

Degradasi Senyawa Fenol dengan Metode Fotokatalitik di Reaktor Tabung Berbaffle

INDAR KUSTININGSIH 1¹, JAYANUDIN 2¹, DENNI KARTIKA 3¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Email: indarkustiningsih@yahoo.com

ABSTRAK

Degradasi fenol menggunakan reaktor berbaffle telah dilakukan. Limbah yang digunakan adalah limbah fenol sintetik yang terbuat dari serbuk fenol (Merck Pro Analys). Fotokatalis yang digunakan adalah TiO₂ Degussa 25. dengan variasi pengaruh penggunaan baffle dan pH. Konsentrasi awal limbah yang digunakan yaitu 10 ppm, 20 ppm dan 40 ppm, sedangkan loading katalisnya yaitu 0.5 gr/L, 1 gr/L dan 1.5 gr/L. Analisa konsentrasi fenol Spectrofotometer Hach. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baffle mempunyai peranan penting dalam hal pengontakkan antara limbah, energi foton dan katalis lebih baik dibandingkan dengan tidak menggunakan baffle. Persen penyisihan dengan tidak menggunakan baffle diperoleh 50.1% dan untuk menggunakan baffle diperoleh persen penyisihan sebesar 79.07%. Sedangkan loading katalis optimum untuk mendegradasi senyawa fenol adalah sebesar 1gr/L dengan pH terbaik yaitu pada pH 7. Pada kondisi optimum ini, dengan konsentrasi awal limbah 10 ppm diperoleh konsentrasi akhir sebesar 2,022ppm setelah degradasi selama 5 jam.

Kata kunci: TiO₂, Fenol, Fotokatalisis, Fotokatalis, Reaktor Tabung Berbaffle

ABSTRACT

Degradation of phenol using baffle tube reactor has been investigated. Phenol (Merk Pro analys) was used as waste solution. TiO₂ Degussa P25 was used as photocatalyst. The influence of baffle in Tube reactor and Ph have been conducted. The initial concentration of the phenol solution was 10 ppm, 20 ppm and 40 ppm, while the catalyst loading of 0.5 g / L, 1 g / L and 1.5 g / L. Analysis of Phenol concentratin was used Hach Spectrophotometer. The results showed the baffle had an important role in terms of contacting the waste, the photon energy and the catalyst better than without a baffle. Percent allowance by without a baffle gained 50.1% and with baffle obtained percent allowance amounting to 79.07%. The optimum catalyst loading to degrade the phenolic compounds was equal to 1 g / L and the optimum pH was obtained at pH 7. In these optimum condition, with initial concentration of 10 ppm obtained a final concentration 2,022ppm after degradation process for 5 hours.

Keywords: TiO₂, phenol, Photocatalysis, Photocatalyst, Baffle Tube Reactoron

1. PENDAHULUAN

Sejalan dengan perkembangan industri yang pesat di Indonesia, maka meningkat pula jumlah limbah industri yang menyebabkan pencemaran air, tanah maupun udara. Salah satu senyawa organik yang sering ditemui pada limbah industri adalah fenol. Fenol sangat berbahaya karena tidak dapat di biodegradasi dan sangat larut dalam air. Kehadiran fenol dalam air buangan dapat menyebabkan gangguan yang serius pada perairan tersebut, pada konsentrasi sekitar 0.1 mg/L dapat membunuh ikan-ikan. Pada konsentrasi lebih rendah senyawa ini akan bersifat racun terhadap organisme rendah seperti plankton-plankton dan beberapa mikroba perairan lainnya. Pada konsentrasi tinggi senyawa ini dapat mengganggu kesehatan ternak-ternak burung, hewan lain dan manusia. [Udiharto, 1989].

Sejak ditemukannya efek fotokatalisis pada permukaan TiO₂ oleh Fujisjima dan Honda pada tahun 1972, kemampuan aplikasi teknologinya menjadi lahan penelitian yang subur hingga saat ini, salah satunya adalah untuk degradasi polutan organik. Dengan proses fotokatalisis tersebut berbagai jenis polutan organik dapat dihancurkan menjadi CO₂ dan H₂O yang tidak berbahaya [Linsebigler et al, 1995].

Metode fotokatalisis ini memerlukan bantuan cahaya dan katalis untuk melangsungkan atau mempercepat transformasi kimia, sumber cahaya yang digunakan bisa berasal dari matahari atau lampu UV, sedangkan katalis yang digunakan adalah katalis semikonduktor. Hal ini disebabkan karena bahan semikonduktor tersebut jika dikenai sinar ultraviolet yang mempunyai energi lebih besar dari energi *bandgap*-nya, maka akan terbentuk pasangan elektron (e⁻) dan *hole* yang dapat mereduksi dan mengoksidasi senyawa-senyawa yang ada disekitarnya [Alfano, 2000; Hermann, 1999; Parent, 1996]. Katalis semikonduktor yang digunakan untuk metode fotokatalisis ini seperti TiO₂, Fe₂O₃, SnO₂, ZnO, ZnS, CuS, CdS dan WO₃ [Khalil, 1998; Hermann, 1999]. Tetapi hingga saat ini TiO₂ lebih sering digunakan dalam aplikasi fotokatalisis khususnya pengolahan limbah, hal ini disebabkan karena mempunyai celah pita (*bandgap*) yang besar (3.2 eV), mempunyai sifat stabil terhadap cahaya (fotostabil), tidak beracun dan tidak larut dalam kondisi eksperimen, memiliki aktivitas fotokatalis yang lebih tinggi daripada fotokatalis lain seperti ZnO, CdS, WO₃ dan SnO₂ serta memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi [Sopyan et al, 1998; Linsebigler, 1995; Subrahmanyam, 1997].

Metode fotokatalisis dapat mendegradasi limbah fenol dengan optimal jika terjadi kontak yang baik antara limbah, energi foton dan katalis. Kontak yang baik ini dipengaruhi juga oleh konfigurasi reaktor sebab reaktor merupakan tempat untuk terjadinya kontak antara limbah, energi foton dan katalis. Konfigurasi reaktor yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya yaitu *Tubular Reaktor* [Malato, 2002], *Thin Fixed Bed Reactor* [Blanco et al], *Laminar Falling Film Slurry Reactor* [Shephard, 2002], *Double Skin Sheet Reactor* [Alfano, 2000], *Packed Bed Photocatalytic Reactor* [Malato, 2002], *Rotating Disk Photocatalytic Reactor* [Dionysiou, 2002], *Close Loop Reactor*, *Cascade Reactor* [Chan et al, 2003], *Parabolic Trough Reactor* [Alfano, 2000], Reaktor pipa spiral, *Slurry Bubble Coulumb Reactor* [Sanjay et al, 2004], *Photocatalytic Membrane Reactor* [Moza, 2005] dan *Parallel-Plate Solar Photocatalytic Reactor* [Leung, 2005].

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Operasi Teknik Kimia (OTK) Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penelitian diawali dengan membuat limbah fenol sintetik serta mengkalibrasi laju sirkulasi limbah dan uji kebocoran reaktor. langsung dengan bahan pangan padat yang dikeringkan, sehingga terjadi difusi uap air

Setelah itu dilakukan proses degradasi limbah fenol dengan metode fotokatalisis, kemudian menganalisa sampel dan dilanjutkan dengan mengolah data untuk mengetahui penurunan konsentrasi limbah fenol.

Reaktor yang digunakan pada penelitian ini adalah reaktor tabung yang terbuat dari bahan *plexiglass* dengan panjang 60 cm dan diameter dalam 4 cm. Reaktor tersebut dilengkapi dengan *baffle* yang bertujuan untuk memperoleh aliran yang turbulen didalam reaktor. Sumber foton yang digunakan yaitu 6 buah lampu UV dengan daya masing-masing sebesar 10 watt. Reaktor juga dilengkapi dengan *pressure gauge*, pompa sentrifugal dan tangki penampung limbah dengan kapasitas 2 liter.

Tahap awal yang dilakukan yaitu membuat limbah fenol sintetis sebanyak 2 liter dengan variasi konsentrasi 10 ppm, 20 ppm dan 40 ppm. Limbah tersebut dimasukkan ke dalam tangki penampungan limbah, kemudian ditambahkan TiO_2 dari Degussa P25 sebagai katalisnya. Lampu UV pun dinyalakan dan reaktor siap untuk dioperasikan, tahap selanjutnya adalah mensirkulasikan limbah fenol ke dalam reaktor dengan bantuan pompa sentrifugal. Waktu pengoperasian reaktor ini selama 5 jam dengan pengambilan sampel setiap 1 jam tetapi pada jam pertama pengambilan sampelnya setiap selang waktu 20 menit. Sampel-sampel tersebut kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring berukuran 42 mesh, hal ini bertujuan untuk memisahkan padatan dan cairannya.

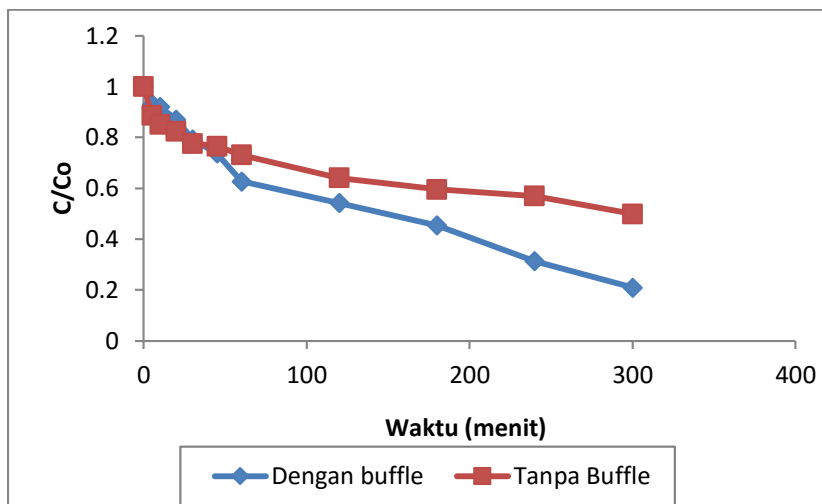
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknologi fotokatalisis merupakan salah satu metode pengolahan limbah yang potensial yang saat ini telah banyak dikembangkan khususnya dalam mengolah polutan yang ada dilingkungan dan salah satunya adalah untuk mendegradasi limbah fenol. Teknologi ini juga dinilai lebih ekonomis dalam penggunaan bahan kimia serta energinya [Chan, 2001].

Pada penelitian pengolahan limbah fenol ini, limbah yang digunakan adalah limbah fenol sintetis dengan kondisi operasi proses yang diatur adalah penggunaan *baffle*, *loading* katalis, pH dan konsentrasi. Waktu operasi selama 5 jam dengan pengambilan sampel setiap jam, limbah fenol tersebut kemudian dianalisa dengan menggunakan *Spectrofotometer Hach* untuk mengetahui penurunan konsentrasinya.

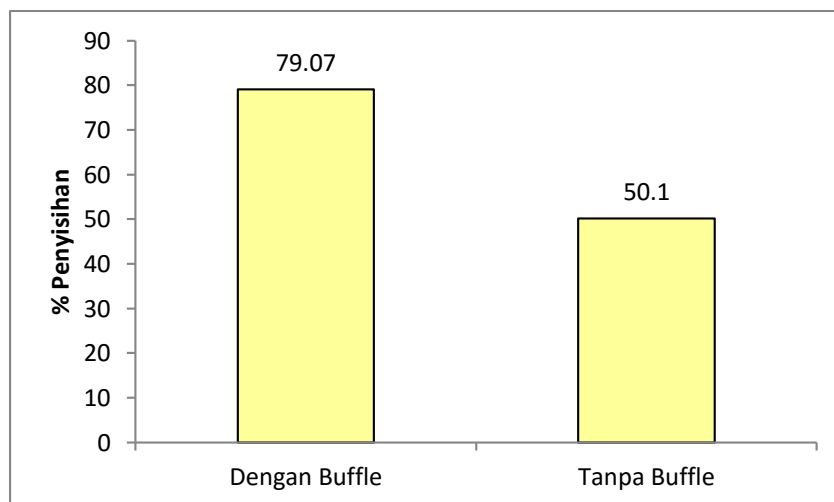
3.1. Pengaruh Penggunaan Baffle terhadap Degradasi Senyawa Fenol

Untuk menjaga supaya aliran didalam reaktor tetap turbulensi maka diperlukan *baffle* didalam reaktor tersebut. Pada variasi *baffle* ini digunakan konsentrasi awal limbah 10 ppm, laju sirkulasi limbah 13.288 ml/dtk, dengan pH 7 dan *loading* katalis 1 gr/L. Adapun hasil penelitian dengan variasi penggunaan *baffle* ini dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1 Kurva pengaruh penggunaan *baffle* terhadap degradasi fenol

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa dalam waktu yang sama, jika dengan menggunakan *baffle* terjadi penurunan kadar limbah fenol yang lebih signifikan hingga mencapai penyisihan sebesar 79.07% dari konsentrasi awal limbah 10 ppm menjadi 2.022 ppm. Lain halnya dengan tidak menggunakan *baffle* dimana waktu yang dibutuhkan cukup lama untuk mendegradasi limbah fenol walaupun pada menit-menit pertama terjadi penurunan konsentrasi yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *baffle* namun hasil yang diperoleh hanya mencapai 50.1 persen penyisihan dari konsentrasi awal 10 ppm menjadi 4.85 ppm, hal ini dipengaruhi oleh kontak antara limbah, energi foton dan katalis yang kurang optimum.

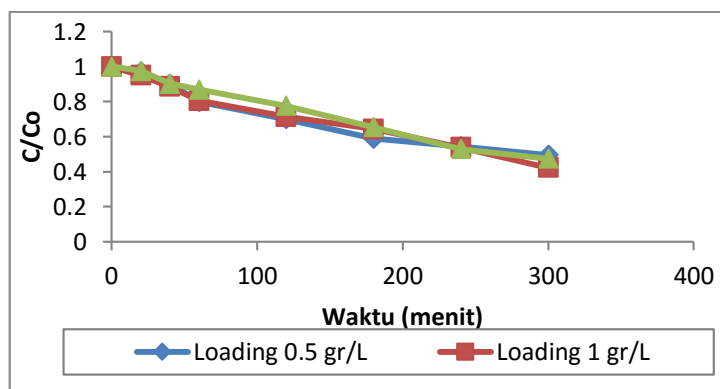


Gambar 2. Pengaruh penggunaan *baffle* terhadap persen penyisihan fenol

Penggunaan *baffle* didalam reaktor reaktor fotokatalis ini sangat berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi limbah fenol karena fungsi *baffle* didalam reaktor itu sendiri untuk memperoleh aliran yang turbulen. Aliran yang turbulen ini dapat menyebabkan kontak antara energi foton, katalis dan limbah lebih baik, karena pengontakkan yang semakin bagus maka waktu yang dibutuhkan untuk mendegradasi senyawa fenol akan semakin sedikit sehingga persen penyisihan limbah juga akan semakin besar dibandingkan dengan tidak menggunakan *baffle*.

3.2. Pengaruh *Loading* Katalis terhadap Degradasi Senyawa Fenol

Loading katalis dapat diartikan sebagai banyaknya jumlah katalis yang digunakan (dalam satuan gram) per liter larutan yang akan diproses. Untuk mengetahui *loading* katalis yang optimum, maka dilakukan penelitian dengan memvariasikan *loading* katalis. Penelitian dilakukan pada konsentrasi awal limbah sebesar 10 ppm dan pH 9, sedangkan *loading* katalis yang divariasikan yaitu 0.5 gr/L, 1 gr/L dan 1.5 gr/L. Hasil degradasi fenol yang diperoleh selama penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.

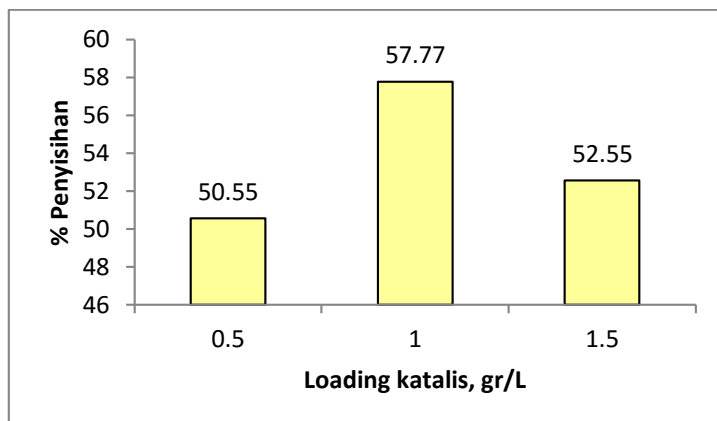


Gambar 3. Kurva pengaruh *loading* katalis terhadap degradasi fenol

Berdasarkan hasil penelitian pada Gambar 4.3, bahwa semakin bertambahnya *loading* katalis pada mulanya akan meningkatkan proses degradasi fenol, tetapi setelah *loading* katalis ditambah menjadi 1.5 gr/L, terjadi penurunan laju degradasi.

Peningkatan laju degradasi fenol ini disebabkan semakin banyaknya TiO₂ berarti semakin banyak pula foton yang diabsorpsi oleh partikel TiO₂ dan jumlah molekul fenol yang diabsorpsi dipermukaan partikel TiO₂ juga semakin banyak. Dengan kata lain, penambahan *loading* katalis, akan menambah luas area permukaan untuk terjadinya adsorbs dan reaksi fotokatalisis [Carp et al, 2004; Mohapatra dkk, 2005] sehingga peluang electron dan *hole* untuk bereaksi dengan fenol dipermukaan katalis TiO₂ semakin besar dan menyebabkan konversi degradasi fenol semakin meningkat.

Namun, setelah mencapai *loading* katalis diatas 1 gr/L, yaitu 1.5 gr/L, persen penyisihan senyawa fenol selama 5 jam mengalami penurunan dari 57.7 persen penyisihan menjadi 52.55 persen penyisihan. Hal ini disebabkan telah terlalu banyaknya jumlah TiO₂ dalam suspensi limbah dan katalis sehingga konsistensi katalis sangat tinggi dan menyebabkan meningkatnya kekeruhan larutan sehingga penetrasi foton akan terhalang untuk sampai kedalam katalis dan mengakibatkan oksidasi fenol tidak meningkat lagi [Lathasree et al, 2004; Carp et al, 2004; Mohapatra dkk, 2005; Nagaveni et al, 2004]. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.



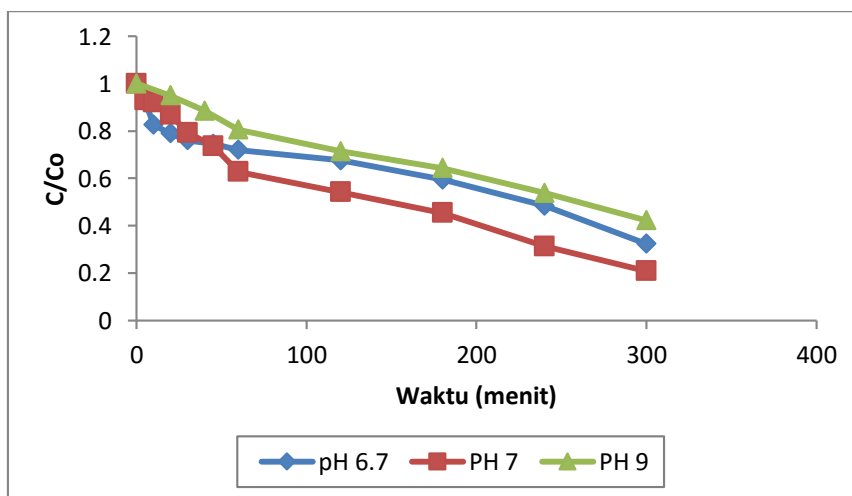
Gambar 4. Pengaruh loading katalis terhadap % penyisihan fenol

Fenomena ini sering disebut sebagian peneliti sebagai efek *shading* atau bayangan [Lathasree et al, 2004; Grzechulska et al, 2003; Kustiningsih dkk, 2005]. Jika semakin banyak lagi jumlah katalisnya maka semakin banyak pula katalis yang tidak mendapat foton sehingga elektron tidak mengalami eksitasi dan menyebabkan laju oksidasi fenol semakin menurun.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Kustiningsih dkk diperoleh *loading* katalis optimum yaitu 1.5 gr/L dengan konversi penyisihan fenol sebesar 17.47% pada konsentrasi awal 20 ppm dengan pH 7. Perbedaan ini dapat terjadi karena jenis reaktor yang digunakan berbeda. Walaupun demikian, prinsip dari pengaruh *loading* katalis ini adalah sama.

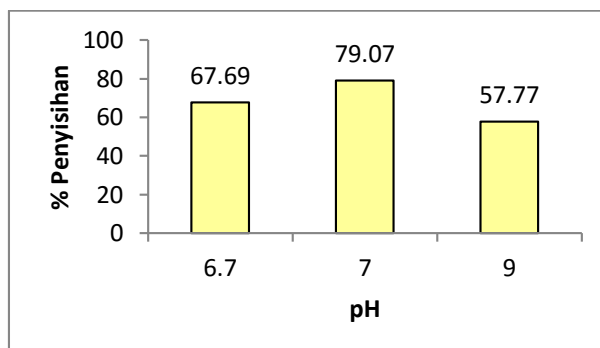
3.3. Pengaruh pH terhadap Degradasi Senyawa Fenol

Selain *loading* katalis, pH juga mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap degradasi limbah fenol dimana pada masing-masing pH dengan konsentrasi fenol yang sama menghasilkan penurunan konsentrasi fenol yang berbeda. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pH terhadap degradasi limbah fenol yang terkandung pada limbah sintetik dengan proses fotokatalisis ini maka dilakukan pengujian pada pH tanpa penyesuaian, pH 7 dan pH 9 dengan konsentrasi awal limbah yang digunakan adalah 10 ppm, *loading* katalis 1 gr/L dan volume limbah 2000 ml.



Gambar 5. Pengaruh pH terhadap degradasi fenol

Pada Gambar 3.5 dapat dilihat bahwa penurunan konsentrasi limbah fenol yang lebih besar dan lebih signifikan yaitu pada pH 7 dengan konsentrasi akhir limbah fenol sebesar 2.002 ppm. Sedangkan pada pH tanpa penyesuaian diperoleh konsentrasi akhir limbah sebesar 3.037 ppm. Dan pada kondisi pH 9 konsentrasi akhir limbah fenol yang didapat adalah sebesar 4.193 ppm.

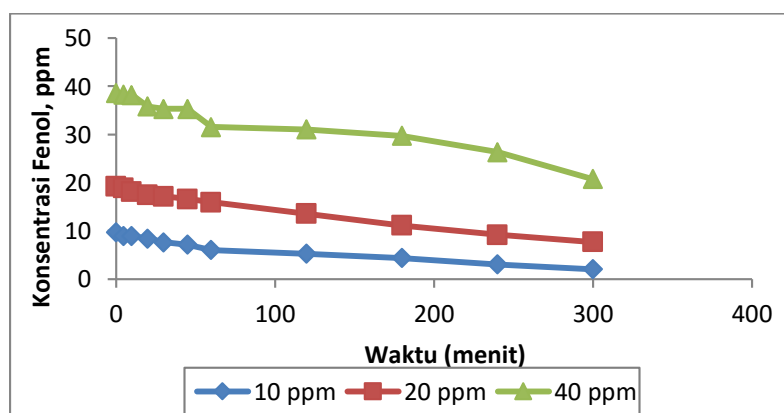


Gambar 3.6 Pengaruh pH terhadap % penyisihan fenol

Pada Gambar 3.6 menunjukkan bahwa kondisi optimum untuk mendegradasi limbah fenol terjadi pada pH 7 dengan persen penyisihan sebesar 79.07%. Hal ini dapat terjadi karena pada pH 7 *hole* yang terbentuk akan bereaksi dengan molekul air membentuk radikal OH^\cdot . Elektron tereksitasi akan bereaksi dengan OH^\cdot membentuk radikal bebas, dimana radikal OH^\cdot ini mempunyai potensi oksidasi yang lebih besar dari *hole* itu sendiri sehingga penurunan konsentrasi limbah fenol menjadi lebih mudah dibandingkan pada pH 9 dan pH tanpa penyesuaian. Penelitian ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Dumitriu, et al (2000) dengan menggunakan limbah fenol sintetik pada konsentrasi 2.65mM diperoleh konversi fenol sebesar 13.2% selama 3 jam. Pada penelitian tersebut diperoleh pH terbaik adalah pH 7 [Dumitriu et al, 2000].

3.4 Pengaruh konsentrasi awal limbah terhadap degradasi senyawa fenol

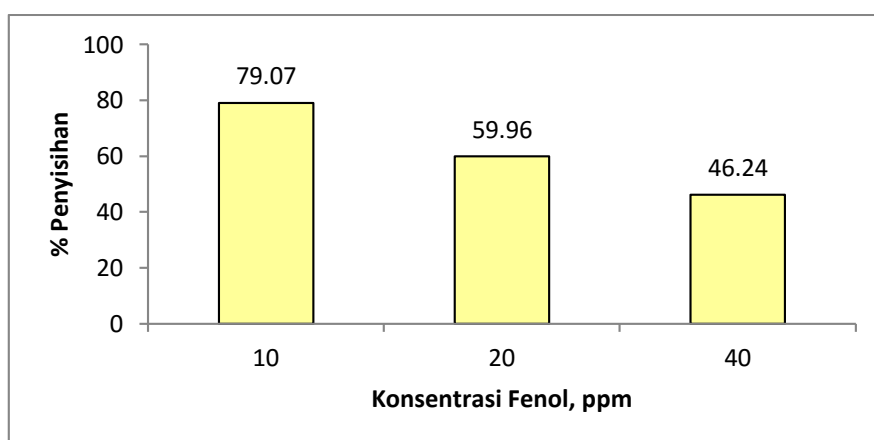
Konsentrasi awal limbah merupakan salah satu faktor yang penting untuk mengetahui kinerja reaktor dalam mengolah suatu limbah. Variasi konsentrasi awal limbah yang digunakan adalah 10, 20 dan 40 ppm. Pada tahap ini dilakukan pengujian pada pH 7, laju sirkulasi limbah 13.288 ml/dtk, *loading* katalis 1 gr/L dengan volume limbah 2000 ml. Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Pengaruh konsentrasi awal limbah terhadap degradasi fenol

Pada Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa pada konsentrasi awal limbah fenol 10 ppm dihasilkan konsentrasi akhir limbah sebesar 2.002 ppm. Sedangkan pada konsentrasi awal limbah 20 ppm diperoleh konsentrasi akhir limbah fenol sebesar 7.688 ppm. Dan pada konsentrasi awal limbah 40 ppm didapat konsentrasi akhir limbah yaitu sebesar 20.734 ppm.

Hasil akhir yang diperoleh pada konsentrasi yang lebih rendah lebih bagus dibandingkan dengan konsentrasi yang lebih tinggi, namun laju degradasi yang terjadi tetap saja lebih kecil. Penurunan laju degradasi fenol terjadi seiring kenaikan konsentrasi awal fenol [Lathasree, 2004]. Gambar 4.7 menunjukkan penurunan konsentrasi limbah fenol pada beberapa konsentrasi awal yang berbeda. Akan tetapi, hasil akhir dari semua variasi tersebut belum mencapai nilai baku mutu limbah industri fenol yang telah ditetapkan oleh pemerintah, yaitu sebesar 0.5 ppm.

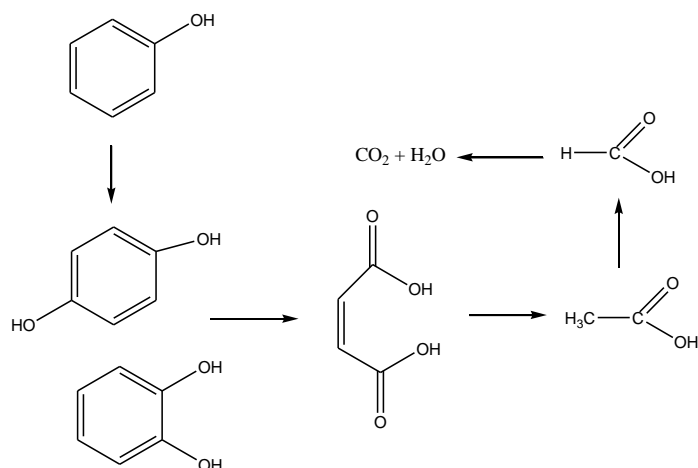


Gambar 3.8 Pengaruh konsentrasi awal limbah terhadap % penyisihan fenol

Pada konsentrasi awal limbah fenol 10 ppm, dapat mencapai persen penyisihan sebesar 79.07% sedangkan pada konsentrasi 20 ppm dan 40 ppm sebesar 59.96% dan 46.24%. Kenaikkan konsentrasi awal limbah menyebabkan konversi degradasi fenol semakin menurun. Hal ini dikarenakan molekul fenol yang harus didegradasi semakin banyak. Pada jumlah foton yang sama dengan beban limbah yang semakin besar menyebabkan semakin sulit dalam mendegradasinya sehingga persen penyisihan senyawa fenol akan lebih sedikit dibandingkan dengan konsentrasi awal limbah fenol yang lebih rendah.

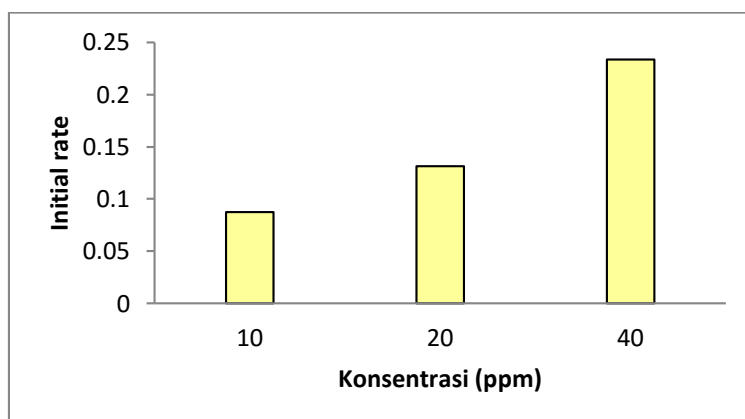
Selain itu pada konsentrasi tinggi, senyawa-senyawa *intermediate* yang terbentuk seperti *hydroquinone*, *cathechol* dan *maleic acid* dalam degradasi fenol pun memiliki konsentrasi yang tinggi pula, sehingga dapat mempengaruhi laju reaksi *overall* [Carp et al, 2004]. Adapun bentuk dari senyawa-senyawa *intermediate* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9 dalam siklus degradasi fenol [Alemany et al, 1997].

Secara fisis, terbentuknya senyawa-senyawa *intermediate* dapat menimbulkan warna yang keruh (coklat) pada katalis sehingga pada konsentrasi tinggi dapat menjadi sangat keruh dan menghalangi penetrasi cahaya ke permukaan katalis TiO₂.



Gambar 3.9 Siklus degradasi fenol [Alemany et al, 1997]

Transformasi kimia yang terjadi pada reaksi fotokatalisis merupakan gabungan dari sinar sebagai energi foton dan katalis. Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah katalis heterogen, dimana reaksi yang terjadi adalah reaksi permukaan. Pada Gambar 4.10 dapat dilihat pengaruh konsentrasi awal terhadap *initial rate*.



Gambar 3.10 Pengaruh konsentrasi awal fenol terhadap *initial rate*

Secara umum pada Gambar 3.10 menunjukkan *initial rate* semakin besar dengan bertambahnya konsentrasi fenol pada awal reaksi. Hal ini disebabkan karena pada awal reaksi, konsentrasi fenol makin besar sehingga mengakibatkan laju reaksi tinggi.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian penyisihan senyawa fenol menggunakan metode fotokatalisis di reaktor tabung berbaffle dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut :

- 1) *Baffle* didalam reaktor tabung sangat berpengaruh terhadap proses degradasi fenol hingga mencapai persen penyisihan 79.07%.
- 2) *Loading* katalis optimum dalam proses fotokatalisis dengan menggunakan reaktor tabung berbaffle diperoleh 1 gr/L.

- 3) Pada penelitian ini diperoleh ph optimum yaitu pada ph 7 dengan konsentrasi awal 10 ppm.
- 4) Konsentrasi awal limbah fenol 10 ppm merupakan konsentrasi maksimum pada reaktor ini dengan menghasilkan akhir limbah sebesar 2.022 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya kepada Dirjen Kementrian Riset Teknologi dan Perguruan Tinggi melalui dana Hibah Bersaing Tahun 2016, dan kepada pihak pihak yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah M., Gary K.C.L., Matthews R.W., "Effect of common inorganic anions on rates of photocatalytic oxidation of hydrocarbons over illuminated TiO_2 ", Journal of Phys Chem, 94 : 6620-6825, 1990.
- Ahmed S and Ollis DF, "Solar photoassisted catalytic decomposition of the chlorinated hydrocarbons trichloroethylene and trichloromethane", Solar Energy 32 : 597-601, 1984.
- Ajmera AA., Sawant SB., Pangarkar VG., and Beenackers A.A.C.M., "Solar assisted photocatalytic degradation of benzoic acid using titanium dioxide as a photocatalyst", Chem Engg and Tech in press, 2001.
- Aleman, L.J., Banaes, M.A., et al, "Photodegradation of Phenol in Water using Silica-Supported Titania Catalysts", App. Catal B. Environ, vol 13, pp. 289-297, 1997.
- Alfano, O.M., "Photocatalysis in water Environment Using Artificial and Solar Light", Cat. Today, vol 58, 199-230, 2000.
- Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, KEP MENLH No. 51/MENLH/10/1995, "Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri", 1995.
- Blanco, J., Malato, S., "Solar Detoxification", Natural Science, Basic and Engineering Science, Chapter 6, Solar Detoxification Technology, pp. 12- 13, 2003.
- Carp, O., Huisman, C.L., Reller, A., "Photoinduced reactivity of titanium dioxide", Progress in Solid State Chemistry, 32 :33-177, 2004.
- Chan, A.H.C., Chan, K., C., Barford, J.P., Porter., "Solar Photocatalytic Thin Film Cascade Reactor for Treatment of Benzoic Acid Containing Waste Water", Wat. Res. Vol. 37, pp. 1125-1135, 2003.
- Chan, D., Ray, A.K., "Removal of toxic metal ions from waste water by semiconductor photocatalysis", Chemical Engineering Science, vol. 56, pp. 1561-1570, 2001.
- Chen, D., Ray, A.K., "Removal of toxic metal ions from wastewater by semiconductor photocatalysis", Chemical Engineering Science, vol 56, pp. 1561-1570, 2001.

- Choi W and Hoffman MR, "Novel Photocatalytic mechanisms for CHCl_3 , CHBr_3 and CCl_3CO_2 degradation and the fate of photogenerated trihalomethyl radicals on TiO_2 ", *Environ Sci Technol* 37 : 89-95, 1997.
- Dhanajay S., Vishwas G., Anthony, "Photocatalytic degradation for environmental applications", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2001.
- Dumitriu D., "Photocatalytic Degradation of Phenol by TiO_2 Photocatalyst Coated Rotating Drum Reactor", *App. Catal. B. Environ.*, 25, 83-92, 2000.
- Fujishima, A., Honda, K., "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electron", *Nature*, 238, 37-38, 1972.
- Fogler, H. S., "Element of Chemical Reaction Engineering", Third Ed., Prentice Hall, Inc., USA, 1999.
- Grzechulska, J., Morawski, A., "Photocatalytic labyrinth flow reactor with immobilized $\text{P}25$ TiO_2 bed for removal of phenol from water", *App. Catal. Environ.*, 46, 415-419, 2003.
- Hermann, J.M., "Heterogenous Photocatalysis : Fundamental And Applications to The Removal of Various Types of Aqueous Pollutants", *Catalysis Today*, vol. 53 pp. 115-129, 1999.
- Hermann, J.M., Tahiri H., Ait-Ichou Y., Lassaletta G., Gonzaler Elipe AR., and Fernandez A., "Characterization and photocatalytic activity in aqueous medium of TiO_2 and Ag- TiO_2 coatings on quartz", *Applied Catalysis B : Environmental* 13 : 219-228, 1997.
- Illhamsyah, M., "Reduksi Logam Berat Cr(VI) dan Degradasi Fenol Secara Simultan Dengan Fotokatalis Serbuk TiO_2 Degussa P25", Skripsi sarjana, TGP-FTUI, Depok, 2003.
- Khalil, L.B., Mourad, W.E., Rophael, M.W., "Photocatalytic reduction of environmental pollutant Cr(VI) over some semiconductors under UV/Visible light illumination", *Appl. Catal. B : Environ.*, 17 : 3, 267-273, 1998.
- Kustiningsih, I., Slamet, Bismo, S., "Kinerja Fotoreaktor Plat Bertingkat Pada Pengolahan Limbah Cr(VI) dan Fenol secara simultan dengan Katalis TiO_2 Bentuk Film", *Prosiding Seminar Nasional Peran Hasil Riset dan Teknologi dalam Pengembangan Industri, Teknik Kimia UGM, Yogyakarta, September (2006) 20-26*, ISBN : 979-99801-2-7.
- Lathasree, A., Nageswara, A., SivaSankar, B., Sadasivam, V., Rangaraj, K., "Heterogeneous photocatalytic mineralization of phenols in aqueous solutions", *J. Molec. Catal. A : Chemical*, 223 :101-105, 2004.
- Leung, M., Tang, S.M., Lam, C.W., Leung, Y.C., Yam, C.W., Vrijmoed, L.P., "Parallel-Plate Solar Photocatalytic Reactor for Air Purification: Semiempirical Correlation, Modeling and Optimizition", *Departement of Mechanical Engineering. The University of Hongkong, China*, 2005.

- Linsebeigler, Amy L., Guangquan Lu, and John t. Yates Jr., "Photocatalysis on TiO_2 Surface : Principels, Mechanisms and Selected Results", Chem. Rev., vol 95, pp.735-758, 1995.
- Litter, M.I., "Heterogenous Photocatalysis Transition metal ions in Photocatalysis System", *App. Catal. B : Environ.*, vol. 23:2-3:89-224, 1999.
- Malato, S., "Photocatalysis with Solar Energy at a Pilot-Plant Scale : an Overview", *App. Catal. B : Environ.*, vol. 37, pp. 1-15, 2002.
- Matthews RW., "Photo-Oxidation of Organic Material in aqueous suspensions of Titanium dioxide" *Water Res*, pp. 569-578, 1986.
- Matthews R.W., " Solar electric purification using photocatalytic oxidation with TiO_2 as a stationary phase", *Solar Energy* 38 : 405-413, 1987.
- Matthews R.W., McEvoy S.R., "Photocatalytic degradation of phenol in the prsesence of Near UV illuminated titanium dioxide", *Journal Photochem Photobiol A : Chem* 64 : 231-246, 1992.
- Mazzarino I and Piccinini P, "Photocatalytic oxidation of organic acids in aqueous media by supported catalyst", *Chem Engg Sci* 54 : 3107-3111, 1999.
- Mills A, Davies RH, Worsley D, "Water Purification by Semiconductor Photocatalysis", *Chem Soc Rev.*, pp 417-425, 1993.
- Mohapatra, P., Samantaray, S.K., Parida, K., "Photocatalytic reduction of hexavalent chromium in aqueous solution over sulphate modified titania", *J. of Photochem. Photobiol. A : Chemistry*, 170: 189-194, 2005.
- Molinari, R., Mungari, M., Drioli, E., Di Paola, A., Loddo, V., Palmisano, L., Schiavello, M., *Catal. Today* 55 : 71, 2000.
- Molinari, R., Grande, C., Drioli, E., Palmisano, L., Schiavello, M., *Catal Today* 67 : 273, 2000.
- Mozia, S., Tomaszewska, M., Morawski, A.W., "A new Photocatalytic Membrane Reactor for Removal of azo-dye Acid Red 18 from Water", *Departement of Water and Environmental Engineering. Pulaskiego* 10, 2005.
- Nagaveni, K., Sivalingam, G., Hedge, M.S., Madras, G., "Solar photocatalytic degradation of dyes : high activity of combustion synthesized nano TiO_2 ", *Appl. Catal. B : Environ.*, 48, 83-93, 2004.
- Noguchi T, Fujishima A, Sawanyawa P and Hashimoto K, "Photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde using TiO_2 film", *Environ Sci Technol* 32 : 3831-3833, 1998.
- Parent, Y., Blake, D., "Solar Photocatalytic Process for the Purification of Water: State of Development and Barriers to Commercialization", *Solar Energy* vol 56, pp. 429-437, 1996.
- Sanjay P.K., Sudhir B.S., and Vishwas G.P., "Novel Solar-Based Photocatalytic Reactor for Degradation of Refractory Pollutans", *AIChE Journal* vol 50, pp. 1647-1650, 2004.

- Schrank, S.G., Jose, H.J., Moreira, R.F.P.M., "Simultaneous photocatalytic Cr(VI) reduction and dye oxidation in a TiO₂ slurry reactor", J. of Photochem. Photobiol. A : Chemistry, 147 : 71-76, 2002.
- Serpone N, Ah-You YK, Tran TP, Harris R, Pelizzetti E and Hidaka H, "AMI simulated sunlight photoreduction and elimination of Hg (II) and CH₃Hg (II) Chloride salts from aqueous suspensions of titanium dioxide", Solar Energy 39 : 491-498, 1987.
- Sopyan lis, "Fotokatalisis Semikonduktor Teori Dasar dan Penerapan", Majalah BPP. Teknologi, No. LXXXVII, PP. 129-138, Juli 1998.
- Subrahmanyam, M., S. Kaneco, and Alonsovante, "A Screening for the Photoreduction of Carbon Dioxide Supported on Metal Oxide Catalysts for C1-C3 Selectivity", Catalysis B : Environmental, vol 39, 1997.
- Sutar, "Degradasi Senyawa Fenol secara Fotokatalitik dengan katalis TiO₂", Skripsi Jurusan TGP-FTUI, 2001.
- Turchi CS and Ollis DF, "Mixed reactant photocatalysis : intermediates and mutual rate inhibition", J Catalysis 119 : 483-496, 1989.
- Udiharto, M., "Diskusi Ilmiah VI Beberapa Hasil Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi", Jakarta, 1989.
- Wang, X., "Photocatalytic Reduction of Hg(II) on Two Comercial TiO₂ Catalysts", Electrochimica Acta, Vol.49, pp. 1435-1444, 2004.
- Yawalkar A.A., Bhatkande D.S., Pangkarkar V.G., Beenacker A.A.C.M., "Solar assisted Photocatalytic and Photochemical degradation of phenol", Journal Chem Technol Biotechnol, 76 : 363-370, 2001.

