

**FOTOKATALITIK REDUKSI ION Cu(II) DAN FOTODEGRADASI
PARASETAMOL YANG DIKATALISIS TiO₂ SEBAGAI ALTERNATIF
PENGOLAHAN LIMBAH**

**(PHOTOCATALYTIC REDUCTION OF Cu(II) ION AND TiO₂-CATALYZED
PARACETAMOL PHOTODEGRADATION AS AN ALTERNATIVE METHOD IN
WASTE TREATMENT)**

Devina Ingrid A.^{a*}, Eka Susanti Hp.^b, Erliena Okta Guna Santosa^b

^a Jurusan Analis Farmasi dan Makanan, Fakultas Kesehatan Universitas M.H. Thamrin, Jln. Raya Pondok Gede No. 23-25 Kramat Jati Jakarta Timur 13550

^b Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi “Yayasan Pharmasi” Semarang

*email: devina.ia@gmail.com

Received 30 September 2014, Accepted 2 Maret 2015, Published 01 September 2015

ABSTRAK

Baru-baru ini keberadaan limbah logam berat seperti Cu, Co, Pb, dan lain sebagainya menjadi sangat populer. Kehadiran Cu dapat berada bersama limbah farmasi seperti parasetamol. Proses fotokatalisis dapat digunakan sebagai alternatif dalam penyelesaian masalah ini. Penelitian ini mempelajari pengaruh lama penyinaran dan konsentrasi awal parasetamol terhadap fotoreduksi ion Cu(II) dengan menggunakan katalis TiO₂. Tujuan dilakukan penelitian ini untuk mengembangkan metode fotoreduksi yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya parasetamol guna pengurangan konsentrasi ion Cu(II) dan parasetamol di lingkungan perairan. Proses fotoreduksi ion Cu(II) dilakukan dalam suatu reaktor tertutup dilengkapi dengan lampu UV. Hasil proses fotokatalisis dianalisis menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) untuk menentukan konsentrasi ion Cu(II) dan Spektrofotometer Visibel untuk menentukan konsentrasi parasetamol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan fotokatalis TiO₂ dapat meningkatkan hasil fotoreduksi ion Cu(II). Fotoreduksi ion Cu(II) terus meningkat selama 15 hingga 45 menit pertama, namun lama penyinaran yang lebih dari 45 menit telah menurunkan fotoreduksi yang relatif kecil. Pada konsentrasi awal parasetamol dari 50 sampai 250 mg/L menghasilkan kenaikan fotodegradasi parasetamol, namun pada konsentrasi yang lebih dari 250 mg/L memberikan penurunan yang relatif besar. Adanya parasetamol dapat meningkatkan efektivitas fotoreduksi ion Cu(II) karena dapat mencegah penggabungan kembali radikal OH[•] dan elektron. Kondisi reaksi yang menghasilkan fotoreduksi paling efektif adalah 25 mL larutan ion Cu(II) 10 mg/L, 20 mg TiO₂ dengan penyinaran selama 45 menit, dan penambahan 25 mL parasetamol 250 mg/L. Pada kondisi tersebut ion Cu(II) tereduksi sebesar 98,87 % dan parasetamol terdegradasi sebesar 14,73 %.

Kata kunci: Cu(II), fotokatalisis, parasetamol, Spektrofotometri Serapan Atom, spektrofotometri visible

ABSTRACT

Recently, the issue of heavy metals are wastes is become popular such as Cu, Co, Pb, and etc. Furthermore, the presence of Cu together with paracetamol as pharmacy waste. Photocatalytic process could be an alternative to avoid the situation. This research investigated the influence of irradiation and the initial concentration of paracetamol toward TiO₂-catalyzed photoreduction of Cu(II). The research aims to develop a photoreduction method that is catalyzed by TiO₂ in the presence of paracetamol in reducing Cu(II) and paracetamol concentration. Cu(II) photoreduction process was (II) conducted in a close reactor equipped with a UV lamp. The remaining Cu(II) in solution was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) to determine its concentration and paracetamol concentration by visible spectrophotometry method. Results showed that the use of photocatalyst TiO₂ improves the photoreduction of Cu(II), 15-45 minutes irradiation also contributes the increment, over the time a tiny decrease in photoreduction effectivity occur, however. At initial paracetamol concentration, 50 to 250 mg/L lead to an increase in photodegradation of paracetamol, and large decline occur over e.i. 250 mg/L, however. The presence of paracetamol may increase the effectiveness of Cu(II) photoreduction due to the prevention of radical OH[•] and electrons recombination. The most effective photoreduction of 25 mL solution of ion Cu(II) 10 mg/L is readily achieve in reaction conditions using 20 mg of TiO₂ by 45 minutes irradiation in the present of 25 mL of paracetamol 250 mg/L. By those Cu(II) ion was reduced by 98.87 % and 14.73 % of paracetamol was degraded.

Keywords: Atomic Absorption Spectrophotometry, Cu(II), paracetamol, photocatalysis, visible spectrophotometry

PENDAHULUAN

Ambang batas ion Cu(II) dalam lingkungan perairan relatif rendah yaitu 1 mg/L. Walaupun pada konsentrasi yang sedemikian rendah, efek ion logam tembaga dapat berpengaruh langsung hingga terakumulasi pada rantai makanan. Metode yang akhir-akhir ini menarik perhatian adalah penghilangan ion Cu(II) secara kimia yaitu dengan metode fotoreduksi. Wahyuni *et al.* (2007) melaporkan bahwa ion Cu(II) dapat dihilangkan dengan metode fotoreduksi yang dikatalisis TiO₂.

Ion Cu(II) di dalam perairan dapat berada bersama-sama dengan polutan organik. Kehadiran senyawa farmasi dalam lingkungan perairan dan bahkan air minum menimbulkan kekhawatiran tentang potensi dampak negatif lingkungan maupun kesehatan manusia (Yang *et al.*, 2008). Untuk menghindari akumulasi obat dalam lingkungan perairan maka dilakukan pengembangan teknik menghilangkan senyawa farmasi melalui proses degradasi.

Sejauh ini, TiO₂ sering digunakan sebagai fotokatalis pada reaksi degradasi polutan organik, seperti zat warna (Lucarelli, 2000 *and* Ramli, 2005), pestisida (Konstantinou *et*

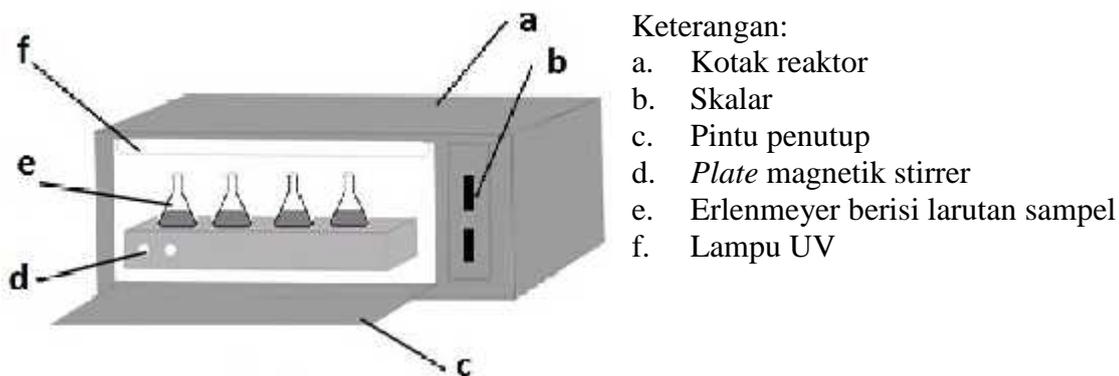
al., 2001), senyawa fenolik (Matos *et al.*, 2001; Piero *et al.*, 2001; Alemany *et al.*, 1997; Wastini, 2005) dan asam-asam karboksilat seperti asam oksalat serta asam malat (Ruhayatun, 2007). Fotodegradasi senyawa organik dapat terjadi karena penyerangan oleh radikal OH[•] yang dihasilkan oleh TiO₂ dalam sistem reaksi. Secara umum hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk mengoksidasi dan mendetoksi polutan-polutan organik tersebut.

Fotoreduksi adalah metode yang menggabungkan sinar UV dengan partikel semikonduktor sebagai fotokatalis, dalam hal ini menggunakan TiO₂. Air dan TiO₂ dapat menyediakan elektron setelah disinari dengan energi yang sesuai, dan pada saat bersamaan menghasilkan *hole* (h_{vb}⁺) yang mampu bereaksi dengan air pada permukaan fotokatalis menghasilkan radikal OH[•]. Elektron yang terbentuk akan ditangkap dan digunakan untuk proses fotoreduksi Cu(II) sedangkan radikal OH[•] yang dihasilkan digunakan untuk fotodegradasi. Senyawa parasetamol dapat mengalami fotodegradasi (fotooksidasi) dalam medium air dengan adanya sinar UV dan TiO₂ seperti penelitian yang telah dilaporkan oleh Dalmazio *et al.* (2008), Yang *et al.* (2008), dan Zhang *et al.* (2008). Keuntungan dari proses fotokatalisis adalah hanya memerlukan cahaya ultraviolet dan fotokatalis yang harganya murah sehingga metode ini efektif dan aman (Kanki *et al.*, 2004 and Wang *et al.*, 2004). Melalui penelitian ini diharapkan limbah anorganik seperti ion Cu(II) dan organik seperti parasetamol dapat diolah secara simultan dan dihilangkan melalui metode fotokatalisis, sehingga dapat memberikan kontribusi dalam solusi pengolahan limbah yang murah dan aman bagi lingkungan sekitar.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah TiO₂ (Multi Kimia Raya Chemicals), CuSO₄.5H₂O p.a. Merck, dan parasetamol (Brataco). Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi reaktor yang dilengkapi dengan satu set alat pengaduk magnetik merk Spinbar ukuran 2 cm dan lampu UV 20 watt tipe *black light blue* (BLB) merk Philips. Instrumen yang digunakan meliputi spektrofotometer serapan atom merk Perkin Elmer no seri 3110, dan spektrofotometer UV-Visibel spectronic 20D+.

Metode yang digunakan untuk mengetahui konsentrasi ion Cu(II) sisa adalah Spektrofotometri Serapan Atom dan parasetamol sisa adalah spektrofotometri visible. Lampu UV yang digunakan adalah UV C 20 watt dan jarak antara lampu UV dengan sampel 20 cm. Reaktor fotokatalis terlihat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaktor fotokatalis.

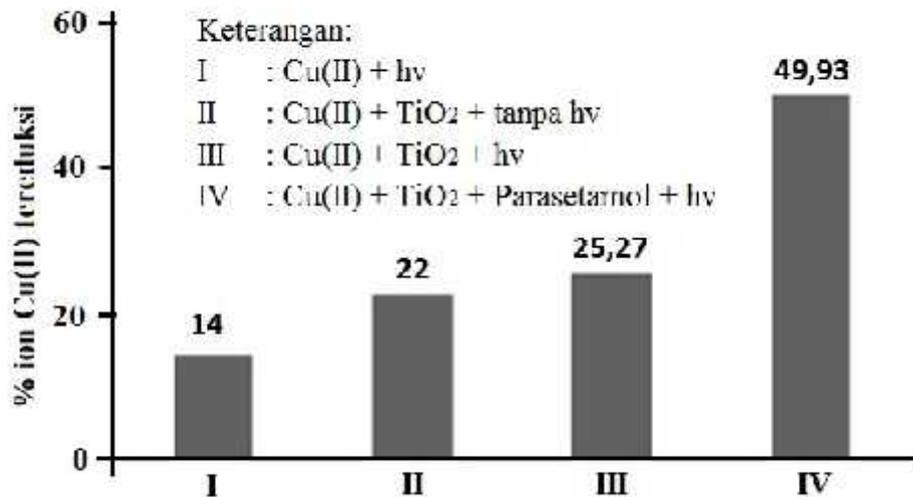
Proses fotoreduksi ion Cu(II) yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya parasetamol dilakukan menggunakan sistem *batch* dalam reaktor tertutup yang dilengkapi dengan lampu UV dan plate pengaduk magnetik pada jarak ± 20 cm dari lampu UV. Proses fotoreduksi dilakukan dengan cara menyinari campuran yang terdiri dari larutan ion Cu(II) 10 mg/L sebanyak 25 ml, parasetamol 300 mg/L sebanyak 25 ml, dan 0,02 g serbuk TiO₂ sehingga diperoleh suspensi. Erlenmeyer ditutup dengan plastik transparan kemudian disinari dengan lampu UV dan waktu penyinaran dilakukan dengan variasi waktu 15-90 menit dengan interval 15 menit. Pengaruh konsentrasi awal parasetamol terhadap fotoreduksi ion Cu(II) dikatalisis dengan TiO₂. Proses dilakukan terhadap sistem yang ditambah parasetamol dengan konsentrasi yang bervariasi yaitu 50, 100, 150, 200, 250, dan 300 mg/L. Sedangkan filtrat didapat dengan penyaringan dari suspensi menggunakan kertas saring whatman. Selanjutnya filtrat dianalisis dengan alat spektrofotometer serapan atom (SSA) guna menentukan konsentrasi ion Cu(II) yang tidak tereduksi dan alat spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan konsentrasi parasetamol yang tidak terdegradasi. Berdasarkan data absorbansi yang diperoleh, konsentrasi ion Cu(II) dan parasetamol sisa dihitung dengan mengintrapolasikannya pada kurva standar.

PEMBAHASAN

1. Peran fotokatalis dan keberadaan parasetamol terhadap fotoreduksi ion Cu(II)

Pengaruh fotokatalis dan keberadaan parasetamol terhadap efektivitas fotoreduksi ion Cu(II), ditentukan berdasarkan proses fotoreduksi ion Cu(II) tanpa maupun dengan

penambahan fotokatalis, proses pengadukan dilakukan pada tempat gelap maupun terang, serta ada maupun tidak adanya parasetamol. Hasil kajian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh cahaya, fotokatalis TiO₂, dan keberadaan parasetamol terhadap hasil fotoreduksi ion Cu(II).

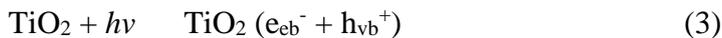
Gambar 2 menunjukkan pengurangan konsentrasi ion Cu(II) selama penyinaran tanpa adanya fotokatalis TiO₂ terjadi oleh adanya reaksi reduksi ion Cu(II) oleh elektron yang dihasilkan oleh peruraian molekul H₂O setelah menyerap foton (*hν*). Dalam hal ini reaksi yang terjadi adalah fotolisis air, yang menghasilkan radikal OH[•], H⁺, dan juga elektron (Hoffman *et al.*, 1995 and Linslebigler *et al.*, 1995). Reaksi fotolisis molekul air dan reaksi reduksi ion Cu(II) dituliskan dalam persamaan (1) dan (2).



Penurunan konsentrasi ion Cu(II) pada keadaan gelap (tanpa cahaya) sangat mungkin terjadi karena adanya proses adsorpsi ion logam tersebut pada permukaan fotokatalis TiO₂. Proses adsorpsi ini mengindikasikan bahwa reaksi fotoreduksi yang dikatalisis TiO₂ diawali dengan adsorpsi ion Cu(II) pada permukaan fotokatalis yang selanjutnya ion Cu(II) yang terserap mengalami kontak dengan elektron pada permukaan TiO₂ sehingga berlangsung reaksi reduksi.

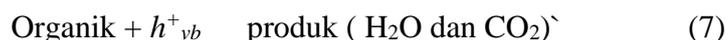
Dari gambar 2 juga teramati terjadinya pengurangan konsentrasi ion Cu(II) yang cukup besar yaitu 25,27 % dengan adanya penyinaran dan fotokatalis TiO₂. Hal ini terjadi karena TiO₂ dapat menyediakan elektron dan juga radikal OH[•] dalam jumlah yang cukup besar setelah fotokatalis TiO₂ dikenai sinar UV (Hoffmann *et al.*, 1995). Proses

pembentukan elektron dan radikal OH[•] pada permukaan fotokatalis ditunjukkan oleh reaksi yang tercantum dalam persamaan (3) dan (4).



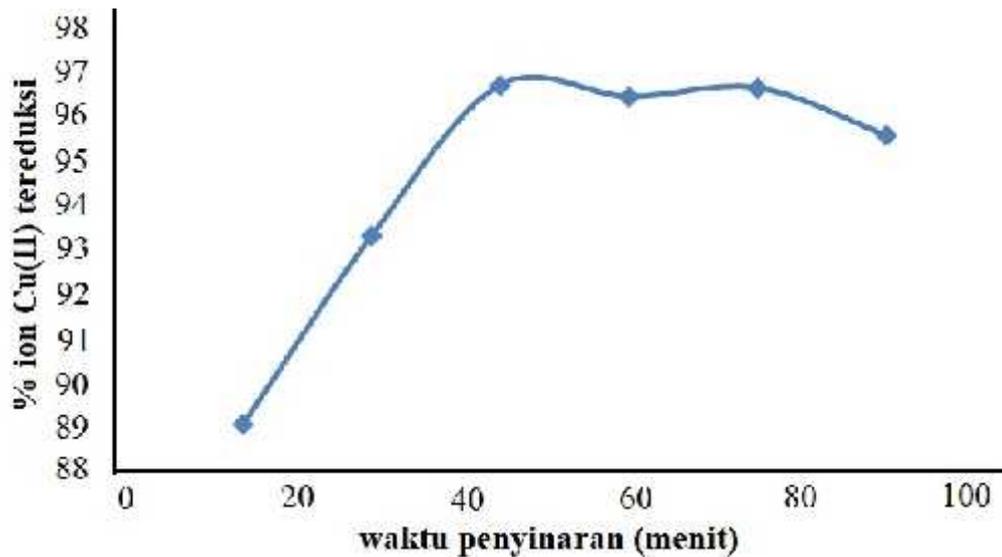
Pada saat TiO₂ dikenai sinar UV, maka terjadi eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi meninggalkan lubang positif (h_{vb}⁺) pada pita valensi. Spesies h_{vb}⁺ yang terikat di permukaan fotokatalis kemudian membentuk radikal OH[•]. Reaksi pelepasan elektron ini berjalan relatif cepat dibandingkan reaksi fotolisis molekul air sehingga jumlah elektron yang dihasilkan relatif lebih banyak (Linsebigler *et al.*, 1995 and Hoffmann *et al.*, 1995).

Gambar 2 menunjukkan bahwa penambahan parasetamol memberikan efektivitas fotoreduksi yang lebih tinggi daripada tanpa penambahan parasetamol. Hal ini terjadi karena parasetamol dapat bereaksi dengan radikal OH[•] yang tersedia dalam sistem reaksi. Reaksi pengikatan radikal OH[•] oleh parasetamol ini dapat mencegah terjadinya penggabungan kembali antara elektron dengan radikal OH[•]. Dengan demikian, jumlah elektron yang tersedia untuk mereduksi ion Cu(II) lebih banyak, sehingga hasil fotoreduksi meningkat. Hole yang dihasilkan dari reaksi (3) selanjutnya digunakan untuk bereaksi dengan H₂O sehingga terbentuk radikal OH[•] yang ditunjukkan pada reaksi yang tercantum dalam persamaan (5), (6), dan (7).



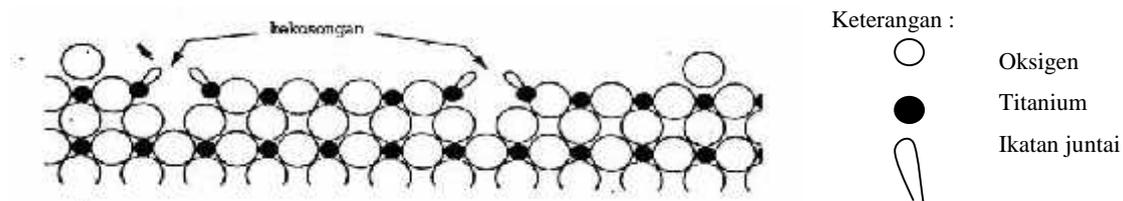
2. Pengaruh waktu penyinaran terhadap efektivitas fotoreduksi ion Cu(II) yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya parasetamol

Gambar 3 menunjukkan bahwa ion Cu(II) yang tereduksi meningkat dengan semakin lamanya waktu penyinaran. Lama waktu penyinaran dengan lampu UV dalam proses fotoreduksi menggambarkan lama interaksi atau kontak antara fotokatalis dengan cahaya (hν) dan kontak antara ion Cu(II) dengan elektron. Semakin lama waktu penyinaran maka kontak antara fotokatalis dengan cahaya juga semakin efektif sehingga elektron yang terbentuk pada permukaan fotokatalis semakin banyak. Jumlah elektron yang semakin banyak dan kontak antara ion Cu(II) dengan elektron yang semakin lama dipastikan memberikan efektivitas fotoreduksi yang semakin tinggi.



Gambar 3. Pengaruh waktu penyinaran terhadap fotoreduksi ion Cu(II) yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya parasetamol.

Akan tetapi dengan semakin lamanya waktu penyinaran (lebih dari 45 menit), semakin banyak Cu⁰ padat yang terbentuk sebagai hasil fotoreduksi, yang menempel pada permukaan TiO₂. Hal ini dapat menghalangi interaksi antara sinar dengan TiO₂ sehingga jumlah elektron yang dihasilkan berkurang, dengan demikian reaksi fotoreduksi ion Cu(II) berjalan lebih lambat. Masel (1996) melaporkan adanya sederetan ikatan jantai (*dangling dand*) pada permukaan semikonduktor TiO₂. Ikatan jantai terjadi ketika satu atom kehilangan atom tetangganya yang seharusnya bisa berikatan dengan atom tersebut. Ikatan jantai pada permukaan TiO₂ merupakan pusat antara atom-atom Ti yang kehilangan atom oksigennya. Kekosongan ikatan jantai pada TiO₂ ditunjukkan pada Gambar 4.

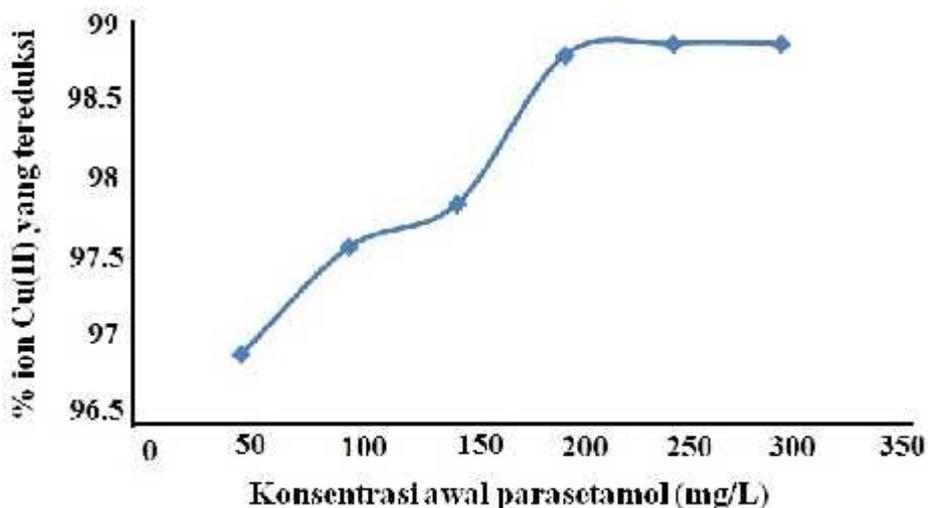


Gambar 4. Kekosongan oksigen pada permukaan TiO₂ (Masel, 1996).

Pada daerah ikatan jantai ini bisa terjadi pemerangkapan (*deep trap*). Kekosongan oksigen pada permukaan TiO₂ inilah yang dimungkinkan diisi oleh ion Cu(II) sehingga dapat terjadi proses adsorpsi. Proses adsorpsi ini mengindikasikan bahwa reaksi fotoreduksi yang dikatalisis TiO₂ diawali dengan adsorpsi ion Cu(II) pada permukaan

fotokatalis yang selanjutnya ion Cu(II) yang terserap mengalami kontak dengan elektron pada permukaan TiO₂ sehingga berlangsung reaksi reduksi.

3. Pengaruh konsentrasi awal parasetamol terhadap efektivitas fotoreduksi ion Cu(II) yang dikatalisis TiO₂

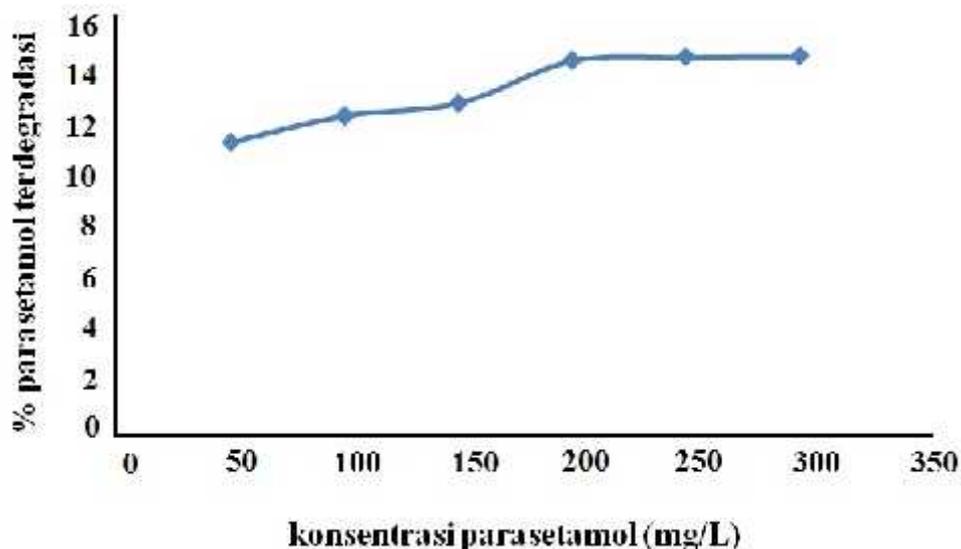


Gambar 5. Pengaruh konsentrasi awal parasetamol terhadap efektivitas fotoreduksi ion Cu(II) yang dikatalisis TiO₂ pada larutan yang terdiri dari 25 mL larutan ion Cu(II) 10 mg/mL, 0,02 g serbuk TiO₂, 25 mL parasetamol, dan waktu penyinaran 45 menit.

Kenaikan konsentrasi parasetamol dalam larutan menunjukkan jumlah parasetamol yang ada dalam sistem reaksi semakin banyak. Dengan jumlah molekul parasetamol yang semakin banyak, maka semakin banyak juga radikal OH[•] yang terikat atau bereaksi dengan parasetamol, sehingga penggabungan elektron dan radikal OH[•] dapat tercegah secara lebih efektif. Pencegahan yang efektif terhadap rekombinasi elektron dan radikal OH[•] ini memungkinkan tersedianya elektron yang diperlukan untuk reduksi ion Cu(II) dalam jumlah yang tetap dan relatif banyak, sehingga fotoreduksi berlangsung semakin efektif. Namun untuk kenaikan konsentrasi parasetamol yang lebih tinggi lagi, ternyata tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Hal ini mungkin disebabkan oleh jumlah radikal OH[•] yang ada relatif tetap sehingga hampir semua radikal OH[•] telah ditangkap parasetamol. Dengan demikian tidak teramati adanya peningkatan fotoreduksi yang signifikan pada kenaikan konsentrasi parasetamol 200 sampai dengan 300 mg/L.

4. Pengaruh konsentrasi awal parasetamol terhadap efektivitas fotodegradasi parasetamol yang dikatalisis TiO₂

Gambar 6 memperlihatkan bahwa reaksi parasetamol dengan radikal OH^{*} menyebabkan terjadinya degradasi parasetamol. Persentase parasetamol yang terdegradasi meningkat pada konsentrasi awal parasetamol 50 sampai 250 mg/L. Namun konsentrasi awal parasetamol diatas 250 mg/L memberikan hasil yang tetap, hal ini dimungkinkan oleh keberadaan radikal OH^{*} yang tersedia dalam sistem reaksi telah habis bereaksi dengan parasetamol.

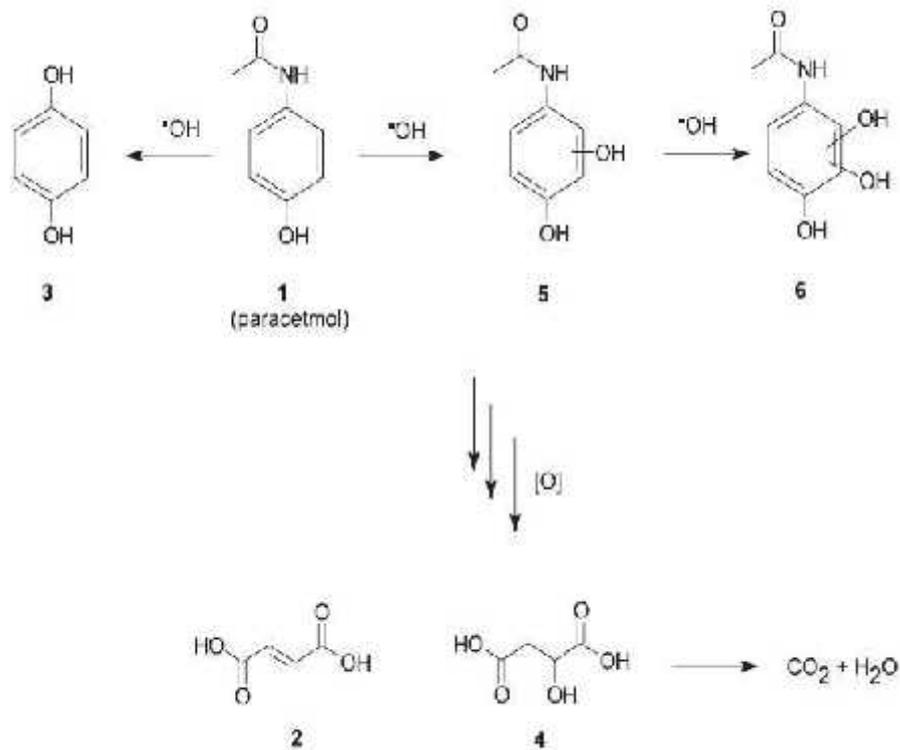


Gambar 6. Pengaruh konsentrasi awal parasetamol terhadap persentase parasetamol yang terdegradasi pada larutan yang terdiri dari 25 mL larutan ion Cu(II) 10 mg/mL, 0,02 g serbuk TiO₂, 25 mL parasetamol, dan waktu penyinaran 45 menit.

Reaksi parasetamol dengan radikal OH^{*} menyebabkan degradasi parasetamol sehingga dipastikan konsentrasi parasetamol dalam larutan berkurang. Reaksi degradasi tersebut menyebabkan molekul parasetamol terurai menjadi spesies yang lebih kecil seperti CO₂ dan H₂O sehingga keberadaannya aman di lingkungan. Penentuan konsentrasi parasetamol yang tidak terdegradasi dilakukan menggunakan spektrofotometer visibel.

Radikal OH^{*} dalam sistem reaksi merupakan spesiasi yang sangat reaktif. Spesies tersebut akan menyerang zat reduktor yang dalam hal ini adalah parasetamol. Berdasarkan gambar 7, proses degradasi parasetamol dimulai dengan menyerang cincin aromatik parasetamol. Pola penyerangan ini mengarah pada pembentukan hidrokuinon (3) dan melalui mekanisme ini melibatkan ipso substitusi dari bagian asetamid oleh radikal hidroksi. Selanjutnya terbentuk 2 isomer hidroksi posisi monohidroksi parasetamol (5) dan dihidroksi parasetamol (6) melalui sebuah serangan elektrofilik radikal hidroksi pada

kedua posisi dari cincin aromatik. Senyawa 5 lebih mudah dihidroksilasi melalui mekanisme substitusi nukleofilik untuk menghasilkan dihidroksi parasetamol. Akhirnya terjadi oksidasi terus menerus sebagai produk intermediet dengan pembentukan asam fumarat (2), asam malat (4) yang lebih lanjut dapat dikonversi menjadi CO₂ dan H₂O yang dikenal dengan proses mineralisasi.



Gambar 7. Skema proses reaksi utama degradasi parasetamol (Dalmazio *et al.*, 2008).

KESIMPULAN

Pada penelitian ini efektivitas fotoreduksi ion Cu(II) lebih tinggi dengan adanya parasetamol, karena parasetamol dapat bereaksi dengan radikal yang tersedia dalam sistem reaksi, sehingga dapat mencegah terjadinya penggabungan kembali antara elektron dengan radikal dan ion Cu(II) yang tereduksi menjadi lebih banyak. Kondisi reaksi yang menghasilkan fotoreduksi paling optimum yaitu dengan menggunakan larutan ion Cu(II) 10 mg/L sebanyak 25 mL dengan penambahan parasetamol 200 mg/L sebanyak 25 mL, menggunakan 20 mg TiO₂, dan waktu penyinaran selama 45 menit. Pada kondisi tersebut ion Cu(II) tereduksi sebesar 98,87 % dan parasetamol terdegradasi sebesar 14,73 %.

DAFTAR PUSTAKA

- Aleman, L. J., Banares, M. A., Pardo, E., Martin, F., Galan-Fereres, M., and Blasco, J. M., 1997, Photodegradation of Phenol in Water Using Silica Supported Titania Catalysis, *Applied Catalysis B Environment*, vol. 13, pp. 289-297.
- Dalmazio, I., Tania, M. A., and Rodinei, A., 2008, An Appraisal on the Degradation of Paracetamol by TiO₂/UV System in Aqueous Medium. Product Identification by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS), *Journal of The Brazilian Chemical Society*, vol. 19, no. 1, pp. 81-88.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., and Bahnemann, D. W., 1995, Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis, *Chemical Review*, vol. 95, pp. 69-96.
- Kanki, T., Yoneda, H., Sano, N., Toyoda, A., and Nagai, C., 2004, Photocatalytic Reduction and Deposition of Metallic Ions in Aqueous Phase, *Chemical Engineering*, vol. 97, pp. 77-81.
- Konstantinou, I. K., Sakellarides, T. M., Sakkas, V. A., and Albanis, T. A., 2001, Photocatalytic Degradation of Selected s-Triazine Herbicides and Organophosphorus Insecticides Over Aqueous TiO₂ Suspensions, *Environmental Science Technology*, vol. 35, pp. 398-405.
- Linsebigler, A., Lu, G., and Yates, J. T. Jr., 1995, Photocatalysis on TiO₂ Surfaces : Principles, Mechanisms, and Selected Result, *Chemical Review*, vol. 95, pp. 735-758.
- Lucarelli, L., Nadtochenko, V., and Kiwi, J., 2000, Environmental Photochemistry Quantitative Adsorption and FTIR Studies During the TiO₂ Photocatalyzed Degradation of Orange II, *Langmuir*, vol. 16, pp. 1102-1108.
- Masel, R. I., 1996, *Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces*, New York: John Willey and Sons. Inc.
- Matos, J., Laine, J., and Herrmann, J. M., 2001, Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania, *Journal Catalyst*, vol. 200, pp. 10-20.
- Piero, A. M., Ayllon, J. A., and Domenech, X., 2001, TiO₂-Photocatalyzed Degradation of Phenol and Ortho-substituted Phenolic Compounds, *Applied, Catalyst B Environment*, vol. 30, pp. 359-373.
- Ramli, R., 2005, *Kajian Fotodegradasi Zat Warna Orange II yang Terkatalisis Oleh TiO₂*, Skripsi, F.MIPA UGM, Yogyakarta.
- Ruhayatun, S., 2007, *Pengaruh Asam Oksalat dan Asam Malonat Terhadap Efektivitas Fotoreduksi Ion Cr(VI) Terkatalisis TiO₂*, Skripsi, F. MIPA UII, Yogyakarta.
- Wang, X., Pchkoncn, S. O., and Ray, A. K., 2004, Photocatalytic Reduction of Hg (II) on two Commercial TiO₂ Catalysts, *Electrochimica Acta*, vol. 49, pp. 1435-1444.

- Wahyuni, E. T., Mudasir, and Aprilita, N. H., 2007, Study on Photocatalytic Reduction of Cu(II) Ions by UV Light and TiO₂, *Proceeding of International Conference On Chemical Sciences (ICCS)*, UGM, Yogyakarta, Indonesia.
- Wastini, 2005, *Kajian Pengaruh Ion Cr (VI) Terhadap Efektivitas Fotodegradasi p-klorofenol Terkatalisis TiO₂*, Skripsi, F.MIPA UGM, Yogyakarta.
- Yang, L., Yu, L. E., and Ray, M. B., 2008, Degradation of Paracetamol in Aqueous Solution by TiO₂ Photocatalysis, *Water Research*, vol. 42, pp. 3480-3488.
- Zhang, Xu, Wu, F., Wu, X., Chen, P., and Deng, N., 2008, Photodegradation of Acetaminophen in TiO₂ Suspended Solution, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 157, pp. 300-307.