

Efektivitas Fotodegradasi Amoksisilin yang Dikatalisis dengan TiO₂ dengan Keberadaan Ion Ag(I)

Devina Ingrid Angraini ^{a*}, I. Pujilestari ^b

a Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Nasional Surakarta, Program Studi D3 Farmasi, Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) Nasional Surakarta, Jl. Yos Sudarso No. 338 Dawung, Serengan, Surakarta

b Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi "Yayasan Pharmasi" Semarang

* Corresponding author: devina.ia@gmail.com

Article Info

Keywords:
 Amoxicillin, Ag(I)
 ions, electron,
 photodegradation,
 ·OH radical

Kata kunci:
 amoksisilinelektron,
 radikal ·OH,
 fotodegradasi, ion
 Ag(I).

Abstract

An intensive use of medicines and their product provides not only benefits for human health but also carries side effect, such as an accumulation of waste. In the water environment, amoxicillin waste could mix with inorganic waste, such as Ag(I) ion. In this research, the study on amoxicillin photodegradation was conducted by combining UV-irradiation, semiconductor particles as the photocatalyst, and the presence of Ag(I) ions. This research aimed to determine the influence of UV-irradiation time, initial Ag(I) concentration, and the optimum conditions of amoxicillin photodegradation catalyzed by TiO₂ in the presence of Ag(I) ions. Amoxicillin photodegradation process was conducted in a closed reactor equipped with a magnetic stirrer and UV light. The results are then analyzed by UV spectrophotometer to determine the remaining amoxicillin concentration and atomic absorption spectrophotometer (AAS) to evaluate the concentration of the unreduced Ag(I) ions. The results showed that the degraded amoxicillin increased with increasing duration of irradiation due to the long contact between the TiO₂ photocatalyst and the UV light, and the contact between amoxicillin and the radical ·OH. The presence of Ag(I) ions might increase the effectiveness of amoxicillin photodegradation due to the prevention of the recombination between radical ·OH from hole species and the excited electron. The optimum condition of amoxicillin photodegradation is reached 32.40 % when 25 mL amoxicillin 200 mg/L and 25 mL of Ag(I) solution 40 mg/L, were added by 20 mg of TiO₂ and irradiated by UV light for 90 minutes. Under the same condition, Ag(I) ion was reduced up to 70.40 %.

Abstrak

Pemakaian obat dan sediaananya secara intensif, selain memberikan keuntungan dalam pelayanan kesehatan juga memiliki efek sekunder yaitu akumulasi limbah yang tidak diinginkan. Akumulasi zat antibiotik seperti amoksisilin di perairan dapat menyebabkan resistensi. Di lingkungan, limbah amoksisilin dapat bersama-sama dengan limbah anorganik seperti ion Ag(I). Kajian tentang fotodegradasi dilakukan dengan menggabungkan cahaya ultraviolet dan partikel semikonduktor sebagai fotokatalis. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh penyinaran, keberadaan ion Ag(I), dan kondisi optimum terhadap efektivitas fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO₂ dengan kehadiran ion Ag(I). Proses fotodegradasi amoksisilin dilakukan dalam suatu reaktor tertutup dilengkapi dengan satu set alat pengaduk magnetik dan lampu UV. Hasil kemudian dianalisis dengan Spektrofotometer UV untuk mengetahui konsentrasi amoksisilin sisa dan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) untuk mengetahui konsentrasi ion Ag(I) sisa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa amoksisilin yang terdegradasi meningkat dengan semakin lamanya waktu penyinaran karena lamanya

kontak antara fotokatalis TiO_2 dengan cahaya dan kontak antara amoksisilin dengan radikal $\cdot\text{OH}$. Keberadaan ion Ag(I) meningkatkan hasil fotodegradasi amoksisilin karena rekombinasi radikal $\cdot\text{OH}$ yang berasal dari *spesies hole* dengan elektron tereksitasi dapat dicegah. Efektivitas fotodegradasi amoksisilin terjadi pada waktu penyinaran 90 menit, larutan amoksisilin 200 mg/L sebanyak 25 mL dengan penambahan ion Ag(I) 40 mg/L sebanyak 25 mL, dan TiO_2 sebagai katalis sebanyak 20 mg. Pada kondisi tersebut fotodegradasi amoksisilin sebesar 32,40 % dan persen ion Ag(I) yang tereduksi sebesar 70,40 %.

1. Pendahuluan

Limbah industri farmasi berkaitan erat dengan masalah pencemaran lingkungan khususnya pencemaran air [1]. Beberapa jenis obat, seperti antibiotik, hormon, pengawet, dan anestesi, telah teridentifikasi pada air tanah, air limbah, dan air minum [2]. Antibiotik banyak digunakan untuk pengobatan bagi manusia dan hewan sebagai obat antibakteri dan perangsang pertumbuhan [3]. Sumber utama dari antibiotik dan obat-obat lain dapat mencemari lingkungan berasal dari industri farmasi, pertanian intensif, dan residu ekskresi manusia [4].

Adanya antibiotik seperti amoksisilin di air limbah dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan residunya dapat memodifikasi informasi genetik bakteri alami sehingga terjadi resistensi [5], selain antibiotik terdapat senyawa lain yaitu logam berat, seperti ion Ag(I) yang memiliki efek toksik apabila terakumulasi dalam tubuh yang menyebabkan pelunturan warna kulit permanen pada manusia. Sehingga diperlukan penelitian untuk mengetahui metode penghilangan amoksisilin dan ion Ag(I) yang paling efektif.

Beberapa alternatif telah dilakukan untuk menghilangkan senyawa ini termasuk *reverse osmosis*, adsorpsi pada karbon aktif atau teknologi oksidasi lanjutan seperti reaksi fenton dan ozonisasi, namun cara ini mempunyai kelemahan pada penggunaannya karena harga yang mahal [6-8]. Dalam beberapa tahun terakhir, proses fotokatalisis untuk degradasi amoksisilin menggunakan TiO_2 telah berpotensi untuk mengatasi pencemaran limbah dengan cara yang ramah lingkungan serta hemat biaya [9-11]. Sejauh ini, TiO_2 sering digunakan sebagai fotokatalis pada reaksi degradasi polutan organik, seperti zat warna, pestisida, dan senyawa fenolik. Fotodegradasi senyawa organik dapat terjadi karena penyerangan oleh radikal $\cdot\text{OH}$ yang dihasilkan oleh TiO_2 dalam sistem reaksi. Penggunaan TiO_2 untuk meningkatkan reaksi fotodegradasi zat warna telah dilaporkan [12, 13]. TiO_2 juga telah dibuktikan dapat mempercepat reaksi fotodegradasi fenol [14, 15], p-klorofenol [16, 17], pestisida [18], asam-asam karboksilat seperti asam oksalat dan asam malonat [19]. Secara umum hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk mengoksidasi dan mendetoksi polutan-polutan organik tersebut. Selain itu, fotokatalis TiO_2 dapat mereduksi ion Ag(I) , karena TiO_2 mempunyai struktur semikonduktor yang dapat menyediakan elektron sehingga dapat merubah ion Ag(I) menjadi Ag(0) yang tidak toksik di lingkungan, dan *hole* yang ditinggalkan elektron akan bereaksi

dengan air sehingga dapat mendegradasi amoksisilin menjadi air dan CO_2 [20]. Mengingat fotodegradasi merupakan pasangan fotoreduksi maka penelitian ini mempelajari fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO_2 dengan adanya ion Ag(I) .

2. Metode Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah TiO_2 (Merck), amoksisilin buatan Brataco Chemica, AgNO_3 p.a. buatan Merck, dan kertas saring Whatman 42. 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. Alat gelas laboratorium dan instrumen yang digunakan meliputi erlenmeyer, pipet volume, corong gelas, labu ukur, gelas beker, neraca analitik, spektrofotometer serapan atom merk Perkin Elmer no seri 3110, dan spektrofotometer UV spectronic 20D+.

Pembuatan Larutan Induk

Pada penelitian ini diperlukan larutan induk amoksisilin 200 mg/L dibuat dengan cara melarutkan 100,0 mg amoksisilin dalam akuades dan diencerkan dalam labu ukur 500 mL sampai tanda batas. Larutan induk ion Ag(I) 1000 mg/L dibuat dengan cara melarutkan 1,5728 g AgNO_3 dalam akuades dan diencerkan dalam labu ukur 1 L sampai tanda batas.

Proses Fotodegradasi Amoksisilin yang Dikatalisis TiO_2

Proses fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO_2 dilakukan menggunakan sistem *batch* dalam reaktor tertutup yang dilengkapi dengan lampu UV dan *plate* pengaduk magnetik pada jarak ± 20 cm dari lampu UV. Proses tersebut dilakukan dengan cara menyinari campuran yang terdiri dari amoksisilin 200 mg/L sebanyak 25 mL, larutan ion Ag(I) 40 mg/L sebanyak 25 mL, dan 20 mg serbuk TiO_2 sehingga diperoleh suspensi. Erlenmeyer ditutup dengan plastik transparan kemudian disinari dengan lampu UV disertai pengadukan selama waktu bervariasi yaitu 30, 60, 90, 120, dan 150 menit. Untuk memperoleh filtrat dari suspensi tersebut dilakukan penyaringan dengan kertas saring whatman. Selanjutnya filtrat dianalisis dengan alat spektrofotometer UV untuk menentukan konsentrasi amoksisilin yang tidak terdegradasi dan alat spektrofotometer serapan atom (SSA) guna menentukan konsentrasi ion Ag(I) yang tidak tereduksi. Cara yang sama dilakukan untuk mempelajari pengaruh perbedaan konsentrasi ion Ag(I) terhadap fotodegradasi

amoksisilin yang dikatalisis TiO₂. Proses dilakukan terhadap sistem yang terdiri dari amoksisilin 200 mg/L sebanyak 25 mL, larutan ion Ag(I) dengan konsentrasi yang bervariasi yaitu 10, 20, 30, 40, dan 50 mg/L sebanyak 25 mL, dan 20 mg serbuk TiO₂.

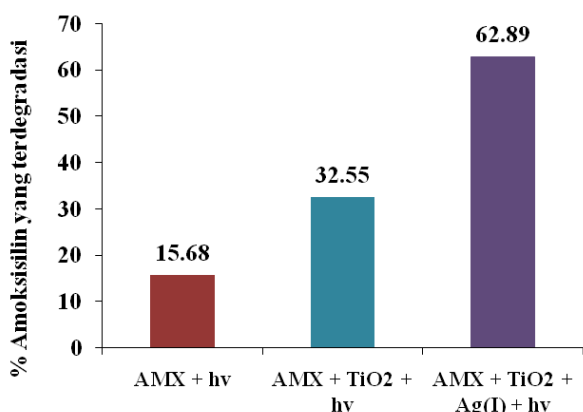
Analisis Data

Persentase amoksisilin (AMX) terdegradasi dapat diketahui dengan menghitung selisih antara konsentrasi amoksisilin awal dan konsentrasi amoksisilin sisa dengan menggunakan persamaan (1) :

$$\% \text{ AMX terdegradasi} = \frac{\text{konsentrasi AMX awal} - \text{konsentrasi AMX sisa}}{\text{konsentrasi AMX awal}} \times 100\% \tag{1}$$

3. Pembahasan

Proses fotodegradasi amoksisilin dengan adanya ion Ag(I) dilakukan dengan cara menyinari campuran dengan lampu UV dalam suatu reaktor tertutup. Campuran terdiri dari larutan amoksisilin, serbuk fotokatalis TiO₂, dan larutan ion Ag(I). Agar reaksi fotodegradasi dan proses fotokatalitik dapat berlangsung efektif, maka lampu UV digunakan sebagai sumber energi foton dan dilakukan pengadukan menggunakan pengaduk magnet agar semua reaktan bercampur rata.



Gambar 1. Pengaruh cahaya, fotokatalis TiO₂, dan keberadaan ion Ag(I) terhadap hasil fotodegradasi amoksisilin.

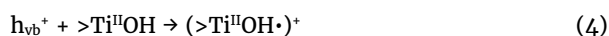
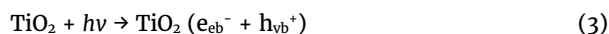
Untuk mengetahui pengaruh cahaya, fotokatalis, dan keberadaan ion Ag(I) terhadap fotodegradasi amoksisilin, telah dilakukan proses fotodegradasi amoksisilin tanpa maupun dengan fotokatalis serta tidak maupun dengan adanya ion Ag(I). Proses degradasi dilakukan dengan adanya pengadukan dan dengan penyinaran UV. Jumlah amoksisilin yang terdegradasi dapat dihitung dengan cara selisih konsentrasi amoksisilin awal dengan konsentrasi amoksisilin yang tidak terdegradasi. Hasil disajikan pada Gambar 1.

Proses penyinaran terhadap amoksisilin tanpa maupun dengan katalis TiO₂ menunjukkan penurunan konsentrasi amoksisilin ditunjukkan pada Gambar 1. Terjadinya penurunan konsentrasi tersebut disebabkan amoksisilin terdegradasi menjadi CO₂ dan H₂O. Hal ini

terjadi oleh adanya reaksi degradasi antara amoksisilin dengan radikal ·OH yang dihasilkan akibat peruraian molekul H₂O setelah menyerap foton (hv) dalam reaksi fotolisis air. Reaksi fotolisis dituliskan sebagai berikut :



Tetapi dalam reaksi fotolisis air, pembentukan radikal ·OH relatif sulit, sehingga radikal ·OH yang terbentuk sedikit. Hal ini menyebabkan proses degradasi amoksisilin berjalan lambat dan persen degradasi amoksisilin menjadi rendah. Proses pembentukan elektron dan radikal ·OH pada permukaan fotokatalis ditunjukkan oleh reaksi:

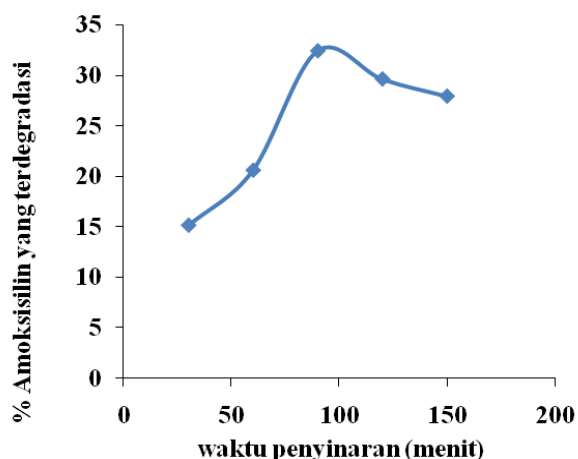


Proses adsorpsi mengindikasikan bahwa reaksi fotodegradasi yang dikatalisis TiO₂ diawali dengan adsorpsi amoksisilin pada permukaan fotokatalis yang selanjutnya amoksisilin yang terserap mengalami kontak dengan radikal ·OH pada permukaan TiO₂ sehingga berlangsung reaksi degradasi.

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}⁺ akan terikat pada permukaan TiO₂ kemudian membetuk radikal ·OH dengan air. Reaksi pembentukan radikal ·OH dan pelepasan elektron ini berjalan relatif cepat dibandingkan reaksi fotolisis molekul air sehingga jumlah radikal ·OH dan elektron yang dihasilkan relatif lebih banyak [20, 21]. Dengan demikian radikal ·OH dan elektron tersedia dalam jumlah yang relatif lebih besar, dihasilkan dari reaksi fotolisis air serta dihasilkan oleh katalis TiO₂. Hal tersebut menjelaskan peningkatan fotodegradasi amoksisilin dengan adanya fotokatalis TiO₂ lebih besar daripada tanpa fotokatalis.

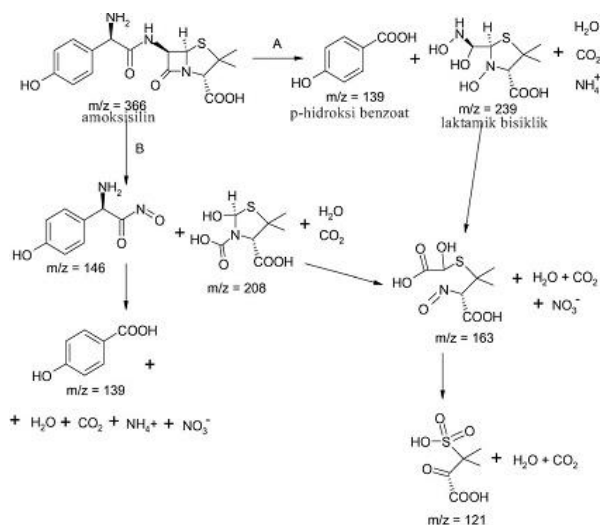
Adanya elektron yang dihasilkan dapat digunakan untuk mereduksi ion Ag(I). Ion Ag(I) selain dapat direduksi oleh elektron yang dihasilkan oleh TiO₂, juga dapat berfungsi untuk mencegah penggabungan kembali antara radikal ·OH dan elektron, sehingga radikal ·OH yang dihasilkan oleh TiO₂ menjadi lebih banyak. Hal ini dapat mempengaruhi proses degradasi amoksisilin. Penurunan konsentrasi amoksisilin paling baik adalah dengan adanya penyinaran, katalis TiO₂, dan ion Ag(I).

Pengaruh waktu penyinaran terhadap fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya ion Ag(I) dipelajari dengan melakukan reaksi pada waktu penyinaran yang bervariasi kondisi yang dilakukan pada kajian waktu penyinaran adalah 25 mL larutan amoksisilin 200 mg/L, serbuk TiO₂ 20 mg, dan 25 mL larutan ion Ag(I) 40 mg/L. Hasil disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh waktu penyinaran terhadap fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO₂ dengan adanya ion Ag(I).

Lamanya waktu penyinaran dengan lampu UV dalam proses fotodegradasi amoksisilin menggambarkan lamanya interaksi atau kontak antara fotokatalis dengan cahaya (*hν*) dan kontak antara amoksisilin dengan radikal ·OH. Semakin lama waktu penyinaran maka kontak antara fotokatalis TiO₂ dengan cahaya (*hν*) juga semakin efektif, sehingga radikal ·OH yang dihasilkan di permukaan TiO₂ akan semakin banyak dan juga memungkinkan terjadinya kontak antara amoksisilin dengan radikal ·OH yang makin efektif. Namun pada waktu penyinaran 90 sampai 150 menit, amoksisilin yang terdegradasi mengalami penurunan, karena semakin banyaknya amoksisilin yang menempel pada permukaan TiO₂ [22]. Hal ini menyebabkan TiO₂ tidak dapat berinteraksi dengan sinar UV, sehingga jumlah radikal ·OH yang dihasilkan berkurang dan reaksi fotodegradasi pun berjalan lebih lambat. Pada Gambar 3 dapat dilihat urutan proses degradasi amoksisilin.

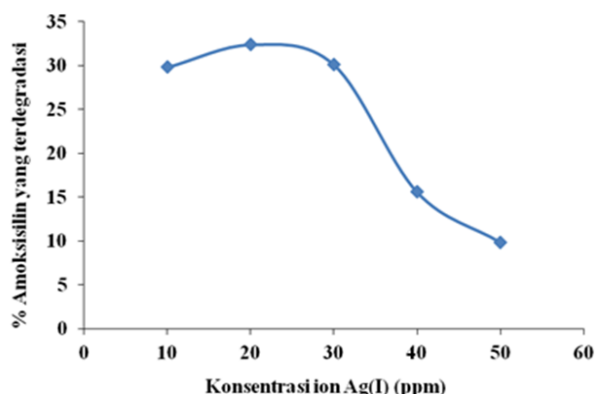


Gambar 3. Proses degradasi amoksisilin [11].

Proses fotodegradasi amoksisilin dapat dilakukan juga dengan berbagai metode, seperti yang dilakukan oleh Homem *dkk.* [7] melaporkan bahwa amoksisilin dapat didegradasi menggunakan proses fotofenton

dengan waktu penyinaran efektif pada 45 menit. Elmolla dan Chaudhuri [9] menyatakan bahwa fotokatalis ZnO dapat digunakan untuk mendegradasi amoxicillin dengan waktu penyinaran efektif pada 180 menit. Hal tersebut dapat digunakan untuk membandingkan bahwa proses fotodegradasi amoksisilin dengan fotokatalis TiO₂ lebih efektif dibandingkan proses fotofenton karena biaya yang dikeluarkan lebih murah dan jika dibandingkan dengan fotokatalis ZnO maka lama penyinarannya lebih singkat.

Kenaikan amoksisilin yang terdegradasi terjadi pada konsentrasi awal ion Ag(I) 10 mg/L sampai 20 mg/L, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Adanya kenaikan konsentrasi awal ion Ag(I) dalam campuran menunjukkan semakin banyaknya ion Ag(I) yang bereaksi dengan elektron, sehingga penggabungan antara radikal ·OH dan elektron tidak terjadi. Akan tetapi pada peningkatan konsentrasi awal larutan ion Ag(I) 20 mg/L sampai 50 mg/L fotodegradasi amoksisilin mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh jumlah elektron yang tetap tetapi jumlah ion Ag(I) terus bertambah, sehingga hampir semua elektron telah bereaksi dengan ion Ag(I). Berdasarkan data di atas dapat diketahui konsentrasi awal larutan ion Ag(I) yang memberikan fotodegradasi yang paling besar adalah pada konsentrasi 20 mg/L.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi ion Ag(I) terhadap fotodegradasi amoksisilin yang dikatalisis TiO₂.

4. Kesimpulan

Waktu penyinaran yang semakin lama meningkatkan kontak antara amoksisilin dengan radikal ·OH juga makin efektif, sehingga efektivitas fotodegradasi amoksisilin meningkat. Keberadaan ion Ag(I) dalam larutan dapat mencegah rekombinasi antara radikal ·OH yang berasal dari *spesies hole* dan terikat di permukaan fotokatalis dengan elektron yang tereksitasi sehingga efektivitas fotodegradasi meningkat.

5. Daftar Pustaka

[1] Daniele Maia Bila, Márcia Dezotti, *Pharmaceutical drugs in the environment, Química Nova*, 26, 4, (2003) 523–530 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422003000400015>

[2] C. Reyes, J. Fernández, J. Freer, M. A. Mondaca, C. Zaror, S. Malato, H. D. Mansilla, *Degradation and inactivation of tetracycline by TiO₂ photocatalysis*,

- Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 184, 1, (2006) 141-146
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.04.007>
- [3] Klaus Kümmerer, Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I, *Chemosphere*, 75, 4, (2009) 417-434
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
- [4] B. Halling-Sørensen, S. Nors Nielsen, P. F. Lanzky, F. Ingerslev, H. C. Holten Lützhøft, S. E. Jørgensen, Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment- A review, *Chemosphere*, 36, 2, (1998) 357-393
[https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)00354-8](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)00354-8)
- [5] Céline Tixier, Heinz P. Singer, Sjeff Oellers, Stephan R. Müller, Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters, *Environmental Science & Technology*, 37, 6, (2003) 1061-1068
<http://dx.doi.org/10.1021/es025834r>
- [6] J. Fernández, J. Kiwi, C. Lizama, J. Freer, J. Baeza, H. D. Mansilla, Factorial experimental design of Orange II photocatalytic discoloration, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 151, 1, (2002) 213-219
[https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(02\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(02)00153-3)
- [7] Vera Homem, Arminda Alves, Lúcia Santos, Amoxicillin degradation at ppb levels by Fenton's oxidation using design of experiments, *Science of The Total Environment*, 408, 24, (2010) 6272-6280
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.058>
- [8] F. Javier Benitez, Juan Luis Acero, Francisco J. Real, Gloria Roldan, Francisco Casas, A Comparison Study of the Removal of Selected Pharmaceuticals in Waters by Chemical Oxidation Treatments, *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 5, 6, (2011) 456-459
- [9] Emad S Elmolla, Malay Chaudhuri, Photocatalytic Degradation of Some Antibiotics in Aqueous Solution, Water Malaysia, Kuala Lumpur, (2009).
- [10] L. Rizzo, S. Meric, M. Guida, D. Kassinos, V. Belgiorno, Heterogeneous photocatalytic degradation kinetics and detoxification of an urban wastewater treatment plant effluent contaminated with pharmaceuticals, *Water Research*, 43, 16, (2009) 4070-4078
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.06.046>
- [11] D. Klauson, J. Babkina, K. Stepanova, M. Krichevskaya, S. Preis, Aqueous photocatalytic oxidation of amoxicillin, *Catalysis Today*, 151, 1, (2010) 39-45
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.01.015>
- [12] L. Lucarelli, V. Nadtochenko, J. Kiwi, Environmental Photochemistry: Quantitative Adsorption and FTIR Studies during the TiO₂-Photocatalyzed Degradation of Orange II, *Langmuir*, 16, 3, (2000) 1102-1108
<http://dx.doi.org/10.1021/la990272j>
- [13] R. Ramli, Kajian Fotodegradasi Zat Warna Orange II yang Terkatalisis Oleh TiO₂, Jurusan Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [14] J. Matos, J. Laine, J. M. Herrmann, Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania, *Journal of Catalysis*, 200, 1, (2001) 10-20
<https://doi.org/10.1006/jcat.2001.3191>
- [15] Ana M. Peiró, José Antonio Ayllón, José Peral, Xavier Doménech, TiO₂-photocatalyzed degradation of phenol and ortho-substituted phenolic compounds, *Applied Catalysis B: Environmental*, 30, 3, (2001) 359-373
[https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(00\)00248-4](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(00)00248-4)
- [16] Luis J. Alemany, Miguel A. Banares, Encarnación Pardo, Francisco Martin, Mercedes Galán-Fereres, JoséM Blasco, Photodegradation of phenol in water using silica-supported titania catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, 13, 3, (1997) 289-297
[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-3373\(97\)00006-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-3373(97)00006-4)
- [17] Wastini, Kajian Pengaruh Ion Cr (VI) Terhadap Efektivitas Fotodegradasi p-klorofenol Terkatalisis TiO₂, Jurusan Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [18] Ioannis K. Konstantinou, Theophanis M. Sakellarides, Vasilis A. Sakkas, Triantafyllos A. Albanis, Photocatalytic Degradation of Selected s-Triazine Herbicides and Organophosphorus Insecticides over Aqueous TiO₂ Suspensions, *Environmental Science & Technology*, 35, 2, (2001) 398-405
<http://dx.doi.org/10.1021/es001271c>
- [19] S. Ruhayatun, Pengaruh Asam Oksalat dan Asam Malonat Terhadap Efektivitas Fotoreduksi Ion Cr(VI) Terkatalisis TiO₂, Jurusan Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- [20] Michael R. Hoffmann, Scot T. Martin, Wonyong Choi, Detlef W. Bahnemann, Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis, *Chemical Reviews*, 95, 1, (1995) 69-96
[10.1021/cr00033a004](https://doi.org/10.1021/cr00033a004)
- [21] Amy L. Linsebigler, Guangquan Lu, John T. Yates, Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results, *Chemical Reviews*, 95, 3, (1995) 735-758
<http://dx.doi.org/10.1021/cr00035a013>
- [22] Richard I. Masel, Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces, Wiley, 1996.