

**PENGARUH ION LOGAM Cd(II) DAN pH LARUTAN TERHADAP
EFEKTIVITAS FOTODEGRADASI ZAT WARNA REMAZOL BLACK B
MENGUNAKAN KATALIS TiO₂**

Nor Basid Adiwibawa Prasetya*, Abdul Haris, Gunawan

Laboratorium Kimia Analitik, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA,
Universitas Diponegoro
email: norbasidap@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian pengaruh ion logam Cd(II) dan pH larutan terhadap efektivitas fotodegradasi zat warna *Remazol Black B* menggunakan katalis TiO₂. Serbuk TiO₂ yang digunakan dikarakterisasi dengan menggunakan XRD. Proses fotokatalisis dilakukan secara simultan menggunakan katalis TiO₂ dalam suatu reaktor tertutup yang dilengkapi dengan lampu UV-C. Konsentrasi *Remazol Black B* dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis dan AAS. Hasil karakterisasi serbuk TiO₂ menunjukkan bahwa TiO₂ yang digunakan mempunyai struktur kristal anatase dengan harga d yaitu 3,5; 2,42; 2,37; 2,32; 1,9; 1,7 dan mempunyai ukuran kristal 46,696 nm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ion logam Cd(II) meningkatkan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B* dan secara simultan mereduksi ion logam Cd(II) menjadi Cd_(s). Pada proses fotodegradasi *Remazol Black B* 40 ppm dengan TiO₂ 50 mg, penambahan ion logam Cd(II) paling optimum adalah pada konsentrasi 4,5 ppm yang menghasilkan fotodegradasi *Remazol Black B* sebesar 85,83% dengan fotoreduksi ion Cd(II) sebesar 97,78%. Proses fotodegradasi *Remazol Black B* dengan adanya penambahan ion logam Cd(II) paling efektif adalah pada pH 4, dengan efektivitas fotodegradasi sebesar 97,62%.

Kata kunci: fotokatalis, fotodegradasi, *Remazol Black B*, TiO₂, Cd(II)

**EFFECT OF Cd(II) ION AND pH ON REMAZOL BLACK B
PHOTODEGRADATION BY USING TiO₂ PHOTOCATALYST**

ABSTRACT

The effect of metal ions Cd (II) and pH on the effectiveness of photodegradation of Remazol Black B dye using TiO₂ catalyst has been investigated. TiO₂ powder was characterized by using XRD. Photocatalysis experiments conducted simultaneously using TiO₂ catalyst in a closed reactor equipped with UV-C lamp. Remazol Black B remain concentration was analyzed using UV-Vis spectrophotometer and Cd(II) remain was analyzed by using AAS. The results of TiO₂ powder characterization indicated that TiO₂ had anatase crystal structure with the d value were 3.5, 2.42, 2.37, 2.32, 1.9, 1.7 and had 46.696 nm of crystal size. The photocatalysis results showed that the addition of Cd(II) metal ions can enhance the effectiveness of photodegradation of Remazol Black B and to reduced the metal ions Cd(II) to Cd_(s) simultaneously. In the process of photodegradation of 40 ppm Remazol Black B with 50 mg TiO₂, the most optimum Cd(II) ions addition was 4.5 ppm and it resulted photodegradation of Remazol Black B up to 85.83% and

photoreduction of Cd(II) ion up to 97.78%. The most effective photodegradation of Remazol Black B with the addition of Cd(II) metal ions was at pH 4, and it resulted the effectiveness of Remazol Black B photodegradation up to 97.62%.

Keywords: Photodegradation, Photocatalyst, Remazol Black B, TiO₂, Cd(II)

PENDAHULUAN

Salah satu zat warna sintetis yang dipakai pada industri tekstil adalah *Remazol Black B*. Zat warna ini merupakan senyawa golongan azo. Sekitar 15-20% zat warna yang digunakan akan tersisa pada air buangan yang pada akhirnya akan masuk ke dalam lingkungan sekitarnya (Chatterjee, dan Dasgupta, 2005). Pada limbah tekstil selain zat warna juga terdapat logam berat seperti kadmium (Cd). Keracunan kadmium dapat bersifat akut dan kronis. Efek keracunan yang dapat ditimbulkannya berupa penyakit paru-paru, hati, tekanan darah tinggi, gangguan pada sistem ginjal dan kelenjar pencernaan serta mengakibatkan kerapuhan pada tulang (Marganof, 2003). Berdasarkan KEP-51/MENLH/10/1995 tentang baku mutu larutan cair bagi kegiatan industri, nilai ambang batas logam kadmium (Cd) adalah 0,05 ppm.

Telah dikembangkan metode pengolahan polutan zat warna dan logam berat dengan proses fotokatalisis. Dengan metode ini, larutan zat warna akan diurai menjadi komponen-komponen yang lebih sederhana dan lebih aman untuk lingkungan (Ong, *et al.*, 2010; Fatimah, dan Wijaya, 2005; Hoffmann, 1995)¹. Sedangkan ion logam berat akan direduksi sehingga akan mudah dihilangkan dari badan air (Slamet, dkk., 2005). Selain itu, metode fotokatalisis relatif lebih sederhana dan ekonomis bila dibandingkan dengan metode-metode lain (Linsebigler, *et al.*, 1995; Kritikos, *et al.*, 2008; Jang, *et al.*, 2004; Amisha, *et al.*, 2008; Barakat, 2010).

Adanya penambahan ion logam dapat meningkatkan proses fotodegradasi pada fenol (Slamet, dkk., 2005; Samarghandi and Nouri, 2007). Pengaruh penambahan ion logam Cd(II) dapat meningkatkan fotodegradasi senyawa fenol (Samarghandi and Nouri, 2007). Selain itu, proses pengolahan limbah secara simultan dapat meningkatkan konversi reduksi ion Cr(VI) dan menaikkan konversi degradasi fenol (Slamet, dkk., 2005). Pada penelitian ini adanya ion logam Cd(II) diharapkan dapat meningkatkan fotodegradasi dari larutan zat warna *Remazol Black B*. Selain itu proses fotokatalisis juga dapat digunakan sebagai metode untuk mereduksi ion Cd(II) menjadi Cd_(s). Metode ini diharapkan dapat digunakan sebagai alternatif metode pengolahan larutan zat warna industri tekstil dan logam berat secara simultan.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat: spektrofotometer *UV-Vis*, difraktometer sinar-X, neraca analitik, spektroskopi serapan atom, pengaduk magnet, lampu UV, peralatan gelas, batang pengaduk, erlemeyer, gelas beker, pipet volume.

Bahan: TiO₂ (Merck), 3CdSO₄.5H₂O (Merck), aquadest, pewarna *Remazol Black B*, kertas saring Whatman 42.

Prosedur Penelitian

Karakterisasi Katalis TiO₂

Katalis TiO₂ dikarakterisasi dengan XRD, untuk mengidentifikasi struktur kristal dari katalis TiO₂. Ukuran kristal

sampel juga diperoleh dari setengah puncak maksimum dari puncak XRD dengan persamaan *Scherrer*:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

dengan D adalah ukuran Kristal, $\lambda=0,154$ nm merupakan panjang gelombang sinar-X, β adalah nilai FWHM masing-masing puncak karakteristik, θ adalah sudut difraksi dan $K = 0,94$ merupakan suatu konstanta.

Reaksi fotokatalisis larutan zat warna *Remazol Black B* dengan penambahan Ion logam Cd(II)

Larutan zat warna *Remazol Black B* dibuat dengan konsentrasi 40 ppm sebanyak 100 mL. Kemudian 50 mL larutan ion logam Cd(II) dimasukkan dalam larutan zat warna *Remazol Black B*. Fotokatalis TiO₂ dengan berat 50 mg dimasukkan ke dalam campuran larutan zat warna *Remazol Black B* dan ion logam Cd(II). Kemudian larutan distirer didalam reaktor selama 4 jam. Sampel disaring lalu dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengetahui konsentrasi *Remazol Black B* yang tersisa. Untuk mengetahui ion logam Cd(II) yang tersisa dalam larutan digunakan metode AAS. Pada penelitian ini penambahan ion logam Cd(II) divariasi mulai dari 3 ppm, 4,5 ppm, 6

ppm, 9 ppm, 12 ppm, dan 15 ppm. Pada penelitian ini pH yang digunakan divariasi mulai dari pH 2, 4, 6, 8, dan 10. Efektivitas fotodegradasi dan fotoreduksi dihitung dengan menggunakan persamaan:

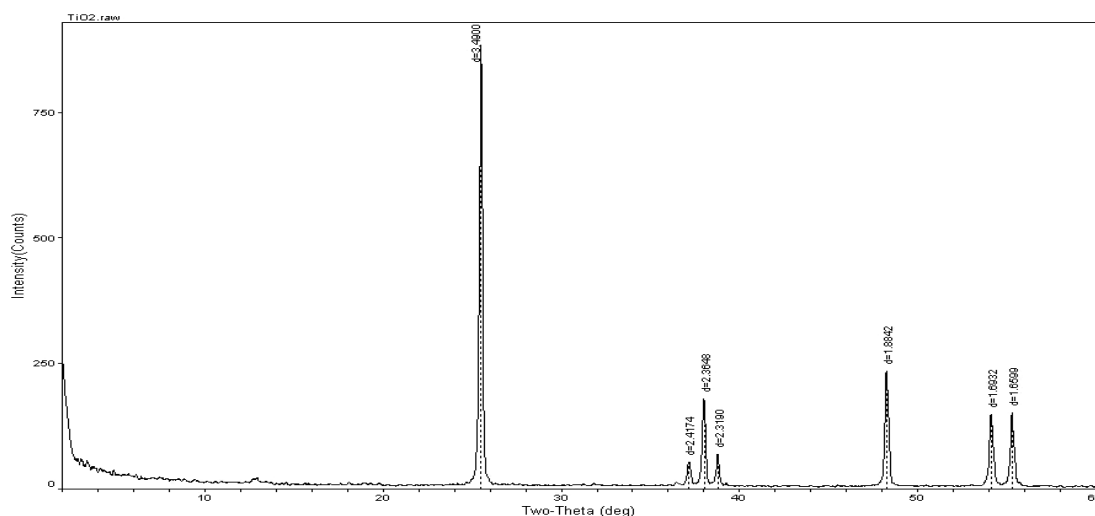
$$\text{Efektivitas (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\%$$

Dimana C_0 adalah konsentrasi awal sebelum fotoradiasi, dan C adalah konsentrasi akhir setelah fotoradiasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Kristal TiO₂

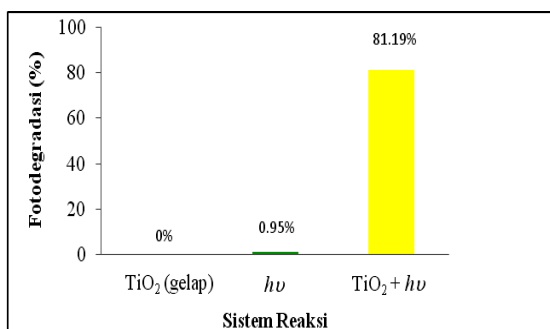
Dari Gambar 1 Serbuk TiO₂ dapat diketahui struktur kristal TiO₂ dari harga d yang dimiliki difraktogram dan membandingkannya dengan difraktogram standard yang disediakan oleh JCPDS. Berdasarkan difraktogram harga d yang dimiliki TiO₂ adalah 3,5; 2,42; 2,37; 2,32; 1,9; 1,7, yang menunjukkan struktur kristal dari TiO₂ berbentuk anatase. Struktur anatase menunjukkan aktivitas fotokatalis yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan struktur rutil (Linsebigler, *et al.*, 1995). Ukuran kristal TiO₂ yang didapat melalui persamaan Scherrer adalah 46,696 nm.



Gambar 1. Difraktogram TiO₂

Pengaruh Penyinaran dengan Sinar UV dan Penambahan Fotokatalis TiO₂ terhadap Efektivitas Fotodegradasi Remazol Black B

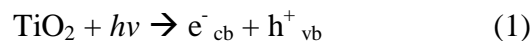
Gambar 2 menunjukkan persentase degradasi Remazol Black B dengan penambahan fotokatalis TiO₂ dalam lingkungan gelap, kemudian dengan penyinaran UV saja tanpa penambahan fotokatalis TiO₂, dan dengan penyinaran UV dengan penambahan fotokatalis TiO₂.



Gambar 2. Persentase fotodegradasi Remazol Black B dengan penyinaran sinar UV dan penambahan fotokatalis TiO₂

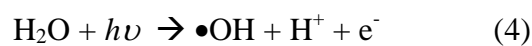
Dari Gambar 2 terlihat persentase degradasi tertinggi adalah dengan penyinaran UV dibantu dengan penambahan fotokatalis TiO₂ yaitu sebesar 81,19%. Hal ini dapat terjadi karena dihasilkan radikal •OH yang bersifat sebagai oksidator kuat, yang dapat mendegradasi Remazol Black B selama penyinaran. Dapat dijelaskan prinsip fotodegradasi adalah adanya loncatan elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada logam semikonduktor jika dikenai suatu energi foton. Loncatan elektron ini menyebabkan timbulnya hole (lubang elektron) yang dapat berinteraksi dengan pelarut (air) membentuk radikal •OH. Radikal bersifat aktif dan dapat berlanjut untuk menguraikan senyawa organik contohnya Remazol Black B. Proses pembentukan radikal •OH dan

elektron dapat ditunjukkan dengan reaksi (Gunlazuardi, 2001).



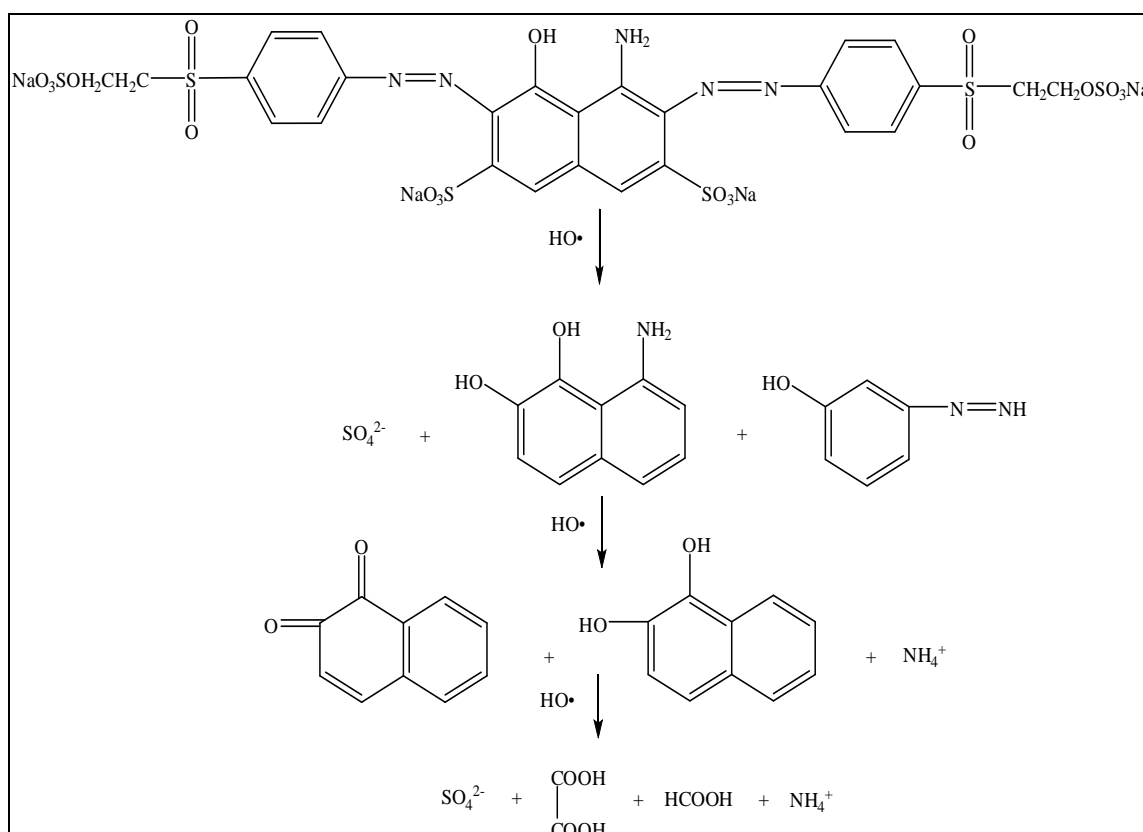
Pada saat TiO₂ dikenai sinar UV, maka terjadi eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi meninggalkan hole positif (h_{vb}^+) pada pita valensi. Spesies h_{vb}^+ yang terikat di permukaan fotokatalis kemudian membentuk radikal •OH. Reaksi pelepasan elektron ini berjalan relatif cepat dibandingkan reaksi fotolisis molekul air sehingga jumlah elektron yang dihasilkan relatif lebih banyak. Semakin banyak elektron yang dihasilkan, maka semakin banyak pula hole yang dihasilkan pada pita valensi. Semakin banyak hole maka radikal •OH yang dihasilkan hasil reaksi dengan air akan semakin banyak pula.

Proses fotodegradasi Remazol Black B dengan penyinaran UV tanpa penambahan fotokatalis TiO₂ dapat terjadi melalui reaksi fotolisis air, dari reaksi tersebut juga dihasilkan radikal •OH dan elektron. Reaksi ini berjalan relatif lambat terjadi, dapat dilihat dari gambar bahwa persentase fotodegradasi dengan penyinaran UV tanpa penambahan fotokatalis TiO₂ hanya sebesar 0,95%. Radikal •OH hasil dari reaksi fotolisis air dapat ditunjukkan dengan reaksi berikut:



Radikal •OH hasil dari reaksi fotolisis air digunakan untuk mengoksidasi senyawa Remazol Black B.

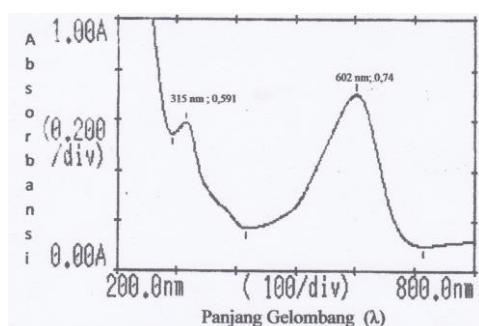
Mekanisme fotodegradasi Remazol Black B dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



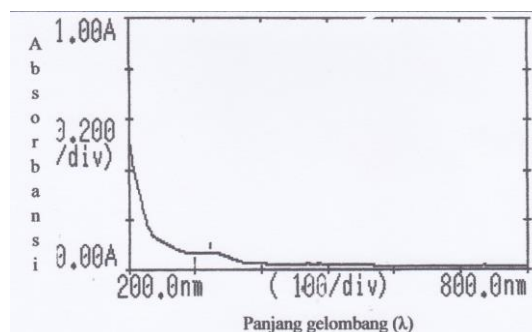
Gambar 3. Mekanisme degradasi *Remazol Black B*^[14]

Mekanisme tersebut didukung oleh data *scanning* absorbansi larutan *Remazol Black B* pada rentang panjang gelombang UV-tampak pada keadaan sebelum fotoradiasi dan setelah fotoradiasi dengan adanya senyawa fotokatalis TiO_2 selama 4 jam (Gambar 4). Terdapat penurunan intensitas absorbansi pada panjang

gelombang 287 nm yang merupakan panjang gelombang khas gugus benzena sebagai gugus penyusun struktur *Remazol Black B*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa benzena telah terdegradasi menjadi senyawa-senyawa yang lebih kecil.



(a)



(b)

Gambar 4. Data *scanning* absorbansi larutan *Remazol Black B* pada rentang panjang gelombang UV-tampak pada keadaan: (a) sebelum fotoradiasi dan (b) setelah fotoradiasi dengan adanya senyawa fotokatalis TiO_2 selama 4 jam

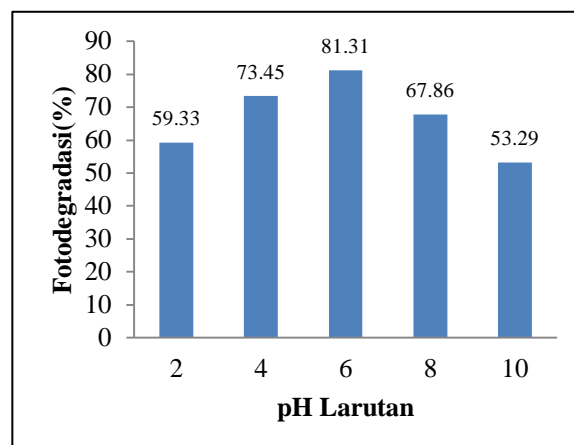
Sementara itu, pada senyawa *Remazol Black B* dengan penambahan TiO_2 tanpa bantuan sinar UV atau kondisi gelap tidak terjadi proses fotodegradasi. Hal ini dapat terlihat dari hasil pada Gambar 2, bahwa persentase fotodegradasi adalah 0%. Hal ini terjadi karena tidak dihasilkan radikal $\bullet\text{OH}$ yang berfungsi untuk mengoksidasi senyawa *Remazol Black B*. Peristiwa adsorpsi zat warna *Remazol Black B* juga tidak terjadi, ditandai konsentrasi dari zat warna *Remazol Black B* tetap.

Fotodegradasi dengan penyinaran UV dan penambahan fotokatalis TiO_2 memiliki nilai yang paling besar bila dibandingkan dengan hanya penyinaran UV atau dalam kondisi ruangan gelap. Dapat diketahui bahwa peran fotokatalis dan sinar UV sangat besar dalam proses fotodegradasi karena dapat menghasilkan radikal $\bullet\text{OH}$ yang melimpah, yang berfungsi untuk mengoksidasi senyawa *Remazol Black B*.

Pengaruh pH Larutan terhadap Efektivitas Fotodegradasi *Remazol Black B*

Terkatalis TiO_2

Dikaji pengaruh pH larutan terhadap efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B* dengan melakukan variasi pada berbagai macam pH pada waktu tetap yaitu 4 jam, berat katalis TiO_2 sebesar 50 mg, dan dengan konsentrasi zat warna *Remazol Black B* 40 ppm. Hasil persentase fotodegradasi *Remazol Black B* dengan variasi pH ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Persentase fotodegradasi *Remazol Black B* terhadap berbagai kondisi pH larutan

Terjadi kenaikan efektivitas fotodegradasi dari pH asam sampai netral. Hal ini dapat dipengaruhi oleh spesiasi dari logam TiO_2 . Pada kondisi asam TiO_2 berbentuk $>\text{TiOH}_2^+$. Spesies ini susah melepaskan radikal $\bullet\text{OH}$, sehingga efektivitas fotodegradasi menjadi rendah. Pada pH mendekati netral TiO_2 berbentuk spesies TiOH . Spesies TiOH relatif lebih mudah melepaskan radikal $\bullet\text{OH}$ sehingga efektivitas fotodegradasi menjadi lebih tinggi bila dibandingkan pada kondisi asam. Pada kondisi basa TiO_2 berbentuk TiO^- , yang relatif lebih susah membentuk radikal $\bullet\text{OH}$. Sehingga dapat dilihat pada gambar 4 bahwa pada pH 8 dan 10 terjadi penurunan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B*.

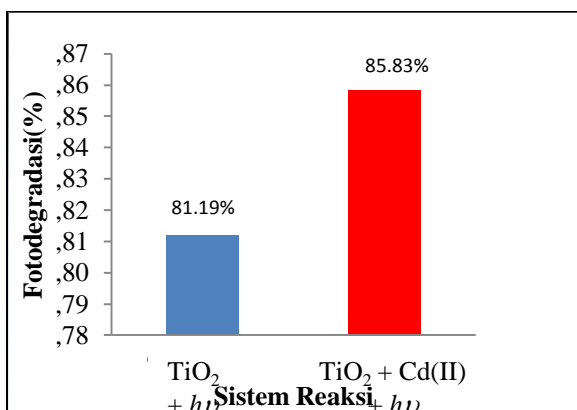
Pengaruh Penambahan Ion Logam Cd(II) terhadap Efektivitas Fotodegradasi *Remazol Black B* Menggunakan katalis TiO_2

Dari Gambar 6 menunjukkan persentase fotodegradasi setelah penambahan ion logam Cd(II) lebih tinggi bila dibandingkan dengan fotodegradasi tanpa penambahan ion logam Cd(II). Persentase fotodegradasi setelah penambahan ion logam Cd(II) yaitu sebesar 85,83%. Hal ini dapat

terjadi karena adanya ion logam Cd(II) dapat menangkap e^- yang terbentuk setelah TiO_2 dikenai sinar UV sehingga dapat mencegah rekombinasi dari pasangan elektron-hole (e^- dan h^+) yang dijabarkan pada reaksi (5) dan (6).

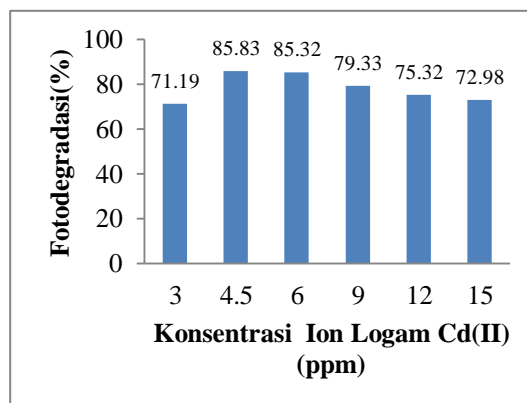


Elektron yang dihasilkan pada saat TiO_2 ketika disinari sinar UV digunakan untuk mereduksi ion logam Cd(II) menjadi logam $Cd_{(s)}$ sehingga mencegah reaksi rekombinasi antara hole (h^+) dan elektron (e^-). Hal ini dapat mengakibatkan semakin banyak populasi hole (h^+) yang tersedia. Dengan semakin banyak hole (h^+) yang tersedia, maka efektivitas fotodegradasi dari zat warna *Remazol Black B* akan semakin meningkat.



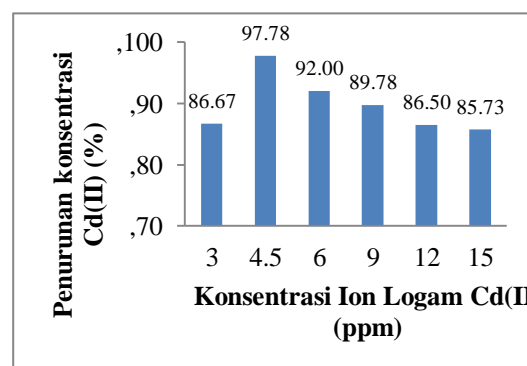
Gambar 6. Persentase fotodegradasi sebelum dan setelah penambahan ion logam Cd(II)

Pada penelitian juga dilakukan variasi konsentrasi penambahan ion logam Cd(II) pada proses fotodegradasi zat warna *Remazol Black B*. Proses fotokatalitik dilakukan pada pH normal, kemudian konsentrasi *Remazol Black B* 40 ppm dan menggunakan katalis TiO_2 sebesar 50 mg.



Gambar 7. Persentase fotodegradasi *Remazol Black B* setelah ditambahkan ion logam Cd(II) dengan berbagai variasi konsentrasi

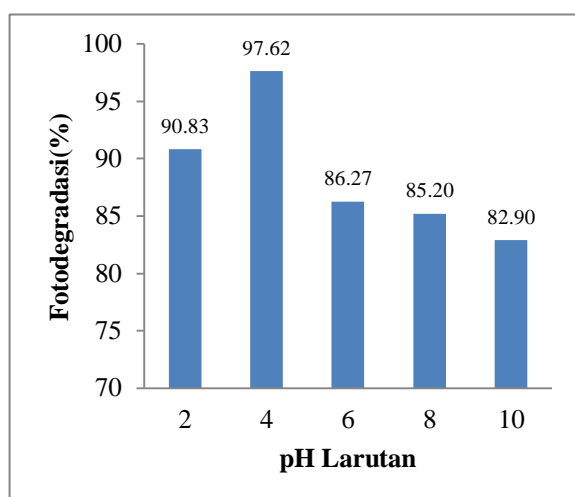
Berdasarkan Gambar 7 diketahui persentase fotodegradasi tertinggi terletak pada konsentrasi ion logam Cd(II) 4,5 ppm. Penambahan logam yang semakin meningkat akan mengakibatkan penurunan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B*. Penurunan efektivitas ini diakibatkan karena semakin banyak ion logam yang ditambahkan maka logam $Cd_{(s)}$ yang terbentuk juga semakin banyak. Akibatnya sisi aktif dari TiO_2 yang seharusnya digunakan dalam proses fotodegradasi tertutupi oleh logam $Cd_{(s)}$ yang menempel pada permukaan TiO_2 . Persentase fotoreduksi dari ion logam Cd(II) menjadi $Cd_{(s)}$ dapat ditunjukkan melalui Gambar 7.



Gambar 8. Penurunan konsentrasi ion logam Cd(II) pada berbagai variasi konsentrasi

Gambar 8 menunjukkan persentase fotoreduksi tertinggi terjadi pada penambahan ion logam Cd(II) dengan konsentrasi 4,5 ppm yaitu sebesar 97,78%. Semakin tinggi proses fotoreduksi akan mengakibatkan semakin meningkatnya efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B*. Seiring semakin banyaknya elektron yang digunakan untuk mereduksi ion logam Cd(II), maka *hole* yang tersedia akan semakin banyak pula, yang akan digunakan untuk proses fotodegradasi *Remazol Black B*.

Pengaruh pH Larutan terhadap Efektivitas Fotodegradasi *Remazol Black B* Menggunakan Katalis TiO₂ dengan Adanya Ion logam Cd(II)

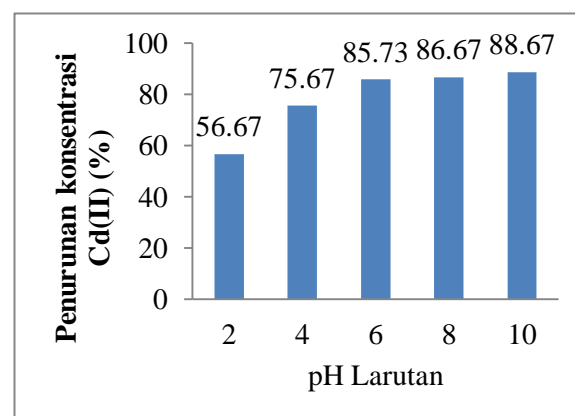


Gambar 9. Persentase fotodegradasi *Remazol Black B* pada berbagai variasi pH dengan penambahan ion logam Cd(II)

Kajian pengaruh pH terhadap fotodegradasi *Remazol Black B* dengan penambahan ion logam Cd(II) ditampilkan pada gambar 9. Terlihat persentase fotodegradasi *Remazol Black B* pada berbagai pH setelah penambahan ion logam Cd(II). Persentase fotodegradasi tertinggi *Remazol Black B* terletak pada pH 4. Hal ini dapat dipengaruhi oleh spesiasi dari logam Cd. Pada suasana asam logam Cd ditemukan

sebagai ion Cd²⁺, sedangkan pada keadaan basa Cd(II) berada dalam bentuk Cd(OH)⁺, endapan terhidroksi Cd(OH)₂, Cd(OH)₃⁻, dan Cd(OH)₄⁻². Diantara semua spesies-spesies tersebut, ion Cd²⁺ adalah yang paling mudah teradsorpsi pada permukaan TiO₂ dari pada dalam bentuk endapan atau anion. Proses fotoreduksi dari ion Cd(II) yang terjadi pada permukaan TiO₂ akan mengakibatkan naiknya efektivitas fotodegradasi dari *Remazol Black B*, karena elektron digunakan dalam proses fotoreduksi akan memperkecil proses rekombinasi dari pasangan elektron-hole (e⁻ dan h⁺).

Penurunan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B* terjadi pada kondisi pH basa. Hal ini dapat terjadi karena pada pH basa ion logam Cd(II) berbentuk endapan Cd(OH)₂ sebagaimana dijelaskan pada Gambar 10.



Gambar 10. Penurunan konsentrasi ion logam Cd(II) pada berbagai variasi pH larutan

Pada pH 8-10 penurunan konsentrasi ion logam Cd(II) karena terbentuknya endapan Cd(OH)₂. Terbentuknya endapan Cd(OH)₂ akan menurunkan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B*. Pembentukan endapan Cd(OH)₂ akan menyebabkan larutan menjadi keruh dan permukaan katalis menjadi tertutupi sehingga dapat menghalangi penetrasi sinar UV pada permukaan katalis. Terhalangnya

penetrasi sinar UV mengakibatkan penurunan efektivitas proses fotodegradasi *Remazol Black B*.

KESIMPULAN

1. Penambahan ion logam Cd(II) dapat meningkatkan efektivitas fotodegradasi *Remazol Black B* dan secara simultan dapat mereduksi ion Cd(II) menjadi Cd_(s).
2. Pada proses fotodegradasi *Remazol Black B* 40 ppm dengan TiO₂ 50 mg, penambahan ion logam Cd(II) paling optimum adalah pada konsentrasi 4,5 ppm yang menghasilkan fotodegradasi *Remazol Black B* sebesar 85,83% dengan fotoreduksi ion Cd(II) sebesar 97,78%.
3. pH optimum untuk proses fotodegradasi *Remazol Black B* dengan adanya penambahan ion logam Cd(II) adalah pada pH 4, yaitu dengan efektivitas fotodegradasi sebesar 97,62%.

DAFTAR PUSTAKA

- Amisha, S., Selvam, K., Sobana, N., dan Swamithan, M., 2008, Photomineralisation of Reactive Black 5 with ZnO Using Solar and UV-A Light, *J. Korean. Chem. Soc.*, Vol.52, No. 1.
- Applications of Semiconductor Photocatalysis, *Chem. Rev.*, Vol. 95, 69-96.
- Barakat, M.A., 2010, *Adsorption and Photodegradation of Procion Yellow H-Exl Dyes in Textile Wastewater Over TiO₂ Suspension*, Fourteenth International Water Technology Conference, Cairo.

Chatterjee, D., Patnama, V.R., Sikdar, A., Joshi, P., Misra, R., dan Rao, N.N., 2008, Kinetics of The Decoloration Of Reactive Dyes Over Visible Light-Irradiated TiO₂ Semiconductor Photocatalyst, *J. Hazardous. Mat.*, Vol. 156, 435-441.

Chatterjee, D., dan Dasgupta, S., 2005, Visible Light Induced Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants, *J. Photochem. Photobio.*, Vol 6, 186-205.

Fatimah, I., dan Wijaya, K., 2005, Sintesis TiO₂/Zeolit Sebagai Fotokatalis Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tapioka Secara Asorpsi-Fotodegradasi, *Teknoin*, Vol. 10, No. 4.

Gunlazuardi, J., 2001, Fotokatalisis pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya, *Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisik II*, Jakarta.

Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Choi, W., dan Bahnemann, D.W., 1995, *Environmental Marganof*, 2003, *Potensi Limbah Udang Sebagai Penyerap Logam Berat (Timbal, Kadmium dan Tembaga) di Perairan*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Jang, S.J., Kim, M.S., dan Kim, B.W., 2004, Photodegradation of Reactive Black 5 in Photoreactors Using TiO₂ Immobilized on a Glass Tube, *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol.10, No.4, 554-550.

Kritikos, D.E., Nikolaos, P.X., Psillakis, E., dan Mantzavinos, D., 2008, Photocatalytic Degradation of Reactive Black 5 in Aqueous Solutions: Effect of Operating Conditions and

- Coupling With Ultrasound Irradiation, *Water Research*, Vol. 41, 2236–2246.
- Linsebigler, A., Lu, G., dan Yates, J. T. Jr., 1995, Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Result, *Chem. Rev.*, Vol. 95, 735-758.
- Ong, S.T., Keng, P.S., Liw, W.T., Wan, S.L., dan Hung, Y.T., 2010, Photodegradation of Congo Red and Reactive Yellow 2 Using Immobilized TiO₂ under Sunlight Irradiation, *World. Appl. Sci. J.*, Vol. 9, No.3: 303-307.
- Samarghandi, M.R., Nouri, J., 2007, Mesdaghinia, A.R., Mahvi, A., Nasser, S., dan Vaezi, F., Efficiency Removal of Phenol, Lead and Cadmium by Means of UV/TiO₂/H₂O₂ Processes, *J. Environ. Sci. Tech.*, Vol. 4, No.1, 19-25.
- Slamet, Arbianti, dan Daryanto, 2005, Pengolahan Limbah Organik (Fenol) dan Logam Berat (Cr⁶⁺ atau Pt⁴⁺) Secara Simultan dengan Fotokatalis TiO₂, ZnO-TiO₂, dan CdS-TiO₂, *Makara Teknologi*, Vol. 9, No. 2,: 66-71.