

MEKANISME DEGRADASI FOTOKATALITIK
PENTAKLORFFENOL DALAM AIR SECARA
MENGUNAKAN KOMPOSIT TIO₂-ZEOLIT

Winarti Andayani, Agustin Soemartono, Nur
Hidayati dan Muhammad Lindu

MEKANISME DEGRADASI FOTOKATALITIK PENTAKLORFENOL DALAM AIR SECARA MENGGUNAKAN KOMPOSIT TiO₂-ZEOLIT

Winarti Andayani*, Agustin Soemartono*, Nur Hidayati *,
dan Muhammad Lindu**

*P₃TIR- BATAN, Jakarta

** FAL-TL, Universitas Trisakti, Jakarta

ABSTRAK

MEKANISME DEGRADASI FOTOKATALITIK PENTAKLORFENOL DALAM AIR MENGGUNAKAN KOMPOSIT TiO₂-ZEOLIT. Telah dilakukan iradiasi pentaklorfenol (PCP) dalam air oleh sinar UV *black light*, dengan bantuan katalis komposit TiO₂ – zeolit dengan tujuan mempelajari mekanisme degradasinya . Larutan PCP dengan konsentrasi 10 ppm sebanyak 200 ml dengan pH awal 7 dimasukkan ke dalam reaktor curah berukuran 25 x 11 x 7 cm³ dan diiradiasi selama 0.5; 1; 2; 4; 6; Dan 8 jam. Iradiasi dilakukan 3 macam perlakuan yaitu: Ke dalam reaktor ditambah katalis komposit TiO₂ – zeolit dan larutan tidak diiradiasi (PCP/TiO₂-zeolit), larutan diiradiasi dengan uv tanpa adanya katalis komposit TiO₂- zeolit (PCP/UV) dan ke dalam reaktor ditambah katalis komposit TiO₂ – zeolit dan larutan diiradiasi dengan sinar uv (PCP/UV-TiO₂-zeolit). Larutan sebelum dan sesudah diiradiasi dianalisis dengan alat spektrofotometer UV-VIS untuk mengetahui residu PCP. Untuk mengevaluasi senyawa intermediet sebagai hasil degradasi maka larutan diukur pembentukan ion klorida secara spektrofotometer dan asam-asam organik menggunakan cara HPLC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada larutan PCP yang diiradiasi dengan UV, degradasi terjadi karena deklorinasi dan terbentuk intermediet berupa senyawa aromatis dengan substitusi klor yang lebih rendah. Pada larutan PCP yang diiradiasi dengan UV/ TiO₂, degradasi juga terjadi karena deklorinasi, namun senyawa intermediet aromatis yang terbentuk dapat didegradasi lebih lanjut menjadi asam oksalat.

ABSTRACT

MECHANISM OF PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF PENTACHLOROPHENOL IN WATER USING TiO₂-ZEOLIT COMPOSIT. Irradiation of pentachlorophenol (PCP) in water using uv-black light as a source and composit of TiO₂-zeolit as a catalyst have been done to know the mechanism of PCP degradation. 10 ppm of pentaklorfenol solution with amount 200 ml and initial pH 7 was put in batch reactor (25 x 11x 7cm³) and irradiated for 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, and 8 hours. Irradiation were done with 3 various treatment : with catalyst without irradiation, irradiation without catalyst and irradiation in the presence of catalyst. The solution were analyze by spectrophotometer to know the PCP residue. Chloride ions evolution was

determined by ferri thiocyanate method and absorption spectrum was measured in the UV-VIS region and degradation products as organic acids by mean HPLC. Examination results showed that the degradation of pentachlorophenol solely by UV light (photolysis) was observed due to dechlorination of pentachlorophenol molecules, and aromatic intermediate were remained. The aromatic intermediate could be further degraded in the presence of TiO_2 -zeolit and UV light (photocatalysis). is indicated by its ability in degrading pentaklorfenol molecule to give simple molecule without leaving aromatic intermediet. The measurement of degraded products by HPLC revealed that oxalic acid was detected consistenly

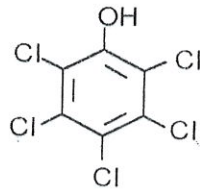
PENDAHULUAN

Penggunaan katalis TiO_2 dan sinar uv sebagai sumber energi telah digunakan untuk memecahkan berbagai masalah pencemaran lingkungan air seperti merusak bakteri, virus, untuk mengontrol bau, dan mendegradasi zat organik seperti pestisida¹⁻⁴. Hal ini karena TiO_2 (anatase) mempunyai energi celah pita 3.2 eV, bila dikenai sinar UV ($\lambda < 380 \text{ nm}$) dalam media air akan menghasilkan pasangan elektron dan *hoie* (e^- dan h^+). Hole yang terbentuk berinteraksi dengan molekul air dan ion OH^- menghasilkan radikal hidroksil dengan potensial 2,9 V relatif terhadap NHE. Potensial ini cukup tinggi untuk merusak sebagian besar senyawa organik menjadi karbon dioksida dan asam mineral.

Penggunaan TiO_2 dalam bentuk lumpur pada sistim pengolahan air limbah menghasilkan banyak kerugian, yaitu pemisahan partikel TiO_2 terjadi sangat lambat, proses pemisahannya memerlukan biaya yang sangat mahal, dan daya tembus UV yang terbatas karena absorpsi yang kuat oleh TiO_2 dan spesies organik terlarut. Untuk mengatasi masalah ini banyak peneliti telah mencoba untuk mengurangi masalah yang timbul dengan cara mengimobilisasikan TiO_2 pada bermacam-macam material diantaranya fiber gelas, silika, dan plat titanium⁵⁻⁷. Peneliti lainnya melakukan composit TiO_2 bubuk dengan bahan zeolit⁸.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat katalis TiO_2 , dimana TiO_2 dalam bentuk bubuk dikompositkan dengan zeolit. Aktivitas katalis diuji menggunakan model limbah organik PCP untuk mengetahui mekanisme degradasinya. Struktur molekul dari PCP dapat dilihat pada Gambar 1. PCP dipilih sebagai model karena senyawa ini bersifat karsinogenik dan toksik terhadap tanaman, hewan dan manusia⁹. PCP juga merupakan salah satu penyebab atau sumber terbentuknya poliklordibenzo-p-dioksin (PCDD) dan

poliklordibenzofuran (PCDF) yang mempunyai sifat racun lebih besar dari pada PCP itu sendiri¹⁰.



Gambar 1. Struktur molekul dari pentaklorfenol (PCP)⁹

BAHAN DAN METODE

Bahan. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah PCP 96%, titanium dioksida jenis kristal anatase, etanol, metanol, asetonitril, petroleum bensen (60-80°C), ferri nitrat, merkuri tiosianat, asam fosfat. Semua bahan buatan Merek dan berkualitas proanalisis kecuali metanol yang berkualitas HPLC grade.

Peralatan. Peralatan yang digunakan selama penelitian antara lain reaktor yang terbuat dari bahan gelas pireks, lampu uv A (*black light*) 10 watt merek TOKI buatan Jepang, intensitasmeter UV- *black ray* buatan USA, alat pengaduk magnet, oven, tanur, pH meter Mettrophm 620 buatan Swiss, spektrofotometer uv-vis (HP 8463), HPLC (shimadzu LC-9A) yang disambungkan dengan detektor uv (shimadzu SPD-6A), kolom HPLC Shodex RS Pax, KC-811 dan peralatan gelas.

Penyiapan Reaktor Fotokatalitik. Reaktor fotokatalitik terbuat dari bahan gelas pireks berbentuk persegi panjang, berukuran 25 x 11 x 7 cm³. Sebanyak 2 (dua) buah komposit TiO₂- Zeolit diletakkan di wadah reaktor dengan posisi berdampingan di sebelah kiri dan kanan batang pengaduk, 0.5 cm dibawah permukaan cairan. Pada dasar wadah reaktor bagian tengah, diletakkan batang pengaduk magnet. Delapan cm di atas reaktor diletakkan 2 (dua) buah lampu uv A (*black light*) (jarak dari dasar wadah reaktor ke lampu = 8 cm). Jarak antara lampu dan permukaan cairan 6,5 cm.

Sumber Iradiasi. Sebagai sumber iradiasi digunakan 2 (dua) buah lampu UV tipe A (*black light*) merk TOKI buatan Jepang, masing-masing berdaya 10 watt. Intensitas sumber lampu hanya diukur pada awal dan akhir percobaan. Pada awal percobaan sebesar 1,9; 2,3; dan 1,9 mwatt/cm², masing-masing di bagian sebelah kiri, tengah dan kanan reaktor. Pada akhir percobaan, sumber lampu mempunyai intensitas sebesar 1,4; 1,8; dan 1,5 mwatt/cm², masing-masing di bagian sebelah kiri, tengah dan kanan reaktor.

Pembuatan Katalis komposit TiO₂- Zeolit. Bubur kertas yang telah dicampur dengan polimer anorganik diaduk dengan kecepatan tinggi sampai tercampur rata. Zeolit bubuk, fiber keramik dan bubuk TiO₂ ditambahkan kedalam campuran. Pengadukan dilanjutkan sampai terbentuk komposit yang mudah dicetak. Komposit dicetak dengan ukuran 8 x 8 cm² dengan ketebalan 0,5 cm, dipress dan dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam. Pengeringan dilanjutkan pada suhu 120 °C selama 2 jam, kemudian dibakar dalam tanur pada suhu 550 °C selama 6 jam.

Iradiasi larutan PCP. Iradiasi larutan PCP dalam air dilakukan di dalam reaktor dengan sistim curah. Suhu larutan selama iradiasi berkisar antara 33 – 36 °C. Larutan PCP (pH 7) dengan konsentrasi awal 10 mg/L sebanyak 200 ml diiradiasi selama 0.5; 1; 2; 4; 6; Dan 8 jam. Iradiasi dilakukan 3 macam perlakuan yaitu:

- a. Ke dalam reaktor ditambah katalis komposit TiO₂ – zeolit dan larutan tidak diiradiasi (PCP/TiO₂-zeolit).
- b. Larutan diiradiasi dengan uv tanpa adanya katalis komposit TiO₂- zeolit (PCP/UV)
- c. Ke dalam reaktor ditambah katalis komposit TiO₂ – zeolit dan larutan diiradiasi dengan sinar uv (PCP/UV-TiO₂-zeolit).

Larutan sebelum dan sesudah diiradiasi dianalisis dengan alat spektrofotometer UV-VIS untuk mengetahui residu PCP. Untuk mengevaluasi senyawa intermediet sebagai hasil degradasi maka larutan diukur pembentukan ion klorida secara spektrofotometer dan asam-asam organik menggunakan cara HPLC.

Analisis Klor Dengan Metode Ferri Tiosianat¹¹. Konsentrasi klor dalam sampel sebelum dan sesudah diiradiasi diukur dengan metode ferri tiosianat menggunakan

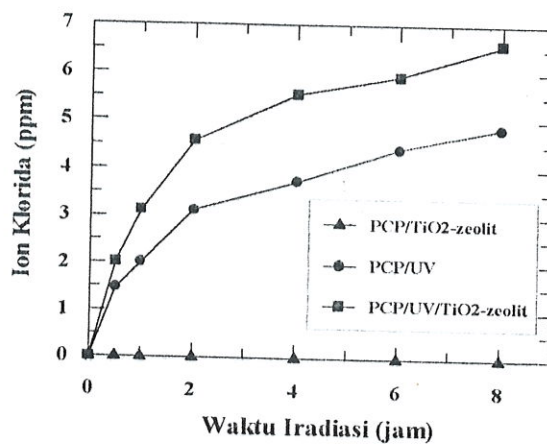
spektrofotometer uv-vis pada panjang gelombang 460 nm. Ion tiosinat dihasilkan dari merkuri tiosianat karena pembentukan merkuri klorida yang terlarut. Dengan adanya ion ferri, ion tiosianat yang bebas membentuk ferri tiosianat yang berwarna merah, yang intensitasnya sebanding dengan konsentrasi klorida.)³

Analisis Asam-Asam Organik Dengan Metode HPLC. Asam-asam organik yang diperkirakan sebagai senyawa intermediet dari hasil degradasi diukur dengan metode HPLC. Alat yang digunakan adalah HPLC Shimadzu model LC-9A, yang disambungkan dengan detektor uv pada panjang gelombang 210 nm, dengan kolom shodex KC-811, menggunakan eluen larutan 0,005 % asam fosfat dalam air, dan kecepatan alir 1 mL/menit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemutusan Atom Klor Molekul PCP Akibat Iradiasi

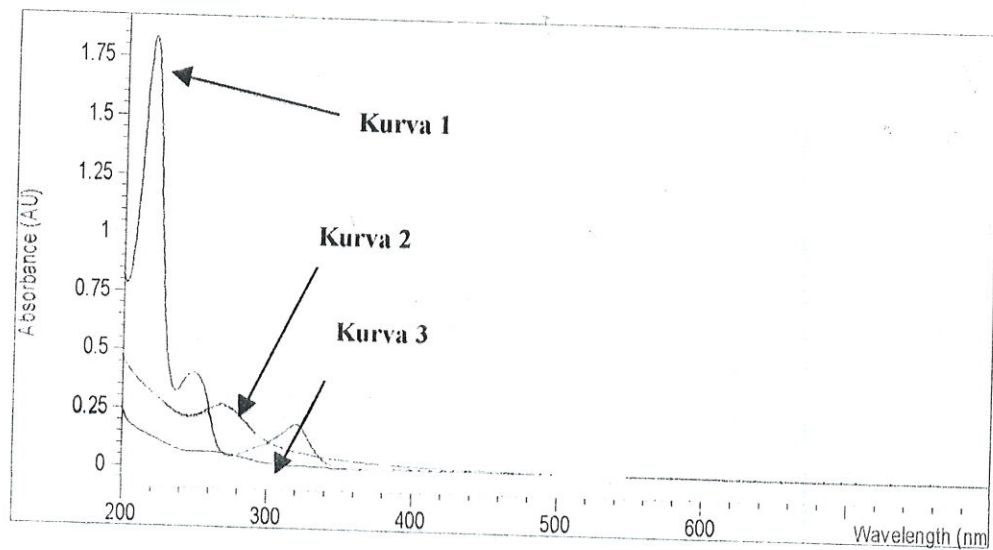
Pemutusan atom klor pada molekul PCP akibat iradiasi dapat diperkirakan oleh adanya penambahan konsentrasi ion klorida di dalam larutan, dimana pada awalnya di dalam larutan tidak terdapat ion klorida. Hasil pengukuran ion klorida pada larutan PCP sebelum dan sesudah diiradiasi dengan UV dan UV/ TiO₂-zeolit, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembentukan ion klorida selama iradiasi PCP

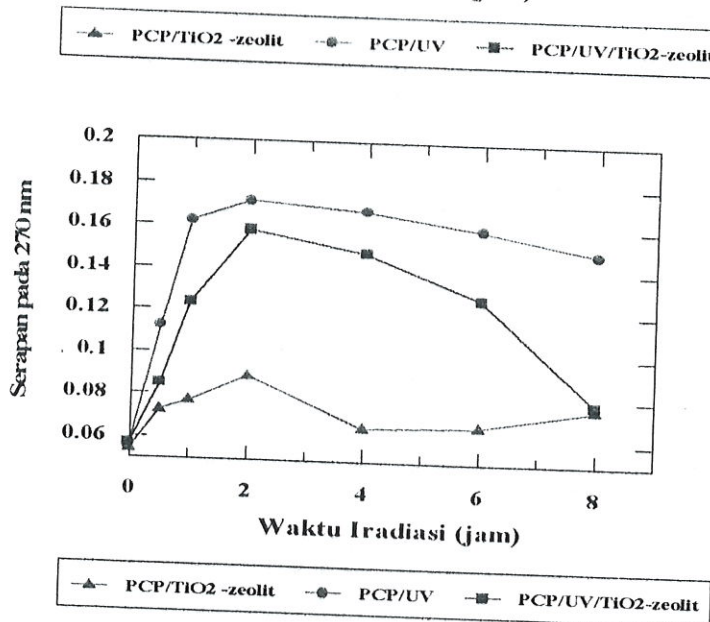
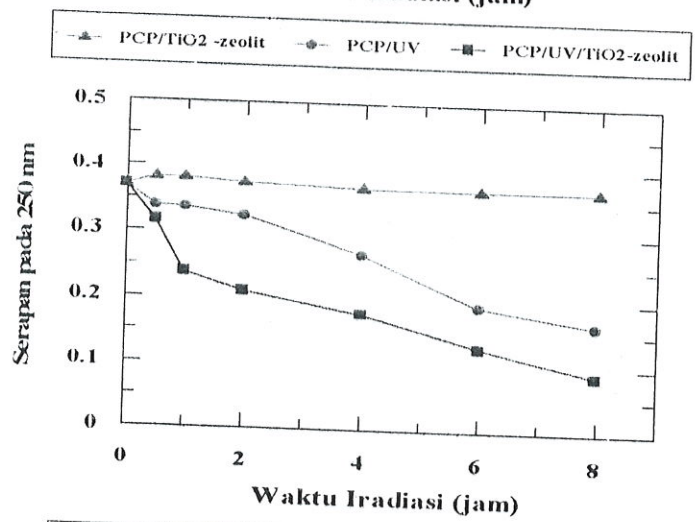
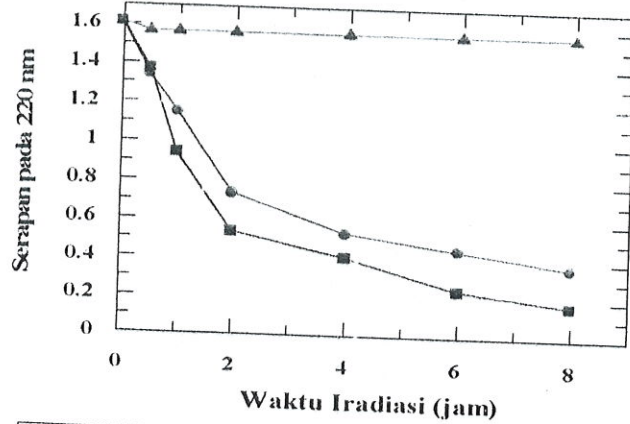
Gambar 2 memperlihatkan pembentukan ion klorida selama iradiasi PCP. Sebelum diiradiasi larutan tidak mengandung ion klorida dan tidak terlihat keberadaan ion klorida pada kondisi percobaan dengan TiO_2 -zeolit tetapi tanpa diiradiasi. Setelah diiradiasi dengan UV saja maupun UV / TiO_2 -zeolit terbentuk ion klorida. Ion klorida ini berasal dari pemutusan atom klor dari molekul pentaklorfenol akibat iradiasi dengan UV maupun UV/ TiO_2 -zeolit. Konsentrasi ion klorida di dalam larutan yang diiradiasi dengan UV selama 8 (delapan) jam sekitar 4 ppm, yang sebanding dengan terjadinya pemutusan 3 (tiga) atom klor dari molekul PCP. Pada larutan yang diiradiasi dengan UV/ TiO_2 -zeolit, kecepatan pemutusan atom klornya lebih tinggi dibandingkan dengan yang diiradiasi dengan UV tetapi tanpa TiO_2 -zeolit, dan setelah 8 jam iradiasi, terjadi pemutusan secara total atom klor dari pentaklorfenol (pemutusan atom klor secara total terjadi bila konsentrasi ion klorida di dalam larutan = 6.5 ppm).

Perubahan Spektrum Larutan PCP Setelah Iradiasi. Perubahan spektrum absorbansi larutan PCP setelah iradiasi selama 8 jam dapat dilihat pada Gambar 3. Larutan PCP mula-mula mempunyai 3 puncak serapan masing-masing pada 220 nm dengan intensitas yang tinggi, 250 nm dan 320 nm dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan pada 220 nm (kurva 1). Iradiasi larutan PCP hanya dengan UV selama 8 jam menyebabkan munculnya puncak lain pada panjang gelombang 270 nm (kurva 2). Hal yang sama juga terjadi pada larutan yang diiradiasi dengan UV dengan adanya komposit TiO_2 - zeolit, tetapi puncak pada panjang gelombang 270 nm ini berkurang secara bertahap dengan bertambahnya waktu iradiasi dan pada 8 jam iradiasi puncak absorbansi ini tidak terlihat lagi (kurva 3).



Gambar 3. Spektrum absorbansi larutan PCP setelah iradiasi selama 8 jam (kurva 1: PCP (konsentrasi awal 10 ppm); kurva 2 : PCP / UV; kurva 3: PCP/UV-TiO₂-zeolit - zeolit)

Gambar 4. merupakan penjelasan secara terperinci perubahan intensitas serapan pada setiap puncak dengan panjang gelombang yang berbeda (pada λ 220, 250, Dan 270 nm). Spektrum serapan larutan PCP yang direndam dengan katalis TiO₂ - zeolit namun tidak diiradiasi menunjukkan tidak terjadi penurunan intensitas serapan dan tidak ada indikasi adanya puncak yang muncul pada panjang gelombang selain 220 nm Dan 250 nm. Intensitas serapan larutan PCP pada 220 nm mengalami penurunan dengan tajam, baik pada larutan yang diiradiasi dengan UV saja, maupun UV/ TiO₂ - zeolit. Pada larutan yang diiradiasi dengan UV, nilai intensitas serapan ini hampir konstan dengan bertambahnya waktu iradiasi, namun untuk larutan yang diiradiasi dengan UV/ TiO₂ -zeolit nilai intensitas serapan ini menurun terus hingga mendekati 0,1 pada 8 jam. Pola yang hampir sama juga terjadi pada kurva dengan intensitas serapan pada 250 nm. Kurva intensitas serapan terhadap waktu iradiasi pada 270 nm, merupakan puncak *unknwon* yang muncul setelah diiradiasi dengan UV dan UV/TiO₂-zeolit. Pada Gambar ini terlihat adanya pola yang sangat berbeda antara larutan yang diiradiasi dengan UV, dan UV/TiO₂-zeolit. Pada larutan yang diiradiasi dengan UV tanpa katalis, intensitas serapannya meningkat terus dengan bertambahnya waktu iradiasi dan mencapai optimal



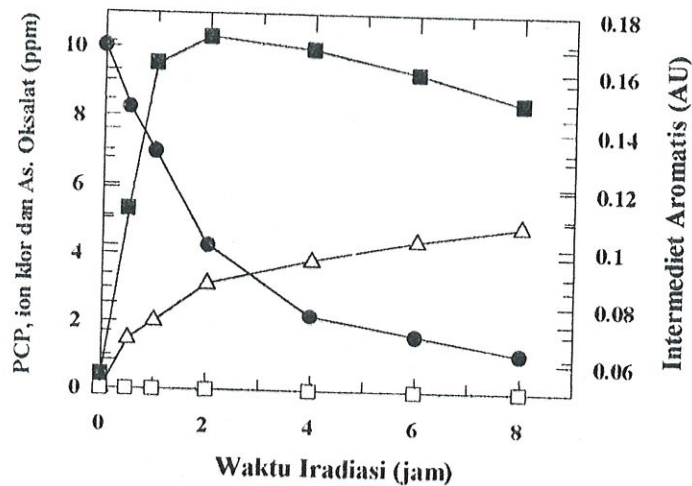
Gambar 4. Intensitas serapan larutan PCP setelah iradiasi pada berbagai panjang gelombang

pada 2 jam, selanjutnya bertambahnya waktu iradiasi sampai 8 jam, nilai ini mendekati konstan. Pada larutan yang diiradiasi dengan UV/TiO₂-zeolit, pada awal iradiasi puncak baru ini juga muncul dan intensitas serapannya mencapai optimal pada 2 jam. Namun dengan bertambahnya waktu iradiasi, puncak pada 270 nm ini secara bertahap mengalami penurunan dan nilainya mendekati nol pada 8 jam iradiasi.

Berdasarkan uraian tersebut diatas diperkirakan bahwa, puncak pada 270 nm, merupakan senyawa intermediet yang merupakan ciri khas dari senyawa aromatis. Transformasi kimia telah terjadi pada larutan yang diiradiasi hanya dengan UV, namun senyawa hasil transformasi tersebut berupa cincin aromatis. Transformasi kimia ini terjadi akibat terputusnya atom klor dari molekul PCP (Gambar 2). Hal ini berbeda dengan larutan yang diiradiasi dengan UV/TiO₂, mula-mula juga terjadi transformasi menjadi senyawa berupa cincin aromatis, namun senyawa hasil transformasi berupa cincin aromatis ini secara bertahap terdegradasi dan cincin aromatis dapat dipecah menjadi asam oksalat. Adanya asam oksalat di dalam larutan hasil degradasi diidentifikasi menggunakan HPLC. Fotodegradasi ini terjadi dipercepat oleh adanya katalis TiO₂-zeolit. Peneliti lainnya juga mengidentifikasi, bahwa senyawa intermediet yang terbentuk sebagai hasil reaksi PCP dengan •OH adalah asam-asam organik. Weavers *et al*¹² melaporkan bahwa degradasi PCP secara sonifikasi menghasilkan asam oksalat sebagai senyawa intermediet, sedangkan Mills dan Hoffmann² juga melaporkan bahwa degradasi secara fotokatalisis menggunakan TiO₂ dengan lampu Xe sebagai sumber ($\lambda > 270$ nm) menghasilkan asam asetat dan asam format sebagai senyawa intermediet.

Mekanisme Degradasi PCP akibat Iradiasi

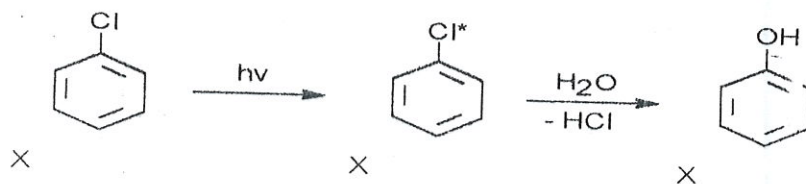
Penguraian PCP dan pembentukan senyawa intermediet akibat iradiasi UV dapat dilihat pada Gambar 5, sedangkan 6. adalah penguraian dan pembentukan senyawa intermediet akibat iradiasi UV/TiO₂-zeolit.



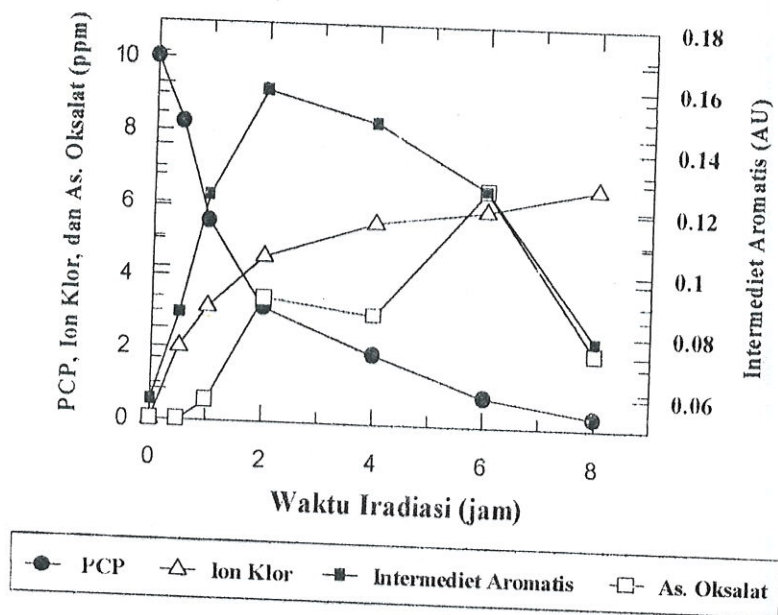
Residu PCP
 Ion Klor
 Intermediet Aromatis (AU)
 Asam Oksalat

Gambar 5. Degradasi PCP dan pembentukan intermediet oleh sinar UV

Gambar 5 memperlihatkan degradasi PCP Dan pembentukan intermediet oleh sinar UV. Penguraian PCP terjadi melalui proses deklorinasi dan menghasilkan intermediet yang masih berupa senyawa aromatis. Penguraian oleh sinar UV (*black light*) terjadi melalui proses fotolisis langsung. Ikatan atom C dengan Cl mempunyai energi sebesar 339 kJ/mol yang sebanding dengan panjang gelombang 353 nm. Panjang gelombang ini mirip dengan panjang gelombang yang dimiliki oleh lampu UV - black light yang memberikan spektrum yang kontinu di daerah 320 nm- 400nm dengan intensitas tertinggi pada 352 nm. dan garis diskrit pada 380 nm. Dengan demikian lampu uv ini mempunyai energi yang lebih tinggi dari energi ikatan antar atom C-Cl, sehingga ikatan tersebut dapat diputus. Faktor lainnya yang mendorong memungkinkan terjadinya pemutusan atom klor adalah pelarut air sebagai media dan adanya gugus hidroksil di dalam air. Mekanisme reaksi yang paling memungkinkan adalah pertukaran secara nukleofilik (*nucleophilic replacement*) atom klor oleh gugus hidroksil dengan reaksi sebagai berikut¹³,



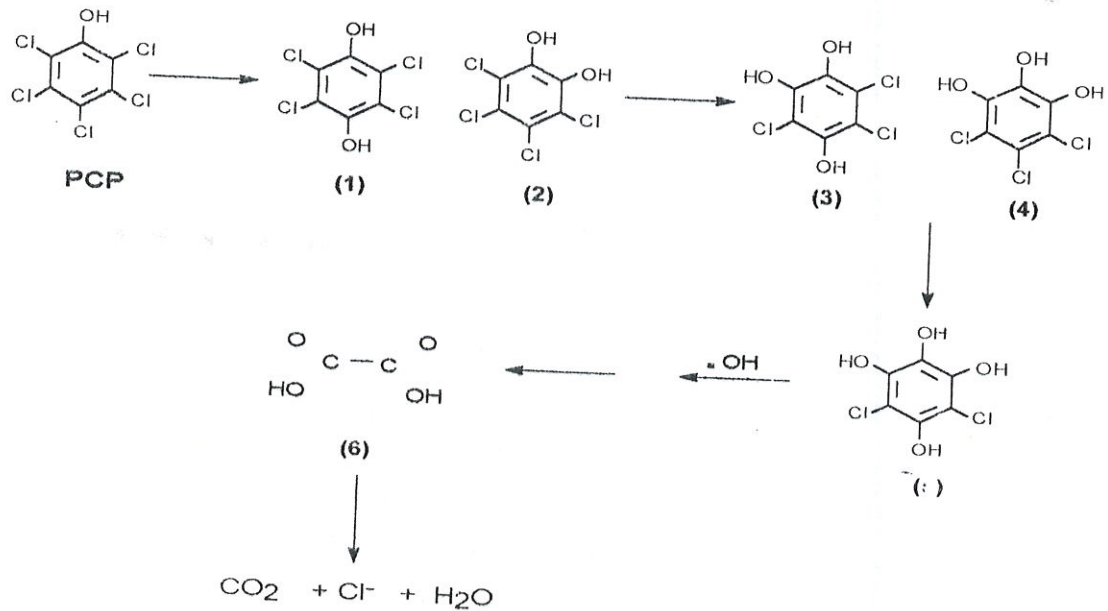
Pada larutan yang diiradiasi dengan UV/TiO₂-zeolit (Gambar 6), pada awalnya penguraian terjadi karena deklorinasi dan menghasilkan intermediet yang masih berupa senyawa aromatis. Intermediet aromatis ini selanjutnya dipecah secara bertahap dengan bertambahnya waktu iradiasi, dan asam oksalat pun mulai terbentuk. Iradiasi lebih lanjut menyebabkan konsentrasi asam oksalat di dalam larutan menurun, yang diperkirakan terdegradasi menjadi CO₂. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa degradasi PCP akibat fotolisis kemungkinan terjadi melalui pertukaran secara nukleofilik (*nucleophilic replacement*) atom klor oleh gugus hidroksil. Fotodegradasi ini kemudian dipercepat oleh katalis TiO₂-zeolit melalui hidroksil radikal, sehingga PCP terurai menjadi asam oksalat.



Gambar 6. Degradasi PCP dan pembentukan intermediet oleh sinar UV / TiO₂-zeolit

Berdasarkan hasil penelitian, mekanisme yang terjadi pada proses fotolisis dan fotokatalisis diperkirakan terjadi seperti pada Gambar 7 di bawah ini. Reaksi fotolisis PCP oleh sinar UV *black light* terjadi terutama karena adanya deklorinasi, dimana posisi atom klor yang lepas digantikan oleh gugus hidroksil. Reaksi substitusi nukleofilik atom klor oleh gugus hidroksil, kemungkinan terbesar terjadi pada posisi orto (o) dan para (p). Mula-mula terjadi pemutusan 1 (satu) atom klor sehingga terbentuk senyawa (1) dan atau (2). Senyawa (3) dan atau (4) terbentuk akibat terputusnya 2 (dua) atom klor. Pada pemutusan 3 (tiga) atom klor, maka senyawa (3) dan (4) akan berubah menjadi senyawa (5). Pada reaksi fotokatalisis, PCP dan senyawa intermediet hasil transformasi kimia oleh reaksi fotolisis

yaitu senyawa (1), (2), (3), (4) dan (5) terdegradasi lebih lanjut menjadi asam oksalat (6). Asam oksalat yang terbentuk terdegradasi menjadi CO₂.



Gambar 7. Alur degradasi fotolisis dan fotokatalisis PCP oleh sinar UV - *blacklight*

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa iradiasi UV pada molekul PCP menyebabkan deklorinasi terbentuk intermediet berupa senyawa aromatis dengan substitusi klor yang lebih rendah. Pada larutan PCP yang diiradiasi dengan UV/ TiO₂, degradasi juga terjadi karena deklorinasi, namun senyawa intermediet aromatis yang terbentuk dapat didegradasi lebih lanjut menjadi asam oksalat.

DAFTAR PUSTAKA

1. SUNADA, K., Y. KIKUCHI, K. HASHIMOTO, AND A. FUJISHIMA, Bactericidal and detoxification effects of TiO₂ thin film photocatalysts, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.32 (5), (1998), 726-728.
2. MILLS, G., AND R. HOFFMANN, Photocatalytic degradation of pentachlorophenol on TiO₂ particles : Identification of intermediates and mechanism of reaction, *Environ. Sci. Technol.*, 27, (1993), 1681-1689.

3. TOPALOV, A., D.M. GABOR, AND J. CSANADI, Photocatalytic oxidation of the fungicide metalaxyl dissolved in water over TiO₂, *Wat. Res.*, 6, (1999), 1371- 1376.
4. PRAMAURO, E., A.B. PREVOT, M. VINCENTI, AND G. BRIZZOLESI, Photocatalytic degradation of carbaryl in aqueous solutions containing TiO₂ suspensions, *Environ. Sci. Technol*, 31, (1997), 3126-3131.
5. DUMITRIU, D., A.R. BALLY, C. BALLIF, P. HONES, P.E. SCHMID, R. SANJINES, F. LEVY, V.I. Parvulescu, Photocatalytic degradation of phenol by TiO₂ thin films prepared by sputtering, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 25 (S, 2, 3), (2000), 83-92.
6. MILLER, L.W., M.I. TEJEDOR-TEJEDOR, AND M.A. ANDERSON, Titanium dioxide-coated silica waveguides for the photocatalytic oxidation of formic acid in water, *Environ. Sci. Technol*, 33, (1999), 2070-2075.
7. GUNLAZUARDI, J., Fotoelektrokatalisis untuk detoksifikasi air, *Seminar Nasional Elektrokimia*, Serpong, 15 Mei 2001
8. ICHIURA, H., T. KITAOKA, AND H. TANAKA, Photocatalytic decomposition of VOC by zeolite-TiO₂ composite sheet prepared using papermaking technique, *Proceedings of International Symposium on Environmentally Friendly and Emerging Technology for a Sustainable Pulp and Paper Industri*, Taipei, April 25-27, 2000.
9. HAYES, W.J., AND E.R. LAWS, *Handbook of Pesticide Toxicology, Classes of Pesticides*, Vol. 3, Academic Press, Inc., 1991, p. 1206-1216.
10. HARNLY, M.E., M.E. PETREAS, J. FLATTERY, AND L.R. GOLDMAN, Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and Polychlorinated dibenzofuran contamination soil and home-produced chicken eggs near pentachlorophenol sources, *Environ. Sci. Technol.* 34 (2000), 1143-1149.
11. GREENBERG, A.E., R.R. TRUSSELL., L.S. CLESCERI., *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*, APHA, AWWA, WPCF (1985)29.
12. WEAVERS, L.K., N. MALMSTADT, and M.R. HOFFMAN, Kinetics and mechanism of pentachlorophenol degradation by sonication, ozonation, and sonolytic ozonation, *Environ. Sci. Technol.*, 34, (2000), 1280-1285.
13. SCHWARZENBACH, R.P., P.M. GSCHWEND, and D.M. IMBODEN, *Environmental Organic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc, 1993, p. 436-471