0,238	0,272	0,295
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,418	0,717	0,975	1,195	1,369	1,482

Çizelge 5.9 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

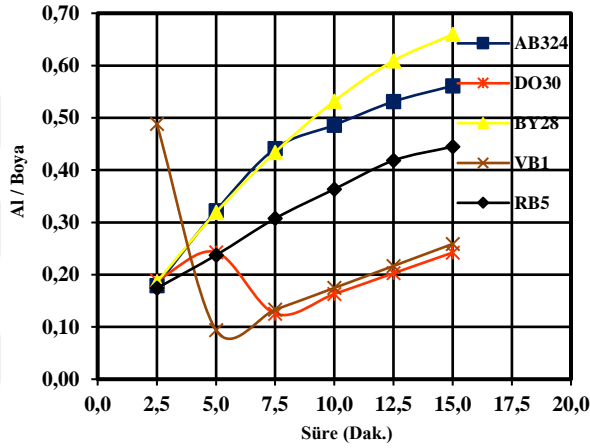
Vat (Vat Brown 1) (VB1)						
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,004	0,009	0,013	0,018	0,022	0,026
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0010	0,0020	0,0029	0,0039	0,0049	0,0059
Boya giderme verimi (%)	8,01	83,26	88,30	89,72	90,35	90,78
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,002	0,021	0,022	0,022	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,488	0,094	0,133	0,175	0,217	0,259
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	2,184	0,420	0,595	0,780	0,968	1,157
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,879	0,169	0,239	0,314	0,390	0,466
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,218	0,042	0,059	0,078	0,097	0,116
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	1,098	0,211	0,299	0,392	0,487	0,581

Çizelge 5.10 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Reaktif (Reactive Black 5) (RB5)						
Akım (A)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Voltaj (V)	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,004	0,009	0,013	0,018	0,022	0,026
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0010	0,0020	0,0029	0,0039	0,0049	0,0059
Boya giderme verimi (%)	22,50	33,01	38,20	43,08	46,80	52,80
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,006	0,008	0,010	0,011	0,012	0,013
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,174	0,237	0,307	0,363	0,418	0,445
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,778	1,060	1,374	1,625	1,870	1,989
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,313	0,427	0,553	0,654	0,753	0,801
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,078	0,106	0,137	0,162	0,187	0,199
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,391	0,533	0,691	0,817	0,940	1,000



Şekil 5.5 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi

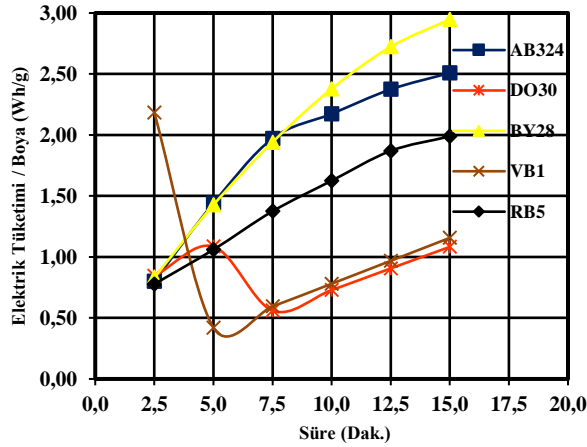


Şekil 5.6 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)

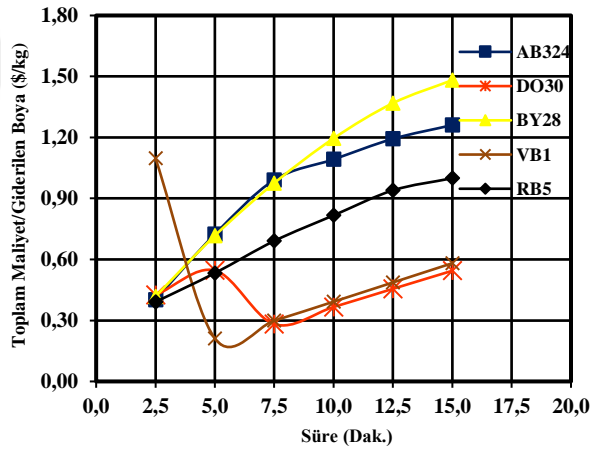
Şekil 5.6'da 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. AB324, BY28, RB5 boyar maddelerinin 5. dakikadan deney sonuna kadar, DO30 ve VB1 boyar maddelerinin ise 7,5 dakikadan deney sonuna kadar gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı doğrusal olarak artmıştır. Boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,189-0,242 g < VB1 (646,614 g/mol) 0,488-0,259 g < RB5 (991,82 g/mol) 0,174-0,445 g < AB324 (473,435 g/mol) 0,179-0,561 g < BY28 (433,523 g/mol) 0,186-0,659 g olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.7'de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. AB324, BY28, RB5 boyar maddelerinin 5. dakikadan deney sonuna kadar, DO30 ve

VB1 boyar maddelerinin ise 7,5 dakikadan deney sonuna kadar gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı doğrusal olarak artmıştır. 5 ile 15. dakikalar arasında boyar madde başına harcanan elektrik miktarı sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 1,086-1,083 Wh/g < VB1 (646,614 g/mol) 0,420-1,157 Wh/g < RB5 (991,82 g/mol) 1,060-1,989 Wh/g < AB324 (473,435 g/mol) 1,440-2,508 Wh/g < BY28 (423,523 g/mol) 1,427-2,948 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.7 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi



Şekil 5.8 : 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda toplam maliyet

Şekil 5.8'de 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda alüminyum ve elektrik maliyetinden hareketle giderilen gram boyar madde başına toplam maliyet süreye bağlı olarak gösterilmiştir. AB324, BY28, RB5 boyar maddelerinin 5. dakikadan deney sonuna kadar, DO30 ve VB1 boyar maddelerinin ise 7,5 dakikadan deney sonuna kadar gram boyar madde başına harcanan elektrik miktarı doğrusal olarak artmıştır. 5 ile 15. dakikalar arasında boyar madde başına toplam maliyet sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,546-0,544 \$/kg < VB1 (646,614 g/mol) 0,211-0,581 \$/kg < RB5 (991,82 g/mol)

0,533-1,000 \$/kg < AB324 (473,435 g/mol) 0,724-1,261 \$/kg < BY28 (433,523 g/mol)
0,717-1,482 \$/kg olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.11: 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Asit (Acid Blue 324) (AB324)						
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,010	0,021	0,031	0,042	0,052	0,063
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0070	0,0084
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0020	0,0039	0,0059	0,0078	0,0098	0,0117
Boya giderme verimi (%)	27,91	32,56	44,19	52,44	65,12	72,56
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,007	0,008	0,011	0,013	0,016	0,018
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,281	0,481	0,532	0,597	0,601	0,647
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,493	2,559	2,829	3,178	3,199	3,445
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,505	0,866	0,957	1,075	1,082	1,165
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,149	0,256	0,283	0,318	0,320	0,345
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,654	1,122	1,240	1,393	1,402	1,510

Çizelge 5.12 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Dispers (Disperse Orange 30) (DO30)						
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,010	0,021	0,031	0,042	0,052	0,063
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0070	0,0084
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0020	0,0039	0,0059	0,0078	0,0098	0,0117
Boya giderme verimi (%)	80,14	89,06	96,98	97,12	97,27	97,55
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,020	0,022	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,098	0,176	0,242	0,322	0,402	0,482
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,520	0,936	1,289	1,716	2,142	2,563
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,176	0,316	0,436	0,580	0,724	0,867
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,052	0,094	0,129	0,172	0,214	0,256
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,228	0,410	0,565	0,752	0,939	1,123

Çizelge 5.13 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Katyonik-Bazik (Basic Yellow 28) (BY28)						
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,010	0,021	0,031	0,042	0,052	0,063
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0070	0,0084
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0020	0,0039	0,0059	0,0078	0,0098	0,0117
Boya giderme verimi (%)	22,50	28,65	29,52	31,00	35,85	40,32
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,348	0,547	0,796	1,010	1,092	1,165
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,852	2,909	4,234	5,376	5,811	6,201
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,626	0,984	1,432	1,818	1,966	2,097
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,185	0,291	0,423	0,538	0,581	0,620
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,812	1,275	1,856	2,356	2,547	2,717

Şekil 5.10'da $0,208 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Beş boyar maddenin giderimi için tüketen alüminyum miktarı deney sonuna kadar zamanla neredeyse doğrusal olarak artış göstermiştir. Giderilen gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı sırasıyla; DO30 ($450,276 \text{ g/mol}$) $0,098-0,482 \text{ g}$ < VB1 ($646,614 \text{ g/mol}$) $0,092-0,515 \text{ g}$ < AB324 ($473,435 \text{ g/mol}$) $0,281-0,647 \text{ g}$ < RB5 ($991,82 \text{ g/mol}$) $0,250-0,721 \text{ g}$ < BY28 ($433,523 \text{ g/mol}$) $0,348-1,165 \text{ g}$ olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.14 : $0,208 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

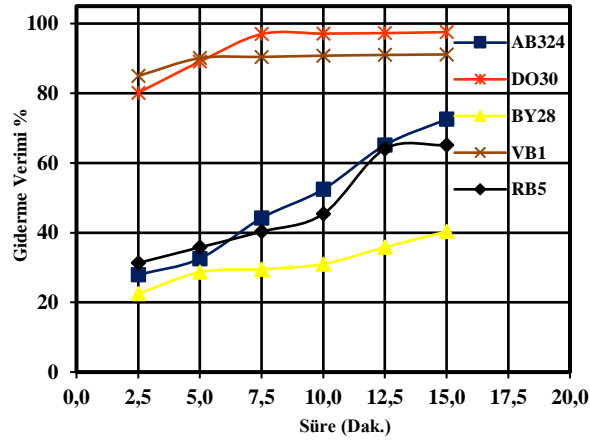
Vat (Vat Brown 1) (VB1)						
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,010	0,021	0,031	0,042	0,052	0,063
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlenmesi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0070	0,0084
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0020	0,0039	0,0059	0,0078	0,0098	0,0117
Boya giderme verimi (%)	84,96	90,07	90,43	90,78	90,99	91,13
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,021	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,092	0,174	0,260	0,345	0,430	0,515
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	0,490	0,925	1,382	1,836	2,290	2,743
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,166	0,313	0,468	0,621	0,774	0,928
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,049	0,093	0,138	0,184	0,229	0,274
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,215	0,405	0,606	0,805	1,003	1,202

Çizelge 5.15 : $0,208 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

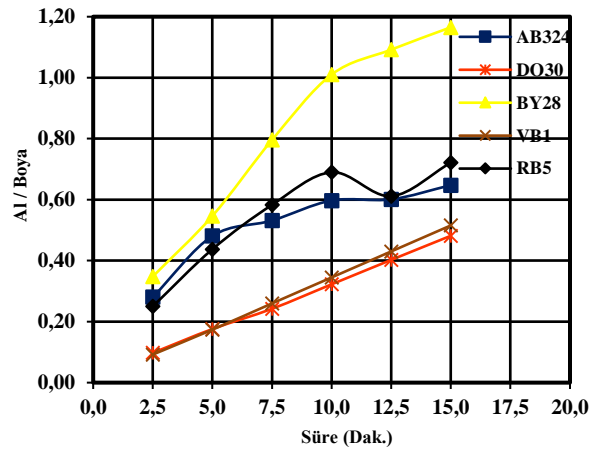
Reaktif (Reactive Black 5) (RB5)						
Akım (A)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Voltaj (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,010	0,021	0,031	0,042	0,052	0,063
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlenmesi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0014	0,0028	0,0042	0,0056	0,0070	0,0084
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0020	0,0039	0,0059	0,0078	0,0098	0,0117
Boya giderme verimi (%)	31,30	35,80	40,30	45,39	64,02	65,12
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,008	0,009	0,010	0,011	0,016	0,016
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,250	0,437	0,583	0,690	0,611	0,721
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,331	2,328	3,102	3,672	3,254	3,839
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,450	0,787	1,049	1,242	1,101	1,299
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,133	0,233	0,310	0,367	0,325	0,384
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,583	1,020	1,359	1,609	1,426	1,682

Şekil 5.11'de $0,208 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına tüketilen elektrik miktarı sırasıyla; DO30 ($450,276 \text{ g/mol}$) $0,520-2,563 \text{ Wh/g}$ < VB1 ($646,614 \text{ g/mol}$) $0,490-2,743$

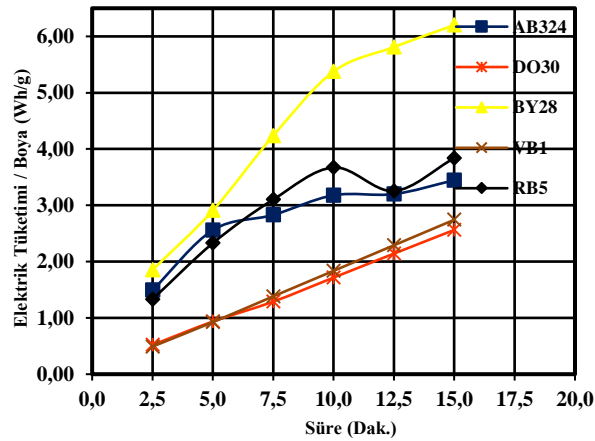
Wh/g < AB324 (473,435 g/mol) 1,493-3,445 Wh/g < RB5 (991,82 g/mol) 1,331-3,839 Wh/g < BY28 (433,523 g/mol) 1,852-6,201 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda olduğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi

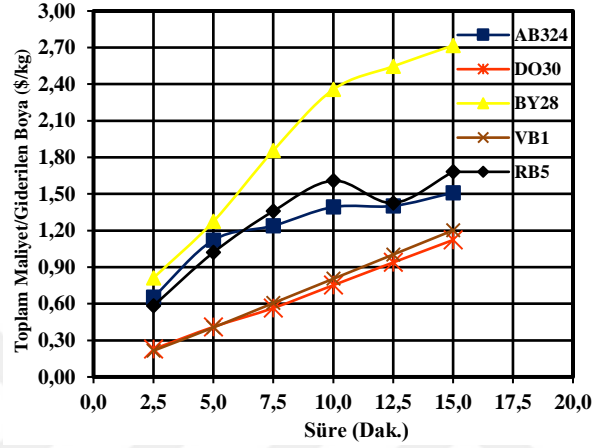


Şekil 5.10 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)



Şekil 5.11 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi

Şekil 5.12’de 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda alüminyum ve elektrik maliyetinden hareketle giderilen gram boyar madde başına toplam maliyet süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına toplam maliyet sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,228-1,123 \$/kg < VB1 (646,614 g/mol) 0,215-1,202 \$/kg < AB324 (473,435 g/mol) 0,654-1,510 \$/kg < RB5 (991,82 g/mol) 0,583-1,682 \$/kg < BY28 (433,523 g/mol) 0,812-2,717 \$/kg olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.12 : 0,208 mA/cm² akım yoğunluğunda toplam maliyet

Şekil 5.14’de 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 5. dakikadan deney sonuna kadar giderilen gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarları sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,322-0,960 g < VB1 (646,614 g/mol) 0,346-1,025 g < AB324 (473,435 g/mol) 0,852-1,195 g < RB5 (991,82 g/mol) 0,763-1,251 g < BY28 (433,523 g/mol) 1,142-2,109 g olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.16 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Asit (Acid Blue 324) (AB324)						
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,024	0,048	0,073	0,097	0,121	0,145
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlü Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0028	0,0056	0,0084	0,0112	0,0140	0,0168
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0039	0,0078	0,0117	0,0157	0,0196	0,0235
Boya giderme verimi (%)	32,09	36,74	48,14	59,77	71,63	78,61
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,008	0,009	0,012	0,015	0,018	0,020
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,488	0,852	0,976	1,048	1,093	1,195
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	3,012	5,262	6,024	6,469	6,748	7,378
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,878	1,534	1,757	1,886	1,968	2,151
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,301	0,526	0,602	0,647	0,675	0,738
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	1,180	2,061	2,359	2,533	2,642	2,889

Çizelge 5.17 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Dispers (Disperse Orange 30) (DO30)						
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,024	0,048	0,073	0,097	0,121	0,145
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlenmesi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0028	0,0056	0,0084	0,0112	0,0140	0,0168
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0039	0,0078	0,0117	0,0157	0,0196	0,0235
Boya giderme verimi (%)	92,81	97,27	97,27	97,41	97,55	97,84
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,023	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,169	0,322	0,483	0,643	0,803	0,960
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,042	1,988	2,982	3,969	4,955	5,928
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,304	0,580	0,869	1,157	1,445	1,729
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,104	0,199	0,298	0,397	0,495	0,593
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,408	0,778	1,168	1,554	1,940	2,321

Çizelge 5.18 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Katyonik-Bazik (Basic Yellow 28) (BY28)						
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,024	0,048	0,073	0,097	0,121	0,145
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlenmesi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0028	0,0056	0,0084	0,0112	0,0140	0,0168
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0039	0,0078	0,0117	0,0157	0,0196	0,0235
Boya giderme verimi (%)	24,93	27,43	30,83	36,72	39,88	44,56
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,011
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,628	1,142	1,524	1,706	1,963	2,109
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	3,877	7,048	9,407	10,530	12,119	13,017
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	1,130	2,055	2,743	3,070	3,534	3,796
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,388	0,705	0,941	1,053	1,212	1,302
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	1,518	2,760	3,684	4,123	4,745	5,097

Çizelge 5.19 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

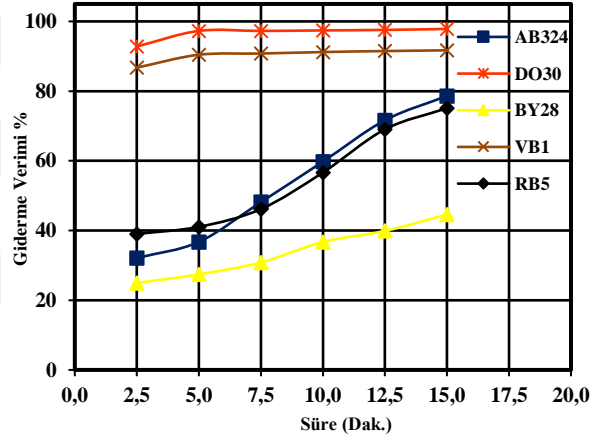
Vat (Vat Brown 1) (VB1)						
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,024	0,048	0,073	0,097	0,121	0,145
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlenmesi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0028	0,0056	0,0084	0,0112	0,0140	0,0168
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0039	0,0078	0,0117	0,0157	0,0196	0,0235
Boya giderme verimi (%)	86,74	90,43	90,78	91,21	91,49	91,70
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,181	0,346	0,517	0,687	0,856	1,025
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	1,114	2,138	3,195	4,240	5,283	6,325
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,325	0,623	0,931	1,236	1,540	1,844
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,111	0,214	0,319	0,424	0,528	0,632
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,436	0,837	1,251	1,660	2,069	2,477

Şekil 5.15’de 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Enerji tüketim miktarı ise 5. dakikadan deney sonuna kadar sırasıyla DO30 (450,276 g/mol) 1,988-5,928 Wh/g < VB1 (646,614 g/mol) 2,138-6,325 Wh/g <

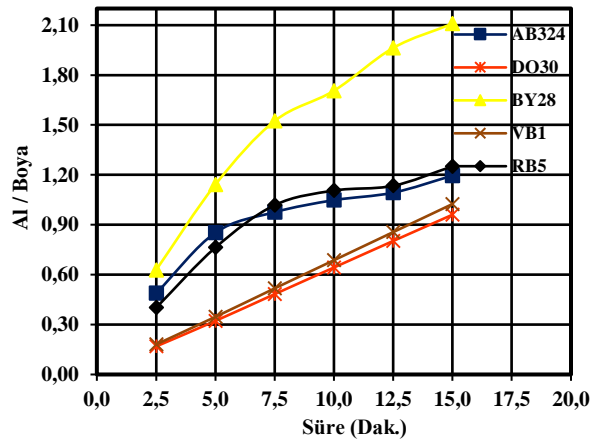
AB324 (473,435 g/mol) 5,262-7,378 Wh/g < RB5 (991,82 g/mol) 4,710-7,723 Wh/g < BY28 (433,523 g/mol) 7,048-13,017 Wh/g olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.20 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Reaktif (Reactive Black 5) (RB5)						
Akım (A)	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Voltaj (V)	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,024	0,048	0,073	0,097	0,121	0,145
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0028	0,0056	0,0084	0,0112	0,0140	0,0168
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0039	0,0078	0,0117	0,0157	0,0196	0,0235
Boya giderme verimi (%)	39,02	41,05	46,15	56,65	69,02	75,10
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,010	0,010	0,012	0,014	0,017	0,019
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,401	0,763	1,018	1,106	1,134	1,251
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	2,477	4,710	6,284	6,826	7,003	7,723
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,722	1,373	1,832	1,990	2,042	2,252
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,248	0,471	0,628	0,683	0,700	0,772
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,970	1,844	2,461	2,673	2,742	3,024

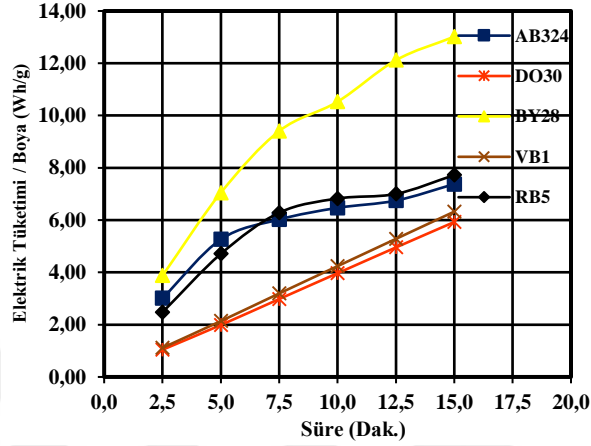


Şekil 5.13 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyarmaddelerin giderimi

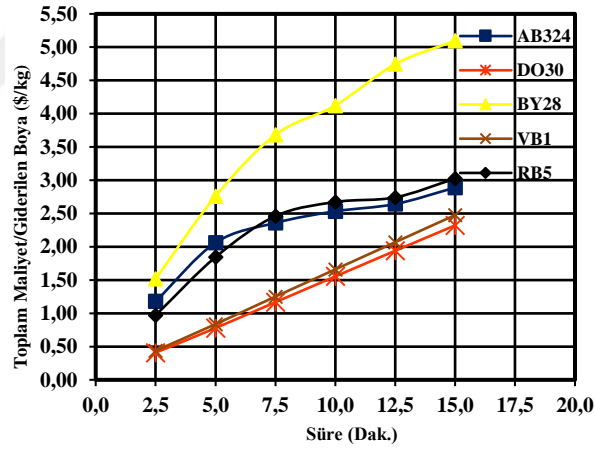


Şekil 5.14 : 0,416 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)

Şekil 5.16'da $0,416 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda alüminyum ve elektrik maliyetinden hareketle giderilen gram boyar madde başına toplam maliyet süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına toplam maliyet sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,408-2,321 \$/kg < VB1 (646,614 g/mol) 0,436-2,477 \$/kg < AB324 (473,435 g/mol) 1,180-2,889 \$/kg < RB5 (991,82 g/mol) 0,970-3,024 \$/kg < BY28 (433,523 g/mol) 1,518-5,097 \$/kg olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.15 : $0,416 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda enerji tüketimi



Şekil 5.14 : $0,416 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda toplam maliyet

Şekil 5.17'de $0,83 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda AB324, BY28, DO30, RB5, VB1 boyar maddelerinin süreye bağlı renk giderme verimleri gösterilmiştir. DO30 ve VB1, 5. dakikada nihai giderim verimine ulaşmıştır. Boyar madde giderim verimi sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) % 96-98 > VB1 (646,614 g/mol) % 87-93 > AB324 (473,435 g/mol) % 44-92 > RB5 (991,82 g/mol) % 45-83 > BY28 (433,523 g/mol) % 25-47 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 5.18'de $0,83 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda çözünen pratik alüminyum miktarından

hareketle giderilen gram boyar madde başına çözünen alüminyum miktarı süreye bağlı olarak gösterilmiştir. 5. dakikadan deney sonuna kadar giderilen gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarları sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,641-1,915 g < VB1 (646,614 g/mol) 0,690-2,030 g < AB324 (473,435 g/mol) 1,311-2,043 g < RB5 (991,82 g/mol) 1,330-2,275 g < BY28 (433,523 g/mol) 2,128-3,959 olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.21 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda Acid Blue 324 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Asit (Acid Blue 324) (AB324)						
Akım (A)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Voltaj (V)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,0280	0,0336
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0078	0,0157	0,0235	0,0313	0,0391	0,0470
Boya giderme verimi (%)	44,07	47,79	79,42	83,37	87,67	91,98
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,011	0,012	0,020	0,021	0,022	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,711	1,311	1,183	1,503	1,786	2,043
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	7,564	13,950	12,592	15,993	19,010	21,745
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	1,279	2,359	2,129	2,705	3,215	3,677
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,756	1,395	1,259	1,599	1,901	2,174
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	2,036	3,754	3,389	4,304	5,116	5,852

Çizelge 5.22 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda Dispers Orange 30 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Dispers (Disperse Orange 30) (DO30)						
Akım (A)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Voltaj (V)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözeltisi Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,0280	0,0336
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0078	0,0157	0,0235	0,0313	0,0391	0,0470
Boya giderme verimi (%)	96,12	97,70	97,84	97,84	97,84	98,13
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,025
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,326	0,641	0,960	1,280	1,600	1,915
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	3,468	6,824	10,221	13,627	17,034	20,381
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,587	1,154	1,729	2,305	2,881	3,447
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,347	0,682	1,022	1,363	1,703	2,038
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	0,933	1,836	2,751	3,667	4,584	5,485

Şekil 5.19’da 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda harcanan elektrik miktarından hareketle giderilen gram boyar madde başına harcanan elektrik süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Enerji tüketim miktarı ise 5. dakikadan deney sonuna kadar sırasıyla DO30 (450,276 g/mol) 6,824-20,381 Wh/g < VB1 (646,614 g/mol) 7,344-21,609 Wh/g < AB324 (473,435 g/mol) 13,950-21,745 Wh/g < RB5 (991,82 g/mol) 14,154-24,213 Wh/g < BY28 (433,523 g/mol) 22,650-42,141 Wh/g olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.23 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda Basic Yellow 28 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

Katyonik-Bazık (Basic Yellow 28) (BY28)						
Akım (A)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Voltaj (V)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlü Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,0280	0,0336
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0078	0,0157	0,0235	0,0313	0,0391	0,0470
Boya giderme verimi (%)	24,76	29,43	33,24	38,81	40,49	47,46
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,006	0,007	0,008	0,010	0,010	0,012
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	1,265	2,128	2,827	3,228	3,867	3,959
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	13,462	22,650	30,087	34,356	41,159	42,141
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	2,277	3,830	5,088	5,810	6,961	7,127
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	1,346	2,265	3,009	3,436	4,116	4,214
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	3,623	6,095	8,097	9,246	11,077	11,341

Çizelge 5.24 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda Vat Brown 1 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

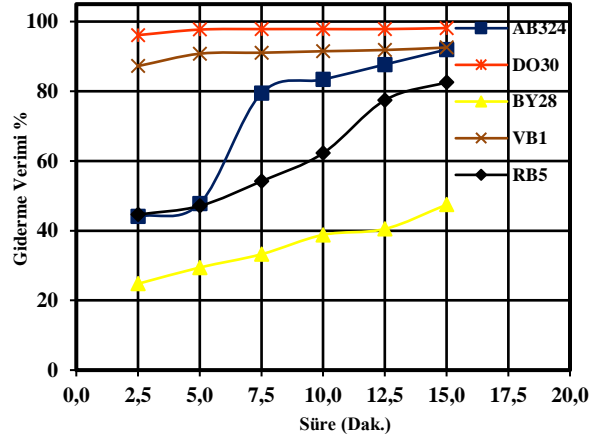
Vat (Vat Brown 1) (VB1)						
Akım (A)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Voltaj (V)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlü Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,0280	0,0336
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0078	0,0157	0,0235	0,0313	0,0391	0,0470
Boya giderme verimi (%)	87,23	90,78	91,06	91,49	91,84	92,55
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,359	0,690	1,032	1,369	1,705	2,030
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	3,821	7,344	10,981	14,574	18,147	21,609
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,646	1,242	1,857	2,465	3,069	3,655
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,382	0,734	1,098	1,457	1,815	2,161
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	1,028	1,976	2,955	3,922	4,884	5,815

Çizelge 5.25 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda Reaktif Black 5 boyar maddesinin giderimi deney şartları ve sonuçları.

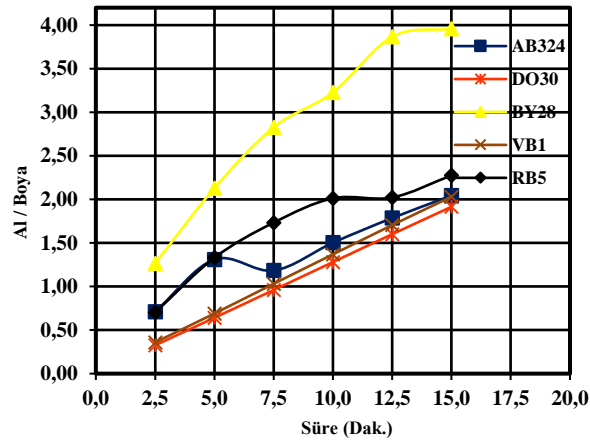
Reaktif (Reactive Black 5) (RB5)						
Akım (A)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Voltaj (V)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Elektrik Tüketimi (Wh)	0,083	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500
Deney Süresi (Dak.)	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
Boya Konsantrasyonu (mg/l)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Reaktördeki Boya Çözümlü Hacmi (l)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Reaktördeki Boya Miktarı (mg)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Çözünen Al Miktarı (Teorik) (g)	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,0280	0,0336
Çözünen Al Miktarı (Pratik) (g)	0,0078	0,0157	0,0235	0,0313	0,0391	0,0470
Boya giderme verimi (%)	44,62	47,10	54,20	62,25	77,45	82,60
Reaktörde Giderilen Boya (g)	0,011	0,012	0,014	0,016	0,019	0,021
Kullanılan Al (g) / Giderilen Boya (g)	0,702	1,330	1,733	2,012	2,022	2,275
Elektrik Tüketimi / Giderilen Boya (Wh/g)	7,470	14,154	18,450	21,419	21,519	24,213
Alüminyum Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	1,263	2,394	3,120	3,622	3,639	4,095
Elektrik Maliyeti \$ / Giderilen Boya (kg)	0,747	1,415	1,845	2,142	2,152	2,421
Toplam Maliyet \$ / Giderilen Boya (kg)	2,010	3,809	4,965	5,764	5,791	6,516

Şekil 5.20’de 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda alüminyum ve elektrik maliyetinden hareketle giderilen gram boyar madde başına toplam maliyet süreye bağlı olarak gösterilmiştir. Deney süresi boyunca gram boyar madde başına toplam maliyet sırasıyla; DO30 (450,276 g/mol) 0,933-5,485 \$/kg < VB1 (646,614 g/mol) 1,028-5,815 \$/kg <

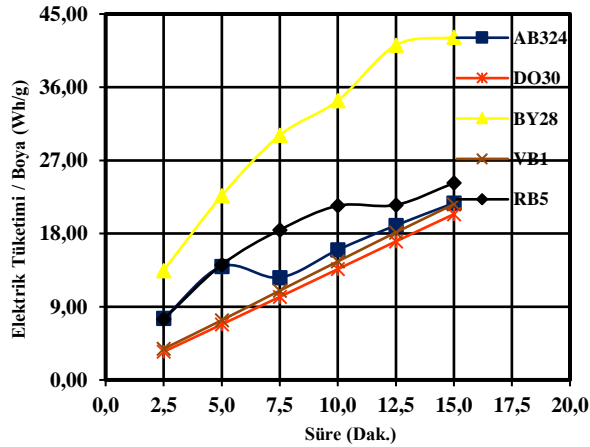
AB324 (473,435 g/mol) 2,036-5,852 \$/kg < RB5 (991,82 g/mol) 2,010-6,516 \$/kg < BY28 (433,523 g/mol) 3,623-11,341 \$/kg olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.15 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı molekül ağırlığındaki boyar maddelerin giderimi

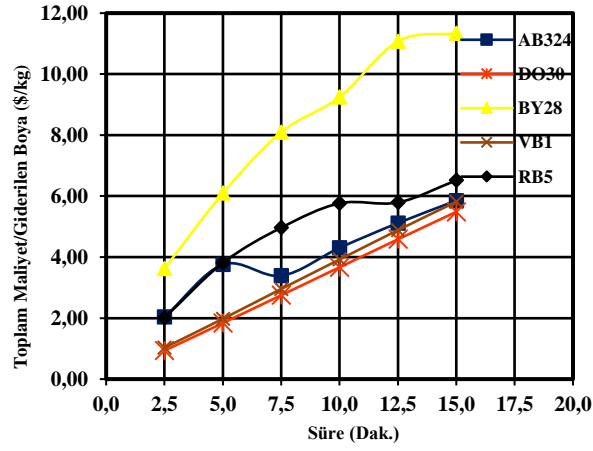


Şekil 5.16 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda kullanılan alüminyum miktarı (g) başına giderilen boya (g)

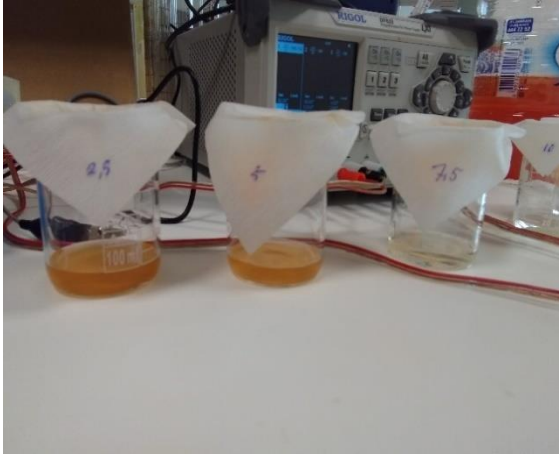


Şekil 5.17 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda enerji tüketimi

Şekil 5.19’de DO30 boyar maddesinin elektrokoagülasyon prosesi ile deney süresine bağlı boyar madde çözeltilerinden renk giderimi görülmektedir.



Şekil 5.17 : 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda toplam maliyet



(a)



(b)

Şekil 5.18 : DO30 boyar maddesinin elektorkoagülasyon ile süreye bağlı renk giderimi Çizelge 5.26’den görüleceği üzere beş boyar madde için de akım yoğunluğunun 0,052’den 0,83 mA/cm² arttırılması ile renk giderim verimlerinde artış gözlenmiştir. Tüm akım yoğunluklarında DO30 boyar maddesinin giderim verimi en yüksek, BY28 boyar maddesinin ise giderim verimi en düşük olmuştur. Akım yoğunluğunun artması daha fazla elektrot çözünmesine neden olur. Bununla beraber giderilen boyar madde başına kullanılan alüminyum miktarı da artmıştır. Tüm akım yoğunluklarında DO30 boyar maddesi için kullanılan alüminyum en az, RB5 boyar maddesi için en çok olmuştur. Diğer taraftan akım yoğunluğunun artışı anodik çözünmenin arttığı ve bunun sonucu olarak kirletici giderimi için gerekli flok miktarının arttığı bilinmektedir. Üstelik akım yoğunluğu arttıkça, hava kabarcıklarının oluşum oranı artmakta, kabarcıkların

boyutu küçülmektedir ki bu durum H₂ flotasyonu ile kirletici gideriminde daha faydalıdır (Adhoum vd., 2004). Deney sürelerinin ilk dakikalarında molekül ağırlığı-boya giderme ilişkisi ağırlık artışı ile giderme verimi artışı şeklinde olmamıştır. Bu durum deneyin ilk dakikalarında yük dengesini bozacak miktarda Al³⁺ ve flok oluşmamış olmasına bağlanmaktadır.

Çizelge 5.26 : Akım yoğunluğunun EK prosesine etkisi.

Akım Yoğunluğu mA/cm ²	AB324		BY28		DO30		RB5		VB1	
	Verim (%) [*]	Al (g) / Boya (g) ^{**}	Verim (%) [*]	Al (g) / Boya (g) ^{**}	Verim (%) [*]	Al (g) / Boya (g) ^{**}	Verim (%) [*]	Al (g) / Boya (g) ^{**}	Verim (%) [*]	Al (g) / Boya (g) ^{**}
0,052	37,33	0,315	31,58	0,372	96,69	0,121	43,90	0,268	88,16	0,133
0,104	41,86	0,561	35,62	0,659	96,98	0,242	52,80	0,445	90,78	0,259
0,208	72,56	0,647	40,32	1,165	97,55	0,482	65,12	0,721	91,13	0,515
0,416	78,61	1,195	44,56	2,109	97,84	0,960	75,10	1,251	91,70	1,025
0,83	91,98	2,043	47,46	3,959	98,13	1,915	82,60	2,275	92,55	2,030

^{*} Giderim Verimi

^{**} Giderilen boya başına kullanılan alüminyum

5.2 İşletme Maliyeti

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

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

Burada, C_{enerji} (Wh/g giderilen boya) ve C_{elektrot} (g Alüminyum/g giderilen boya), giderilen boya miktarı başına tüketim miktarları. a ve b, birim fiyatlarıdır. Alüminyum elektrot birim fiyatı (a) 0,0018 \$/g, elektrik enerjisi birim fiyatı (a), 0,1 \$/Wh olarak alınmıştır.

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

Çizelge 5.27 : Elektrokoagülasyon farklı akım yoğunluklarında işletme maliyeti.

Akım Yoğunluğu mA/cm ²	AB324		BY28		DO30		RB5		VB1	
	\$/kg Boya [*]	Verim ^{**}	\$/kg Boya [*]	Verim ^{**}	\$/kg Boya [*]	Verim ^{**}	\$/kg Boya [*]	Verim ^{**}	\$/kg Boya [*]	Verim ^{**}
0,052	0,647	37,33	0,764	31,58	0,250	96,69	0,550	43,90	0,274	88,16
0,104	1,261	41,86	1,482	35,62	0,544	96,98	1,000	52,80	0,581	90,78
0,208	1,510	72,56	2,717	40,32	1,123	97,55	1,682	65,12	1,202	91,13
0,416	2,889	78,61	5,097	44,56	2,321	97,84	3,024	75,10	2,477	91,70
0,83	5,852	91,98	11,34	47,46	5,485	98,13	6,516	82,60	5,815	92,55

^{*} Giderilen boya başına maliyet

^{**} Giderim verimi

Akım yoğunluğunun artması ile birlikte tüketilen elektrik miktarı, daha fazla elektrot tükenecektir. Bununla birlikte işletme maliyeti artış gösterecektir. Akım yoğunluğu- işletme maliyeti incelendiğinde BY28 ve RB5 boyar maddeleri dışındaki diğer üç boyar maddelerin renk giderimi $0,83 \text{ mA/cm}^2$ akım yoğunluğunda 15 dakika deney süresi sonunda %90 üzerinde renk giderim verimi elde edilmiştir. Akım yoğunluğunun daha fazla arttırılmasının renk giderimi üzerinde ilave etkisi çok olmamış ancak işletme maliyetlerinin artmasına sebep olmuştur.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı sınıf tekstil boyalarının elektrokimyasal arıtım proseslerinden biri olan elektrokoagülasyon yöntemi ile sudan giderimi incelenmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak akım yoğunluğunun giderim verimine etkisi belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan tekstil boya sırasıyla; Acid Blue 324, Basic Yellow 28, Dispers Orange 30, Reaktif Black 5 ve Vat Brown 1'dir. 0,052, 0,104, 0,208, 0,416 ve 0,83 mA/cm² akım yoğunluklarında 15 dakika deney süresi boyunca aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

AB324 boyar maddesinin akım yoğunluğuyla beraber giderim verimi artmıştır. 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda 15. dakikanın sonunda %90'nın üstünde verime ulaşılmıştır.

BY28 boyar maddesinin tüm akım yoğunluklarında giderim verimi en düşüktür. Tüm boyalar arasında gram boyar madde başına harcanan alüminyum miktarı, harcanan enerji miktarı ve toplam maliyeti en yüksek olan BY28 boyar maddesidir.

DO30 boyar maddesinin tüm akım yoğunluklarında giderim verimi en yüksektir. 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda 10. dakikanın sonunda %90'nın üstünde verime ulaşılmıştır. Bu dakikada diğer boyar maddelere göre en düşük alüminyum ve enerji tüketimine sahiptir. Tüm boyar maddeler arasında toplam maliyeti en az olan, reaktörde giderilen boya miktarı en fazla ve akım yoğunlukları arasında giderim verimi en iyi olan boyar maddedir.

RB5 boyar maddesi 0,83 mA/cm² akım yoğunluğunda 15. dakikanın sonunda %80'nin üstünde verime ulaşılmıştır. BY28 boyar maddesinden sonra tüm akım yoğunluklarında elektrik tüketimi yüksek olan ikinci boyar maddedir.

VB1 boyar maddesinin 0,052 mA/cm² akım yoğunluğunda 15. dakikanın sonunda %85'in üstünde, 0,104 mA/cm² akım yoğunluğunda 12,5. dakikanın sonunda ise %90'nın üstünde giderim verimine ulaşılmıştır. Tüm akım yoğunluklarında DO30 boyarmaddesinden sonra reaktörde giderilen boya miktarı yüksek olan ikinci boyar maddedir.

Kullanılan boya sınıfının elektrokoagülasyon yöntemi ile sulardan boya giderimine etki ettiği görülmüştür. Giderme verimlerine göre büyükten küçüğe doğru sıralandığında

boya sınıfı Dispers (Disperse Orange 30) > Vat (Vat Brown 1) > Asit (Acid Blue 324) > Reaktif (Reactive Black 5) > Katyonik/Bazik (Basic Yellow 28) şeklinde gerçekleşmiştir. Tüm akım yoğunluklarında dispers boya yüksek bir giderme verimi ile neredeyse boyanın tümü ortamdan giderilirken, en kötü giderme verimine sahip katyonik/bazik boya ancak konsantrasyonunun yarısı ortamdan giderilebilmiştir.

Tekstil boyalarının, boyama sonrası suda kalan kısmının gideriminde kullanılan boya türünün giderme verimine etki ettiği görüldüğüne göre; alıcı su ortamlarının kalitelerinin korunması ve atıksu arıtım maliyetlerinin düşürülmesi açısından mümkünse sulardan giderimi kolay boya türleri tercih edilmelidir. Bu çalışmada 5 boya türüne ait boyanın sulardan giderimi incelenmiştir. Diğer türlerinde giderme verimine etkilerinin değerlendirilebilmesi için yeni çalışmaların yapılması önerilir.



KAYNAKLAR

Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal, N., Belgaied, J. E. (2004). Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 112(3), 207–213,. doi:10.1016/2004.04.018.

Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., Hamitouche, H. (2010). Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1176–1182,. doi:10.1016/2010.08.019.

Ardhan, N., Ruttithiwapanich, T., Songkasiri, W., Phalakornkule, C. (2015). Comparison of performance of continuous-flow and batch electrocoagulators: A case study for eliminating reactive blue 21 using iron electrodes. *Separation and Purification Technology*, 146, 75–84,. doi:10.1016/2015.03.028.

Asselin, M., Drogui, P., Brar, S. K., Benmoussa, H., Blais, J. F. (2008). Organics removal in oily bilgewater by electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 151(2–3), 446–455,. doi:10.1016/2007.06.008.

Avcu, F. (2010). *Atık sularındaki fenolün elektrooksidasyon ile arıtılması için elektroaktif elektrot geliştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Bahadır, E. B. (2012). *Tekstil endüstrisi arıtılmış atıksularında renk ve öncelikli kirleticilerin ozon teknolojisi ile gideriminin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Başer, İ., İnanıcı, Y. (2017). Boyarmade Kimyası. Erişim adresi <http://hdl.handle.net/11424/5514> (Orijinal eser 1990'da basıldı)

Bayar, S., Boncukçuoğlu, R., Fil, B. A., Yılmaz, A. E. (2012). Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak Direct Red 23 boyarmaddesinin gideriminin incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2), 21–28.

Bejankiwar, R. S. (2002). Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater: Feasibility study. *Water Research*, 36(17), 4386–4390,. doi:10.1016/S0043-1354(02)00155-0.

Can, O. T., Gazigil, L. (2017). Elektrokoagülasyon yöntemi ile sulardan boyarmade gideriminde molekül büyüklüğü ve pH etkisi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 5(3), 113–122,. doi:10.21541/335384.

Chatzisyneon, E., Xekoukoulotakis, N. P., Coz, A., Kalogerakis, N., Mantzavinos, D. (2006). Electrochemical treatment of textile dyes and dyehouse effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 998–1007,. doi:10.1016/2006.03.032.

Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11–41,. doi:10.1016/2003.10.006.

Christie, R. M. (2015). Colour chemistry. Erişim adresi

<https://books.google.com.tr/books?id=UGsoDwAAQBAJ&hl=tr> (Orijinal eser 2001'de basıldı)

Chung, K. T., Stevens, S. E. J. (1993). Degradation of azo dyes by environmental microorganisms and helminths, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 12(11), 2121–2132,. doi:10.10025620121120.

Fakı, A. (2007). *Reaktif tekstil boyarmaddelerinin zeolit kolonda adsorpsiyon yolu ile giderilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ghosh, D., Medhi, C. R., Purkait, M. K. (2008). Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. *Chemosphere*, 73(9), 1393–1400,. doi:10.10162008.08.041.

Golder, A. K., Samanta, A. N., Ray, S. (2007). Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 653–661,. doi:10.10162006.07.025.

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

İçoğlu, H. İ. (2006). *Pamuklu dokunmuş kumaşların reaktif boyarmaddelerle boyanması ve uygulama yöntemlerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E., Gönüllü, T. M. (2007). Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması, TÜRKAY 2007 AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, (ss. 1-16). İstanbul : Y.T.Ü, Mayıs 28-31.

Işık, M., Sponza, D. T. (2004). Decolorization of azo dyes under batch anaerobic and sequential anaerobic/aerobic conditions. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 39(4), 1107–1127,. doi:10.1081120028417.

Kaptan, D. (2002). *Tekstil endüstrisi atıksularında toksisite giderilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Keleş, T. (2008). *Mono ve dikromofor grup içeren reaktif boyarmadde ve geçiş metal komplekslerinin sentezi* (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Kobyay, M., Bayramoğlu, M., Can, O. T., Sözbir, M., Akyol, A. (2008). Endüstriyel Atıksuların Arıtılması İçin Elektrokimyasal Reaktör Geliştirilmesi (Proje No. 104Y267). Kocaeli : Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Kobyay, M., Can, O. T., Bayramoğlu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1–3), 163–178,. doi:10.1016S0304-3894(03)00102-X.

Kocaer, F. O., Alkan, U. (2002). Boyar madde içeren tekstil atıksularının arıtım alternatifleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 47–55.

Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J., Lassi, U. (2013). Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater - a review. *Green and Sustainable Chemistry*, 3, 89–121,. doi:10.42362013.32013.

- 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(2–3), 163–174,. doi:10.1016/S0168-1656(01)00313-3,
- Maas, R., Chaudhari, S.** (2005). Adsorption and biological decolourization of azo dye Reactive Red 2 in semicontinuous anaerobic reactors. *Process Biochemistry*, 40(2), 699–705,. doi:10.1016/2004.01.038.
- Mickova, I.** (2015). Advanced electrochemical technologies in wastewater treatment. Part II: Electro-flocculation and electro-flotation. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 14(2), 273–294.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., Cocke, D. L.** (2001). Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41,. doi:10.1016/S0304-3894(01)00176-5.
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D. L.** (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1–3), 199–210,. doi:10.1016/2004.08.009.
- Müller, K.** (1992). Electroflotation from the double layer to troubled waters. *Electrochemistry in Transition. From the 20th to the 21st Century*, 1(1), 21-37,. doi:10.1007/978-1-4615-9576-2_2.
- Mutlutürk, B.** (2016). *Demir ve alüminyumun doğal sularda uv spektrofotometrik tayini için yöntem geliştirilmesi ve elde edilen verilerin kemometrik kalibrasyon yöntemleri ile değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Nandi, B. K., Patel, S.** (2013). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 1–8,. doi:10.1016/2013.11.032.
- O’Neill, C., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., Esteves, S., Wilcox, S. J.** (2000). Anaerobic-aerobic biotreatment of simulated textile effluent containing varied ratios of starch and azo dye. *Water Research*, 34(8), 2355–2361,. doi:10.1016/S0043-1354(99)00395-4.
- Özdemir, Ö.** (2007). *Modifiye edilmiş zeolit yataklı reaktörde tekstil endüstrisi boyahane atıksularından renk gideriminin araştırılması* (Doktora Tezi). <http://hdl.handle.net/11527/8674>
- Özyonar, F., Karagözoğlu, B.** (2012). Elektrokoagülasyon prosesi ile tekstil sanayi atıksuyunun arıtımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(1), 29–37.
- Rajeshwar, K., Ibanez, J. G., Swain, G. M.** (1994). Electrochemistry and the environment. *Journal of Applied Electrochemistry*, 24(11), 1077–1091,. doi:10.1007/BF00241305.
- Romanov A., Kobya M., Dimoğlu A.** (2000). Atıksulardaki Kolloidal Partiküllerin Elektroflotokoagülasyonla Giderimi. *7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu*, (ss. 67–74). İstanbul: İ.T.Ü.
- Sahu, O., Mazumdar, B., Chaudhari, P. K.** (2014). Treatment of wastewater by electrocoagulation: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2397–2413,. doi:10.1007/s11356-013-2208-6.
- Saygılı, R.** (2009). *Bazı metal katyonlarının spektrofotometrik tayinlerinde çok bileşenli*

kalibrasyon tekniklerinin uygulanması (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Sevimli, M. F. (2000). *Tekstil endüstrisi atıksularından ozonlama ile renk giderimi ve ozonlamanın biyolojik arıtılabilirliğe etkisi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Solak, M. (2007). *Elektrokoagülasyon prosesi ile mermer atıksularının arıtılması* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Şahin, Y. (2006). *Asit boya banyosu atıksularının kimyasal prosesler ile ön arıtılabilirliğinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şengil, İ. A., Özacar, M. (2009). The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 1369–1376., doi:10.1016/2008.04.100.

US EPA. (1997). *EPA Office of Compliance Sector Notebook Project : Profile of the Textile Industry*. Washington, CA: U.S. Environmental Protection Agency.

Van Der Zee, F. P. (2002). *Anaerobic azo dye reduction* (Doktora Tezi). Wageningen Üniversitesi, Wageningen.

Vandevivere, P. C., Bianchi, R., Verstraete, W. (1998). Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72(4), 289–302., doi:10.1002/1097-4660(199808)72:4.

Vardar, B. (2006). *Tekstil endüstrisi reaktif boya banyolarının elektrokimyasal yöntemler ile arıtımı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Verma, A. K., Dash, R. R., Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93(1), 154–168., doi:10.1016/2011.09.012.

Vivek Narayanan, N., Ganesan, M. (2009). Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 575–580., doi:10.1016/2008.03.113.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ufuk Muhammed ÖZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1992/ Malatya
E-posta : ozufukmuhammed@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2018, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği