

Karışık boyalı atıksuların paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanarak peroksi-koagülasyon yöntemiyle arıtılması

Treatment of mixed dye wastewater by peroxy-coagulation using stainless steel and graphite electrodes

Dilek GÜMÜŞ*, 

Sinop Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

• Geliş tarihi / Received: 14.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 04.07.2023

Öz

Boyalı atıksuların çoğu canlılar için toksik ve kanserojendir. Karmaşık yapılarından dolayı geleneksel arıtma yöntemleriyle arıtılmaları oldukça güçtür. Boyalı atıksuları arıtmak için çeşitli elektrokimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada karışık boyaların oluşturduğu sentetik atıksudan renk ve KOİ giderimi peroksi-koagülasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Anot ve katot olarak sırasıyla paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanılmıştır. Başlangıç pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi temel işletme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Parametrelerin elektrokimyasal sistem üzerindeki etkilerini incelemek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi (L9) orthogonal array (OA) uygulandı. Sistemin performansı, Sinyal/gürültü (S/N) oranı (ne kadar büyükse o kadar iyidir) ve varyans analizi (ANOVA), faktörlerin yanıt değeri üzerindeki etkisinin göreceli olarak büyüklüğünü karşılaştırmak için değerlendirildi. Optimum çalışma koşulları başlangıç pH'ı 3, akım 100 mA ve reaksiyon süresi 60 dakika olarak bulundu. Bu koşullarda %99'un üzerinde renk giderimi ve %95 KOİ giderimi elde edilmiş ve toplam enerji tüketimi yaklaşık 25 kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler Boyalı atıksu, Paslanmaz çelik anot, Peroksi koagülasyon

Abstract

In this study, the geometric process (GP) model is considered in order to calculate the debugging and testing costs of a software product. Under the assumption of the GP model, the debugging and testing costs of the software product are obtained depending on the first and second moment functions of the GP. It is observed that the values of the first and second moment functions of the process must be known in order to calculate the debugging and testing costs. At the same time, the calculation of moment functions also depends on both the distribution of the first interarrival time of the GP and the estimates of the model and distribution parameters. In this study, the proposed debugging and testing costs are calculated for the data set containing 136 failure times of a real-time command and control system. For this dataset, it has been shown in previous studies that the GP with gamma distribution can be proposed as a model. Under gamma distribution assumption, the maximum likelihood estimates of the model parameters are obtained. Using the estimates of the model parameters, the first and second moment functions of the GP are calculated with the help of the numerical methods proposed for these functions. Finally, the debugging and testing costs are obtained for the data set.

Keywords: Dyed wastewater, Stainless steel anode, Peroxy coagulation

* Dilek GÜMÜŞ, dilek.gumus@gmail.com

1. Giriş

1.1. Introduction

Çeşitli endüstrilerden kaynaklanan su kirliliği küresel bir çevre sorunudur. Tekstil endüstrisi en çok su kullanan ve dolayısıyla en çok atıksu üreten endüstrilerin başında gelmektedir. Boyar madde ve pigment üretimi, dünya genelinde yıllık olarak 700.000 tonun üzerindedir (Nidheesh vd., 2018). Boyalar başta tekstil olmak üzere, gıda, kozmetik, deri, kağıt, plastik ve ilaç gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Tüm bu sektörlerde üretim esnasında oluşan atıksuların etkin ve ekonomik bir şekilde arıtılması ve konsantre bir şekilde ortaya çıkan boya kirliliğinin giderilmesi şarttır. Aksi takdirde boyalı atıksular alıcı ortamdaki ışık geçirgenliğini azaltır ve bu durumda fotosentetik aktivite olumsuz etkilenir. Bununla birlikte boyar maddeler sucul ortamlardaki canlılar ve insanlar için toksik ve kanserojendir (Pekey, 2016). Yaygın olarak bilindiği üzere, özellikle biyolojik prosesler gibi geleneksel arıtma işlemlerinin kullanıldığı prosesler düşük bozunma verimliliği göstermiştir (Rodríguez-Narváez vd., 2021). Bu nedenle çeşitli etkin arıtma yöntemleri geliştirmek için halen çalışmalar devam etmektedir. Bunlar arasında en çok ilgi çeken yöntemlerden biri kirlenici giderimindeki etkinliği, düşük maliyeti, çok yönlülüğü ve kompakt uygulama kolaylığı ile elektrokimyasal arıtım yöntemleridir.

Elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde, kirlenicilerin giderimi doğrudan ya da dolaylı oksidasyon yöntemi ile gerçekleşir. Doğrudan anodik oksidasyon prosesinde, anot yüzeyine adsorbe edilen kirleniciler anodik elektron transferi ile okside edilirler. Dolaylı oksidasyon prosesinde, elektrokimyasal olarak üretilen ozon, hidrojen peroksit, hipoklorit/klor gibi güçlü oksitleyiciler sayesinde kirlenici degradasyonu olur (Rajkumar & Palanivelu, 2004).

Fenton prosesi, klasik Fenton reaksiyonu yoluyla güçlü bir oksidasyon potansiyeline sahip hidroksil radikalının (OH[•]) üretilmesine dayanır (Reaksiyon 1). Fenton reaktiflerinden H₂O₂ ya da Fe⁺² elektrokimyasal olarak üretildiğinde sırasıyla, Elektro-Fenton (EF) ya da Anodik-Fenton (AF) olarak adlandırılır. Her iki reaktifin de elektrokimyasal olarak üretildiği sistemler Peroksi-koagülasyon (PC) işlemi olarak adlandırılır. PC, Fenton reaksiyonu için sürekli olarak demir (II) sağlayabilen demir veya paslanmaz çelikten yapılmış bir anot kullanan elektro Fenton prosesine dayalı bir arıtma prosesidir. PC kirlenicileri hem oksidasyon gücüyle hem de adsorpsiyon ve çökeltme yoluyla giderebilen birleşik bir prostestir (Ren vd., 2018).



Karbonlu malzemelerin katot yüzeyinde basit havalandırma ile elektrolitik hidrojen peroksit oluşumunda etkili oldukları bulunmuştur (Kumar vd., 2018). Hidrojen peroksit, asidik çözeltilerde genellikle karbon bir katot yüzeyinde oksijenin iki elektronla indirgenmesiyle elektrojenleştirilir (Reaksiyon 2) veya oksijen alkali bir çözeltide aşağıdaki reaksiyonu verir (Reaksiyon3) (Zarei vd., 2010).



Sonrasında, çözeltideki demir iyonlarını yeniden oluşturmak için ferrik iyonlar (Fe⁺³) katotta Fe⁺²'ye indirgenir (Reaksiyon 4). Fazla Fe⁺³ iyonları ise Fe(OH)₃ olarak çökeltmek kirlenici giderimine katkıda bulunur (Nayebi vd., 2021).



Genellikle, peroksi-koagülasyon işleminde üretilen H₂O₂ miktarı, anottaki demir iyonu oluşumundan daha düşüktür. Bu durum, kirlenicilerin pıhtılaştırılarak uzaklaştırılmasına dayanan elektrokoagülasyon işleminde olduğu gibi ortam pH'ında bir artışa neden olur. Bu nedenle, peroksi-koagülasyon sürecinde, kirlenicilerin uzaklaştırılmasından hem pıhtılaşma hem de bozunma birlikte etkindir (Kumar vd., 2018). Bu prosteste azo boyalar (do Vale-Júnior vd., 2018) tekstil atıksuları (Ghanbari & Moradi, 2015) ve çeşitli endüstriyel atıksularla ilgili çalışmalar yapılmış olmakla beraber diğer elektrokimyasal proseslere göre peroksi-koagülasyon yönteminin literatürdeki çalışmaları oldukça kısıtlıdır (Zhou vd., 2020).

Bu çalışmada, peroksi-koagülasyon prosesi ile dört farklı boya karışımını içeren sentetik atıksudan renk ve KOİ giderimi incelenmiştir. Elektrot malzemesi olarak paslanmaz çelik anot ve grafit katot kullanılmıştır. KOİ ve renk giderimini etkileyen temel işletme parametrelerinden olan uygulanan akım, çözelti pH'ı ve reaksiyon süresi gibi en temel faktörler değerlendirilmiş ve elektrokimyasal prosenin verimlilik ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Deneysel parametrelerin optimizasyonunda Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Düşük maliyetli ve kaliteli tasarım çözümleri öneren Taguchi yönteminin atıksu arıtımında kullanımı oldukça yaygındır (Davila vd., 2011). Deneysel veriler analiz edilerek sistemin verimliliği değerlendirilmiştir. ANOVA parametrelerin önceliğini ve proses üzerindeki etkinliğini kontrol etmek için kullanılır.

2. Materyal ve metod

2. Material and method

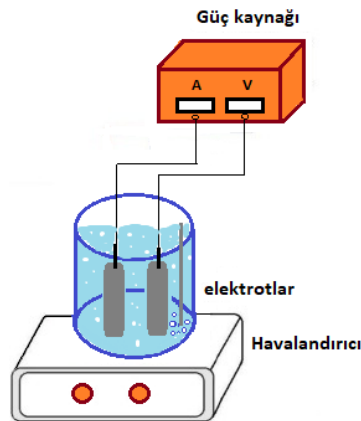
Bu çalışmada kullanılan boyalı atıksu Anilin Mavisini, Fast Green, Kristal Viyole ve Malaşit Yeşili olmak üzere her biri 10 mg/L konsantrasyonunda dört farklı boya karışımından elde edildi. Analiz için kullanılan tüm kimyasallar Merck'ten satın alınmıştır. Grafit elektrot ticari olarak satın alındı. Paslanmaz çelik elektrot sanayiden bir endüstriden temin edildi. Elektrokimyasal oksidasyon deneyleri, 200 mL atıksu kapasitesi olan silindirik bir cam reaktörde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Peroksi-koagülasyon işleminde anot elektrot malzemesi olarak 62 mm x 10mm x 0.5mm boyutlarında paslanmaz çelik levha elektrot kullanıldı. Kullanılan elektrotun etkin yüzey alanı yaklaşık 12,5 cm² olarak hesaplandı. Anot ve katot elektrotlar paralel olarak yerleştirildi ve birbirinden yaklaşık 2.5 cm uzaklıktaydı. Çalışmalar dijital bir güç kaynağı (Gw instek GPS-3303. 0–30 V. 0-3 A aralığında) kullanılarak gerçekleştirildi. Yapılan deneylerde çözeltinin pH değeri 0.1 N H₂SO₄ kullanılarak istenilen değere ayarlandı. Sentetik atıksuyun iletkenlik değeri 0.05 M Na₂SO₄ kullanılarak 3000 µs/cm olarak ayarlandı. Elektrokimyasal reaktöre boyalı atıksu eklendikten ve başlangıç koşulları oluşturulduktan sonra güç kaynağı başlatıldı. Katotta hidrojen peroksit üretimini desteklemek ve sisteme gerekli oksijeni sağlamak için piyasadan temin edilen bir hava pompası kullanıldı. Belirlenen süre tamamlandığında düşük pH'ta çalışılan deneylerin numunelerde analizlerde herhangi bir girişimi önlemek için 1 M Ca(OH)₂ kullanılarak numunelerin pH'ı 8'in üstüne yükseltildi ve ortamdaki demirin çöktürülmesi sağlandı. Daha sonra numuneler süzülerek renk ve KOİ ölçümleri yapıldı.

Örneklerin KOİ ve renk parametreleri için % giderim verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\%giderim = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (6)$$

C₀ ve C_t, sırasıyla elektrokimyasal arıtmadan önce ve sonra atıksudaki KOİ ve renk konsantrasyonlarını gösterir.

Karışık boyalı atıksuyun dalga boyu taramasında en yüksek absorbans değeri 620 nm dalga boyunda elde edildi. Numunelerin KOİ ve rengi, HACH LANGE DR3900 UV-vis spektrofotometre kullanılarak analiz edildi. Çözeltilerin pH'sı, bir HANNA HI 8424 pH metre kullanılarak ölçüldü. İletkenlik değeri, bir iletkenlik ölçer HANNA Instruments HI8819 kullanılarak ölçülmüştür. 15 mg/L ile 150 mg/L O₂ aralığında KOİ tayini için küvet testi (Hach Lange GmbH. Berlin. Almanya) LCK 314 kullanılarak yapılan spektrofotometrik yöntem kullanıldı.



Şekil 1. Elektrokimyasal düzenek
Figure 1. Electrochemical apparatus

2.1. Enerji tüketimi

2.1. Energy consumption

Sistemin enerji tüketimi aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (7) and (8).

$$kWh/kgKOİ = \frac{I \cdot voltaj \cdot t}{\Delta KOİ \cdot V} \quad (7)$$

$$kWh/m^3 = \frac{I \cdot voltaj \cdot t}{V} \quad (8)$$

I; akım (A), V; çözelti hacmi, t; süre ve $\Delta KOİ$ çözültideki KOİ degradasyonu.

2.2. Taguchi deneysel tasarım yöntemi

2.2. Taguchi experimental design method

Taguchi yöntemi ile ortogonal dizilere dayalı deney tasarımı planlanmıştır. Deneysel tasarımı hazırlamak için MINITAB yazılım programı kullanıldı. pH (A), akım yoğunluğu (B) ve reaksiyon süresi (C) olmak üzere üç değişken, Tablo 1' de gösterilen üç farklı seviyede seçilir. Kullanılan üç seviye ve işletim parametreleri literatüre ve ön deneylere dayalı olarak seçilmiştir. Tasarımda önerilen 9 deney (L_9) (OA), her sütun çiftinin olası tüm seviye kombinasyonlarına sahip olduğu ortogonal bir dizi içerir. Deneysel olarak %KOİ ve %renk giderimi gözlemlendi ancak çıktı yanıtı olarak %KOİ giderimi kullanıldı. Uygun bir ortogonal dizi tasarım tablosu (Tablo 2) tasarlanmış ve değişken sayısına ve düzey sayısına göre seçim Tablo 1'de gösterilmiştir. Deneyin optimum koşulunu belirlemek için Taguchi yöntemi, S/N oranı kullanılmıştır. S/N oranı özellikleri üç seçenek sunar: ne kadar küçükse o kadar iyidir, nominal en iyisidir ve ne kadar büyükse o kadar iyidir (Mythilishri vd., 2021). Bu çalışmada “ne kadar büyükse o kadar iyidir” seçeneği kullanılmıştır.

Tablo 1. Deney tasarımının seçilen faktörleri ve seviyeleri
Table 1. Selected factors and levels of experimental design

Faktör	Birim	L ₁	L ₂	L ₃
Çözelti pH		3	5	8
Akım	mA	50	100	150
Reaksiyon süresi	dakika	15	60	120

Tablo 2. Taguchi deneysel dizaynı (L_9) (OD)
Table 2. Taguchi experimental design (L_9) (OD)

Deney no	pH	Akım (mA)	Reaksiyon süresi (dk)
1	3	50	15
2	3	100	60
3	3	150	120
4	5	50	60
5	5	100	120
6	5	150	15
7	8	50	120
8	8	100	15
9	8	150	60

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

3.1. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile elektrokimyasal sistemin optimizasyonu ve proses parametrelerinin etkileri

3.1. Optimization of electrochemical system and effects of process parameters with Taguchi experimental design method

Paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar yardımıyla karışık boyalı atıksuyun elektro koagülasyon prosesi ile arıtılmasında % KOİ giderim verimliliği yanıt değerleri olarak kullanılmıştır. Sistemin renk giderim performansı ilk 15 dakikadan itibaren tüm deneyler için %90'ın üzerindedir. Bu nedenle sistem verimliliği KOİ giderim performansı üzerinden değerlendirilmiştir. Daha sonra tüm deneyler için enerji tüketim miktarları hesaplanmıştır. KOİ ve renk giderimi yüzdeleri ve Sinyal/gürültü (S/N) oranları Tablo 3'te verilmiştir. Peroksi-koagülasyon prosesi optimizasyonunda parametrelerin etkileri Şekil 2' de sunulmuştur. Çalışılan parametrelerin süreçteki katkısı varyans analizi ile değerlendirilmiştir. S/N oranı arttıkça KOİ giderim yüzdesi artar ve bunun tersi söz konusu iken KOİ giderim verimi azalır. Bu durumda, en yüksek S/N oranına sahip seviye, optimum sistem parametreleri seviyesini belirtir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, maksimum KOİ giderim verimleri, ilk pH seviyesinde (3), akım ikinci seviyesinde (100 mA) ve reaksiyon süresi de ikinci seviyesinde (60 dakika) elde edildi.

Tablo 3. Elektrokimyasal proseste Taguchi L₉ OD deneysel tasarımında boyalı atıksuda KOİ ve renk giderim yüzdeleri ve S/N oranları

Table 3. COD and color removal percentages and S/N ratios in dyed wastewater in Taguchi L₉ OD experimental design in electrochemical process

No	pH	Akım (V)	Süre (dk)	% Giderim renk	% Giderim KOİ	S/N
1	3	50	15	97,80	76,74	37,70
2	3	100	60	99,28	94,26	39,49
3	3	150	120	98,09	90,70	39,15
4	5	50	60	93,15	73,08	37,28
5	5	100	120	93,53	79,77	38,04
6	5	150	15	90,04	72,56	37,21
7	8	50	120	98,71	80,23	38,09
8	8	100	15	94,48	75,99	37,61
9	8	150	60	99,02	84,77	38,56



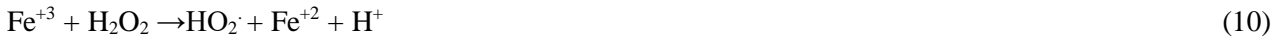
Şekil 2. Peroksi-koagülasyon prosesi optimizasyonunda parametrelerin etkileri

Figure 2. Effects of parameters on peroxy-coagulation process optimization

Genellikle, peroksi-koagülasyon süreci üzerindeki muhtemel etki ve mekanizmaların oluşumunda çözeltilinin pH'ı önemli bir rol oynar. Deneylerde 3,0, 5,0 ve 8,0 olmak üzere 3 farklı pH değeri üzerinden planlama

yapıldı. Bulgular, peroksi-koagülasyon prosesinde en iyi giderim veriminin pH 3,0'te olduğunu gösterdi. Elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon proseslerinin beklenen birleşik etkisi bu pH değerinde elde edildi. Bu durum, çalışılan proseste asidik koşullarda pıhtılaşmadan daha baskın kirletici giderme mekanizmasının bozunma olduğunu belirtmiştir. Literatürde benzer bulgulardan bahsedilmektedir. [Venu ve arkadaşları \(2016\)](#) tarafından yapılan son araştırma, peroksi-koagülasyon prosesinde kirleticilerin bozunması için optimum çözelti pH'ı 3 olarak bildirilmiştir. Asidik pH değerindeki daha yüksek giderim yüksek oksidasyon ürünleri ve OH radikalleri üretimi ile ilişkilendirilmektedir ([Salari vd., 2009](#)).

Uygulanan akımın proses üzerindeki etkisini belirlemek için 50, 100 ve 150 mA olmak üzere 3 farklı akım denemesi yapıldı. Optimum akım yoğunluğunun belirlenmesi elektrokimyasal arıtma sisteminde hem kirletici giderimi açısından hem de ekonomik etkinlik açısından önemli bir parametredir. Akımın artması ile üretilen H₂O₂ ve Fe⁺² miktarının artması ve böylelikle boyalı çözültide renk ve KOİ giderim verimlerinin artması beklenir. Akım optimum değerden yüksek olduğunda, KOİ giderimi kayda değer bir oranda iyileşmez. Bu, daha yüksek akım değerlerinde sistemdeki Fe⁺² konsantrasyonunun artması ve fazla Fe⁺²'nin ise hidroksil radikalleri ile reaksiyona girerek Fe⁺³ üretmesi ile açıklanabilir. Daha sonra fazla Fe⁺³, H₂O₂ ile reaksiyona girerek OH radikallerinden daha zayıf bir oksitleyici tür olan hidroperoksil radikalini (HO₂) üretir. Ayrıca daha yüksek akımlarda O₂, H₂O₂ üretimi ile rekabet eden H₂O'ya indirgenecektir ([Ren vd., 2018](#)). Uygulanan akımın artması anottan demir salınımını arttırdığı için elektroliz süresi ile çözelti pH'ında hızlı bir artışa neden olur. Bu durumda pıhtılaşma, Fenton reaksiyonundan daha baskın kirletici giderme mekanizması haline gelir. Bu durum, reaksiyonları uygulanan daha düşük akımda yürüterek çözülebilir. Düşük akım, anottan demir salınımını düzenler ve pH artış hızını geciktirir. Böylece kirleticilerin çoğu degradasyon yöntemi ile giderilmektedir ([Nidheesh, 2018](#)). Akım yükseldikçe enerji maliyetleri de aynı oranda artacaktır. Deneysel sistemde optimum akım olarak 100 mA belirlenmiştir.



Elektrokimyasal proseslerde elektroliz süresi arıtma sisteminin performansını etkileyen önemli bir parametredir. En yüksek S/N oranının 60 dakikada elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle, 60 dakikalık reaksiyon süresi KOİ'nin gideriminde iyi bir sonuç verdiği için optimum süre olarak kabul edilmiştir.

ANOVA sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. R² değeri %97,9 hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi ANOVA ile hesaplanan p değerleri doğrultusunda başlangıç pH değeri (p: 0,043 <0,05 olduğu için) çalışılan elektrokimyasal sistemde istatistiksel olarak anlamlı ve etkili bir parametre olduğu anlamını taşımaktadır ([Bhagawative & Shivayogimath, 2021](#)).

Analiz sonucunda peroksi-koagülasyon prosesinde 60 dk elektroliz süresinde, başlangıç pH değeri 3, Akım 100 mA değerinde %92,81 KOİ giderimi ve 39,35 (S/N) oranı belirlenmiştir. Belirlenen koşullar için doğrulama deneyi gerçekleştirilmiş ve %95 KOİ giderimi elde edilmiştir. Elde edilen giderim oranının tahmin edilenle tutarlı olması model parametrelerinin etkisini tanımlamakta son derece başarılı olduğunun göstergesidir.

Tablo 4. Peroksi-koagülasyon prosesinde karışık boya gideriminin ANOVA çalışması

Table 4. ANOVA study of mixed dye removal in the peroxy-coagulation process

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	221,037	110,518	22,43	0,043
Akım(A)	2	80,566	40,283	43,313	0,109
Süre(dk)	2	151,868	75,934	15,41	0,061
Hata	2	9,854	4,927		-
Toplam	8	463,325	-	-	-

3.2. Enerji tüketimi

3.2. Energy consumption

Tüm deneylerdeki enerji tüketimi zamana, voltaja ve akıma bağlı olarak kWh/m³ ve kWh/kgKOİ şeklinde hesaplanarak Tablo 5'te sunulmuştur. Bununla birlikte optimum koşullar için gereken enerji tüketimi de tabloda sunulmuştur. Optimum koşullarda tüketilen enerji miktarı 4,10 kWh/m³ ve 25,09kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Deneylerdeki enerji tüketimleri
Table 5. Energy consumption in experiments

No	I (A)	Voltaj	t (h)	E(Wh)	Enerji tüketimi (kWh/m ³)	ΔCOD	kWh/kgKOİ
1	0,05	2,40	0,25	0,03	0,15	132,0	1,14
2	0,1	8,20	1,00	0,82	4,10	162,1	25,29
3	0,15	9,00	2,00	2,7	13,50	156,0	86,54
4	0,05	4,20	1,00	0,21	1,05	125,7	8,35
5	0,1	11,1	2,00	2,22	11,10	137,2	80,90
6	0,15	13,3	0,25	0,50	2,49	124,8	19,98
7	0,05	4	2,00	0,40	2,00	138,0	14,49
8	0,1	9,2	0,25	0,23	1,15	130,7	8,80
9	0,15	12,9	1,00	1,93	9,68	145,8	66,36
Deney	0,1	8,2	1,00	0,82	4,10	163,4	25,09

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Yapılan çalışmada, peroksi-koagülasyon prosesinde maksimum KOİ ve renk giderimini bulabilmek için sistemi etkileyen faktörleri optimize etmek amacıyla L9 (OA) ile Taguchi deneysel tasarımı kullanılmıştır. Tasarım parametrelerinin optimum koşulları başlangıç pH'ı (pH 3), akım (100mA) ve reaksiyon süresi (60 dakika) olarak belirlenmiştir. Deneysel %KOİ giderim verimliliği %95 ve tahmin edilen %KOİ giderim verimliliği %92,81 olarak bulunmuştur. Optimum koşullar için tahmin ve deneysel veriler birbiriyle son derece uyumluydu. Laboratuvar ölçekli peroksi-koagülasyon prosesinin enerji tüketimi optimum koşullarda 25,09kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada Taguchi deneysel tasarım tekniğinin, az sayıda deneysel çalışma ile kısa sürede etkili olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanarak uygulanan peroksi-koagülasyon prosesinin karışık boyalı atıksulardan renk ve KOİ gideriminde etkin olduğunu doğrulamaktadır.

oksi-koagülasyon prosesinin karışık boyalı atıksulardan renk ve KOİ gideriminde etkin olduğunu doğrulamaktadır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma için laboratuvar altyapısını kullanmama izin veren Sinop Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim, Makalemin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Bhagawati, P. B., & Shivayogimath, C. B. (2021). Electrochemical technique for paper mill effluent degradation using concentric aluminum tube electrodes (CATE). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 553-564. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00627-8>
- Davila, J. A., Machuca, F., & Marrianga, N. (2011). Treatment of vinasses by electrocoagulation–electroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*, 56(22), 7433-7436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.07.015>
- do Vale-Júnior. E., da Silva. D. R., Fajardo. A. S., & Martínez-Huitle. C. A. (2018). Treatment of an azo dye effluent by peroxi-coagulation and its comparison to traditional electrochemical advanced processes. *Chemosphere*, 204, 548-555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.007>
- Nidheesh, P. V. (2018). Removal of organic pollutants by peroxicoagulation. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1283-1292. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0752-5>
- Ghanbari. F., & Moradi. M. (2015). A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.018>
- Kumar. A., Nidheesh. P. V., & Kumar. M. S. (2018). Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. *Chemosphere*, 205, 587-593. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.141>
- Mythilishri. R., Kamalakannan. V. P., Saravanathamizhan. R., & Balasubramanian. N. (2021). Kinetic and residence time distribution modeling of tubular electrochemical reactor: analysis of results using Taguchi method. *Water Practice and Technology*, 16(1), 108-116. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.101>
- Nayebi. B., Ghalebizade. M., & Niavol. K. P. (2021). Removal of Acid Red 131 by Peroxi-Coagulation Using Stainless Steel and Aluminum Electrodes: a Comparative Study. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(4), 201-211. <https://doi.org/10.1007/s41101-021-00114-z>
- Nidheesh. P. V., Zhou. M., & Oturan. M. A. (2018). An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 197, 210-227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.195>
- Salari, D., Niaei, A., Khataee, A., & Zarei, M. (2009). Electrochemical treatment of dye solution containing CI Basic Yellow 2 by the peroxi-coagulation method and modeling of experimental results by artificial neural networks. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 629(1-2), 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.02.002>
- Pekey. H. (2016). Evaluation of electrochemical peroxidation (ECP) process variables for removal of co-complex dye using a central composite design. *Desalination and Water Treatment*, 57(21), 9845-9858. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1033466>
- Rajkumar. D., & Palanivelu. K. (2004). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of hazardous materials*, 113(1-3), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.039>
- Ren, G., Zhou, M., Su, P., Liang, L., Yang, W., & Mousset, E. (2018). Highly energy-efficient removal of acrylonitrile by peroxi-coagulation with modified graphite felt cathode: influence factors, possible mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 343, 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.115>
- Ren. G., Zhou. M., Zhang. Q., Xu. X., Li. Y., Su. P., ... & Bouzek. K. (2019). Cost-efficient improvement of coking wastewater biodegradability by multi-stages flow through peroxi-coagulation under low current load. *Water research*, 154, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.013>

- Rodríguez-Narváez, O. M., Picos, A. R., Bravo-Yumi, N., Pacheco-Alvarez, M., Martínez-Huitile, C. A., & Peralta-Hernández, J. M. (2021). Electrochemical oxidation technology to treat textile wastewaters. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29, 100806.
- Venu. D., Gandhimathi. R., Nidheesh. P. V., & Ramesh. S. T. (2016). Effect of solution pH on leachate treatment mechanism of peroxicoagulation process. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 20(3), 06016001.
- Zarei. M., Niaei. A., Salari. D., & Khataee. A. R. (2010). Removal of four dyes from aqueous medium by the peroxi-coagulation method using carbon nanotube–PTFE cathode and neural network modeling. *Journal of electroanalytical chemistry*, 639(1-2), 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.12.005>
- Zhou. X., Hou. Z., Lv. L., Song. J., & Yin. Z. (2020). Electro-Fenton with peroxi-coagulation as a feasible pre-treatment for high-strength refractory coke plant wastewater: Parameters optimization, removal behavior and kinetics analysis. *Chemosphere*, 238, 124649. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.12.005>