

Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Reaktif Yellow 160 Boyar Maddesinin Giderimi

^{1*}Ahmet AYGÜN, ²Beytullah EREN

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

²Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü

Öz

Demir ve alüminyum elektrotlar ile donatılmış elektrokoagülasyon prosesinin (EP) kullanıldığı çalışmada Reaktif Yellow 160 (RY160) boyarmaddesi giderimi üzerine başlangıç pH, akım yoğunluğu, iletkenlik ve elektroliz süresinin etkisi incelenmiştir. EP’de elektrot materyalinden bağımsız olarak yüksek renk giderim verimi elde edilmiştir. Optimum işletme şartları alüminyum elektrot kullanılması durumunda, pH = 5, akım yoğunluğu 100 A/m², elektroliz süresi 10 dakika, iletkenlik 1000 µS/cm iken demir elektrot kullanılması durumunda pH = 7, akım yoğunluğu 200 A/m², elektroliz süresi 5 dakika, iletkenlik 1000 µS/cm olarak belirlenmiştir. Renk giderim verimi alüminyum elektrot çifti için 2,3 kWsa/m³ enerji sarfıyatı ve 0,52 \$/m³ toplam maliyetle %96,4 iken demir elektrot çifti için 1,7 kWsa/m³ enerji sarfıyatı ve 0,28 \$/m³ toplam maliyetle %95,8 elde edilmiştir. Sonuçlar, demir elektrot kullanımının alüminyum elektrot ile karşılaştırıldığında RY160 boyarmaddesinin gideriminde daha ekonomik olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokoagülasyon, Maliyet, Reaktif Yellow 160 (RY160), Renk Giderimi

Decolorization of Reactive Yellow 160 Dye by Using Electrocoagulation

Abstract

The effect of initial pH, current density, conductivity and electrolysis time on Reactive Yellow 160 (RY160) dye removal was investigated by using electrocoagulation process (EC) equipped with iron and aluminum electrodes couple. High color removal efficiency was obtained independent of electrode materials in EC. Optimum operational conditions was determined as pH = 5, current density 100 A /m², electrolysis time 10 min and conductivity 1000 µS / cm for aluminum electrodes while it was pH = 7, current density 200 A/m², electrolysis time 5 min and conductivity 1000 µS/cm for iron electrodes. Color removal was 96.4% with 2.3 kWh/m³ energy consumption and 0.52 \$/m³ operating cost for aluminum electrode while it was 95.8% with 1.7 kWh/m³ energy consumption and 0,28 \$/m³ operating cost for iron electrode. The results show that, iron electrodes are more cost effective than aluminum electrodes in removal of RY160 dye.

Keywords: Color Removal, Cost, Electrocoagulation, Reactive Yellow 160 (RY160)

1. Giriş

Reaktif boyar maddeler, uygun koşullar altında elyaf ile kimyasal reaksiyona girerek kovalent bağ oluşturmaları, küçük ve basit molekül yapılarına sahip olmaları ve suda kolay çözünmeleri nedeniyle tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır[1]. Bununla birlikte boyamada reaktif boyar maddeler tercih edildiğinde, bu grup boyar maddelerin life bağlanma verimi az olduğundan boya banyosu atıksuyunda kullanılan boyar maddenin % 20-40 kadarı fikse olmadan kalmaktadır [2]. Tekstil endüstrisi yoğun su tüketiminin yanında renkli ve yüzey aktif madde ile organik madde içeren yüksek kirlilik yüküne sahip atıksu oluşumu ile karakterize edilmektedir [3].

Bununla birlikte, üretim proseslerinin çeşitliliği ve işlenen elyafın özelliğine bağlı olarak oluşan atıksuyun kirletici özellikleri tesisten tesise büyük farklılıklar göstermektedir [4-5].

Tekstil atıksularının en önemli bileşenlerinden olan ve alıcı ortam üzerinde ışık geçirgenliğini azaltarak çevresel ve estetik problemlere yol açan boyar maddelerin arıtılması sürdürülebilir bir çevre için büyük önem arz etmektedir [6]. Zira, boyar maddelerin toksik ve kanserojenik özellikleri nedeniyle ekolojik ve insan sağlığı açısından potansiyel bir tehdit unsuru olduğu da göz ardı edilmemelidir [7]. Boyar maddelerin toksik özellik göstermeleri ve tekstil atıksularında biyolojik parçalanmaya dirençli organik madde içeriğinin

*Sorumlu Yazar: Bursa Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye, E mail: ahmet.aygun@btu.edu.tr, Tel: (224) 300 35 90

fazla olması biyolojik yöntemlerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır [8]. Yine de biyolojik yöntemler kullanılarak boyar madde gidermek için yapılan arıtılabilirlik çalışmalarında, anaerobik yöntemler ile aerobik süreçlere göre daha başarılı sonuçların elde edildiği rapor edilmektedir [9]. Ayrıca ardışık anaerobik ve aerobik yöntemler kullanılmasının tekil biyolojik yöntemlere nazaran daha başarılı olduğu kaydedilmektedir [10].

Kimyasal koagülasyon/flokülasyon tekniği ile arıtımda, boyarmaddelerin kısmi bozunması ve parçalanması söz konusu olmadığı gibi toksik ve zararlı maddelerin oluşumu gözlenmediğinden tercih edilebilmektedir [11]. Bununla birlikte çamur oluşumunun diğer yöntemlerle kıyaslandığında fazla olması ve reaktif boyama tekniğinin kullanıldığı işletmelerde, boyarmaddelerin atıksuda çözünmüş formda olması nedeniyle bu yöntem arıtım alternatifi olarak tercih edilememektedir [12-13].

Kimyasal oksidasyon yöntemleri tekstil atıksularının arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır ve renk giderim verimleri yüksektir [14-16]. Ancak, oksitleme reaksiyonları sonucu toksik olduğu bilinen maddelerin oluşma potansiyeli fazladır [17].

Boyar maddelerin olumsuz etkilerinin en aza indirilmesi için uygulanan klasik arıtma yöntemleri alıcı ortam deşarj standartlarının sağlanması açısından yetersiz kalmaktadır. Tüm bu sorunların üstesinden gelmek için tekstil atıksularının arıtımında elektrokimyasal arıtım tekniği olan ve genellikle demir veya alüminyum elektrotların kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesi alternatif bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Basit kurulum, işletme kolaylığı, güvenilir ve ekonomik çözüm üretme açısından avantajlar sunması bu yöntemin tercih edilebilirliğini arttırmaktadır [18].

Bu yöntemde galvanik bir hücre içerisinde elektrotlar arasında doğru akım uygulanması sonucu

anodun çözünmesi ve katotta ise suyun parçalanması sağlanır. Elektrokimyasal olarak oluşturulan floklar ortam pH'sında etkisiyle monomerik ve polimerik metal hidroksit özellik gösterir, kirletici maddeler (bu çalışma özelinde boyarmaddeler) ile bağlanma, tutunma, kompleks oluşturma vb reaksiyonlar vererek birleşir, nihai olarak çöktürme veya yüzeyde toplanma şeklinde uzaklaştırılır [19].

Elektrokoagülasyon yöntemi tekstil [20-23], metal kaplama [24-26], zeytin işleme [27-28], deri [29], [30], kağıt [31], mezbaha [32] gibi birçok endüstriyel atıksuyun arıtılmasının yanında evsel atıksu [33-34] ve sızıntı sularının [35-36] arıtımında da başarı ile uygulanmıştır. Bununla birlikte, teknik olarak başarılı bir yöntemin aynı zamanda ekonomik olarak uygulanabilirliğinin belirlenmesi çevresel problemlerin sürdürülebilir olarak çözülebilmesi için önemlidir. Bu çalışmada RY160 boyar maddesinin arıtılmasında elektrokoagülasyon yönteminin temel işletme parametrelerinden olan pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, zaman değişkenlerinin optimum değerleri hem alüminyum hem de demir elektrot için belirlenmiş ve uygulamaya dönük olarak maliyet hesabı yapılmıştır.

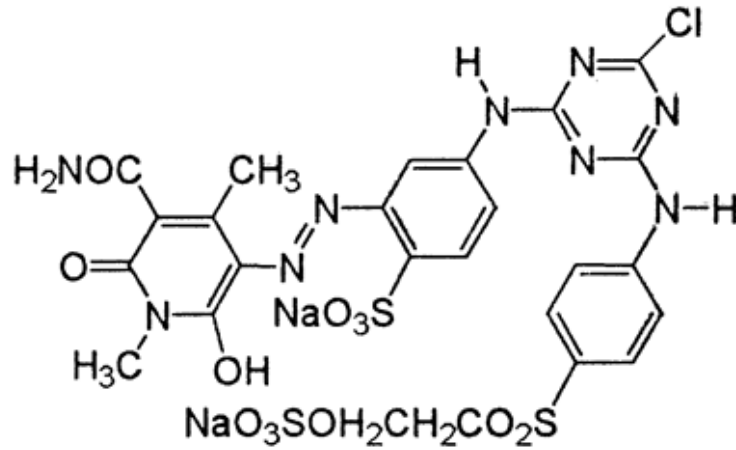
2. MATERYAL ve METOT

2.1. Materyal

Bu çalışmada ticari olarak kullanılan reaktif boyarmaddenin (C.I. Reaktif Yellow 160), elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak arıtılması çalışılmıştır. Umut Kimya Tekstil San. Tic. Ltd. Şti firmasından temin edilen boyarmaddenin özellikleri Tablo 1'de özetlenirken, Şekil 1'de ise molekül yapısı verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm kimyasal maddeler analitik saflıktadır. Boyarmadde içeren çözeltilerin hazırlanmasında ultra saf su kullanılmıştır.

Tablo 1. Boyarmaddenin özellikleri

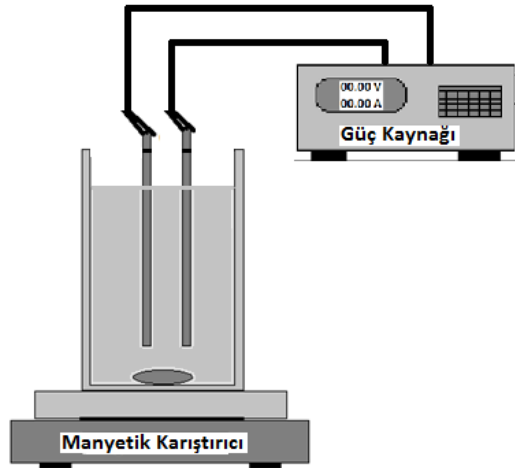
Parametre	Değer/Durum
CAS numarası	129898-77-7
Moleküler formülü	$C_{25}H_{22}ClN_9Na_2O_{12}S_3$
Molekül ağırlığı (g/mol)	818.13
Fiziksel Hali	Yeşil-açık sarı görünümde



Şekil 1. Moleküler yapı (C.I. Reaktif Yellow 160)

2.2. Deneysel Düzenek

Deneysel çalışmalar Şekil 2’de şematik olarak gösterilen deneysel düzenek kullanılarak sürdürülmüştür. 50 x 50 x 5 mm ebatlarında alüminyum ve demir elektrot çiftlerinin kullanıldığı çalışmada elektrotlar arası mesafe 25 mm’dir. 1 litrelik hacme sahip pleksiglas malzemeden yapılmış elektrokoagülasyon reaktöründe, akım ve voltaj kontrolü EA-PS 3032-10 B marka (0–32 V gerilim ve 0–10 A akım ayarlı) dijital doğru akım güç kaynağı ile sağlanmıştır. Elektroliz süresi boyunca karışım için manyetik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneysel Düzenek

2.3. Deneysel İşlem

Elektrotların yerleştirilmesinden sonra elektrokoagülasyon reaktörüne 500 mL 100 mg/L boyarmadde içeren çözelti konulmuştur. Çözeltinin pH değeri 0.1 M HCl ve 0.1 M NaOH kullanılarak, iletkenlik değeri ise katı NaCl ile tanımlanmış deney şartlarına ayarlanmıştır. İstenen akım ve voltaj

değerleri dijital güç kaynağında ayarlanıp sistem çalıştırılmıştır.

Elektrokoagülasyon deneylerinin hemen ardından ölçümler üzerine flokların girişim yapmasının engellenmesi için reaktörden alınan numuneler 0.45 µm gözenek çaplı filtre kâğıdı kullanılarak süzülmüş ve süzülen numunelerde renk tayini yapılmıştır. Her deneyden önce elektrotların yüzeyleri aseton ile yıkandıktan sonra deney süresince elektrot yüzeyinde biriken kir ve pasların giderimi, önceden hazırlanan % 37’lik 100 mL HCl ve % 2.8’lik 200 ml heksametilen tetramin ((CH₂)₆N₄) karışımı ile oluşturulan temizleme çözeltisinde elektrotların 5 dakika bekletilmesi ile sağlanmıştır [37]. Her bir deney setinde elektrot aşınım miktarının (kütle kaybının) belirlenmesi için elektrotlar tartılmış ve not edilmiştir [38].

2.4. Analitik Metot

RY160 boyarmaddesi için maksimum absorbanse elde edilen dalga boyunun DR 5000 UV-Vis spektrofotometre ile 190 nm ile 800 nm arasında 1 nm aralıklarla yapılan tarama sonucu 426 nm olduğu tespit edilmiştir. 0-100 mg/L RY160 içeren çözeltiler kullanılarak kalibrasyon eğrisi oluşturulmuş ve boyarmadde konsantrasyonu ile absorbanse arasındaki ilişki matematiksel olarak belirlenmiştir. Elde edilen denklem yardımıyla aritmetiklik çalışmaları sonucu absorbanse değeri belirlenen numunelerin boyarmadde konsantrasyonu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda renk giderim verimi Eşitlik 1’de verilen denklem yardımıyla belirlenmiştir.

$$(\%) C_{Renk} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) * 100 \quad (1)$$

Burada C₀, seçilen dalga boyundaki başlangıç boya konsantrasyonu (mg/L), C_e, seçilen dalga boyundaki artım sonrası boya konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir.

2.5. Maliyet Analizi

Elektrokoagülasyon yöntemiyle boyarmadde gidermede işletme maliyeti hesaplanırken elektrik sarfiyatı ile elektrot tüketimleri ve oluşan çamurun bertaraf edilmesi dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda tüketilen elektrot materyali için birim fiyat alüminyum elektrot için 1.78 \$/kg, demir elektrot için 0.93 \$/kg olarak kabul edilirken, elektrik sarfiyatı için maliyet 0.13 \$/kWh ve oluşan çamurun bertaraf edilmesi için maliyet 0.10 \$/kg olarak kabul edilmiştir [39].

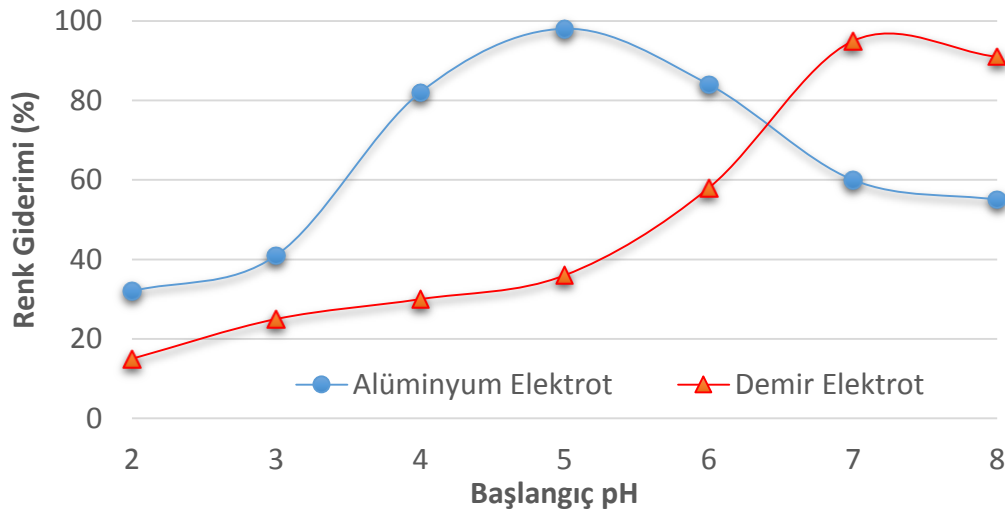
3. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada elektrokoagülasyon prosesi ile reaktif boyarmadde giderim verimi üzerine başlangıç pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, elektroliz süresi (zaman) gibi prosese özgü işletme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde hem demir hem de alüminyum elektrot kullanılması durumunda katotta oluşan hidrojen gazı çıkışı

nedeniyle floklar reaktörün üst kısmında toplanmış ve net bir katı sıvı ayırımı gözlenmiştir.

3.1. Başlangıç pH'ın Etkisi

pH galvanik hücre içerisinde meydana gelen reaksiyonları ve oluşan floklar türlerini direkt olarak etkilediği için büyük öneme sahiptir. Elektrokoagülasyon yönteminin kullanıldığı çalışmalarda arıtma performansının başlangıç pH'ına bağlı olduğu kadar arıtım işlemi sonunda ulaşılan pH değerlerine de bağlı olduğu rapor edilmiştir. Şekil 3'te başlangıç pH değerinin renk giderimi üzerine etkisi alüminyum ve demir elektrot çiftlerinin kullanılması durumu için verilmiştir. pH etkisinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalarda işletme şartları olarak 0.5 A akım (akım yoğunluğu olarak 100 A/m²), NaCl eklenerek 1000 µS/cm iletkenlik değeri ve 200 rpm karıştırma hızı sabit tutulmuştur. Ön deneysel çalışmalar neticesinde, elektroliz süresi alüminyum elektrot çifti için 10 dakika, demir elektrot çifti için ise 5 dakika olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Başlangıç pH değerinin renk giderimi üzerine etkisi

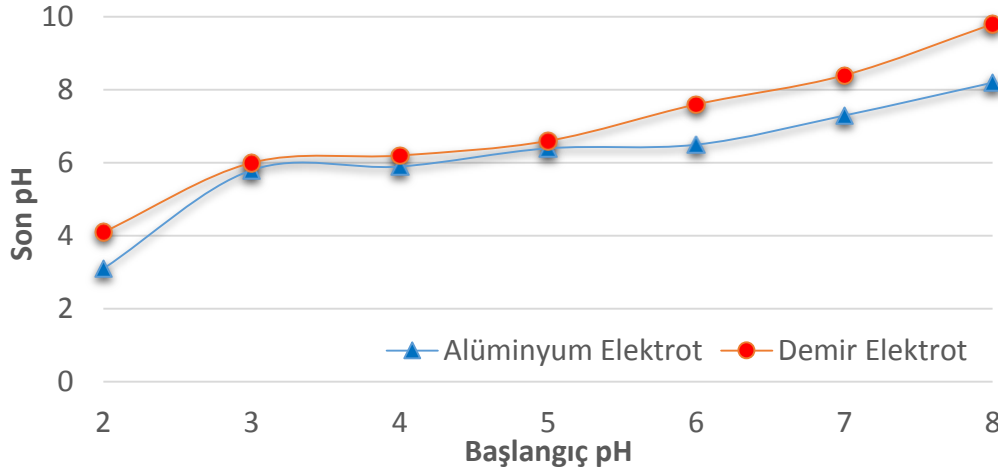
Alüminyum ve demir elektrotlarının çözünmesi ile çözünen elektrot materyaline özgü floklar oluşumu gözlenmektedir. Şekil 3'ten de görüleceği üzere en iyi renk giderme verimi alüminyum elektrotun başlangıç pH değeri 5, demir elektrotun ise başlangıç pH değeri 7 olduğunda elde edilmiştir. Alüminyum elektrotlar kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalarda pH'ya bağlı olarak monomerik ve polimerik alüminyum hidroksit kompleks türlerini oluşturmaktadır. Bu kompleksler pH 4-7 aralığında polimerize olma eğilimindedirler. En çok bilinen monomerik türler; $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^{+4}$, $Al(OH)_4^-$ ve en çok bilinen polimerik türler ise; $Al_6(OH)_{15}^{+3}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$,

$Al_8(OH)_{20}^{+4}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ 'dir. Değişik türlerin oluşma oranları renk giderme aşamasında belirleyici öneme sahip olmaktadır. Düşük pH değerlerinde flokülasyon ile çökeltme, pH > 6.5 olduğu durumlarda ise adsorpsiyon mekanizması ile renk giderimi gerçekleştiği rapor edilmektedir. Demir elektrot kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalarda, elektrotun Fe^{+2} ve Fe^{+3} olarak anodik çözünmesi ile $Fe(OH)_n$ kompleksleri oluşmaktadır. Demir kompleksleri ile çöktürme reaksiyonu baskın mekanizma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrokoagülasyon prosesinde pH değeri, elektroliz süresi boyunca katotta suyun parçalanması

nedeniyle oluşan hidrojen gazı çıkışı ve hidroksit iyonlarının birikimi nedeniyle artmaktadır. Hem alüminyum hem de demir elektrot kullanılan

çalışmalarda gözlenen başlangıç ve artım sonrası pH değerleri Şekil 4'te verilmiştir.



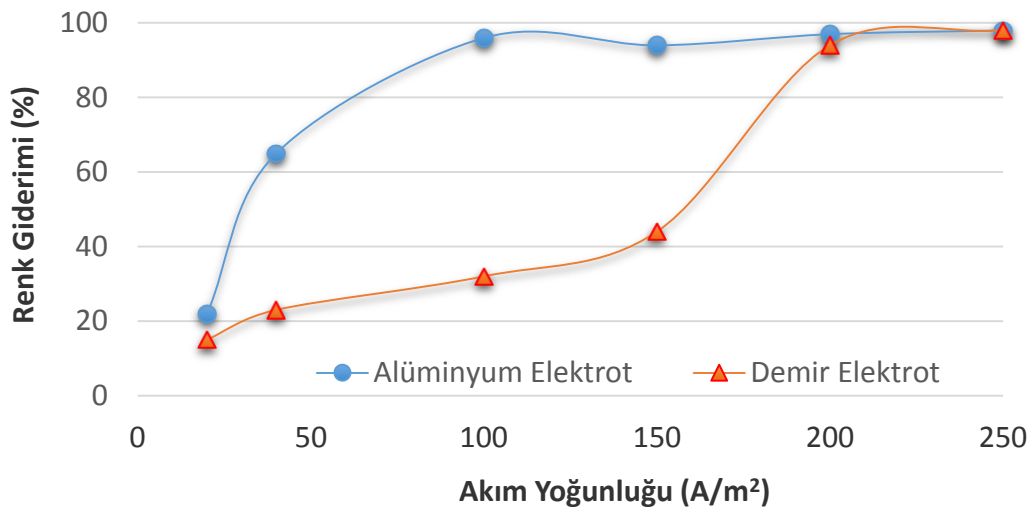
Şekil 4. Başlangıç pH değerinin son pH değeri üzerine etkisi

3.2. Akım Yoğunluğunun Etkisi

Akım yoğunluğu, birim elektrot alanından geçen akım olarak ifade edilir. Akım yoğunluğunun miktarı, anotta çözünen metal iyonlarının üretim hızını ve katotta oluşacak kabarcık hızı ile büyüklüğünü etkilediğinden oluşan flokların miktarını, yapısını ve oluşumunu da etkiler. Akım yoğunluğu, aşırı oksijenin ve olası sıcaklık artışının önlenmesi için kontrol edilmelidir [40]. Elektrokoagülasyon prosesi, verimli olarak işletilebilmesi için kritik akım yoğunluğunda çalıştırılmalıdır. Akım yoğunluğunun artışı ile verimde artış olur, bu kritik değerden sonra akım yoğunluğunun artırılması ile çıkış suyu kalitesinde

önemli bir iyileşme gözlenmemektedir. Çözünen elektrot miktarı Faraday kanunları çerçevesinde elektrotun cinsine göre değişmektedir [41].

Akım yoğunluğunun renk giderme verimine etkisini incelemek amacı alüminyum elektrot çifti için başlangıç pH değeri 5 ve elektroliz süresi 10 dakika, demir elektrot çifti için başlangıç pH değeri 7 ve elektroliz süresi 5 dakika olarak ayarlanmıştır. Katı NaCl eklenerek 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değeri ve 200 rpm karıştırma hızı sabit tutulmuştur. 20-120 A/m^2 aralığında akım yoğunlukları uygulanması ile alüminyum ve demir elektrot çiftleri için elde edilen renk giderim verimi değişimleri Şekil 5'te özetlenmiştir.



Şekil 5. Akım yoğunluğunun renk giderim verimi üzerine etkisi

Şekil 5'te alüminyum elektrot çifti için 20 A/m^2 ile 100 A/m^2 arasında renk giderim veriminin hızlı bir şekilde arttığı, 100 A/m^2 ve 250 A/m^2 aralığında ise

renk giderme veriminde değişimin sınırlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, demir elektrot çifti kullanıldığında ise akım yoğunluğunun 200 A/m^2 'ye

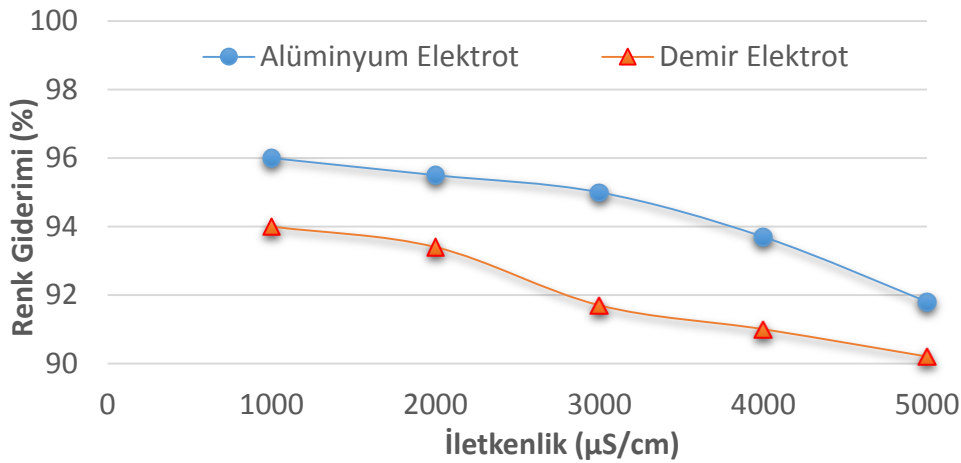
kadar artırılması gerekmektedir. Akım yoğunluğu elektrik sarfiyatı ve elektrot çözünmesi üzerinde en önemli etkiye sahip olan değişken durumundadır. Alüminyum elektrot için akım yoğunluğu 20 A/m²'den 250 A/m²'ye çıkarıldığından potansiyel fark 1,6 volttan 10.4 volta yükselmiştir. Demir elektrot için de durum farklı değildir. Nihai olarak optimum akım yoğunluğu değerleri alüminyum elektrot kullanılması durumunda 100 A/m², demir elektrot kullanıldığında ise 200 A/m² olarak belirlenmiştir.

3.3. Elektrokoagülasyon Üzerine İletkenliğin Etkisi

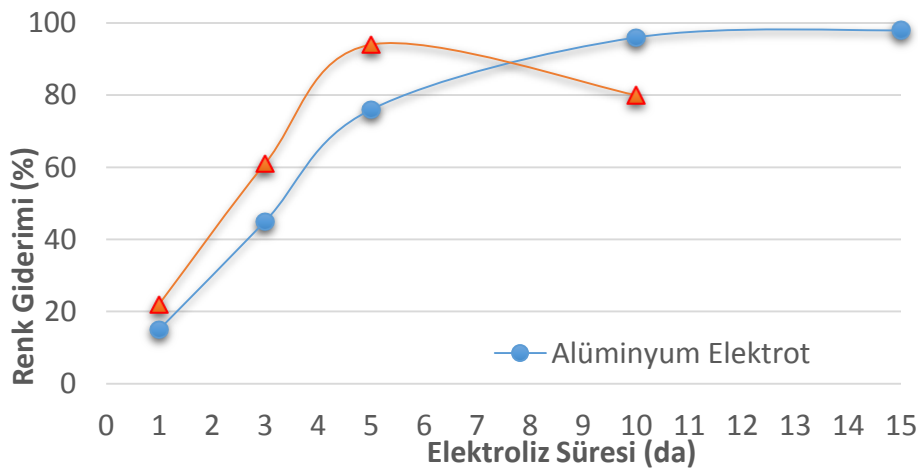
Çözelti iletkenliğinin renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla boyarmadde içeren çözeltisinin iletkenliği, katı NaCl ilavesi ile 1000 – 5000 μ S/cm aralığında çalışılmıştır. Deneysel çalışmalar alüminyum ve demir için belirlenen optimum başlangıç pH'sı, akım yoğunluğu ile 200 rpm karıştırma hızında alüminyum elektrot çiftleri için 10

dakikalık elektroliz süresi, demir elektrot çiftleri için 5 dakikalık elektroliz süresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da iletkenlik değişiminin renk giderimi üzerine etkisi gösterilmiştir.

Şekil 6'dan da görüleceği üzere elektriksel iletkenlik artışıyla elektrotlar arasındaki potansiyel farkın azalması sonucu anodik oksidasyonda düşüş buna bağlı olarak da renk giderme veriminde sınırlı da elektrot türünden bağımsız olarak azalma meydana gelmiştir. Elektriksel iletkenlik artışı ortamda klorür iyonlarının artışı anlamına gelmektedir. Organik moleküllü kirleticilerin olduğu bir elektrokimyasal hücrede oksidasyon nedeniyle organoklorlu toksik maddelerin oluşması kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle iletkenlik artışı potansiyel farkın azalması ile ihtiyaç duyulan elektrik maliyetinin azalması ile sonuçlansa da hem verimde meydana gelen azalma hem de toksik madde oluşma potansiyelinin artışı nedeniyle her iki elektrot türü için de 1000 μ S/cm elektriksel iletkenlik optimum olarak kabul edilmiştir.



Şekil 6. Elektriksel iletkenliği renk giderim verimi üzerine etkisi



Şekil 7. Zamanın renk giderim verimi üzerine etkisi

3.4. Zamanın Etkisi

Çözünen elektrot miktarı elektroliz süresinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Kimyasal madde miktarının kontrollü olarak elektrokimyasal çözünme ile arttırıldığı proseste belirlenen optimum arıtım süre aşıldıktan sonra elektroliz süresinin arttırılması ile kirlenici giderim veriminde iyileşme meydana gelmemekte ve genellikle sabit kalmaktadır. Zamanın renk giderme verimine etkisini incelemek amacıyla 0-15 dakikalar arasında belirlenen aralıklarla reaktörden numuneler alınmıştır. Zamanın renk giderim verimi üzerine etkisi Şekil 7’de verilmiştir.

Şekil 7’de alüminyum elektrot çifti için optimum süresinin 10 dakika olduğu, süre artışı ile renk giderim veriminde artış meydana gelmediği görülmektedir. Buna karşın demir elektrot kullanılan çalışmada ilk dakikalarda demir elektrotun çözünmesi ile renk değişimi olmazken 4. dakikadan sonra çözelti renginde demir +2 oluşumu nedeniyle yeşermeye meydana gelmiş ve 5. dakikadan sonra renk giderim veriminde azalma gözlenmiştir. 10. dakikadan sonra demir kaynaklı aşırı renk oluşumu nedeniyle ölçüm alınmamıştır. Optimum elektroliz süresi 5 dakika olarak kabul edilmiştir.

3.5. Arıtım maliyeti

Demir elektrot kullanılması durumunda 0.28 \$/m³, alüminyum elektrot kullanılması durumunda ise 0.52 \$/m³ işletme maliyeti olarak hesaplanmıştır. Enerji maliyetleri demir ve alüminyum elektrot çiftleri için sırasıyla 1.7 kWsa/m³ ve 2.3 kWsa/m³ olarak hesaplanmıştır. Demir elektrotun alüminyum elektroda nazaran daha ucuz olması, daha kısa elektroliz süresinde renk giderimi işleminin sağlanması, akım verimliliği daha az olduğundan çözünme sonucu oluşan çamurun miktarının daha az olması nedeniyle ekonomik olduğu tespit edilmiştir.

4. DEĞERLENDİRME

Alüminyum ve demir elektrot çiftleri kullanılarak yürütülen arıtılabilirlik çalışmaları sonucunda elektrokoagülasyon prosesinin Reaktif Yellow 160 boyarmaddesinin arıtılmasında etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Tekstil endüstrisinin yüksek su kullanımı ve açığa çıkan atıksu miktarı göz önüne alındığında, çok yüksek giderme verimlerine ulaşan bu yöntemin çevrenin ve doğal kaynakların korunmasında önemli bir alternatif atıksu arıtma prosesi olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Renk giderim verimi alüminyum elektrot çifti için 2,3 kWsa/m³ enerji sarfiyatı ve 0,52 \$/m³ toplam maliyetle %96,4 iken demir elektrot çifti için 1,7 kWsa/m³ enerji sarfiyatı ve 0,28 \$/m³ toplam maliyetle %95,8 elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre,

elektrokoagülasyon prosesinde demir elektrot çifti kullanımı ile daha ekonomik arıtım yapılabileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] M. A. Al-Ghouti, M. A. M. Khraisheh, S. J. Allen, and M. N. Ahmad, “The removal of dyes from textile wastewater: A study of the physical characteristics and adsorption mechanisms of diatomaceous earth,” *Journal of Environmental Management*, vol. 69, no. 3, pp. 229–238, 2003.
- [2] Y. Gunes, R. Atav, and O. Namirti, “Effectiveness of ozone in decolorization of reactive dye effluents depending on the dye chromophore,” *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 10, pp. 994–1000, 2011.
- [3] J. Blanco, F. Torrades, M. Morón, M. Brouta-Agnés, and J. García-Montaño, “Photo-Fenton and sequencing batch reactor coupled to photo-Fenton processes for textile wastewater reclamation: Feasibility of reuse in dyeing processes,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 240, pp. 469–475, 2014.
- [4] Y. K. Ong, F. Y. Li, S. P. Sun, B. W. Zhao, C. Z. Liang, and T. S. Chung, “Nanofiltration hollow fiber membranes for textile wastewater treatment: Lab-scale and pilot-scale studies,” *Chemical Engineering Science*, vol. 114, pp. 51–57, 2014.
- [5] F. Ciner, S. K. A. Solmaz, T. Yonar, and G. E. Ustun, “Treatability studies on wastewater from textile dyeing factories in Bursa, Turkey,” *International Journal of Environment and Pollution*, vol. 19, no. 4, pp. 403–407, 2003.
- [6] Y. Uysal, D. Aktas, and Y. Caglar, “Determination of Colour removal efficiency of Lemna minor L. from industrial effluents,” *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 15, no. 4, pp. 1718–1726, 2014.
- [7] Z. Aksu and G. Dönmez, “Combined effects of molasses sucrose and reactive dye on the growth and dye bioaccumulation properties of *Candida tropicalis*,” *Process Biochemistry*, vol. 40, no. 7, pp. 2443–2454, 2005.
- [8] H. S. Rai, M. S. Bhattacharyya, J. Singh, T. K. Bansal, P. Vats, and U. C. Banerjee, “Removal of Dyes from the Effluent of Textile and Dyestuff Manufacturing Industry: A Review of Emerging Techniques With Reference to Biological Treatment,” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 219–238, 2005.
- [9] H. Kocyigit and A. Ugurlu, “Biological decolorization of reactive azo dye by anaerobic/aerobic sequencing batch reactor system,” *Global NEST journal*, vol. 17, no. X, pp. 1–10, 2015.
- [10] S. Ozdemir, K. Cirik, D. Akman, E. Sahinkaya, and O. Cinar, “Treatment of azo dye-containing synthetic textile dye effluent using

- sulfidogenic anaerobic baffled reactor,” *Bioresource Technology*, vol. 146, pp. 135–143, 2013.
- [11] C. S. D. Rodrigues, L. M. Madeira, and R. A. R. Boaventura, “Treatment of textile dye wastewaters using ferrous sulphate in a chemical coagulation/flocculation process,” *Environmental Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 719–729, 2013.
- [12] V. Golob, A. Vinder, and M. Simonič, “Efficiency of the coagulation/flocculation method for the treatment of dyebath effluents,” *Dyes and Pigments*, vol. 67, no. 2, pp. 93–97, 2005.
- [13] O. T. Can, M. Kobya, E. Demirbas, and M. Bayramoglu, “Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation,” *Chemosphere*, vol. 62, no. 2, 2006.
- [14] S. Karthikeyan, A. Titus, A. Gnanamani, A. B. Mandal, and G. Sekaran, “Treatment of textile wastewater by homogeneous and heterogeneous Fenton oxidation processes,” *Desalination*, vol. 281, no. 1, pp. 438–445, 2011.
- [15] S. Şahinkaya, “COD and color removal from synthetic textile wastewater by ultrasound assisted electro-Fenton oxidation process,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 19, no. 2, pp. 601–605, 2013.
- [16] M. F. Sevimli and C. Kinaci, “Decolorization of textile wastewater by ozonation and Fenton’s process,” in *Water Science and Technology*, 2002, vol. 45, no. 12, pp. 279–286.
- [17] N. Daneshvar, A. Oladegaragoze, and N. Djafarzadeh, “Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 129, no. 1–3, pp. 116–122, 2006.
- [18] M. Y. Mollah, R. Schennach, J. R. Parga, and D. L. Cocke, “Electrocoagulation (EC)--Science and Applications.,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 84, no. 1, pp. 29–41, 2001.
- [19] M. Y. A. Mollah, P. Morkovsky, J. A. G. Gomes, M. Kesmez, J. Parga, and D. L. Cocke, “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 114, no. 1–3, pp. 199–210, 2004.
- [20] I. Arslan-alaton, M. Kobya, A. Akyol, and M. Bayramoğlu, “Electrocoagulation of azo dye production wastewater with iron electrodes: Process evaluation by multi-response central composite design,” *Coloration Technology*, vol. 125, no. 4, pp. 234–241, 2009.
- [21] M. Kobya, E. Demirbas, O. T. Can, and M. Bayramoglu, “Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 132, no. 2–3, 2006.
- [22] O. T. Can, M. Kobya, E. Demirbas, and M. Bayramoglu, “Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation,” *Chemosphere*, vol. 62, no. 2, pp. 181–187, 2006.
- [23] C. S. Keskin, A. Özdemir, and I. A. Şengil, “Simultaneous decolorization of binary mixture of reactive yellow and acid violet from wastewaters by electrocoagulation,” *Water Science and Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 1644–1650, 2011.
- [24] H. A. Kabuk, Y. Avsar, F. Ilhan, and K. Ulucan, “Comparison of pH Adjustment and Electrocoagulation Processes on Treatability of Metal Plating Wastewater,” *Separation Science and Technology*, vol. 49, no. 4, pp. 613–618, 2014.
- [25] K. K. Dermentzis, A. Christoforidis, and E. Valsamidou, “Removal of nickel, copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation,” *International Journal of Environmental Sciences*, vol. 1, no. 5, pp. 697–710, 2011.
- [26] F. Akbal and S. Camci, “Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation for heavy metal removal,” *Chemical Engineering and Technology*, vol. 33, no. 10, pp. 1655–1664, 2010.
- [27] Ü. Tezcan Ün, S. Uğur, A. S. Koparal, and Ü. Bakir Öğütveren, “Electrocoagulation of olive mill wastewaters,” *Separation and Purification Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 136–141, 2006.
- [28] H. Inan, A. Dimoglo, H. Şimşek, and M. Karpuzcu, “Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation,” *Separation and Purification Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 23–31, 2004.
- [29] O. Apaydin, U. Kurt, and M. T. Gonullu, “An Investigation on the Treatment of Tannery Wastewater by Electrocoagulation,” *Water*, vol. 11, no. 4, pp. 546–555, 2009.
- [30] A. Deghles and U. Kurt, “Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process,” *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 104, pp. 43–50, 2016.
- [31] M. Uğurlu, A. Gürses, Ç. Doğar, and M. Yalçın, “The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation,” *Journal of Environmental Management*, vol. 87, no. 3, pp. 420–428, 2008.
- [32] M. Kobya, E. Senturk, and M. Bayramoglu, “Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 133, no. 1–3, pp. 172–176, 2006.
- [33] C. Sarala, “Domestic Wastewater Treatment by Electrocoagulation with Fe-Fe Electrodes,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 530–533, 2012.
- [34] S. Barişçi and O. Turkay, “Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 10, pp. 56–66, 2016.
- [35] F. Ilhan, U. Kurt, O. Apaydin, and M. T. Gonullu, “Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, no. 1–3, pp. 381–389, 2008.

- [36] S. Top, E. Sekman, S. Hoşver, and M. S. Bilgili, "Characterization and electrocoagulative treatment of nanofiltration concentrate of a full-scale landfill leachate treatment plant," *Desalination*, vol. 268, no. 1–3, pp. 158–162, 2011.
- [37] O. T. Can and M. Bayramoglu, "The effect of process conditions on the treatment of benzoquinone solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, no. 1–3, pp. 731–736, 2010.
- [38] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. T. Can, and M. Sozbir, "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater," *Separation and Purification Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 117–125, 2004.
- [39] E. Demirbas and M. Kobya, "Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 105, pp. 79–90, 2017.
- [40] I. A. Şengil, S. Kulaç, and M. Özacar, "Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, no. 1–3, pp. 940–946, 2009.
- [41] P. K. Holt, G. W. Barton, M. Wark, and C. A. Mitchell, "A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 211, no. 2–3, pp. 233–248, 2002.