

PAPER DETAILS

TITLE: Etkili Aktif Karbon Destekli CdS Fotokatalizörlerin Fotokatalitik Uygulamaları

AUTHORS: Mehmet Sait IZGI, Cihan ZÖRER, Orhan BAYTAR, Ömer SAHİN, Sabit HOROZ

PAGES: 662-670

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1147838>

Araştırma Makalesi / Research Article

Etkili Aktif Karbon Destekli CdS Fotokatalizörlerin Fotokatalitik Uygulamaları

Mehmet Sait İZGİ^{1*}, Cihan ZÖRER²,
Orhan BAYTAR¹, Sabit HOROZ³, Ömer ŞAHİN¹

¹Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

²Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt, Türkiye

³Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Siirt, Türkiye
(ORCID: 0000-0003-3685-3219) (ORCID: 0000-0002-7620-6529) (ORCID: 0000-0002-2915-202x)
(ORCID: 0000-0002-3238-8789) (ORCID: 0000-0003-4575-3762)

Öz

Farklı aktif karbon konsantrasyonları (%5, %10 ve %20) kullanılarak aktif karbon destekli CdS fotokatalizörler hidrotermal tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. Sentezlenen %5, %10 ve %20 aktif karbon destekli CdS fotokatalizörler sırasıyla CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 şeklinde isimlendirilmiştir. Fotokatalitik deneylerin birinci aşamasında metilen mavisinin fotokatalitik bozundurulmasında en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olan fotokatalizör belirlendi. Daha sonra bu fotokatalizör varlığında, katalizör miktarı ve boya konsantrasyonu gibi farklı parametrelerin metilen mavisinin fotokatalitik bozundurulmasını nasıl etkilediği incelenmiştir. Çalışmanın son kısmından en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olan fotokatalizörün yapısal, morfolojik ve elementsel özellikleri sırasıyla x-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı x-ışını (EDX) cihazları ile karakterize edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Aktif karbon, fotokatalitik, karakterizasyon, sentezleme, yarıiletken

Photocatalytic Applications of Effective Activated Carbon Supported Cds Photocatalysts

Abstract

Activated carbon supported CdS photocatalysts with different activated carbon concentrations (5%, 10% and 20%) were synthesized using hydrothermal technique. The synthesized activated carbon (5%, 10% and 20%) supported CdS photocatalysts were named as CdS_1, CdS_2 and CdS_3, respectively. In the first step of photocatalytic experiments, the photocatalyst having the best photocatalytic activity was determined in the photocatalytic degradation of methylene blue. Then, in the presence of this photocatalyst, it was investigated how different parameters such as catalyst amount and dye concentration affect the photocatalytic degradation of methylene blue. In the last part of the study, the structural, morphological and elemental properties of the photocatalyst having the best photocatalytic activity were characterized by x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersing x-ray (EDX) devices, respectively.

Keywords: Activated carbon, photocatalytic, characterization, synthesis, semiconductor

1. Giriş

Son birkaç on yıl boyunca tekstil endüstrisinden salınan atık su, kirletici maddeler olarak boya içeren zorlu bir çevre sorunu olarak ortaya çıkmıştır. Bu kirletici maddelerin doğal bozulması her ne ise zor bir iş olarak görülmektedir [1-3]. Birkaç araştırma grubu[4-6] bu sorunla başa çıkmak için çalışmalar yapmıştır. Buna göre, araştırmacıların suda mevcut olan kirleticilerin doğal bozundurulması için yarı

*Sorumlu yazar: saitizgi@gmail.com

Geliş Tarihi: 20.11.2019, Kabul Tarihi: 08.04.2020

iletken fotokatalizörler, araştırmacıların önemli bir şekilde dikkatini çekmiştir. Bu tür yarı iletken fotokatalizörler arasında, TiO_2 [7], ZnO [8] ve SnO_2 [9]'ler, düşük toksite, yüksek fotokatalitik aktivite ve stabiliteye sahip olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır. Bu özelliklere rağmen, geniş bir bant boşluğuna sahip olan metal oksitlerin aktiviteleri sadece UV bölgesinde incelenmiştir. Görünür bölgedeki spektral aralık ile yakından eşleşen, 2.4 eV [10]'lik bant aralığı enerjisine sahip olan CdS'nin oldukça aktif bir fotokatalizör olduğu iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, sulu ortamdaki foto korozyon etkisi ve CdS'deki yüksek elektron-boşluk çiftinin rekombinasyon hızı, CdS' nin fotokatalitik aktivitesini sınırlandırmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için (a) metallerle katkılama [11], (b) metal oksitlerle çiftleştirme [12] ve (c) karbon bazlı malzemelerle destekleme [13] gibi farklı stratejiler geliştirilmiştir. CdS'nin karbon nanotüpler (CNT'ler), azaltılmış grafen oksitler [14], fulleren (C_{60}) [15] ve karbon küreleri [16] gibi karbon bazlı malzemelere yüklenmesi sonucunda, onun fotokatalitik aktivitesinde kayda değer bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bu destekleyici malzemelerin yüksek piyasa maliyeti nedeniyle yüklü CdS'nin ticarileştirilmesi mümkün olamamıştır. Karbon bazlı malzemeler arasında, aktif karbon; yüksek yüzey alanı, iyi kimyasal stabilite, üstün ışık tepki yeteneği ve mükemmel elektronik özellikler sayesinde birçok alanda potansiyel olarak uygulanmıştır [17, 18]. Yüksek yüzey alanı ve düşük maliyeti nedeniyle, aktif karbonlar, yarı iletken fotokatalizörler için destek malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aktif karbon üzerine yükleme, fotokatalizörün boya bozunum verimliliğinin yanı sıra yüzey alanında da önemli bir gelişme sağlamaktadır [19].

Huang ve arkadaşları [20], aktif karbon destekli CdS fotokatalizör varlığında Rhodamine B'nin fotokatalitik bozundurulmasını incelemiştir. Bu katalizörün yüksek fotokatalitik aktiviteye sahip olmasına rağmen tekrar kullanılabilirlik açısından yetersiz olduğu rapor edilmiştir. Guo ve arkadaşları [21], mikro gözenekli karbonlu destek nedeniyle yüksek yüzey alanına sahip CdS yüklü kömür bazlı aktif karbon nano fiberleri başarıyla sentezlemişlerdir. Benzer şekilde Hu ve arkadaşları [22], mikrodalga destekli sentez ile kolloidal karbon küresinin CdS nanopartikülleriyle kaplanmasını incelemişlerdir. Bununla birlikte, her iki durumda da, bu fotokatalizörün ticarileştirilmesi, pahalı destekleyici malzemeler nedeniyle zor olmaktadır. Bu çalışmada, basit hidrotermal yöntem kullanarak, aktif karbona CdS kristallerini başarıyla yükledik ve daha az partikül boyutu, homojen dağılım ve yüksek saflık avantajları [23-25] elde ettik. Genel olarak, fotokatalizörler, sulu ortam içinde yüzey alanlarını azaltan topaklaşma sergilerken, aktif karbon üzerine yükleme, topaklaşma olmadan muntazam bir dağılım sağlamaktadır. Buna ek olarak, aktif karbonun yüksek adsorpsiyon kapasitesi, organik kirleticiler ile fotokataliz arasındaki teması ve fotokatalitik aktiviteyi arttırmaktadır. Ayrıca, kullanılan fotokatalizör basit filtrasyon işlemi ile kolayca geri kazanılmaktadır.

Bu çalışmada, farklı aktif karbon konsantrasyonlarındaki aktif karbon destekli CdS fotokatalizörleri hidrotermal yöntem kullanılarak sentezlenmiştir. Farklı aktif karbon konsantrasyonlarında aktif karbon destekli CdS fotokatalizörlerine ait metilen mavisinin fotokatalitik bozundurma etkinliği UV-C lambasının varlığında incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Sentezleme sırasında aktif karbon, kadmiyum asetat, tiyoüre ve etilen-diamin gibi kimyasallar Sigma Aldrich şirketinden ticari olarak sağlanmıştır. Tüm kimyasallar analitik derecede olup farklı saflaştırma işlemi yapılmamıştır. Ayrıca fotokatalizörlerin sentezlenmesinde di-iyonize su kullanılmıştır.

2.2. Metot

Farklı aktif karbon konsantrasyonları (%5, %10 ve %20) kullanılarak aktif karbon destekli CdS fotokatalizörler hidrotermal tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. 40 ml'lik di-iyonize suda sırasıyla 2.76 g kadmiyum asetat ve 1.67 g tiyoüre eklenerek karıştırma işlemi 30 dakika boyunca sürdürülmüştür. Daha sonra karışım üzerine 2.6 ml'lik etilen-diamin eklenmiştir. Ağırlıkça %5'lik aktif karbon CdS karışımı üzerine eklenerek %5 aktif karbon destekli CdS fotokatalizörün elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen bu karışım 2 saat kuvvetlice karıştırıldı ve daha sonra Teflon kaplı paslanmaz çelik otoklav içine aktararak ve 12 saat 180° C'de olacak şekilde etüv içerisinde tutuldu. Reaksiyonun

tamamlanmasından sonra, otoklav oda sıcaklığına soğutuldu. Elde edilen zeytin renkli toz vakumda 70 °C'de kurutuldu.

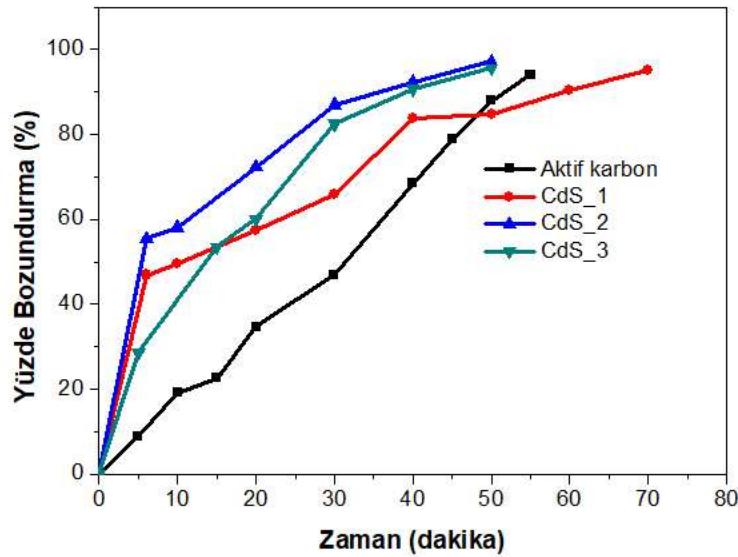
Benzer sentezleme işlemleri %10 ve %20 aktif karbon destekli CdS fotokatalizörlerin elde edilmesinde uygulandı. Sentezlenen %5, %10 ve %20 aktif karbon destekli CdS fotokatalizörler sırasıyla CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 şeklinde isimlendirilmiştir.

CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 fotokatalizörler kullanılarak metilen mavisinin fotokatalitik bozundurulması UV-C lambasının varlığında incelenmiştir. Metilen mavisinin fotokatalitik bozundurma testleri için kullanılan parametreler sırasıyla 22 ml'lik çözelti, 25 mg'lık katalizör, 20 ppm'lik boya konsantrasyonudur. Fotokatalitik deneylerin birinci aşamasında metilen mavisinin fotokatalitik bozundurulmasında en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olan fotokatalizör belirlendi. Daha sonra bu fotokatalizör varlığında, katalizör miktarı ve boya konsantrasyonu gibi farklı parametrelerin metilen mavisinin fotokatalitik bozundurulmasını nasıl etkilediği incelenmiştir. Çalışmanın son kısmından en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olan fotokatalizörün yapısal, morfolojik ve elementsel özellikleri sırasıyla x-ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı x-ışını (EDX) cihazları ile karakterize edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. En iyi aktif karbon/CdS oranının tespiti

CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 fotokatalizör varlığında metilen mavisinin bozundurulmasında en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olan aktif karbon/CdS oranını tespit etmek için fotokatalitik bozundurma deneyleri 22 mL çözelti hacmi, 20 ppm metilen mavisi konsantrasyonu ve 25 mg katalizör miktarı şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri Şekil 1'de gösterilmektedir.

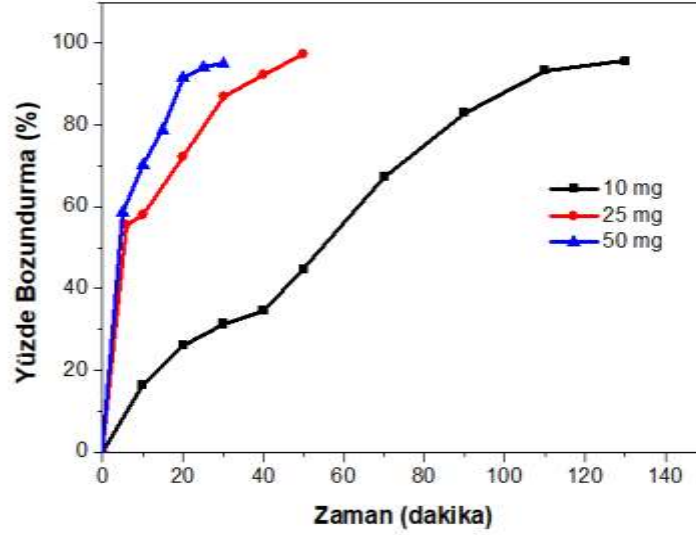


Şekil 1. Aktif karbon, CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 fotokatalizöre ait zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri.

Şekil 1'den görüldüğü gibi aktif karbon/CdS oranı % 5'den % 10'a artırıldığında fotokatalizör aktivitesinin arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir. Bu durumun muhtemel nedeni düşük aktif karbon/CdS oranlarında CdS yeterli olmadığı ve yüksek aktif karbon/CdS oranlarında ise CdS üst üste gelip aktiviteyi azalttığı düşünülmektedir. Aktif karbon/CdS oranının en aktif oranının % 10 olduğu belirlenmiş bundan sonraki parametrelerde CdS_2 fotokatalizörü kullanılmıştır.

3.2. Katalizör miktarı etkisi

En aktif aktif karbon/CdS oranı belirlendikten sonra; 22 mL çözelti hacmi ve 20 ppm metilen mavisi konsantrasyonu şartlarında ve CdS_2 fotokatalizörü varlığında farklı katalizör miktarları için metilen mavisinin zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri Şekil 2’de verilmektedir.

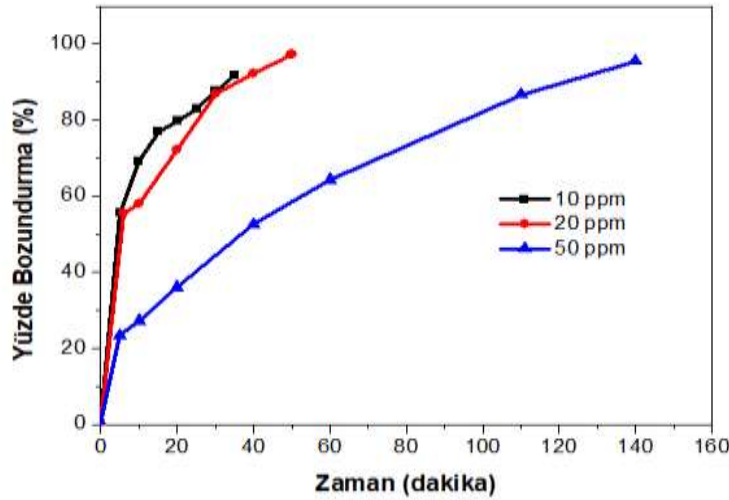


Şekil 2. CdS_2 fotokatalizörü varlığında farklı katalizör miktarları için metilen mavisinin zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri.

Şekil 2’de görüldüğü gibi katalizör miktarının 10 mg’dan 50 mg’a artmasıyla yüzde bozundurma artmaktadır. Bu durumun muhtemel nedeni artan katalizör miktarıyla birlikte aktif bölgelerin artması sonucu katalizör yüzeyinde ışık adsorpsiyonu ve OH⁻ radikallerinin oluşması artacağından dolayı boyar madde giderim yüzdesi de artacaktır.

3.3. Metilen mavisi konsantrasyonu etkisi

22 mL çözelti hacmi ve 25 mg CdS_2 fotokatalizörü varlığında farklı metilen mavisi konsantrasyonu için metilen mavisinin zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. CdS_2 fotokatalizörü varlığında farklı metilen mavisi konsantrasyonu için metilen mavisinin zaman-yüzdelik bozundurma eğrileri.

Şekil 3’de görüldüğü gibi metilen mavisinin konsantrasyonunun artmasıyla yüzde bozundurma azaldığı görülmektedir. Örneğin 10 ppm çözelti başlangıç konsantrasyonu 35 dakika’da bozunurken 50 ppm çözelti başlangıç konsantrasyonu 140 dakika’da bozunmaktadır. Bu durumun muhtemel nedeni artan metilen mavisi konsantrasyonu katalizör yüzeyi üzerine adsorpsiyon kapasitesini arttırmakta ve bu yüzden katalizör yüzeyinde oluşan OH⁻ adsorpsiyonunu engelleyerek fotokatalitik aktivasyonunu azaltmakta ve bunun sonucunda OH⁻ oluşumundaki azalış renk giderim veriminde düşüşe yol açmaktadır.

3.4. Metilen mavisinin bozundurma kinetiği

Metilen mavisinin CdS_2 fotokatalizörü varlığında fotokatalitik bozundurma kinetiği birinci ve ikinci derece kinetik model ile incelenmiştir. Birinci ve ikinci derece kinetik model denklemleri aşağıda sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) şeklinde verilmiştir.

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = k_1 \cdot t \quad (1)$$

$$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_o} = k_2 \cdot t \quad (2)$$

C_t : t anındaki çözelti derişimi (mg/l)

C_o : Başlangıç çözelti derişimi (mg/l)

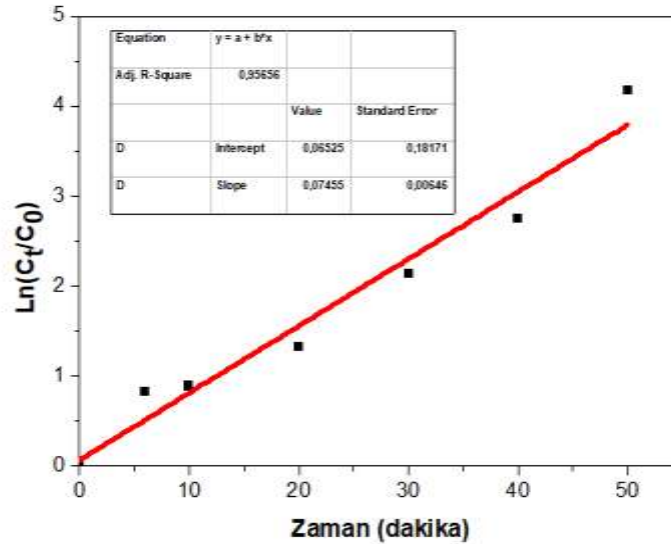
k_1 : Birinci dereceden adsorpsiyon hız sabiti (dk.⁻¹)

k_2 : İkinci dereceden adsorpsiyon hız sabiti (l/(mg dk.))

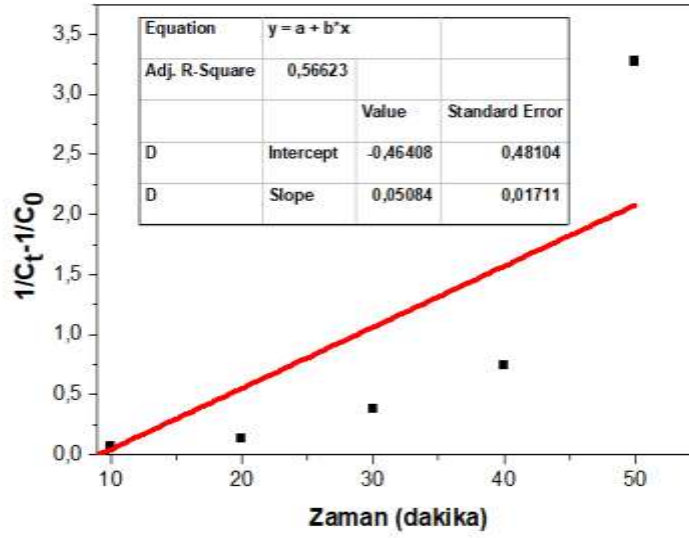
t : Adsorpsiyon süresi (dk.)

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak hem birinci dereceden hem de ikinci dereceden kinetik modeller için elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 4a ve Şekil 4b’de verilmiştir.

Her iki şekilden açıkça görüleceği gibi metilen mavisinin CdS_2 fotokatalizörü varlığında fotokatalitik bozundurma kinetiği birinci derecedendir. Bu sonuç metilen mavisinin fotokatalitik bozundurmasının zaman kontrollü olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4a. CdS_2 fotokatalizörü varlığında metilen mavisinin fotokatalitik bozundurma kinetik grafiği: birinci derece kinetik model.



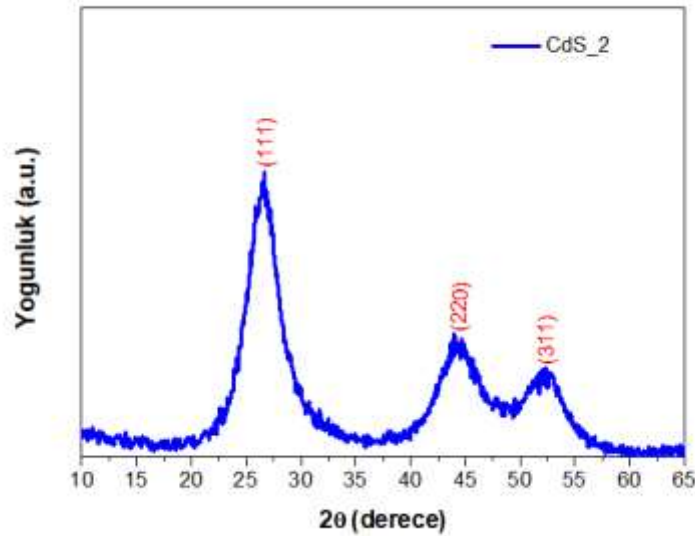
Şekil 4b. CdS_2 fotokatalizörü varlığında metilen mavisinin fotokatalitik bozundurma kinetik grafiği: ikinci derece kinetik model.

3.5. CdS_2 fotokatalizörünün karakterizasyonu

CdS_2 fotokatalizörünün kristal yapısını karakterize etmek için XRD tekniği kullanılmıştır. CdS_2 fotokatalizörü için elde edilen XRD kırınım desenleri Şekil 5 'te gösterilmektedir. Şekilde gösterilen üç geniş kırınım desenlerinin sırasıyla (111), (220) ve (311) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu durum sentezlenen CdS_2 fotokatalizörünün kübik yapıda olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuç CdS'ye ait standart JCPDS dosyasıyla (JCPDS- 75-1546) örtüşmektedir. Ayrıca, CdS_2 fotokatalizörüne ait kristalit boyutu, aşağıda verilen Scherrer formülü (Eşitlik 3) kullanılarak 3 nm olarak hesaplandı;

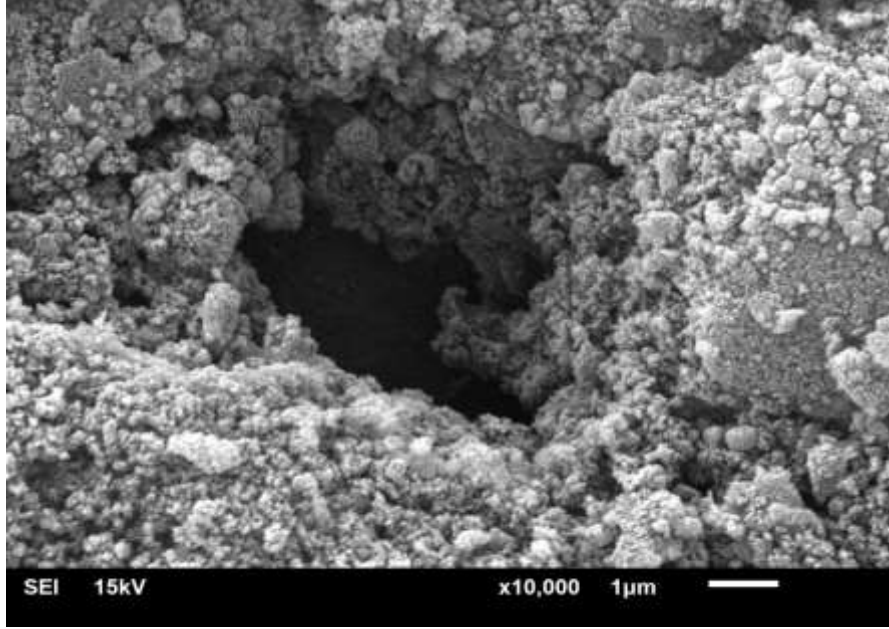
$$d = \frac{0,9*\lambda}{\beta*cos\theta} \quad (3)$$

Burada d : CdS_2 fotokatalizörünün kristalit boyutu, λ : XRD cihazının dalga boyu, β : radyan olarak yarı yükseklikteki tam genişliği (FWHM) ve θ : Bragg'ın kırınım açısıdır.



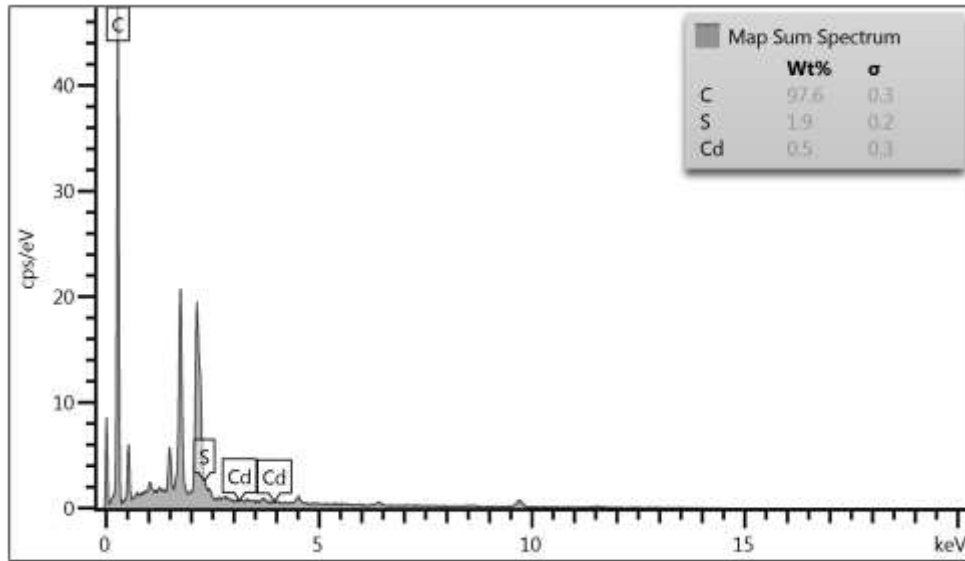
Şekil 5. CdS_2 fotokatalizörüne ait XRD kırınım desenleri.

Şekil 6'da CdS_2 fotokatalizörüne ait kaydedilen bir SEM görüntüsü gösterilmektedir. Görüntüden anlaşılacağı gibi CdS_2 örneğinin topak (bulk) şeklinde oluştuğu, bu topakların bir araya gelmesiyle de yüzey üzerinde öbekler oluştuğu görülmüştür. Ayrıca oluşan öbeklerden dolayı sentezlenen CdS_2 fotokatalizörünün farklı boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle aynı öbek içinde farklı boyutlarda parçacıklar tespit edilebilmektedir.



Şekil 6. CdS_2 fotokatalizörüne ait kaydedilen bir SEM görüntüsü.

Sentezlenen CdS_2 fotokatalizörünün başarılı bir şekilde sentezlenip sentezlenmediğini tespit edebilmek için sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesi EDX ölçümü yapmaktır. EDX ölçümü sonucunda elde edilen spektruma bakılarak istenilen elementin gözlenip gözlenmediğini tespit etmek mümkündür. Bu bilgi ışığında sentezlenen CdS_2 fotokatalizörüne ait elementsel analizi inceleyebilmek için EDX ölçümü gerçekleştirilmiş ve fotokatalizör için elde edilen EDX spektrumu Şekil 7'de gösterilmiştir. Spektrumda Cd, S ve C elementlerinin gözlemlenmesi CdS_2 fotokatalizörünün başarılı bir şekilde sentezlendiğinin bir göstergesidir.



Şekil 7. CdS_2 fotokatalizörüne ait EDX spektrumu.

4. Sonuç

Mevcut çalışmada ağırlıkça farklı aktif karbon konsantrasyonlarına sahip aktif karbon destekli CdS (CdS_1, CdS_2 ve CdS_3) fotokatalizörler hidrotermal tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. CdS_1, CdS_2 ve CdS_3 fotokatalizörlerin varlığında metilen mavisinin fotokatalitik bozundurma verimliliği UV-C lambasının varlığında incelenmiştir. CdS_2 fotokatalizörünün en iyi fotokatalitik aktiviteye sahip olduğu fotokatalitik bozundurma deneyleri sonucunda tespit edilmiştir. Sonuç olarak, aktif karbonun bir destek olarak kullanılmasıyla ilgili şu anki çalışmamızın malzeme bilimleri alanında önemli bir yaklaşım olarak hizmet etmesi gerektiğini düşünüyoruz.

Teşekkür

Bu çalışma Siirt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından 2019-SİÜFEB-005 projesi kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Makale için hipotezin oluşturulmasına ve gerekli düzenlemelerin takip edilmesine Prof. Dr. Ömer ŞAHİN katkı sağlamıştır. Çalışmanın deney yürütümü Doç. Dr. Orhan BAYTAR ve Cihan ZÖRER katkı sağlamıştır. Yürütülen teorik hesaplamalardaki sonuçların sunumuna, fotokatalizörlerin karakterizasyon yorumları, literatürün araştırılmasına ve makalenin yazımına Doç. Dr. Mehmet Sait İZGİ ve Doç. Dr. Sabit HOROZ katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Baytar O., Sahin O., Kılıçvuran H., Horoz S. 2018 Synthesis, structural, optical and photocatalytic properties of Fe-alloyed CdZnS nanoparticles. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(6): 4564-4568.
- [2] Anis P., Eren H. 2002. Comparison of Alkaline Scouring of Cotton vs. Alkaline Pectinase Preparation. AATCC Review, 12 (2): 22-26
- [3] Horoz S. Baytar O., Şahin Ö., Kılıçvuran H. 2018. Photocatalytic degradation of methylene blue with Co alloyed CdZnS nanoparticles. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29 (2): 1004-1010.
- [4] Das S., Mahalingam H. 2019. Dye degradation studies using immobilized pristine and waste polystyrene-TiO₂/rGO/g-C₃N₄ nanocomposite photocatalytic film in a novel airlift reactor under solar light. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7 (5): 103289.
- [5] Hussein A.A., Alzuhairi M., Aljanabi N.H. 2018. Degradation and depolymerization of plastic waste by local bacterial isolates and bubble column reactor. AIP Conference Proceedings, 1: 030081.
- [6] Salami J., Crews C.M. 2017. Waste disposal-An attractive strategy for cancer therapy. Science, 355 (6330): 1163.
- [7] Reddy K.R., Karthik K.V., Benaka Prasad S.B., Soni S.K. Jeong H.M., Raghu A.V. 2016. Enhanced photocatalytic activity of nanostructured titanium dioxide/polyaniline hybrid photocatalysts. Polyhedron, 120: 169-174.
- [8] Taghavi Fardood S., Ramazani A., Moradi S., Asiabi A.A. 2017. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using arabic gum and photocatalytic degradation of direct blue 129 dye under visible light. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28 (18): 13596-13601.

- [9] Abbasi S., Hasanpour M. 2017. The effect of pH on the photocatalytic degradation of methyl orange using decorated ZnO nanoparticles with SnO₂ nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (2): 1307-1314.
- [10] Horoz S., Sahin O. 2017. Synthesis, characterizations and photovoltaic properties of Cr-doped CdS QDs. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (23): 17784-17790.
- [11] Park H., Choi W., Hoffmann M.R. 2008. Effects of the preparation method of the ternary CdS/TiO₂/Pt hybrid photocatalysts on visible light-induced hydrogen production. *Journal of Materials Chemistry*, 18 (20): 2379-2385.
- [12] Jia X., Tahir M., Pan L., Huang Z.F., Zhang X., Wang L., Zou J.J. 2016. Direct Z-scheme composite of CdS and oxygen-defected CdWO₄: An efficient visible-light-driven photocatalyst for hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 198: 154-161.
- [13] Neelgund G.M., Oki A. 2011. Photocatalytic activity of CdS and Ag(2)S quantum dots deposited on poly(amidoamine) functionalized carbon nanotubes. *Applied catalysis. B, Environmental*, 110: 99-107.
- [14] Li Q., Guo B., Yu J., Ran J., Zhang B., Yan H., Gong J.R. 2011. Highly Efficient Visible-Light-Driven Photocatalytic Hydrogen Production of CdS-Cluster-Decorated Graphene Nanosheets. *Journal of the American Chemical Society*, 133 (28): 10878-10884.
- [15] Cai Q., Hu Z., Zhang Q., Li B., Shen Z. 2017. Fullerene (C60)/CdS nanocomposite with enhanced photocatalytic activity and stability. *Applied Surface Science*, 403: 151-158.
- [16] Wang Q., Lian J., Ma Q., Zhang S., He J., Zhong J., Li J., Huang H., Su B. 2017. Preparation of carbon spheres supported CdS photocatalyst for enhancement its photocatalytic H₂ evolution. *Catalysis Today*, 281: 662-668.
- [17] Liu S.X., Chen X.Y., Chen X. 2007. A TiO₂/AC composite photocatalyst with high activity and easy separation prepared by a hydrothermal method. *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1): 257-263.
- [18] Wang X., Liu Y., Hu Z., Chen Y., Liu W., Zhao G. 2009. Degradation of methyl orange by composite photocatalysts nano-TiO₂ immobilized on activated carbons of different porosities. *Journal of Hazardous Materials*, 169 (1): 1061-1067.
- [19] Laohasurayotin K., Pookboonmee S. 2013. Multifunctional properties of Ag/TiO₂/bamboo charcoal composites: Preparation and examination through several characterization methods. *Applied Surface Science*, 282: 236-244.
- [20] Huang H.-B., Wang Y., Cai F.Y., Jiao W.B., Zhang N., Liu C., Cao H.L., Lü J. 2017. Photodegradation of Rhodamine B over Biomass-Derived Activated Carbon Supported CdS Nanomaterials under Visible Irradiation. *Frontiers in Chemistry*, 5 (123): 1-10.
- [21] Guo J., Guo M., Jia D., Song X., Tong F. 2016. CdS loaded on coal based activated carbon nanofibers with enhanced photocatalytic property. *Chemical Physics Letters*, 659: 66-69.
- [22] Hu Y., Liu Y., Qian H., Li Z., Chen J. 2010. Coating Colloidal Carbon Spheres with CdS Nanoparticles: Microwave-Assisted Synthesis and Enhanced Photocatalytic Activity. *Langmuir*, 26 (23): 18570-18575.
- [23] Balushi B., Marzouqi F.A., Wahaibi B., Kuvarega A.T., Kindiy S., Kim Y., Selvaraj R. 2018. Hydrothermal synthesis of CdS sub-microspheres for photocatalytic degradation of pharmaceuticals. *Applied Surface Science*, 457 (1): 559-565.
- [24] Tian Z., Yu N., Cheng Y., Wang Z., Chen Z., Zhang L. 2017. Hydrothermal synthesis of graphene/TiO₂/CdS nanocomposites as efficient visible-light-driven photocatalysts. *Materials Letters*, 194: 172-175.
- [25] Zou S., Fu Z., Xiang C., Wu W., Tang S., Liu Y., Yin D. 2015. Mild, one-step hydrothermal synthesis of carbon-coated CdS nanoparticles with improved photocatalytic activity and stability. *Chinese Journal of Catalysis*, 36 (7): 1077-1085.