

Alüminyum elektrotun farklı bağlanma şekillerinin elektrokoagülasyon yöntemiyle çamaşırhane atıksuyuna uygulanması

Application of various aluminum electrode connection methods to laundry wastewater via electrocoagulation

Hatice KURTKULAK^{1*} , Sevil VELİ² 

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.

haticekurtkulak@gmail.com

²Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.

sevilv@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.09.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.11.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.43995

Kabul Tarihi/Accepted: 27.12.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada alüminyum elektrotun farklı bağlanma şekilleri kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile çamaşırhane atıksuyunun arıtımı incelenmiştir. Çamaşır yıkama suları belirli oranlarda (ön yıkama, ana yıkama ve durulama sonrası atıksular 1:1:1,5 oranında) karıştırılarak atıksuyun karakterizasyonu yapılmıştır. Anot ve katot olarak kullanılan alüminyum elektrotun farklı bağlanma şekillerinde, monopolar paralel (MP-P), monopolar seri (MP-S) ve bipolar paralel (BP-P) ile arıtım gerçekleştirilmiştir. Her bir bağlanma şekillerinde pH, akım yoğunluğu ve süre gibi proses değişkenlerinin MBAS, KOİ ve bulanıklık giderimi üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan deneylerde maksimum giderim verimi KOİ, MBAS, bulanıklık için sırasıyla; %80, %97, %97 değerleri ile MP-P bağlanma şeklinde pH 5.5 değerinde 15 dk süre ve 5 mA/cm² akım yoğunluğunda elde edilmiştir. Monopolar paralel bağlantı şekli ile çalışılan sistemde optimum giderim koşulları pH 5.5, süre 15 dk, akım yoğunluğu 5 mA/cm², sıcaklık 25 °C ve karıştırma hızı 200 rpm bulunmuştur. Optimum giderim verimleri ise MBAS, KOİ, bulanıklık için sırasıyla; %97, %80, %96 değerleri tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çamaşırhane atıksuyu, Elektrokoagülasyon, Monopolar paralel, Alüminyum elektrot, Anyonik yüzey aktif madde giderimi.

Abstract

In this work, various bonding techniques for the aluminum electrode were used to explore the electrocoagulation method for treating laundry wastewater. By combining the laundry water in specific ratios (1:1:1,5 ratio of the wastewater after prewash, main wash, and rinsing), the wastewater was characterized. Aluminum electrodes were employed as the anode and cathode, and purification was conducted using monopolar parallel (MP-P), monopolar series (MP-S), and bipolar parallel (BP-P) in various connection configurations. For each bonding form, the impacts of process variables like pH, current density, and time on COD, MBAS, and turbidity removal were examined. In the experiments, the maximum removal efficiencies for COD, MBAS, and turbidity, respectively, were obtained in the form of MP-P binding, at pH 5.5 for 15 minutes and at a current density of 5 mA/cm². The corresponding values were 80%, 97%, and 97%, respectively. The optimum removal conditions in the system examined with a monopolar parallel connection were pH 5.5, duration 15 minutes, current density 5 mA/cm², temperature 25 °C and stirring speed 200 rpm. The optimal removal efficiencies for MBAS, COD, and turbidity were determined to be 97%, 80%, and 96%, respectively.

Keywords: Laundry wastewater, Electrocoagulation, Monopolar parallel, Aluminum electrode, Anionic surfactant removal.

1 Giriş

Evsel, endüstriyel ve hastane çamaşırhane atıksuları arıtılabilen, geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilen atıksu kaynaklarıdır [1]. Çamaşırhanelerden gelen atıksular, belediye kanalizasyon deşarjlarının yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır [2]. Endüstriyel çamaşırhanelerde günde ortalama 400 m³ atıksu üretilmektedir ve 1 kg çamaşır yıkamak için yaklaşık 15 L su kullanılmaktadır [3]. Suyun azalması ile karşı karşıya kalındığında dikkate alınabilecek yöntemlerden bazıları su tasarrufu, geri dönüşüm ve suyun arıtımıdır. Bunlardan suyun geri dönüşümü, atıksu arıtım tesisinde atıksu arıtımından daha düşük maliyeti nedeniyle diğer iki yöntemden çok daha etkindir [4]. Çamaşır atıksuları; organik (yağ, gres, sıvı yağ, sabunlar, deterjanlar, klorlu ve biyolojik maddeler) ve inorganik (metal iyonları ve partikülleri, ağır metaller, kum ve toprak tozları) ve bunların arıtılmasını zorlaştıran maddeleri içermektedir. Tipik olarak, sırasıyla 5000, 1300 ve 1000 ppm'lik bir kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve toplam katı madde (TSS) seviyelerine sahiptirler [2].

Genel olarak, çamaşır atıksuyunun bileşimi ticari kaynaklar ve ev kaynakları arasında farklılık gösterir. Bununla birlikte, çamaşır atıksuyunda yer alan kirleticiler genellikle fosfat, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, yüzey aktif maddeler, yağ-gres, askıda katı maddeler içerir ve bunlar bariz safsızlıklardır. Bunların arasında ana kimyasal madde, kumaşların üzerindeki kirleri çoğunlukla gıda artıkları ve vücut artıklarını temizlemek için kullanılan yüzey aktif maddelerden oluşan deterjandır [5].

Çamaşırhane atıksularında alkalinite, organik yük, renk, askıda katı maddeler ve yüzey aktif maddeleri veren çeşitli kimyasal girdiler kullanılır ve bu atıksular arıtma olmadan deşarj edilirse, su ekosistemlerine zarar vermektedir [6]. Çünkü yüzey aktif maddeler içeren atıksu, kanalizasyonu ve atıksu arıtma tesislerini etkileyen köpük oluşturma potansiyeline de sahiptir [7]. Ek olarak, yüzey aktif madde türleri kanserojen yan ürünler üretir, su ortamında toksiktirler, balıklarda solunum problemlerine ve genetik mutasyona neden olabilmektedirler [8].

Çamaşır atıksuyu için en yaygın olarak kullanılan arıtma yöntemleri; pıhtılaşma, yüzdürme ve kimyasal oksidasyon veya bunların kombinasyonları gibi geleneksel işlemlerdir. Ancak bunlar, dışarı için çevresel düzenlemelere göre yüzey aktif maddeleri, bulanıklığı ve KOİ'yi gidermek için yetersiz kalmaktadır [9]. Çamaşır atıksuyunun arıtılmasına yönelik geleneksel yöntemler, biyolojik, fiziksel ve kimyasal yöntemlerin çeşitli kombinasyonlarından oluşur. Bu tür atıksuyun bileşiminin büyük değişkenliğinden dolayı, bu geleneksel yöntemlerin çoğu, yüksek içerikli kirletici maddelerin aynı anda giderilmesi için yetersiz hale gelmektedir. Çamaşır atıksuyunu arıtmak için elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon süreci geliştirilmiştir [10]. Elektrokoagülasyon son zamanlarda çok yönlülüğü ve çevresel uyumluluğu nedeniyle endüstriyel atıksuların arıtılmasında potansiyel bir teknik olarak dikkat çekmiştir [11]. Elektrokoagülasyon, alüminyum veya demir elektrotlardan alüminyum veya demir iyonlarının oluşması ve bunların elektriksel olarak çözülmesiyle yerinde pıhtılaştırıcıların üretilmesini içerir. Metal iyonların üretimi anotta gerçekleşir, hidrojen gazı katottan salınır. Hidrojen gazı, floklanmış partikülleri sudan ayırmaya da yardımcı olacaktır. Bu işleme bazen elektroflokülasyon denir. Elektrotlar monopolar veya bipolar modda düzenlenebilir. Malzemeler, alüminyum veya demir plaka formunda veya çelik olabilir [12].

Elektrokoagülasyon (EK) etkili bir tekniktir, çünkü metal hidroksitler pıhtılaştırıcı olarak kullanıldığında ön-çöktürülmüş hidroksitler yerine hidroksitin mineral yüzeylere adsorpsiyonu 100 kat daha fazladır. EK tarafından oluşturulan floklar nispeten daha az bağlı su içeren ve daha kararlı oldukları için nispeten büyük olduğundan, filtreleme ile kolayca çıkarılabilirler. Uygun maliyetlidir ve kolayca kullanılabilir. EK basit ekipmanlara ihtiyaç duyar ve her türlü atıksu arıtma kapasitesi için tasarlanabilir. Bu işlemde kimyasal madde ilavesine gerek olmadığından, ikincil kirleticilerin oluşma olasılığını azaltır. Elektron ana reaktif olduğundan ve reaktiflerin/kimyasalların eklenmesini gerektirmediği için çevre dostu bir tekniktir. Bu, çamur oluşumunu büyük ölçüde en aza indirecek ve sonunda geleneksel atıksu arıtma yöntemlerinde pıhtılaştırıcı olarak kullanılan bazı zararlı kimyasalları ortadan kaldıracaktır. Elektrokoagülasyon işlemi, küçük kolloidal partikülleri etkili bir şekilde dengeseleştirir ve diğer işlemlere kıyasla daha az miktarda çamur üretir [11].

EK yönteminde tuzların varlığı nedeniyle daha iyi iletkenlik sağlanmakta ve bu nedenle enerji tüketimi azaltılabilir ve hücre akımı veya voltajı değiştirilerek reaksiyon koşulları kolayca kontrol edilebilir [2].

Elektrokoagülasyon yöntemi atıksu arıtımında en yaygın olarak kullanılan elektrokimyasal yöntemdir. Elektrokoagülasyonda suyun akışı genellikle plaka elektrotların arasında olup, elektrik akımı akış yönüne dik bir yönde olacak şekilde dikey olarak düzenlenir. Böylece, elektrokoagülasyon sırasında elektrot işlemleri; karşılıklı olan anot elektrotlarda hidroksit koagülantın metalin anodik çözünmesi sırasında oluşması ve kullanılan katot üzerinde hidrojen gazı üretimi ile koagüle edilmiş yabancı maddelerin yüzdürülmesi ile sağlanmaktadır [13]. Endüstriyel atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımında çok sayıda yayın yapılmıştır. Geçtiğimiz 20 yıl içinde, genel olarak laboratuvarında elektrokimyasal yöntemler ve özellikle elektrokoagülasyon yoluyla çok çeşitli atıksuların arıtımına yönelik çalışma bulunmaktadır. Buna rağmen sadece birkaçı çamaşırhane atıksularının arıtımıyla ilgilidir [11],[14]-[17].

Çamaşırhane atıksularının arıtımı konusunda incelenen çalışmalarda elektrokoagülasyon yönteminde alüminyum elektrotun ve elektrot bağlantı şekillerinin uygulanması konusunda araştırmaların yetersiz olduğu dikkat çekmiştir. Elektrokoagülasyon yönteminin endüstriyel atıksuların arıtımında etkin giderim yüzdesi vermesi ve uygulama kolaylığının yanı sıra reaksiyon sonunda daha az çamur oluşumu sağlaması bu yöntemi cazip hale getirmiştir. Bu nedenlerle çalışmanın amacı, EK yönteminde elektrotların farklı bağlanma şekillerinin çamaşırhane atıksuyuna uygulanmasının etkisinin araştırılması olmuştur. Aynı zamanda elektrokoagülasyon yöntemine etki eden parametreler (pH, süre, akım yoğunluğu, sıcaklık ve karıştırma hızı) incelenerek optimum koşulların belirlenmesi ve belirlenen şartlarda uygulanan deneysel çalışmalar sonucunda çıkış suyunda KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim yüzdesi üzerinden çamaşırhane atıksuyunun arıtımı araştırılarak, optimum koşulların belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma başlangıç pH, proses sırasındaki pH değişimleri, süre, akım yoğunluğu dahil olmak üzere farklı çalışma koşullarının etkilerinin değerlendirilmesini içermektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan kimyasallar

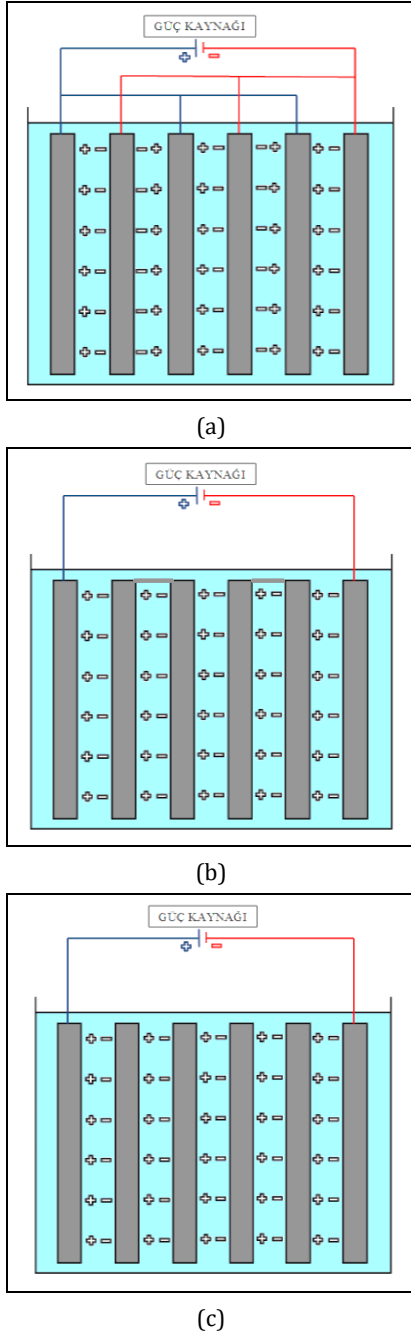
Çalışmada pH ayarlama işleminde 1 N NaOH ve 1 N H₂SO₄ kullanılmıştır. Metilen mavisi aktif madde tayininde NaH₂PO₄.H₂O, CHCl₃, metilen mavisi, H₂SO₄, C₂₀H₁₄O₄ fenoltalein, C₂H₅OH etanol ve cam yünü kullanılmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı tayininde (NH₄)₂Fe(SO₄)₂.6H₂O, Ag₂SO₄, HgSO₄, H₂SO₄, K₂Cr₂O₇ ve ferroin indikatörü kullanılmıştır. Kullanılan tüm kimyasallar yüksek saflığa sahip (≥%99.0) olup, Merck markadır.

2.2 Atıksu özellikleri

Çalışmada kullanılan çamaşırhane atıksuyu Eczacıbaşı Girişim'e ait çamaşırhane yıkama sularından temin edilmiştir. Çamaşırhane atıksuyu karakterizasyonu; pH 9.58, iletkenlik 1128 µS/cm, sıcaklık 25 °C, bulanıklık 28 NTU, anyonik yüzey aktif madde 34 mg/L, KOİ 320 mg/L bulunmuştur.

2.3 Yöntem

Elektrokoagülasyon ile arıtım yöntemi için; (MP-P), (MP-S) ve (BP-P) olmak üzere farklı bağlantı şekillerinde dizayn edilmiştir. Bu bağlantı şekillerinde süre, akım yoğunlukları ve pH'nın etkisi incelenmiştir. Reaksiyon süresi 3, 5, 7, 10, 15, 20 ve 30 dk'lık periyotlarda, 3.75, 5, 7.5, 10 mA/cm² akım yoğunluklarında, pH ise 3, 5.5, 7 ve 9'da, 200 rpm karıştırma hızında çalışılmıştır. MP-S bağlantı modunda tüm deneylerde 1.5 g NaCl ve BP-P bağlantı modunda ise 2 g NaCl reaktör içine eklenmiştir. Her bir deney seti için 500 mL çamaşırhane atıksuyu kullanılmıştır. Çamaşırhanede anyonik yüzey aktif madde içeren deterjan kullanılmıştır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda anyonik yüzey aktif madde içeriğini belirlemek için MBAS (methylene blue active substance) analiz yöntemi kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon ile arıtım yöntemi için 3 anot ve 3 katot olmak üzere 6 tane alüminyum elektrot kullanılmış ve elektrotlar arası mesafe 1 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Farklı bağlantı konfigürasyonlarına ait reaktör dizaynları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. EK reaktörü. (a): Monopolar paralel. (b): Monopolar Seri ve (c): Bipolar paralel bağlantı konfigürasyonları.

Figure 1. EK reactor connection configurations. (a): Bipolar Parallel. (b): Monopolar series; and (c): Monopolar parallel.

%99.52 saflıkta alüminyum elektrotlar kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon reaktör en, boy ve yükseklik olarak sırasıyla 11 cm, 11 cm, 11 cm boyutunda tasarlanmıştır. Manyetik karıştırıcı üzerine kurulan reaktöre, karışımı sağlamak amacıyla balık eklenmiştir. Deney süresi sonunda kaba filtre kâğıdından süzülen numunelerin analizleri Standart yöntemlere uygun olarak yapılmıştır. Çözeltilerin ve çamaşırhane atıksuyu pH değerlerinin ölçümü Thermo Scientific ORION STAR A111 pH metre ile okunmuştur. Pasivizasyonu önlemek amacıyla elektrotlar her deney öncesinde zımparalanmış ve deneyler arasında seyreltik (%1) HCl'de 8 sa bekletilip saf su ile yıkanmıştır [18]. KOİ, Metilen

mavisi aktif maddesi yöntemi ile anyonik yüzey aktif madde (MBAS) ve bulanıklık giderim verimliliği, %Gv Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$Gv (\%) = \frac{[C_i - C_n]}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

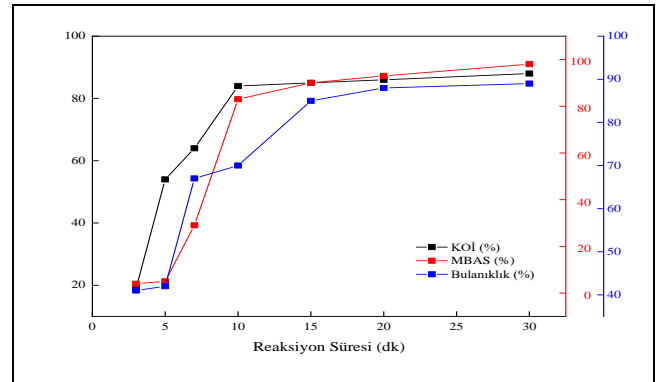
Burada; C_i (mg/L) başlangıç KOİ, MBAS veya bulanıklık konsantrasyonu, ve C_n (mg/L) ilgili nihai konsantrasyondur.

3 Deneysel bulgular

Çalışmada farklı bağlantı şekillerinin proses verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elektrokoagülasyon ile arıtım yöntemi için en verimli bağlantı şeklinin belirlenmesinde; (MP-P), (MP-S) ve (BP-P) olmak üzere üç bağlantı şekillerinde dizayn edilmiştir. Tüm deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar 3 tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar bu değerlerin ortalaması alınarak verilmiştir.

3.1 Monopolar paralel bağlantı şekli ile çalışmalar

İncelenen literatür ışığında ve ön deneyler yapılarak 5 mA/cm^2 akım yoğunluğu değerinde çalışmalar başlatılmıştır. Ayrıca, karıştırma hızı parametresi proses verimi etkileyen parametrelerdendir. Farklı karıştırma hızlarında ön deneysel çalışmalarda belirlenen optimum değerde (200 rpm) deneylere devam edilmiştir. MP-P bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri üzerindeki etkisi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. MP-P bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 5 mA/cm^2 ; T: 25 °C).

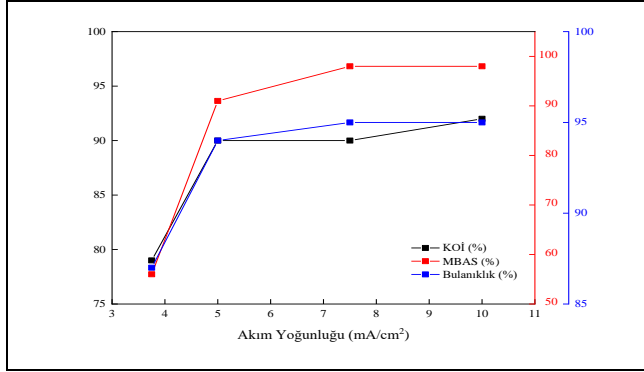
Figure 2. Effect of reaction time on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-P connection (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 5 mA/cm^2 ; T: 25 °C).

Şekil 2'e göre; ilk 10 dk.'da MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %85, %83 ve %70 elde edilmiştir. 15 dk.'da ise giderim verimleri sırasıyla; %90, %85 ve %85'e ulaşmıştır. 15. dk. ve sonrasında ise giderim veriminde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu nedenle MP-P bağlantı şeklinde optimum reaksiyon süresi 15 dk. olarak tespit edilmiştir. MP-P bağlantı şekli ile reaksiyon süresi etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır.

Toplamda 7 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 66.85714, Standart sapma değeri 24.11382, toplam 468, minimum değer 19, ortanca değer 80 ve maksimum değer 85 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 7 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 80.28571, Standart sapma 17.58517, toplam 562, minimum değer 45, ortanca değer 83 ve maksimum değer 98 bulunmuştur.

Bulanıklık için ise toplamda 7 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 68.85714, Standart sapma 20.55423, toplam 482, minimum değer 41, ortanca değer 70 ve maksimum değer 89 olarak hesaplanmıştır.

Akım yoğunluğunun MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri üzerindeki etkisi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. MP-P bağlantı şeklinde akım yoğunluğunun KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk; T: 25 °C).

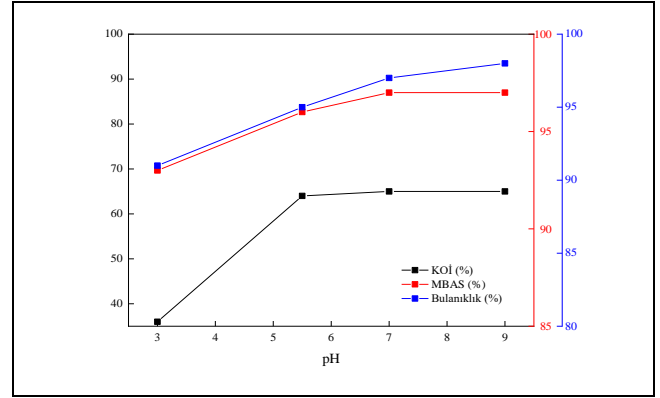
Figure 3. Effect of current density on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-P connection (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 15 min; T: 25 °C).

Şekil 3'te görüldüğü gibi; akım yoğunluğunun artması daha yüksek giderim yüzdesi sağlamıştır. MBAS'ın 5 mA/cm² akım yoğunluğu ile %93 giderim verimi elde edilmiştir. Çalışılan akım yoğunluklarına göre KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %90 ve %94 bulunmuştur. Akım yoğunluğundaki artışın giderim verimi üzerinde olumlu etki yaptığı birçok çalışmada görülmüştür. Akım yoğunluğundaki artışa paralel olarak çıkış suyunda pH da artmıştır [19],[20].

MP-P bağlantı şekli ile akım yoğunluğu etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 80.25, Standart sapma değeri 1.25831, toplam 321, minimum değer 79, ortanca değer 80 ve maksimum değer 82 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 91.75, Standart sapma 8.5, toplam 367, minimum değer 80, ortanca değer 94.5 ve maksimum değer 98 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 92.75, Standart sapma 3.86221, toplam 371, minimum değer 87, ortanca değer 94.5 ve maksimum değer 95 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4'te pH'nın MBAS, KOİ ve bulanıklık giderimi üzerine etkisi incelenmiştir. pH 5.5 değerinde 15 dk. 5 mA/cm² akım yoğunluğu ve 25 °C sıcaklıkta çalışılmıştır.

Şekil 4'te elektrokoagülasyon ile arıtmada MBAS, KOİ ve bulanıklık gideriminin pH değerleri üzerindeki etkileşimleri verilmiştir. Elektrokimyasal yöntem ile arıtmada pH 5-7'de alüminyum anotların %90 kadarı çözünmektedir [21]. pH 5.5 değerinde MBAS giderim yüzdesinde artış ile birlikte MBAS giderim verimi ortalama %97'e ulaşmıştır. KOİ giderim verimi pH 5.5 değerinde ani bir yükselme ile %80 giderim verimi elde edilmiştir.



Şekil 4. MP-P bağlantı şeklinde pH'nın KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk. 5 mA/cm²; T: 25 °C).

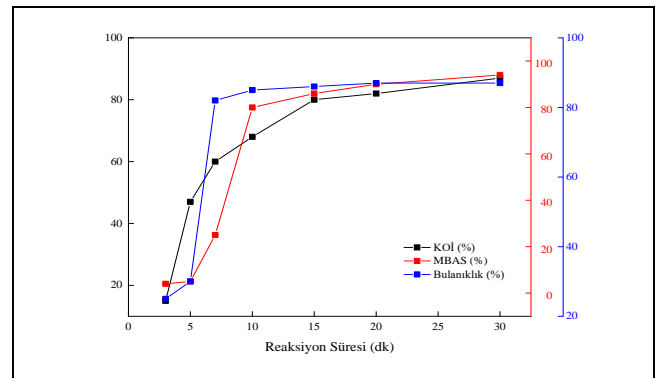
Figure 4. Effect of pH on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-P connection (Mixing speed: 200 rpm; 15 min; 5 mA/cm²; T: 25 °C).

MP-P bağlantı şekli ile pH etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 69.5, Standart sapma değeri 22.35322, toplam 278, minimum değer 36, ortanca değer 80 ve maksimum değer 82 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 95.75, Standart sapma 1.89297, toplam 383, minimum değer 93, ortanca değer 96.5 ve maksimum değer 97 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 95.25, Standart sapma 3.0957, toplam 381, minimum değer 91, ortanca değer 96 ve maksimum değer 98 olarak hesaplanmıştır.

Bulanıklık gideriminde ise pH'nın 5.5 değerinde, atıksudaki bulanıklığın %96 giderimi sağlanmıştır. MP-P bağlantı şeklinde optimum çalışma koşulları, pH: 5.5; 15 dk. 5 mA/cm²; T: 25 °C belirlenmiştir. Bu koşullarda; MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %97, %80 ve %96 bulunmuştur.

3.2 Monopolar seri bağlantı şekli ile çalışmalar

MP-S bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. MP-S bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

Figure 5. Effect of reaction time on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-S connection (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

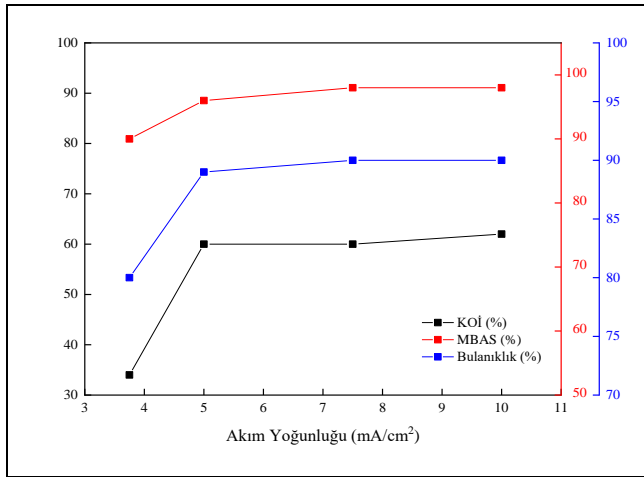
Şekil 5'te MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimliliği ve reaksiyon süresi arasındaki bağımlılığın 15. dk.'dan sonra sabit kaldığı görülmüştür. Bu anlamda MP-P ve MP-S bağlantı şekilleri benzer grafikler göstermiştir. Burada reaksiyon süresi 15 dk. olduğunda MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla %86, %80, %85 bulunmuştur.

MP-S bağlantı şekli ile reaksiyon süresi etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 7 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 62.71429, Standart sapma değeri 25.2307, toplam 439, minimum değer 15, ortanca değer 68 ve maksimum değer 87 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 7 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 72.85714, Standart sapma 20.1033, toplam 510, minimum değer 40, ortanca değer 80 ve maksimum değer 94 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 7 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 62, Standart sapma 24.54927, toplam 434, minimum değer 25, ortanca değer 69 ve maksimum değer 83 olarak hesaplanmıştır.

Akım yoğunluğunun MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri üzerindeki etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi akım yoğunluğu 5 mA/cm² değerinde maksimum giderim verimlerine ulaşılmıştır.

MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %96, %60 ve %89 elde edilmiştir.

Seri bağlantıda monopolar elektrotlarda her bir elektrot çifti birbirine bağlıdır. Bu bağlantı şeklinde hücre voltajlarının eklenmesi, belirli bir akım için daha yüksek bir potansiyel farkına yol açabilmektedir. Bu da daha yüksek akım yoğunluğu ihtiyacına yol açtığını göstermiştir [11].



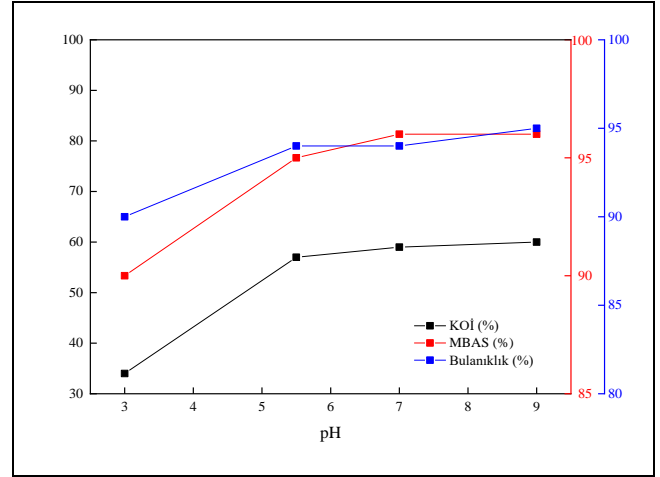
Şekil 6. MP-S bağlantı şeklinde akım yoğunluğunun KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk. T: 25 °C).

Figure 6. Effect of current density on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-S connection (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 15 min; T: 25 °C).

MP-S bağlantı şekli ile akım yoğunluğu etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 54, Standart sapma değeri 13.36663, toplam 216, minimum değer 34, ortanca değer 60 ve maksimum değer 62 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 95.5, Standart sapma 3.78594,

toplam 382, minimum değer 90, ortanca değer 97 ve maksimum değer 98 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 87.25, Standart sapma 4.85627, toplam 349, minimum değer 80, ortanca değer 89.5 ve maksimum değer 90 olarak hesaplanmıştır.

MP-S bağlantı şeklinde pH'nın KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. MP-S bağlantı şeklinde pH'nın KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk. 5 mA/cm² T: 25 °C).

Figure 7. Effect of pH on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in MP-S connection (Mixing speed: 200 rpm; 15 min; 5 mA/cm²; T: 25 °C).

Şekil 7'ye göre; pH 5.5 değerinde her üç parametre için maksimum giderim verimine hemen ulaşmıştır. Aynı pH'da MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimi %94, %57, %94 bulunmuştur. pH 7 değerinde bulanıklık giderim verimi üzerinde bir azalma görülmüştür. Bunun sebebi ise; EK işleminden sonra atıksuların bulanıklığının arttığı gözlemlenebilir. EK işleminden sonra flok oluşumunda yer alan ve dolaylı olarak suyu daha bulanık hale getiren hidroksit oluşumu nedeniyle numunenin bulanıklığı artabilmektedir. EK prosesi ve OH⁻ metal iyonları suda askıda katı maddelerle kompleks yaparlar ve bulanıklık üretirler. Hangi metal kullanılmış olursa olsun, akım yoğunluğu arttıkça bulanıklık değişebilmektedir [20].

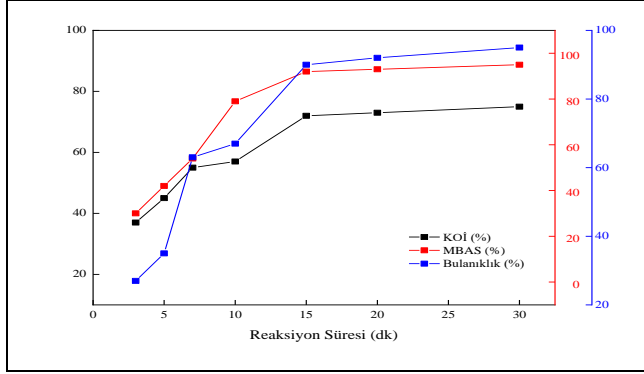
MP-S bağlantı şekli ile pH etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 52.5, Standart sapma değeri 12.39624, toplam 210, minimum değer 34, ortanca değer 58 ve maksimum değer 60 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 94.25, Standart sapma 2.87228, toplam 377, minimum değer 90, ortanca değer 95.5 ve maksimum değer 96 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 93.25, Standart sapma 2.21736, toplam 373, minimum değer 90, ortanca değer 94 ve maksimum değer 95 olarak hesaplanmıştır.

MP-S bağlantı şeklinde optimum çalışma koşulları, pH: 5.5; 15 dk; 5 mA/cm²; T: 25 °C seçilmiştir.

3.3 Bipolar paralel bağlantı şekli ile çalışmalar

BP-P bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'e göre bipolar paralel bağlantı modunda reaksiyon süresinin artmasıyla giderim veriminde artış gözlenmiştir. Reaksiyon süresi 15 dk. olduğunda MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırası ile %98, %72, %95 bulunmuştur.



Şekil 8. BP-P bağlantı şeklinde reaksiyon süresinin KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

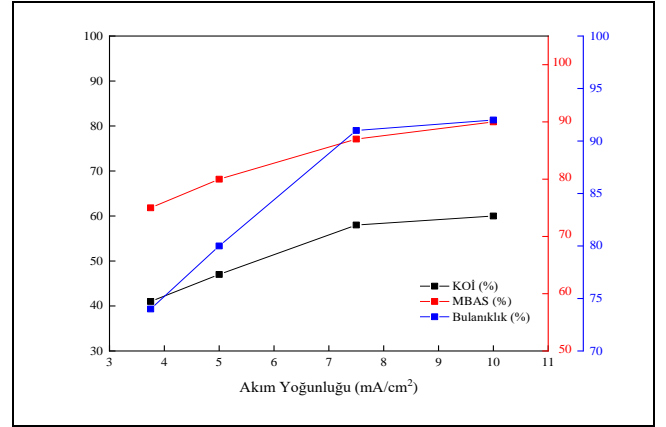
Figure 8. Effect of reaction time on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in BP-P junction (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

BP-P bağlantı şekli ile reaksiyon süresi etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 7 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 59.14286, Standart sapma değeri 14.83721, toplam 414, minimum değer 37, ortanca değer 57 ve maksimum değer 75 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 7 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 69.28571, Standart sapma 26.94262, toplam 485, minimum değer 30, ortanca değer 79 ve maksimum değer 95 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 7 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 67, Standart sapma 27.62245, toplam 469, minimum değer 27, ortanca değer 67 ve maksimum değer 95, olarak hesaplanmıştır.

Belirli reaksiyon süresi ve elektrokoagülasyon işleminin tamamlanmasından sonra pıhtılaşmış türlerin çökmesine izin vermek için sabit bir süre (tutma süresi) boyunca tutulması gerekmektedir. Alıkonma süresi arttıkça kirleticinin uzaklaştırma etkinliği de artmaktadır. Bunun nedeni, alıkonma süresindeki artışla birlikte, tüm pıhtılaşmış türlerin, berrak süpernatant sıvı ve çamur vermek üzere kolayca ayrılıp çökmeleridir [22]. Ancak, optimum reaksiyon süresinden daha fazla bir reaksiyon süresi sağlamak, adsorbe edilen kirletici çözeltiye geri desorbe olurken kirletici giderme verimliliğinin azalmasına neden olabilmektedir [11].

BP-P bağlantı şeklinde akım yoğunluğunun MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi Şekil 9'da verilmiştir.

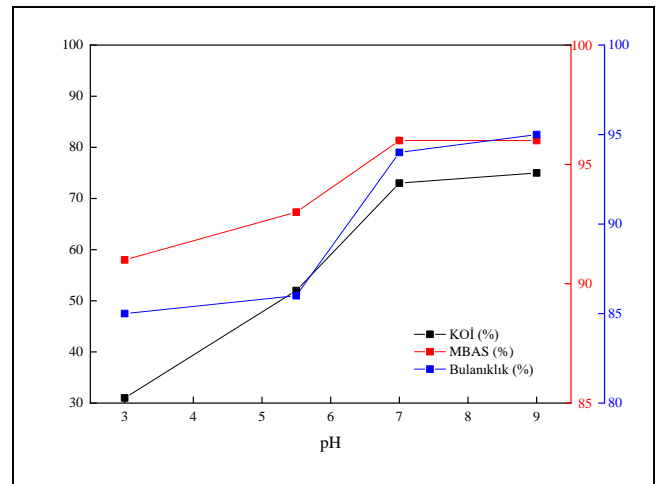
Şekil 9'da MP-P ve MP-S bağlantı şekillerine göre BP-P bağlantı modunda daha yüksek akım yoğunluğunda benzer giderim verimleri elde edilmiştir. Akım yoğunluğu 7.5 mA/cm² değerinde MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %88, %57 ve %92 bulunmuştur. BP-P bağlantı modunda dış elektrotlar güç kaynağına bağlanmaktadır ve burada iç elektrotlar arasında elektrik bağlantısı yoktur. Bu nedenle daha fazla akım ve voltaj ihtiyacı gerektirmektedir [11].



Şekil 9. BP-P bağlantı şeklinde akım yoğunluğunun KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk; T: 25 °C).

Figure 9. Effect of current density on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in BP-P connection (pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 15 min; T: 25 °C).

BP-P bağlantı şekli ile akım yoğunluğu etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 51.5, Standart sapma değeri 9.03696, toplam 206, minimum değer 41, ortanca değer 52.5 ve maksimum değer 60 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 83, Standart sapma 6.78233, toplam 332, minimum değer 75, ortanca değer 83.5 ve maksimum değer 90 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 84.25, Standart sapma 8.73212, toplam 337, minimum değer 74, ortanca değer 85.5 olarak hesaplanmıştır. BP-P bağlantı şeklinde pH'nın MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi Şekil 10'da verilmiştir.



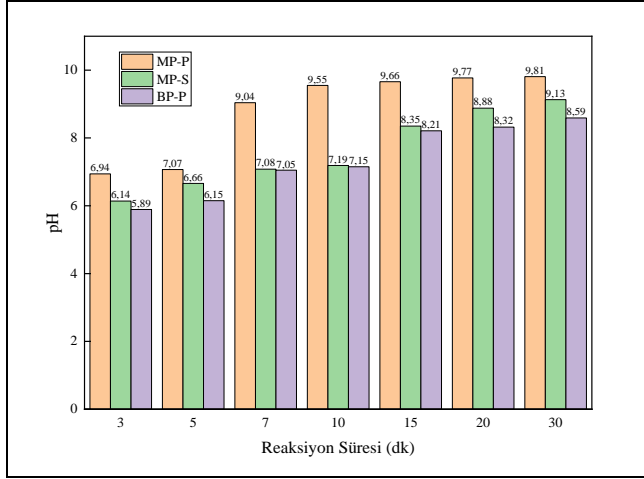
Şekil 10. BP-P bağlantı şeklinde pH'nın KOİ, MBAS ve bulanıklık giderim verimi üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 200 rpm; 15 dk; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

Figure 10. Effect of pH on COD, MBAS and turbidity removal efficiency in BP-P connection form (Mixing speed: 200 rpm; 15 min; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

Şekil 10'a göre pH'nın 5.5 değerinden 7 değerine yükselmesiyle birlikte her üç parametrenin giderim verimi üzerinde artışa yol

açtığı görülmüştür. pH 5.5'dan pH 7'e yükseldiğinde ise MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %93-97, %52-73, %86-94'e varmıştır. BP-P bağlantı şeklinde optimum çalışma koşulları, pH: 7; 15 dk. 7.5 mA/cm²; T: 25 °C olduğu tespit edilmiştir. Bu koşullarda; MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri sırasıyla; %97, %73 ve %94 bulunmuştur.

BP-P bağlantı şekli ile pH etkisinin değerlendirilmesinde KOİ, MBAS ve bulanıklık değerleri için istatistiksel hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 4 set deneysel çalışma sonucunda KOİ için; ortalama değer 57.75, Standart sapma değeri 20.64582, toplam 231, minimum değer 31, ortanca değer 62.5 ve maksimum değer 75 bulunmuştur. MBAS değerlerinin değerlendirilmesinde 4 set deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 94, Standart sapma 2.44949, toplam 376, minimum değer 91, ortanca değer 94.5 ve maksimum değer 96 bulunmuştur. Bulanıklık için ise toplamda 4 deneysel çalışma sonucunda ortalama değer 90, Standart sapma 5.22813, toplam 360, minimum değer 85, ortanca değer 90 ve maksimum değer 95 olarak hesaplanmıştır. MP-P, MP-S ve BP-P bağlantı şekillerinde reaksiyon süresine karşı pH değişimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. MP-P, MP-S ve BP-P bağlantı şekillerinde reaksiyon süresine karşı PH değişimi (Başlangıç pH: 5.5; Karıştırma hızı: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

Figure 11. PH change versus reaction time in MP-P, MP-S ve BP-P connection forms (Initial pH: 5.5; Mixing speed: 200 rpm; 7.5 mA/cm²; T: 25 °C).

Şekil 11'de görüldüğü gibi üç bağlantı şeklinde reaksiyon sonrası pH'da artış görülmüştür. EK prosesinde çözeltinin pH'sı reaksiyon sırasında değişmektedir [20]. Özellikle MP-P bağlantı şeklinde pH'nın reaksiyon sırasında daha fazla arttığı Şekil 11'den görülmekte, bu da ortamda oluşan OH⁻ iyon konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir [23],[24]. İlk pH sadece alüminyum türlerinin varlığını etkilemekle kalmaz, aynı zamanda farklı alüminyum türlerinin varlığında yük nötralizasyonunu ve adsorpsiyonda giderim verimini de olumlu yönde etkilemektedir. pH, zeta potansiyelini dolayısıyla da oluşan flokların boyutunu etkilemektedir. Zeta potansiyelinin sıfıra yaklaşması ile flok boyutunun artması ve flok büyüme oranının daha hızlı olması beklenen bir durumdur [25],[26].

MP-P, MP-S ve BP-P bağlantı şekli ile reaksiyon süresi arasındaki etkileşim grafiği istatistiksel değerleri 7 set deneysel çalışma sonuçlarına göre hesaplanmıştır. MP-P için; ortalama değer 8.83429, Standart sapma değeri 1.27573, toplam 61.84,

minimum değer 6.94, ortanca değer 9.55 ve maksimum değer 9.81 bulunmuştur. MP-S için, ortalama değer 7.63286, Standart sapma değeri 1.15383, toplam 53.43, minimum değer 6.14, ortanca değer 7.19 ve maksimum değer 9.13 bulunmuştur. BP-P için; ortalama değer 7.33714, Standart sapma değeri 1.07382, toplam 51.36, minimum değer 5.89, ortanca değer 7.15 ve maksimum değer 8.59 olarak hesaplanmıştır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada çamaşırhane atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı amaçlanmıştır. Elektrokoagülasyon yönteminde kullanılan alüminyum elektrotların MP-P, MP-S ve BP-P bağlantı şekillerinin giderim yüzdesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Giderim yüzdeleri MBAS, KOİ ve bulanıklık parametreleri için takip edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve tartışma ışığında; her üç elektrot bağlantı konfigürasyonu incelendiğinde çamaşırhane atıksuyunun arıtımı için 15 dakika sürede optimum MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim verimleri elde edilmiştir. MP-P ve MP-S için benzer sonuçlar elde edilirken BP-P bağlantı sonuçlarında KOİ giderim verimi nispeten düşük elde edilmiştir. MP-P için optimum koşullar pH: 5.5, 15 dk, 5 mA/cm², 25 °C ve 200 rpm karıştırma hızında elde edilmiştir. MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim yüzdeleri sırasıyla; %97, %80, %96 bulunmuştur. MP-S bağlantı şekli uygulanan çalışmalarda belirlenen optimum koşullar pH: 5.5, 15 dk. 5 mA/cm², 25 °C ve 200 rpm bulunmuştur. MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim yüzdeleri sırasıyla; %96, %55, %94 elde edilmiştir. BP-P bağlantı şekli ile dizayn edilen çalışma sonucunda optimum koşullar pH: 7, 15 dk, 7.5 mA/cm², 25 °C ve 200 rpm olarak belirlenmiştir. MBAS, KOİ ve bulanıklık giderim yüzdeleri sırasıyla; %97, %73, %94 elde edilmiştir. Elektrot bağlantı konfigürasyonlarının farklılığı MBAS ve KOİ gideriminde etkili iken; bulanıklık gideriminde ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Alüminyum elektrotlarla yapılan çalışmada her üç bağlantı şeklinde de 15 dk.'lık bir reaksiyon süresinin uygun olduğu görülmüştür. MP-P bağlantılı elektrotlar ile çalışılan konfigürasyonda nispeten daha az reaksiyon süresi ihtiyacı, pH'nın nötr ve bazik seviyelerde izlemesi, akım yoğunluğunun diğer bağlantı şekillerine göre daha az enerji ihtiyacı gerektirmesi ve ek kimyasal eklenmemesi gibi avantajları sayesinde bu sistemi cazip hale getirmiştir. Literatürde çamaşırhane atıksularının arıtımı konusunda yeterli araştırmanın olmadığı dikkat çekmektedir. Elektrokoagülasyon yöntemi ile çamaşırhane atıksularının arıtımında MP-P bağlantı şekli ile uygulanan alüminyum elektrotların MBAS, KOİ ve bulanıklık gideriminde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda çalışmamızın çamaşırhane atıksularının arıtımında elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımda farklı bağlantı şekillerinin uygulanabilirliği konusunda literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5 Conclusions

The goal of this study was to remediate laundry wastewater using an electrocoagulation approach. The impact of aluminum electrode connection types MP-P, MP-S, and BP-P employed in the electrocoagulation technique on the elimination % was evaluated. MBAS, COD, and turbidity removal percentages were all monitored. In view of the experimental findings and discussion, MBAS, COD, and turbidity removal efficiencies for the three electrode connection configurations were equivalent for MP-P and MP-S within 15 minutes, however the COD removal efficiency was significantly low in the BP-P connection results. The following parameters were found to be ideal for MP-P: pH 5.5, 15 min, 5 mA/cm², 25 °C, and 200 rpm mixing

speed. The percentages of MBAS, COD, and turbidity removal were determined to be 97%, 80%, and 96%, respectively. The following parameters were shown to be ideal in investigations employing the MP-S connection type: pH: 5.5, 15 min, 5 mA/cm², 25 °C, and 200 rpm. The percentages of MBAS, COD, and turbidity reduction were 96%, 55%, and 94%, respectively. The BP-P connection type study design led to the identification of the ideal parameters, which were pH 7, 15 min, 7.5 mA/cm², 25 °C, and 200 rpm. The percentages of MBAS, COD, and turbidity reduction were 97%, 73%, and 94%, respectively. While different electrode connection configurations are useful for removing MBAS and COD, it was found that turbidity removal was only minimally effective. A 15 minute response time was discovered to be suitable for all three connection options in the aluminum electrode investigation. Due to its benefits, which include requiring comparatively less reaction time when working with MP-P connected electrodes, monitoring pH at neutral and basic levels, requiring less energy for current density compared to other connection types, and requiring no additional chemical addition, this system has become appealing. It is worth noting that there is not enough study on the treatment of laundry wastewater in the literature. Aluminum electrodes used with the MP-P connection technique in the electrocoagulation treatment of laundry wastewater have been found to be successful in reducing MBAS, COD, and turbidity. In this regard, it is hoped that it will contribute to the literature on the suitability of various connection types in the electrocoagulation treatment of laundry wastewater.

6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Hatice KURTKULAK, deney düzeneklerinin tasarımının yapılması, laboratuvar çalışmalarının yapılması, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, veri toplama, grafiklerin çizimi, yazım ve yorumlanması başlıklarında; Sevil VELİ, kaynak ve malzemelerin temini, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur". "Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

8 Kaynaklar

- [1] Pakula C, Stammering R. "Electricity and water consumption for laundry washing by washing machine worldwide". *Journal of Energy Efficiency*, 3(4), 365-82, 2010.
- [2] Janpoor F, Torabian A, Khatibikamal V. "Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation". *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(8), 1113-1120, 2011.
- [3] Ciabattia I, Cesaro F, Faralli L, Fatarella E, Tognotti F. "Demonstration of a treatment system for purification and reuse of laundry wastewater." *Journal of Desalination*, 245(1-3),451-59, 2009.
- [4] Manouchehri M, Kargari A. "Water recovery from laundry wastewater by the cross flow microfiltration process: a strategy for water recycling in residential buildings." *Journal of Cleaner Production*, 168, 227-38, 2017.
- [5] Ramcharan T, Bissessur A. "Analysis of linear alkylbenzene sulfonate in laundry wastewater by hplc-uv and uv-vis spectrophotometry". *Journal of Surfactants and Detergents*, 19(1), 209-218, 2016.
- [6] Huang AK., Veit MT, Juchen PT, Gonçalves GDC, Palácio SM, Cardoso CDO. "Sequential process of coagulation/flocculation/sedimentation-adsorption-microfiltration for laundry effluent treatment". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 1-7, 2019.
- [7] Centurion VB, Moura AGL, Delforno TP, Okada DY, Dos Santos VP, Varesche MBA, Oliveira VM. "Anaerobic co-digestion of commercial laundry wastewater and domestic sewage in a pilot-scale egss reactor: the influence of surfactant concentration on microbial diversity". *International Biodeterioration & Biodegradation*, 127, 77-86, 2018.
- [8] Khosravanipour M, Benguit AT, Carabin A, Drogui P, Brien E. "Development of combined membrane filtration, electrochemical technologies, and adsorption processes for treatment and reuse of laundry wastewater and removal of nonylphenol ethoxylates as surfactants". *Journal of Water Process Engineering*, 28, 277-292, 2019.
- [9] Turkyay O, Barışçi S, Sillanpää M. "E-peroxone process for the treatment of laundry wastewater: a case study". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4282-4290, 2017.
- [10] Emamjomeh MM, Sivakumar M. "Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes". *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663-1679, 2009.
- [11] Khandegar V, Saroha AK. "Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent-a review". *Journal of Environmental Management*, 128, 949-963, 2013.
- [12] Chen G. "Electrochemical technologies in wastewater treatment". *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41, 2004.
- [13] Mollah MYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. "Electrocoagulation (EC)- science and applications". *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41, 2001.
- [14] Ge J, Qu J, Lei P, Liu H. "New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater". *Separation and Purification Technology*, 36(1), 33-39, 2004.
- [15] Wang, CT, Chou WL, Kuo YM. "Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electroflotation". *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 81-86, 2009.
- [16] Tripathi SK, Tyagi R, Nandi BK. "Removal of residual surfactants from laundry wastewater: a review". *Journal of Dispersion Science and Technology*, 34(11), 1526-1534, 2013.
- [17] Dimoglo A, Elibol S, Dinç P, Gökmen K, Erdoğan H. "Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse". *Journal of Water Process Engineering*, 31, 1-8, 2019.
- [18] Veli S, Özbay B, Özbay İ, Arslan A, Çebi E. "Elektrokoagülasyon prosesi ile gıda endüstrisi atıksuyunun arıtımında optimum koşulların belirlenmesi". *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22(2), 932-936, 2018.

- [19] Zhu M, Yin X, Liu Q, Feng Z. "Optimization and modelling using the response surface methodology for methylene blue removal by electrocoagulation/hazelnut shell adsorption coupling in a batch system". *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(3), 2493-2502, 2020.
- [20] Sher F, Iqbal SZ, Rasheed T, Hanif K, Sulejmanović J, Zafar F, Lima EC. "Coupling of electrocoagulation and powder activated carbon for the treatment of sustainable wastewater". *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 48505-48516, 2021.
- [21] Eryuruk K, Tezcan Un U, Bakır Oğutveren U. "Electrochemical treatment of wastewaters from poultry slaughtering and processing by using iron electrodes". *Journal of Cleaner Production*, 172, 1089-1095, 2018.
- [22] Titchou FE, Zazou H, Afanga H, El Gaayda J, Akbour RA, Hamdani M. "Removal of persistent organic pollutants (pops) from water and wastewater by adsorption and electrocoagulation process". *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 1-23, 2021.
- [23] Golder AK, Samanta AN, Ray S. "Removal of trivalent chromium by electrocoagulation". *Separation and Purification Technology*, 53(1), 33-41, 2007.
- [24] Tulum Ş, Bilgin M. "Sızıntı sularında çeşitli kirleticilerin elektrokoagülasyon yöntemiyle gideriminin incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(9), 1055-1058, 2017.
- [25] Barhoumi A, Ncib S, Chibani A, Brahmi K, Bouguerra W, Elaloui E. "High-rate humic acid removal from cellulose and paper industry wastewater by combining electrocoagulation process with adsorption onto granular activated carbon." *Industrial Crops and Products*, 140, 1-6, 2019.
- [26] Gören AY, Öncel MS, Kobya M. "Arsenate removal from groundwater by air-injected ec with al ball anodes: effects of operational parameters". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 462-467, 2020.