

Sol-Jel Yöntemiyle Sentezlenen CeO₂:0,1Er0,1Y Bileşiğinin Farklı Boyalar ile Fotokatalitik Aktivitelerinin İncelenmesi

Handan ÖZLÜ TORUN^{1*}, Soner ÇAKAR², Rabia KIRKGEÇİT³, Fatma KILIÇ DOKAN⁴

¹Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 46036, Kahramanmaraş

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 67100, Zonguldak

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 46040, Kahramanmaraş

⁴Kayseri Üniversitesi, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksek Okulu, Kimya Bölümü, 38280, Kayseri

¹<http://orcid.org/0000-0002-9858-466X>,

²<http://orcid.org/0000-0002-3745-954X>

³<http://orcid.org/0000-0003-0766-721>

⁴<http://orcid.org/0000-0002-5355-2904>

*Sorumlu yazar: handan.ozlutorun@istiklal.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.06.2022

Kabul tarihi: 07.11.2022

Online Yayınlanma: 04.12.2023

Anahtar Kelimeler:

CeO₂

Fotokatalitik aktivite

Malahit yeşili

Metilen mavisi

ÖZ

Bu çalışmada, güneş enerjisi yardımıyla CeO₂ temelli fotokatalizör bileşiğinin farklı boyar madde üzerinde etkisi araştırıldı. Çalışmada endüstride sıkça kullanılan ve toksik etkiye sahip metilen mavisi ve malahit yeşilinin CeO₂:0,1Er0,1Y bileşiği kullanılarak fotokatalitik bozunma davranışı incelendi. Fotokatalizör, sol-jel yöntemi kullanılarak Er ve Y elementlerinin CeO₂ kristal yapısına birlikte katılması ile sentezlendi. Sentez sonrası kristal yapı tayininde x-ışını toz difraktometresi kullanıldı. Sentezlenen örnekler kübik kristal yapısına sahiptir. Fotokatalizör etkinliklerinin araştırılmasında süreye bağlı olarak boya giderimi UV-Vis spektrofotometre ile izlendi. Boya giderim mekanizmasının detaylı incelenmesi amacıyla FT-IR analizinden yararlanıldı. Sonuç olarak, CeO₂:0,1Er0,1Y bileşiğinin optik bant enerji düzeyi 2,92 eV hesaplandı. Sentezlenen CeO₂ tabanlı bileşiğin fotokatalitik verim sırasıyla malahit yeşili ve metilen mavisi için %48 ve %37 olarak belirlendi.

Investigation of Photocatalytic Activities of CeO₂:0.1Er0.1Y Compound Synthesized by Sol-Gel Method with Different Dyes

Research Article

Article History:

Received: 22.06.2022

Accepted: 07.11.2022

Published online: 04.12.2023

Keywords:

CeO₂

Photocatalytic

Malahide green

Methylene blue

ABSTRACT

In this study, the effect of CeO₂-based photocatalyst compound on different dye was investigated with the solar energy. In the study, the photocatalytic degradation behavior of methylene blue and malahit green, which are frequently used in industry and have toxic effects, was investigated by using CeO₂:0,1Er0,1Y compound. Photocatalyst was synthesized by doping Er and Y elements together to CeO₂ crystal structure using sol-gel method. X-ray powder diffractometry was used to determine the crystal structure after synthesis. The synthesized samples have a cubic crystal structure. In the investigation of photocatalyst activities, dye removal was analysed with UV-Vis spectrophotometer. FT-IR analysis was used to examine the dye removal mechanism in detail. As a result, the optical band energy level of CeO₂:0,1Er0,1Y was calculated as 2,92 eV. The photocatalytic efficiency of the synthesized CeO₂-based compound was determined as 48% and 37% for malahide green and methylene blue, respectively.

To Cite: Torun HÖ., Çakar S., Kırkgeçit R., Kılıç Dokan F. Sol-Jel Yöntemiyle Sentezlenen CeO₂:0,1Er0,1Y Bileşiğinin Farklı Boyalar ile Fotokatalitik Aktivitelerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 2076-2085.

1. Giriş

Günümüzde çevre kirliliğın önüne geçmek, sağlıklı yaşam hakkına sahip tüm canlıların birinci derecede hakkıdır. Üretiminde çok su kullanılan tekstil, ilaç, boya, plastik gibi alanlardan kirlilik içeren suyun toprağı ve temiz içme sularını kirletmesi endüstriyel kaynaklı en önemli sorunlar arasındadır. Bu kirliliklerin önüne geçmek için endüstrideki atık sularda toksik etkiye sahip boyaların bertaraf edilmesi gerekmektedir. Farklı bertaraf yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri de fotokatalitik bozunmadır. Fotokatalitik bozunma, kirleticilerin bozunmasında güneş enerjisini kimyasal enerjiye çeviren ekonomik bir yöntemdir (Koe ve ark., 2020). Fotokatalitik bozunma güneş enerjisi ile bileşiklerin oksidasyona uğrayarak elektron boşluklarının oluşmasını sağlayan bir işlemdir. Bu işlemde kirleticiler güneş ışığı yardımıyla CO₂ ve su gibi zararsız bileşik formlarına dönüşmektedirler. TiO₂ ve ZnO en çok kullanılan fotokatalizör bileşiklerdendir (Veziroglu ve ark. , 2017; Kerli ve ark., 2022). Son zamanlarda bu bileşiklere ek olarak CeO₂ ilgi çekici olmaya başlamıştır (Ma ve ark., 2019; Fauzi ve ark., 2022).

CeO₂, lantan grubunda yer alır ve yarıiletken özelliğe sahiptir. CeO₂ ve bileşikleri; fotokataliz, yakıt pilleri, suyun ayrışması ve antioksidan vb. uygulamalarında kullanılmaktadır. CeO₂ 3,2 eV'luk geniş bir band enerjisine sahiptir ve kristal örgüde Ce⁴⁺/Ce³⁺ redoks reaksiyonu sonucu oksijen iyon boşlukları içermektedir. Bu oksijen boşlukları ile oksijen depolama özelliğı kazanmakta ve fotokatalizör olarak kullanılmaktadır (Fauzi ve ark., 2022). Bilim insanları CeO₂'i fotokatalizör olarak bazı boyar maddelerin bertarafında katkı türü, katkı oranı, pH gibi değişkenleri kullanarak araştırmış ve araştırmaktadır. Magdalane ve ark. CeO₂/Y₂O₃ nanokompozitleri hidrotermal yöntem ile sentezlemişler ve rodamin B bozunmasını incelemişlerdir. Rodamin B nin bertarafında 150. Dk da %92 verim elde etmişlerdir (Magdalane ve ark., 2017). Miao ve ark. F doped CeO₂ çalışmışlar ve F in saf CeO₂ bozunmasını 5,5 kez artırdığını tespit etmişlerdir (Miao ve ark., 2016). Liyanage ve ark. CeO₂ bileşiğine Y elementini farklı mol oranlarında katkılayarak indigo karmin boyarmaddenin katalizi ile bozunmasını incelemişler ve katkı oranı arttıkça bozunma yüzdesinin azaldığı sonucunu elde etmişlerdir (Liyanage ve ark., 2014). Xu ve ark. Y, Nd, La ve Sm katkılı CeO₂'in fotokatalizör olarak bisfenol A (BPA) bozunması ve asetaldehit bozunma etkinliğini incelemişlerdir. Bu çalışmada Sm katkılı CeO₂'nin diğer katkı türleri ve saf CeO₂'e göre bisfenol A için üç kat, asetaldehit için ise beş kat daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır (Xu ve ark., 2020).

Bu çalışmada, (La, Er) ile kararlı hale getirilmiş CeO₂ fotokatalizörü ile endüstride sıkça kullanılan metilen mavisi ve malahit yeşilinin boyar maddelerinin bozunması incelendi. Metilen mavisi; ilaç sektörü, pamuk, ahşap ve ipek boyamada sıkça kullanılan boyar maddeler arasındadır ve uzun süreli maruziyeti sonucunda göz yanıklarına sebep olmaktadır (Jack ve Leikin, 2003; Rafatullah ve ark., 2010). Bir diğer boyar madde olan malahit yeşili ise tekstil sektöründe yün, iplik, pamuk ve deri boyamada kullanılan toksik boyar maddeler arasındadır. Bu boyar madde de merkezi sinir sistemi ve gastrointestinal üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Mittall, 2006).

2. Materyal ve Metot

Yapılan bu çalışmada, CeO₂:0,1Er0,1Y bileşikler sitrik asit sol-jel yöntemi ile hazırlandı. Başlangıç kimyasalları olarak cerium (III) nitrat heksahidrat [Ce(NO₃)₃.6H₂O] (safılık 99,99%, Alfa Aesar), erbiyum(III)nitrat pentahidrat [Er(NO₃)₃.5H₂O] (safılık 99,9%, Arcos organics) ve itrium(III)nitrat heksahidrat [Y(NO₃)₃.6H₂O] (safılık 99,9%, Arcos organics) kullanıldı. Başlangıç bileşiklerinin stokiometrik oranda tartımları sonrasında karışım 50 ml saf suda çözüldü. Hazırlanan bu karışımın içerisine etilen glikol ve sitrik asit ilave edildi ve manyetik karıştırıcıda 80 °C’de jelleşme meydana gelene dek yaklaşık 3 saat bekletildi. Jelleşme sonrasında 120 °C de 12 saat ön kurutma işlemi ve sonrasında 600 °C de 48 saat ısıl işlem uygulandı. Sentezlenen CeO₂:0,1Er0,1Y fotokatalizörü XRD, FT-IR ile yapı aydınlatmaları ve fotokatalitik aktivite çalışmaları gerçekleştirildi. Sentezlenen fotokatalizörün kristal yapısının aydınlatmasında Pananalytical Empyrean marka X-ışınları diffraktometresi (Cu K α 1 (1,5406 Å)) ve FT-IR spektrumları Perkin-Elmer Frontier FT-IR spektrometre ile gerçekleştirildi. Fotokatalitik aktivite çalışmalarında metilen mavisi (MB) ve malahit yeşili’nin (MG) 5 ppm (mg/L) çözeltileri kullanıldı. 10 mg CeO₂:0,1Er0,1Y bileşiği boya çözeltilerine eklenerek absorpsiyon/desorpsiyon dengesini sağlamak amacıyla karanlık ortamda 30 dakika bekletildi. Örnek ile ışık kaynağı arasındaki mesafe 10 cm olacak şekilde yerleştirildi. Ardından örnekler 300 W’lık güneş simülatör altında Shimadzu marka UV-V1s spektrofotometre ile boya bozunmaları 0-120 dakika aralığında tarandı.

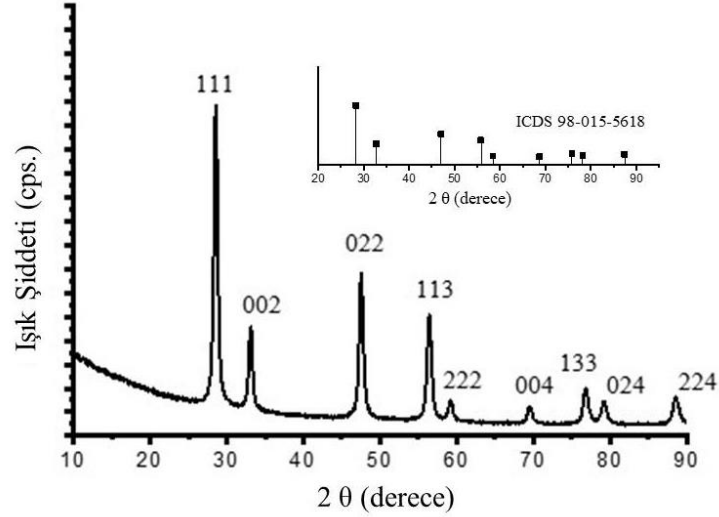
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. X-Işını Kırınımı Analizi (XRD)

CeO₂:0,1Er0,1Y bileşiğinin 600 °C 48 saat ısıl işlem sonrası x-ışını kırınımı toz deseni Şekil 1’de görülmektedir. Sentezlenen fotokatalizör kübik (fcc) birim hücrelerine sahip ve ICDS 98-015-5618 katalog numarası ile uyumlu olduğu belirlendi. X-ışını toz kırınım analizi sonrasında elde edilen (111), (022) ve (113) pikleri kullanılarak HighScore Plus yazılımında Debye-Scherrer eşitliği ile ortalama kristal boyutu hesaplandı. Bu eşitlik;

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

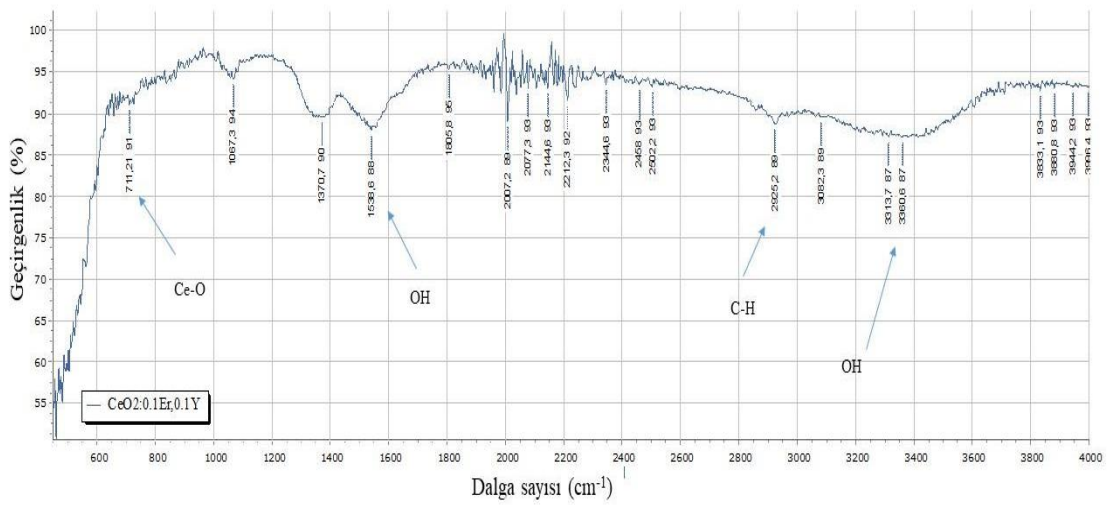
burada k, Debye-Scherrer sabitidir, λ , X-ışınının dalga boyudur, β , FWHM (maksimum yarıda tam genişlik) değeridir ve θ , Bragg kırınım açısıdır. Hesaplamalar sonucunda bileşiğin kristal boyutunun 16,74 nm olduğu bulundu. Ayrıca Er³⁺ ve Y³⁺ katkılanması ile elde edilen kristal yapının birim hücre parametresi a= 5,4085 Å olarak hesaplandı.



Şekil 1. CeO₂:0,1Er_{0,1}Y bileşiğinin x-ışını kırınım deseni.

3.2. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

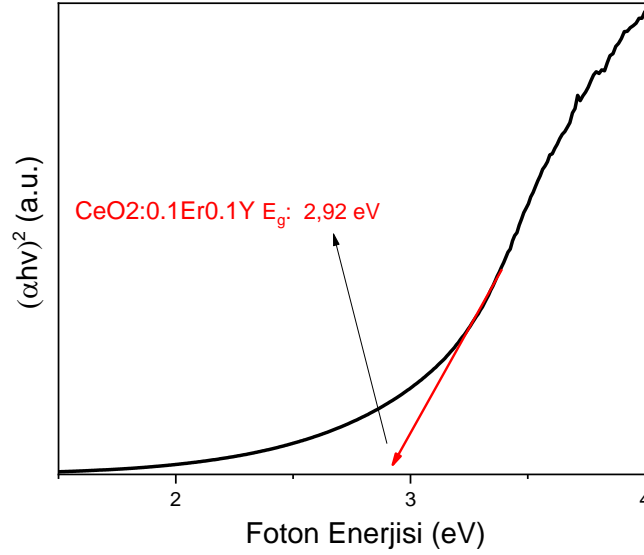
Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi, bileşikteki bağlar ile gerilimleri göstermek için yapılır ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak elde edilen sonuçlara kızılötesi spektrum denir. Fotokatalitik çalışmalarda, reaksiyonda -OH oluşumu boyanın degradasyonu için önemlidir. Bu sebeple sentezlenen CeO₂:0,1Er_{0,1}Y fotokatalizörde ki -OH bağlarını göstermek amacıyla FT-IR analizi gerçekleştirildi. FT-IR spektrum 4000-400 cm⁻¹ aralığında kaydedildi ve analiz grafiği Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’deki FT-IR spektrumunu incelediğimizde 3442-1629 cm⁻¹’deki karakteristik tepe noktası O-H çekme titreşiminden kaynaklanmaktadır (Asena ve ark., 2021). FT-IR spektrumunda görülen 711 cm⁻¹’deki pik Ce-O bağını göstermekte ve XRD spektrumları ile elde edilen CeO₂ kristal yapısının başarılı bir şekilde sentezlendiğini desteklemektedir.



Şekil 2. CeO₂:0,1Er_{0,1}Y bileşiğinin fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi grafiği.

3.3. Ultraviyole/Görünür Bölge Absorpsiyon Spektrofotometre Analizi (UV-VIS)

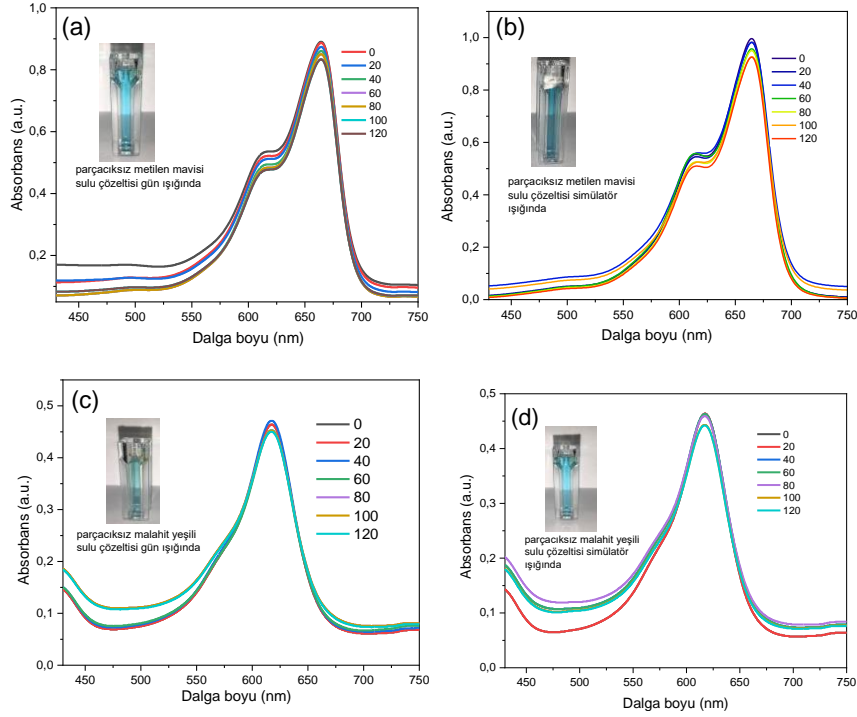
Literatürde saf CeO_2 'in optik band aralığı yaklaşık 3,1 eV'tur.(Tiwari ve ark., 2019) . $\text{CeO}_2:0,1\text{Er}0,1\text{Y}$ bileşiğinin optik band aralığı Şekil 3'te yer alan Tauc plot grafiği yardımıyla 2,92 eV olarak bulunmuştur. Er^{3+} ve Y^{3+} katyonlarının band aralığını düşürdüğü anlaşılmıştır. Optik band aralığındaki düşme, boya bozunma sonuçları incelendiğinde verim artışı sağlanmıştır.



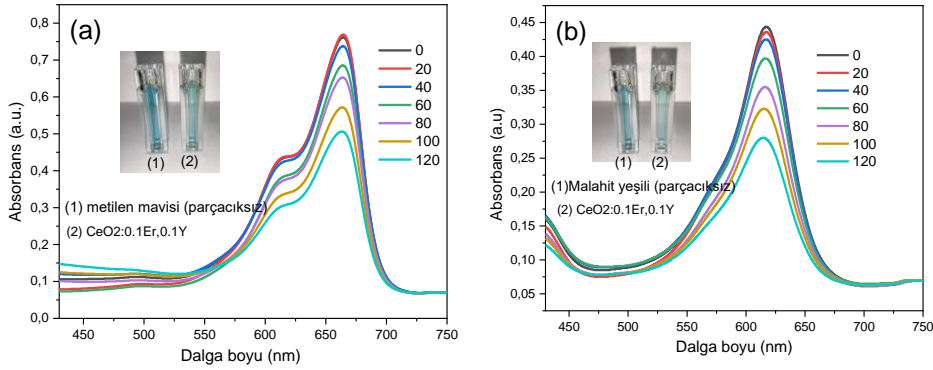
Şekil 3. $\text{CeO}_2:0,1\text{Er}0,1\text{Y}$ bileşiğinin Tauc plot grafiği.

Boyar madde olan metilen mavisi ve malahit yeşili katyonik boyar madde grubunda yer almaktadır. Şekil 4'te bu çalışmada kullanılan metilen mavisi ve malahit yeşili boyar maddelerin parçacıksız absorpsanlarına ait grafikler görülmektedir. Şekilde 4'te görüldüğü üzere çeşitli parametreler ele alınarak $\text{CeO}_2:0,1\text{Er}0,1\text{Y}$ fotokatalist bileşiği yok iken, gün ışığında ve simülasyon eşliğinde bozunma verimlerinin düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

Şekil 5'te ise metilen mavisi ve malahit yeşili boyar maddeleri için fotokatalizör bileşiği varlığında değişkenlik gösteren absorpsan grafikleri yer almaktadır. Sentezlenen $\text{CeO}_2:0,1\text{Er}0,1\text{Y}$ katalizör varlığında metilen mavisi ve malahit yeşili boyar maddelerinin güneş enerjisi simülasyonu yardımı ile bozunma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Metilen mavisi parçacıksız sulu çözelti (a- gün ışığı, b- simülator), malahit yeşili parçacıksız sulu çözelti (c- gün ışığı, d- simülator) grafiği.



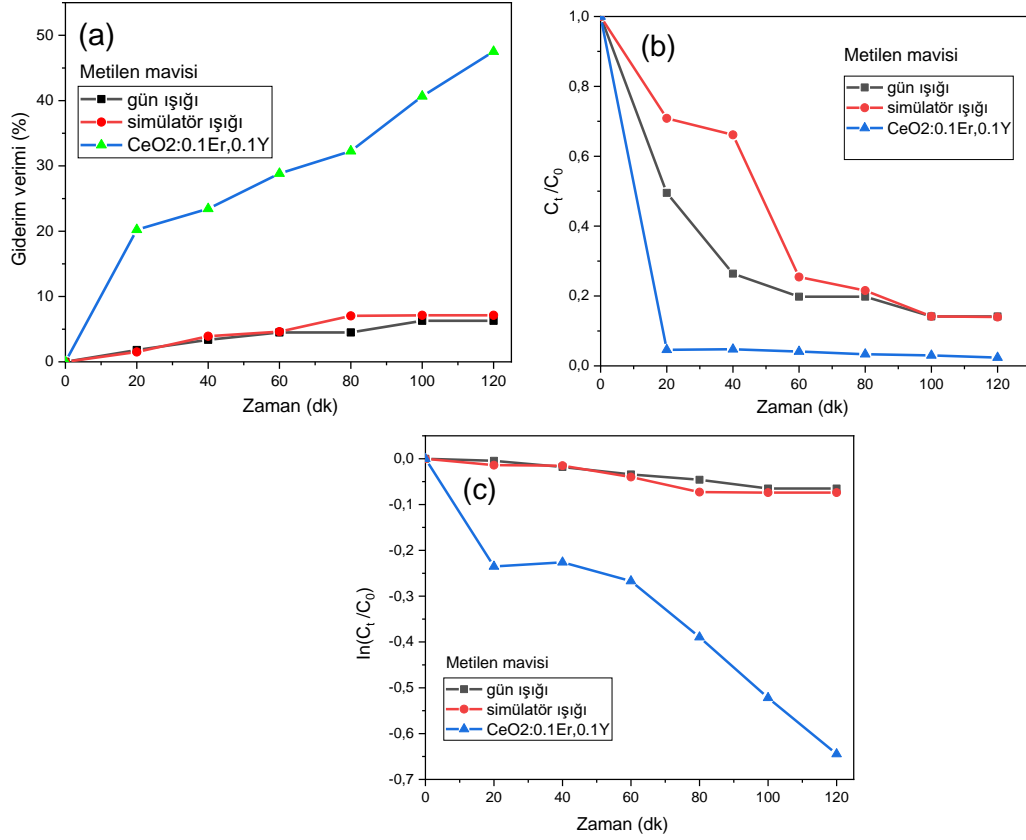
Şekil 5. Metilen mavisi (a), malahit yeşili (b) sulu çözeltisinde $CeO_2:0,1Er,0,1Y$ katalizör grafiği.

Metilen mavisi boyası üzerinde 664 nm'de maksimum absorban dikkate alınarak hesaplamalar yapıldı. Malahit yeşili (MG) boyasının 617 nm'de maksimum absorban zirvesine sahip olduğu belirlendi. 0-120 dk sonunda eşitlik 2 kullanılarak hesaplanan verimin grafikleri ise Şekil 6-7'de verildi.

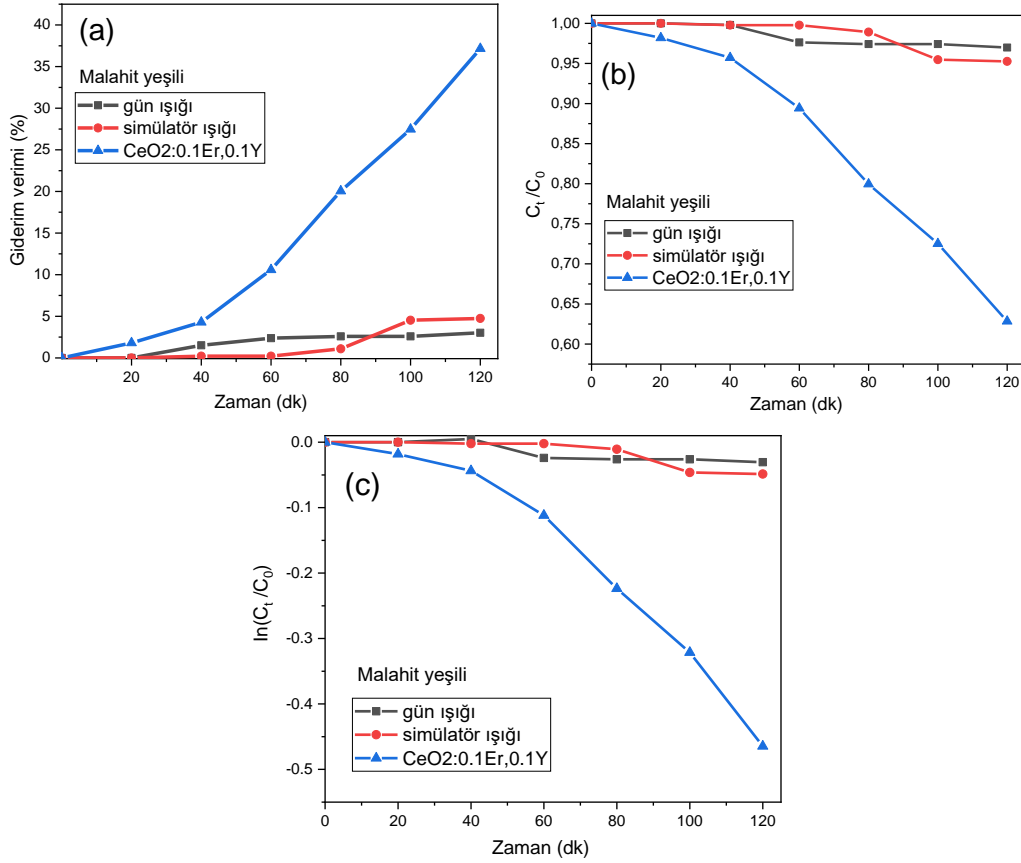
Eşitlik 2:

$$\% \text{ Bozunma Aktivitesi} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

Burada C_0 , başlangıç konsantrasyonu ve C , 120 dk.'da elde edilen konsantrasyonu temsil etmektedir.



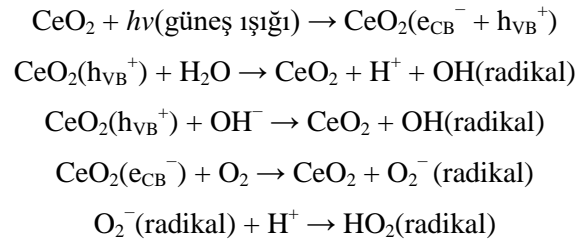
Şekil 6. Metilen mavisi boyar maddesinin; (a) Zamana bağlı bozunma verim grafiği, (b) C_t/C_0 Zamana karşı eğri grafiği, (c) $\ln(C_t/C_0)$ zamana karşı eğri grafiği.



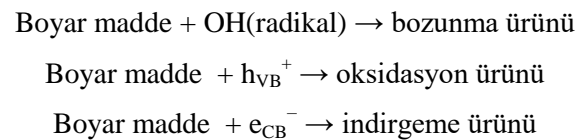
Şekil 7. Malahit yeşili boyar maddesinin; (a) Zamana bağlı bozunma verim grafiği, (b) C_t/C_0 Zamana karşı eğri grafiği, (c) $\ln(C_t/C_0)$ zamana karşı eğri grafiği.

Yapılan bir araştırmada CeO₂'in metilen mavisi boya bozunma verimi %35 olarak bulunmuştur (Younis ve ark., 2016). Torun ve ark., 800 °C de sinterlenmiş katkısız CeO₂ metilen mavisi ile yapılan çalışmalarında verimi 100 dakikanın sonunda % 31 olarak hesaplamışlardır (Torun ve ark., 2021). Grldđđ üzere katkısız CeO₂ in boya giderimi konusunda verimi düşüktür. Ancak katkılama ile verim artışı literatür çalışmaları ile desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalara göre Xioa ve ark.,2018, farklı oranlarda Cu katkılı CeO₂ in fotokatalizör etkisini metilen mavisi kullanarak araştırmışlardır. 120 dk. sonunda en yüksek verimi ise %5 Cu katkılı CeO₂ bileşiği için yaklaşık %35 olarak hesaplamışlardır . Malahit yeşilinin bozunması amacıyla CeO₂'e CdO katkılamanın Magdalene ve ark.,(2017), farklı miktarlarda katalizör kullanmışlardır. 120 dk. sonunda en yüksek verimi 40 mg fotokatalizrde yaklaşık %25 olarak hesaplamışlardır. Kırkgeçit ve Torun, 2020, La, Ho birlikte katkılı CeO₂ bileşiklerin metilen mavisi üzerinde katalitik etkisini araştırmışlar ve 100.dakika sonunda en yüksek verimi %46 olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada ise yapılan hesaplamalara göre fotokatalitik verim malahit yeşili için %37, metilen mavisi için %48 olarak hesaplandı. Sonuçlar literatür ile kıyaslandığında Er ve Y katkılamanın her iki boyar maddenin bertarafında verim artırcı olduğu görülmektedir.

Güneş enerjisi yardımı ile fotokatalitik bozunma sırasında gerçekleşen bozunmanın kimyasal enerjiye dönüşmesi esnasındaki reaksiyonlar ise aşağıda verilmiştir (Akpan ve Hameed, 2009):



Yarıiletken metal oksitte valans bandında bulunan elektron güneş enerjisi sayesinde iletkenlik bandına taşınır. Boyanın bozunması Güneş enerjisinin de etkisi ile oluşan -OH radikalinin kuvvetli oksitleyici özelliği sayesinde sağlanır. Boyar madde bozunma adımları:



şekil 2'de analiz grafiği verilen FT-IR sonuçlarına göre oluşan -OH radikalleri malahit yeşili ve metilen mavisinin bozunmasına neden olmaktadır.

Sonuçlar

X-ışınları toz difraktometre verilerine göre sol-jel yöntemi ile kübik kristal örgüye sahip CeO₂:0,1Er_{0,1}Y bileşiği elde edildi. Malahit yeşili ve metilen mavisi kullanılarak fotokatalizör özellikleri incelendi ve boya bozunmasında etkili olduğu bulundu. CeO₂:0,1Er_{0,1}Y bileşiğinin optik band aralığı 2,92 eV olarak Tauc grafiğinden hesaplandı. Sentezlenen CeO₂:0,1Er_{0,1}Y fotokatalizörünün verimi malahit yeşili için %37, metilen mavisi için %48 olarak hesaplandı. CeO₂, Er³⁺ ve Y³⁺ nadir toprak elementlerinin katkılanması ile enerji transferinin arttırılmasından kaynaklanabilecek optik aktivitelerini önemli ölçüde geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederiz.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Araştırma konusu birinci yazar tarafından belirlenmiştir. Deneysel süreçlerin yorumlanmasında yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır. Tüm yazarlar, makalenin son haline onay vermiştir.

Kaynaklar

- Akpan UG., Hameed BH. Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: a review. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 170(2-3): 520-529
- Aseena S., Abraham N., Babu VS. Morphological and optical studies of zinc doped cerium oxide nanoparticles prepared by single step co-precipitation method. *Materials Today: Proceedings* 2021; 80(3): 1901-1905
- Fauzi AA., Jalil AA., Hassan NS., Aziz FFA., Azami MS., Hussain I., Vo DV. A critical review on relationship of CeO₂-based photocatalyst towards mechanistic degradation of organic pollutant. *Chemosphere* 2022; 286: 131651.
- Jack Clifton II., Leikin JB. Methylene blue. *American journal of Therapeutics* 2003; 10(4): 289-291.
- Koe WS., Lee JW., Chong WC., Pang YL., Sim LC. An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane. *Environmental Science and Pollution Research* 2020; 27(3): 2522-2565.
- Kerli S., Kavgacı M., Soğuksu AK., Avar B. Photocatalytic degradation of methylene blue, rhodamine-b, and malachite green by Ag@ ZnO/TiO₂. *Brazilian Journal of Physics* 2022; 52(1): 1-11.
- Liyanage AD., Perera SD., Tan K., Chabal Y., Balkus Jr, KJ. Synthesis, characterization, and photocatalytic activity of Y-doped CeO₂ nanorods. *Acs Catalysis* 2014; 4(2): 577-584.
- Ma R., Zhang S., Wen T., Gu P., Li L., Zhao G., Wang X., A critical review on visible-light-response CeO₂-based photocatalysts with enhanced photooxidation of organic pollutants. *Catalysis Today* 2019; 335: 20-30.

- Mittal A. Adsorption kinetics of removal of a toxic dye, Malachite Green, from wastewater by using hen feathers. *Journal of hazardous materials* 2006; 133(1-3): 196-202.
- Magdalane CM., Kaviyarasu K., Vijaya JJ., Siddhardha B., Jeyaraj B. Facile synthesis of heterostructured cerium oxide/yttrium oxide nanocomposite in UV light induced photocatalytic degradation and catalytic reduction: synergistic effect of antimicrobial studies. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 2017; 173: 23-34.
- Magdalane CM., Kaviyarasu K., Vijaya JJ., Jayakumar C., Maaza M., Jeyaraj B. Photocatalytic degradation effect of malachite green and catalytic hydrogenation by UV-illuminated CeO₂/CdO multilayered nanoplatelet arrays: investigation of antifungal and antimicrobial activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 2017; 169: 110-123.
- Miao H., Huang GF., Liu JH., Zhou BX., Pan A., Huang WQ., Huang GF. Origin of enhanced photocatalytic activity of F-doped CeO₂ nanocubes. *Applied Surface Science* 2016; 370: 427-432.
- Kırkgeçit R., Torun HÖ. La³⁺, Ho³⁺ katkılı seryum oksidin sol-jel yöntem ile sentezi: kafes kusurları ve optik özellikleri üzerindeki değişim. *Eurasian Journal of Biological and Chemical Sciences* 2020; 3(Suppl 1): 180-188.
- Rafatulla M., Sulaiman O., Hashim,R., Ahmad A. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. *Journal of Hazardous Materials* 2010; 177(1-3): 70-80.
- Tiwari S., Rathore G., Patra N., Yadav AK., Bhattacharya D., Jha SN., Sen S. Oxygen and cerium defects mediated changes in structural, optical and photoluminescence properties of Ni substituted CeO₂. *Journal of Alloys and Compounds* 2019;782: 689-698.
- Torun HÖ., Kırkgeçit R., Dokan FK., Öztürk E. Preparation of La-Dy-CeO₂ ternary compound: Examination of photocatalytic and photoluminescence properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2021; 418: 113338.
- Veziroglu S., Kuru M., Ghorri MZ., Dokan FK., Hinz AM., Strunskus T., Aktas OC. Ultra-fast degradation of methylene blue by Au/ZnO-CeO₂ nano-hybrid catalyst. *Materials Letters* 2017; 209: 486-491.
- Xiao Y., Jin X., Zhang L., Luo H., Li J. Preparation and photocatalytic performance of Cu-doped CeO₂ by citrate combustion method. *Integrated Ferroelectrics* 2018; 191(1): 169-179.
- Xu B., Yang H., Zhang Q., Yuan S., Xie A., Zhang M., Ohno T. Design and synthesis of Sm, Y, La and Nd-doped CeO₂ with a broom-like hierarchical structure: a photocatalyst with enhanced oxidation performance. *Chem Cat Chem* 2020; 12(9): 2638-2646
- Younis A., Chu D., Kaneti YV., Li S. Tuning the surface oxygen concentration of {111} surrounded ceria nanocrystals for enhanced photocatalytic activities. *Nanoscale* 2016; 8(1): 378-387.