

Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi

Behzat BALCI^{1,a}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana

^aORCID: 0000-0002-4636-4235

Makale Bilgileri

Geliş : 09.09.2024

Kabul : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605873

Sorumlu Yazar

Behzat BALCI

behzatbalci@gmail.com

Anahtar Kelimeler

İleri oksidasyon

Boyar madde

Auksu

Kalsiyum peroksit

Atf şekli: BALCI, B., (2024). Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 873-880.

ÖZ

Tekstil boyar maddelerini içeren atıksuların alıcı ortamlarda varlığı, çevre sağlığı için önemli sakıncalar oluşturmaktadır. Boyar maddelerin etkili bir şekilde giderimini sağlayan yöntemler arasında ileri oksidasyon prosesleri yer almaktadır. Yaygın kullanılan yöntemler arasında Fenton prosesleri bulunsa da, bu yöntem metal içerikli çok miktarda çamur oluşturmaması nedeniyle önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. CaO₂, çevre dostu ve güçlü oksidasyon potansiyeline sahip bir kimyasaldır. Bu çalışmada, değişken deneysel koşullar altında CaO₂ ile Crystal Violet boyar maddesinin sulu fazda oksidasyonu araştırılmıştır. CaO₂, demir gibi aktivatör olmadan yüksek oksidasyon verimleri göstermiştir. Süreç sonunda çamur oluşumunun önüne geçilmiştir. CV oksidasyonu için optimum pH değerinin 10 olduğu tespit edilmiştir. Oksidasyon çalışmaları, düşük CaO₂ dozlarıyla kısa reaksiyon sürelerinde yüksek oksidasyon verimlerinin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. 200 mg/L CV'nin %99,9 oranında giderimi için 0,1 gram CaO₂ kullanılarak 25 dakikalık bir reaksiyon süresinin yeterli olduğu belirlenmiştir.

Removal of a Textile Dye from Aqueous Phase Using CaO₂ as an Environmentally Friendly Oxidant

Article Info

Received : 09.09.2024

Accepted : 23.12.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1605873

Corresponding Author

Behzat BALCI

behzatbalci@gmail.com

Keywords

Advance oxidation

Dye

Wastewater

Calcium peroxide

How to cite: BALCI, B., (2024). Bir Tekstil Boyasının Çevre Dostu Bir Oksidant Olan CaO₂ ile Sulu Fazdan Giderimi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(4), 873-880.

ABSTRACT

The presence of wastewater containing textile dyes in receiving environments poses significant risks to environmental health. Advanced oxidation processes are among the methods that effectively remove dye substances. Although Fenton processes are commonly used, they present a significant disadvantage due to the generation of large amounts of sludge containing metals. CaO₂ is a chemical with an environmentally friendly and strong oxidation potential. In this study, the oxidation of Crystal Violet dye in aqueous phase using CaO₂ under varying experimental conditions was investigated. CaO₂ exhibited high oxidation efficiencies without the need for activators like iron. The process successfully prevented sludge formation at the end. The optimum pH value for the oxidation of CV was found to be 10. The oxidation studies indicated that high oxidation efficiencies could be achieved with low doses of CaO₂ and short reaction times. It was determined that a reaction time of 25 minutes with 0.1 grams of CaO₂ was sufficient for the removal of 99.9% of 200 mg/L CV.

1. GİRİŞ

Tekstil atıksularındaki boyar madde içeriğini arıtmak amacıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri ya da bunların kombinasyonlarını kapsayan çeşitli teknikler kullanılmaktadır [1,2]. Bu arıtma teknolojileri umut verici giderim verimliliği gösterse de, yüksek işletim maliyetleri, büyük miktarda çamur oluşumu, uzun işletme süreleri ve nitelikli iş gücü gereksinimi gibi çeşitli dezavantajları beraberinde getirmektedir [3]. Adsorpsiyon sürecinin temel dezavantajları arasında adsorbanın geri kazanım ihtiyacı, pahalı adsorbanların kullanımı ve boyar maddelerin mineralizasyon yerine katı fazda birikimi yer almaktadır. Koagülasyon yöntemi ile boyar madde giderimi sağlanabilse de, bu yöntem büyük miktarda kimyasal tüketimi ve boya içeren çamurun oluşumu gibi ciddi zorluklarla karşı karşıyadır ve bu çamurun özel bertaraf işlemleri gerektirmektedir. Membran ayırma tekniği, boya içeren atıksuların arıtılmasında yüksek kalitede arıtılmış su sağlasa da, membran tıkanıklığı, yüksek işletim maliyetleri ve boyar maddelerin mineralizasyonunun ya çok az ya da hiç olmaması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır [3-5]. Tekstil boyaları genellikle aerobik biyolojik ayrışmaya karşı direnç göstermektedir [6]. Öte yandan, anaerobik/anoksik biyolojik süreçte, azo bağlarının NADH'den bu bağlara elektron transferi sonucunda kopması gerçekleşir [7]. Ancak, anaerobik/anoksik süreçte azo bağlarının ayrışması, renksiz aromatik aminlerin oluşumuna yol açmaktadır. Aromatik aminlerin, azo boyalarının orijinal hallerine kıyasla daha yüksek sitotoksikite ve genotoksikite gösterebileceği önemli bir husustur [8]. Bu aromatik aminlerin belirli oranlarda giderimi için aerobik bir süreç gereklidir. Bu giderim süreci biyodegradasyon ve biyosorpsiyon mekanizmalarını içerebilir; ancak aromatik aminlerle yüklü biyokütle birikimi potansiyel bir sorun teşkil etmektedir [9]. Öte yandan, ileri oksidasyon süreçleri (İOP'ler), sentetik boyaları zararsız maddelere mineralize edebilir. Son yıllarda, tekstil atık sularının arıtımında yüksek kaliteli çıkış suyu sağladıkları için çeşitli İOP'lere olan ilgi artmıştır. Hidrojen peroksit (H₂O₂) temelli kimyasal oksidasyon, sentetik boyalar gibi dirençli organik bileşikler içeren atıksuların arıtımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [10]. H₂O₂, hidroksil radikalini (•OH) üretmesi nedeniyle güçlü bir oksitleyici ajandır [11]. •OH radikali, organik kirleticileri CO₂ ve H₂O'ya mineralize edebilen, seçici olmayan, son derece reaktif bir oksidandır (E° = 2.8 V) [12]. Ancak, H₂O₂'nin doğrudan kullanımı, hızlı bozunması nedeniyle sınırlıdır. Fenton prosesi, demir iyonları ile H₂O₂ reaksiyonundan •OH radikali üretir. Ancak, Fenton prosesi dar bir asidik pH aralığında etkili olup, büyük miktarlarda demir çamuru üretir ve su sistemlerinde metal kirliliğine neden olabilir [13]. H₂O₂ ile ozonun (O₃/H₂O₂) birlikte kullanılması, organik bileşiklerin oksidasyonu için serbest radikal üretimini artırır. Ancak, ozonun düşük çözünme hızı ve bromat gibi zararlı yan ürünlerin oluşumu, O₃/H₂O₂ prosesinin başlıca dezavantajlarıdır. UV destekli H₂O₂ (UV/H₂O₂) oksidasyon süreci, dirençli organik bileşikler içeren atık suların arıtımında kullanılabilir. Ancak, yüksek enerji maliyetleri, UV/H₂O₂ teknolojisinin sınırlayıcı faktörüdür [14,15]. Kalsiyum peroksit (CaO₂), organik kirleticilerin arıtımında 2.01 V redoks potansiyeli ile güçlü bir oksitleyici ajan olarak kullanılabilen yenilikçi bir oksidandır. Geleneksel oksitleyici ajanlarla karşılaştırıldığında, CaO₂ uzun ömür, kolay taşıma, yüksek stabilite ve saflık, kolay üretim ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. CaO₂, yüksek enerji seviyesine sahip bir peroksit kovalent bağına sahiptir ve aynı zamanda katı formda H₂O₂ olarak bilinir. Stokiyometrik denkleme (Eşitlik 1) göre, CaO₂, maksimum 0,47 g H₂O₂/g CaO₂ açığa çıkarır [16]. CaO₂, sulu ortamda yavaşça oksijen ve H₂O₂ serbest bırakır; H₂O₂ ise O₂ ve •OH, •HO₂ ve •O₂ gibi oksitleyici radikal türlerini üretir (Eşitlik 1-5).



CaO₂ su içerisinde neredeyse çözünmez olduğu için doğrudan kirli suya enjekte edilebilir. Ayrıca, CaO₂ mikroorganizmalara oksijen sağlayarak sulu ortamlarda biyolojik bozunmayı teşvik eder. Yapılan çalışmalar, CaO₂'nin çözünmüş oksijen konsantrasyonunu ve su kütlelerindeki oksidasyon-redüksiyon potansiyeli (ORP) seviyesini artırabileceğini göstermiştir [17]. CaO₂, serbest radikallerin kontrollü salınımı nedeniyle organik kirleticilerin oksidasyonunda H₂O₂'nin doğrudan kullanımına göre daha uygundur. Kalsiyum, biyolojik yaşam için gerekli bir metaldir ve CaO₂, diğer metal oksitlere kıyasla suda daha güvenli bir şekilde kullanılabilir [18]. CaO₂, tek başına kullanılabilir gibi Fe⁺², Fe⁺³ ve UV gibi aktifleştiricilerle birleştirilerek oksitleyici radikallerin hızlı üretimi sağlanabilir [19]. Ancak, ferroz iyonlarının kullanımı durumunda demir çamuru oluşumu ve UV aktifleştiricisinin yüksek maliyeti, CaO₂'nin aktifleştiricilerle kullanılmasının dezavantajları arasındadır. Yukarıda belirtildiği gibi, demir iyonlarının aktifleştirici olarak kullanımı, çevre dostu uygulama açısından sınırlıdır; çünkü ağır metal kirliliğine ve çamur oluşumuna yol açabilir.

Bu çalışmanın amacı, bir tekstil boyası olan Crystal Violet (CV) gideriminde, herhangi bir aktifleştirici kullanmaksızın CaO₂'nin oksidasyon potansiyelini araştırmaktır. Demir aktivatörünün kullanılmaması oksidasyon süreci sonunda bertaraf edilmesi gereken bir demir çamuru oluşumunu engellemektedir. Bu anlamda süreç çevre dostu bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, tekstil atıklarından renk gideriminde çevre dostu yöntemlerin benimsenmesi üzerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. YÖNTEM

2.1. CaO₂'nin Karakterizasyonu

CaO₂'nin morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. CaO₂'nin kristal fazlarının belirlenmesi için 10–90° arasındaki 2θ tarama aralığında X-ışını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır (PANalytical EMPYREAN XRD). CaO₂'nin parçacık boyutu dağılımı düşük açılı lazer ışığı tekniği ile belirlenmiştir (Malvern Panalytical, Mastersizer 3000). CaO₂'ye ait fonksiyonel grupların araştırılması ise Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile gerçekleştirilmiştir (Jasco, FT/IR-6700).

2.2. CaO₂ Sentezi

CaO₂, çöktürme yöntemi ile alkali koşullarda ve fazla miktarda H₂O₂ kullanılarak sentezlenmiştir. 8 gram kalsiyum klorür (CaCl₂·2H₂O) belirli bir miktar saf suda çözülür ve karışıma 1 ml/dk hızla 25 mL %35'lik H₂O₂ eklenmiştir. Ardından çözeltiye 60 mL (1 N) KOH eklenmiştir. Çözeltinin son hacmi saf su ile 200 mL'ye ayarlanmıştır. Karışım, sarımsı bir çözelti elde etmek amacıyla 20°C'de 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Çözeltinin katı fazı santrifüj ile ayrılmıştır. Santrifüjden sonra katı faz, KOH kalıntılarını gidermek amacıyla birkaç kez saf su ile yıkanmış ve 80°C'de 24 saat boyunca kurutulmuştur.

2.3. Renk Giderim Çalışmaları

Renk giderim deneyleri kesikli deneyler şeklinde yürütülmüştür. 250 mL'lik Erlenmeyer şişeleri kullanılmış, her biri farklı CV konsantrasyonlarına sahip 200 mL distile suda belirli miktarlarda CaO₂ içermektedir. Şişeler, 20°C sabit sıcaklıkta 300 rpm hızında bir orbital çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Renk giderimine pH (5-11), CaO₂ dozu (0,05-0,20) ve başlangıç CV konsantrasyonunun (100-500 mg/L) etkileri araştırılmıştır. Kontrol grupları, aynı koşullar altında CaO₂ olmaksızın yürütülmüştür.

2.4. Analitik Yöntemler

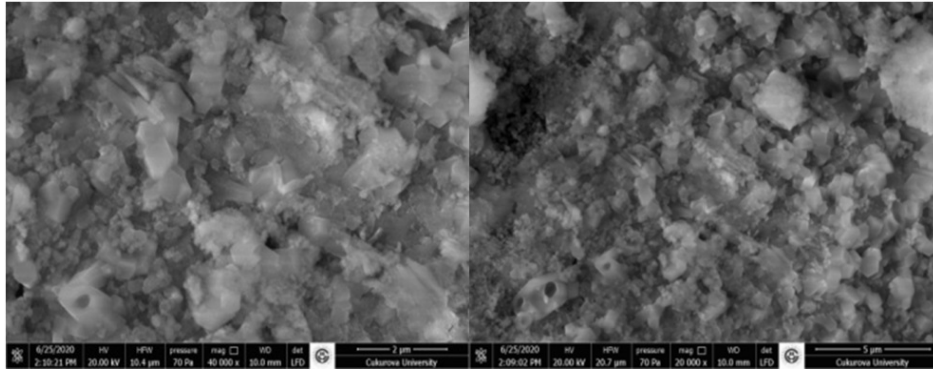
CV konsantrasyonları, 592 nm dalga boyunda hazırlanan kalibrasyon eğrisi kullanılarak hesaplanmıştır (Perkin Elmer Lambda 35 UV/VIS spektrofotometresi).

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

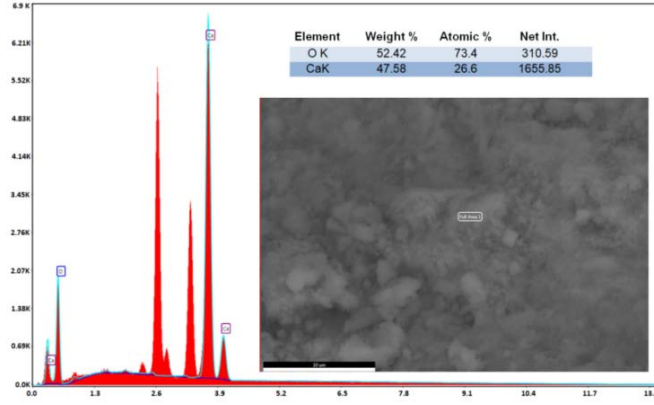
3.1. CaO₂'nin Karakterizasyonu

CaO₂'nin morfolojisi SEM ile incelenmiştir (Şekil 1). CaO₂ partiküllerinin genellikle düzensiz şekillere ve farklı küme yapılarında olduğu belirlenmiştir. CaO₂'nin elementel analizi EDX ile yapılmıştır. EDX analizi

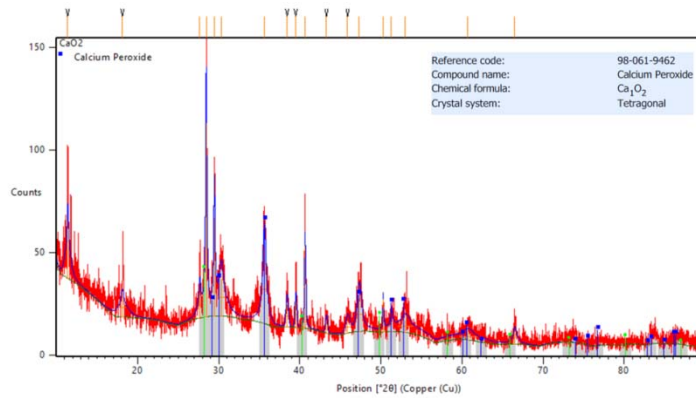
sonucunda üründe kalsiyum ve oksijene ait ana pikler elde edilmiştir (Şekil 2). Sentezlenen CaO₂'nin oksijen ve kalsiyum içeriği sırasıyla %52,42 ve %47,58 olarak belirlenmiştir. Şekil 2'deki isimlendirilmeyen iki keskin pik, analiz öncesinde örneğin iletkenliğini ayarlamak amacıyla kaplama malzemesi olarak kullanılan Au elementine aittir. CaO₂ partiküllerinin kristal yapısı XRD analizi ile incelenmiştir. Keskin pikler ($2\theta=29.2, 30.0, 35.6, 47.2, 51.2, 52.7, 60.6, 76.6^\circ$) tetragonal kristal yapıya ait olup, CaO₂'nin XRD sonuçları ile (Referans kodu: 98-061-9462) güçlü bir uyum göstermektedir (Şekil 3). Tetragonal kristal yapının daha önceki çalışmalar tarafından da CaO₂ için raporlandığı belirtilmiştir [20]. XRD analiz sonuçları, bu çalışmada uygulanan üretim prosedürü ile CaO₂'nin başarıyla elde edildiğini ortaya koymuştur. CaO₂'nin fonksiyonel gruplarının incelenmesi FTIR ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). CaO₂'nin FTIR spektrumunda (Şekil 4), 3000-3600 cm⁻¹ aralığında ortaya çıkan geniş tepe, üretim sırasında CaO₂ üzerine su moleküllerinin adsorpsiyonu sonucu oluşan -OH bağının gerilmesine atfedilmiştir. 1200 ile 1600 cm⁻¹ arasında görülen geniş sinyal ise O—Ca—O'nun bükülme titreşimine karşılık gelmektedir. 873 ve 680 cm⁻¹'de belirlenen keskin sinyaller, peroksidin O—O gerilme titreşimini ifade etmektedir. 556 cm⁻¹'de görülen tepe ise kullanılmamış CaO₂'nin O—Ca—O gerilme titreşimine atfedilmiştir [21].



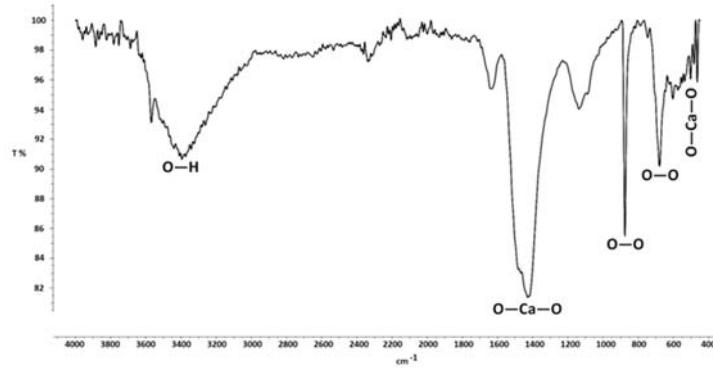
Şekil 1. CaO₂ için SEM Analizi



Şekil 2. CaO₂ Elementel Analiz



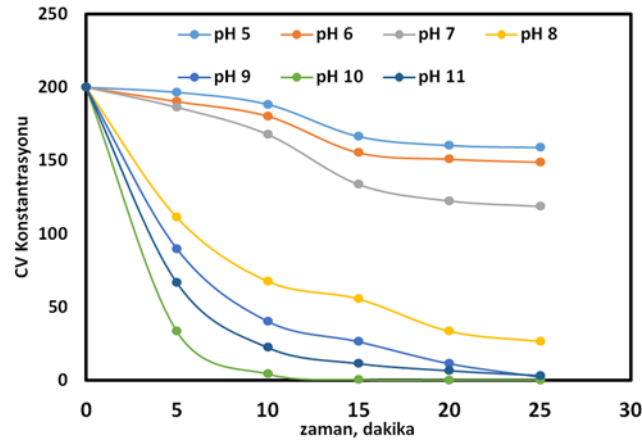
Şekil 3. CaO₂ XRD Analizi

Şekil 4. CaO₂ FTIR Analizi

3.2. Renk Giderim Çalışmaları

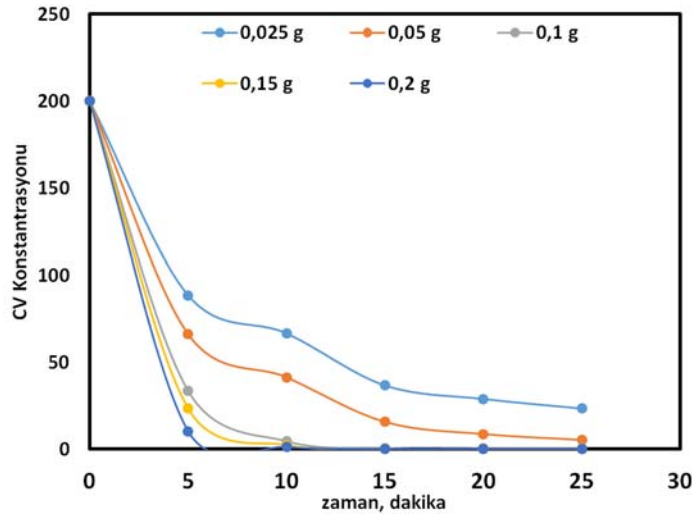
3.2.1. Renk Giderimine pH'nin Etkisi

CaO₂ ile CV oksidasyonu üzerine farklı pH değerlerinin (5-11) etkisi 0,25 g CaO₂ sabit dozu, 200 mg/L CV konsantrasyonu ile 20 °C'de araştırılmıştır. CV oksidasyonunda denge zamanının, 25 dakika içinde sağlandığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, pH seviyesinin artmasıyla birlikte CV'nin giderim verimliliğinde bir artış olduğunu ve bu artışın pH 10'da zirve yaptığını göstermiştir (Şekil 5). CaO₂, bir aktivatör olmadan bağımsız olarak kullanıldığında, asidik çevresel koşulların boya oksidasyonunu olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Giderim verimlilikleri pH 5 için %25,55 ve pH 10 için %99,8 olarak ölçülmüştür. pH 10'un üzerinde, boya oksidasyon verimliliğinde belirli ölçüde düşüş gözlemlenmiştir. Asidik pH değerlerinde azalan giderim verimlilikleri, CaO₂'nin çözünürlüğünün artmasına bağlanabilir. Öte yandan, güçlü alkali koşullar altında giderim verimliliklerindeki azalmanın, CaO₂'nin oksidant radikaller yerine oksijen üretme eğilimindeki artışla ilişkilendirildiği açıklanmıştır [22]. Sonuç olarak, CaO₂ ile CV'nin oksidasyonu için optimum pH değeri 10 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4. CV'nin CaO₂ ile Oksidasyonu Üzerine pH Etkisi

3.2.2. CV Oksidasyonu Üzerine CaO₂ Dozunun Etkisi

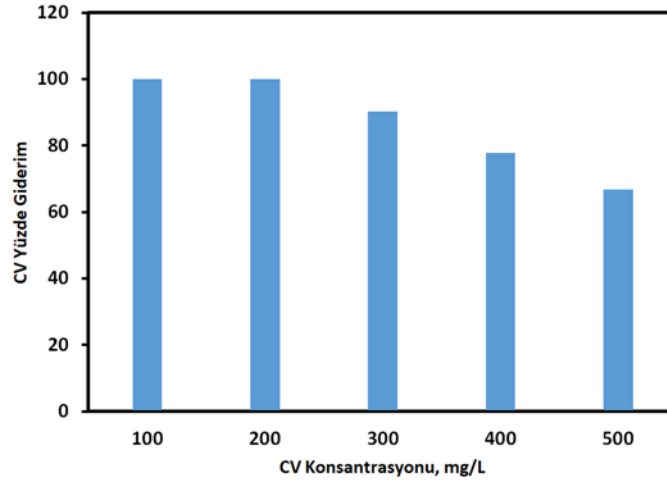
CaO₂ dozajının (0,025-0,20g) 200 mg/L CV ile dekolorizasyon üzerindeki etkisi sabit pH 10 değerinde ve oda sıcaklığında incelenmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü üzere, CV'nin giderimi, CaO₂ miktarının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. 0,025 g ve 0,05 g CaO₂ için CV giderim verimliliği 25 dakika sonunda sırasıyla, %87,35 ve %97,38 olarak bulunurken, bu dozların üzerindeki her doz için giderim verimleri %99,5'un üzerinde tespit edilmiştir. Deneyle sonuçları, CaO₂ dozajının artışıyla giderim verimliliğinin büyük ölçüde arttığını göstermektedir. Yüksek CaO₂ miktarlarında yüksek boya giderim verimlilikleri, artan CaO₂ dozajı ile birlikte artan oksidant radikalleri ile açıklanabilir. CaO₂ düşük dozlarda kullanılmasına rağmen kısa sürelerde yüksek renk giderim verimleri sağlamıştır. Bu, gerçek ölçekli tesislerde önemli bir ekonomik avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 6. CV'nin Oksidasyonunda CaO₂ Dozunun Etkisi

3.2.3. CV Konsantrasyonunun Oksidasyon Üzerindeki Etkisi

CV konsantrasyonunun (100-500 mg/L) etkisi 0,5 g CaO₂ dozajı ile incelenmiştir (Şekil 7). CV giderim verimliliğinin, başlangıç CV konsantrasyonunun azalmasıyla arttığı belirlenmiştir. Başlangıç CV konsantrasyonu 100 mg/L'den 500 mg/L'ye yükseldiğinde, CV giderim veriminin 25 dakika içinde %99,9'dan %66,8'e düşmüştür. Yüksek boya konsantrasyonlarında daha düşük renk oksidasyon verimliliği, oksidant ile boya oranındaki azalma ile açıklanabilir.



Şekil 7. CaO₂ ile Renk Oksidasyonunda CV Konsantrasyonunun Etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada çevre dostu bir oksidant olan CaO₂ ile CV boyar maddesinin oksidasyon yoluyla giderimi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, oksidasyon üzerine pH parametresinin önemli derecede etki ettiğini göstermiştir. Oksidasyon sürecinde optimum pH değerinin 10 olduğu tespit edilmiştir. Oksidasyon çalışmaları, düşük CaO₂ dozları ile kısa reaksiyon sürelerinden yüksek oksidasyon verimleri elde edilebildiğini göstermiştir. 200 mg/L CV'nin %99,9 ile giderimi için 0,1 gram CaO₂ ile 25 dakikalık bir reaksiyon süresinin yeterli olduğu ortaya konmuştur. CaO₂'nin Fenton süreçlerinden farklı olarak demir aktivatörü olmaksızın oksidasyon süreçlerinde kullanılması, önemli bir sorun olan çamur oluşumunu da engellemektedir. Böylece, hem artıma maliyetleri açısından önemli avantajlar sağlanmakta hem de demir içerikli çamur oluşumuna bağlı potansiyel metal kirliliği risklerinin önüne geçilmektedir. CaO₂'nin tekstil atıksularında renk gideriminde çevre dostu bir oksidant olma potansiyelini taşıdığı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Sağlam, S., Türk, F.N., Arslanoğlu, H., 2023. Use and applications of metal-organic frameworks (MOF) in dye adsorption. *J. Environ. Chem. Eng.*, 110568.
2. Hadadi, A., Imessaoudene, A., Bollinger, J.C., Bouzaza, A., Amrane, A., Tahraoui, H., Mouni, L., 2023. Aleppo pine seeds (*Pinus halepensis* Mill.) as a promising novel green coagulant for the removal of Congo red dye: Optimization via machine learning algorithm. *J. Environ. Manage.*, 331, 117286.
3. Raj, S., Singh, H., Bhattacharya, J., 2023. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. *Sci. Total. Environ.*, 857, 159464.
4. Rosli, N.A., Ahmad, M.A., Noh, T.U., 2023. Unleashing the potential of pineapple peel-based activated carbon: Response surface methodology optimization and regeneration for methylene blue and methyl red dyes adsorption. *Inorg. Chem. Commun.*, 155, 111041.
5. He, Y., Huang, Y., Wang, Q., Pan, X., 2023. Controlling waste by waste: a modified landfill leachate coagulation sludge activated peroxydisulfate process achieves complete BPA degradation. *Environ. Technol.*, 44(7), 1027-1034.
6. Nachiyar, C.V., Rakshi, A.D., Sandhya, S., Jebasta, N.B.D., Nellore, J., 2023. Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: A review. *CSCEE*, 100339.
7. Tian, F., Wang, Y., Guo, G., Ding, K., Yang, F., Wang, C., Wang, H., Yan, M., 2023. Meta-genome analysis of a newly enriched azo dyes detoxification halo-thermophilic bacterial consortium. *Environ. Res.*, 237, 116828.
8. Lawal, I.M., Soja, U.B., Hussaini, A., Saleh, D., Aliyu, M., Noor, A., Birniwa, A.H., Jagaba, A.H., 2023. Sequential batch reactors for aerobic and anaerobic dye removal: a mini-review. *CSCEE*, 100547.
9. Albahnasawi, A., Yüksel, E., Gürbulak, E., Duyum, F., 2020. Fate of aromatic amines through decolorization of real textile wastewater under anoxic-aerobic membrane bioreactor. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(5), 104226.
10. Iqbal, A., Yusaf, A., Usman, M., Hussain, B.T., Mansha, A., 2023. Insight into the degradation of different classes of dyes by advanced oxidation processes; a detailed review. *Int. J. Environ. An. Ch.*, 857(2), 159172.
11. Eduardo, M.C.C., María, F.A.F., Carmen, F.G., 2020. Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. *An Overview Water*, 12, 102.
12. Wang, X., Jing, J., Zhou, M., Dewil, R., 2023. Recent advances in H₂O₂-based advanced oxidation processes for removal of antibiotics from wastewater. *Chinese Chem. Lett.*, 34(3), 107621.
13. Shuguang, L., Xiang, Z., Yunfei, X., 2017. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review. *J. Haz. Mater.*, 337, 163-177.
14. Monica, B., Ioannis, A.K., 2017. Sulfate radical technologies as tertiary treatment for the removal of emerging contaminants from wastewater. *Sustainability*, 9, 1604.
15. Xulei, Z., Yueyue, L., Junhe, L., Lei, Z., Jean-Marc, C., Quansuo, Z., Yuefei, J., 2021. UV/H₂O₂ oxidation of chloronitrobenzenes in waters revisited: Hydroxyl radical induced self-nitration. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Available*, 113162.
16. Hou, Z., Wang, W., Dong, N., Chen, P., Ge, L., Tan, F., Wang, X., Qia, X., Wong, P.K., 2023. A dual-oxidant advanced oxidation process system containing CaO₂ and peroxydisulfate for organic pollutant degradation: High adaptability and synergistic effect. *Sep. Purif. Technol.*, 308, 122909.
17. Wang, Y., Wang, W., Yan, F., Ding, Z., Feng, L., Zhao, J., 2019. Effects and mechanisms of calcium peroxide on purification of severely eutrophic water. *The Science of the Total Environment*, 650, 2, 2796.
18. Qiuxiang, X., Qi-Su, H., We, W., Jin, S., Xiaoh, D., Bing-Ji, N., 2020. Improving the treatment of waste activated sludge using calcium peroxide. *Wat. Res.*, 187, 116440.
19. Yong, S., Muhammad D., Meesam A., Ali, S., Ming, L., Yanchen, L., Zhaofu, S., Qian, Z. Xueke, Shuguang, L., 2020. Trichloroethene degradation by nanoscale CaO₂ activated with Fe(II)/FeS: The role of FeS and the synergistic activation mechanism of Fe(II)/FeS. *Chem. Eng. J.*, 394(15), 124830.
20. Meesam, A., Usman, F., Shuguang, L., Yong, S., Ming, L., Ayyaz, A., Ali, S., Zain, A., 2020. Synthesis of controlled release calcium peroxide nanoparticles (CR-nCPs): Characterizations, H₂O₂ liberate performances and pollutant degradation efficiency. *Sep. Pur. Technol.*, 241(15), 116729.

21. Sajedeh, K., Akbar, K., Shahin, B., 2020. Fabrication of amine-decorated nonspherical microparticles with calcium peroxide cargo for controlled release of oxygen. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 108, 136-147.
22. Erkurt, F.E., Mert, A., 2023. Eco-friendly oxidation of a reactive textile dye by CaO₂: Effects of specific independent parameters. *Environ. Technol.*, 44(21), 3294-3315.