

Penyisihan Fenol Dengan Kombinasi Proses Adsorpsi Dan Fotokatalisis Menggunakan Karbon Aktif Dan TiO₂

Slamet, Setijo Bismo, Rita Arbianti dan Zulaina Sari
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus UI Depok, Depok 16424, Tel. 7863516
E-mail : slamet@che.ui.edu

Abstrak

Kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalisis dipandang mempunyai prospek yang lebih baik dalam mengolah limbah organik. Paduan katalis yang terdiri dari fotokatalis TiO₂ dan adsorben karbon aktif (AC) telah dievaluasi untuk pengolahan limbah fenol. Preparasi katalis dilakukan dengan menguapkan seluruh cairan pada slurry TiO₂ yang telah dicampur dengan AC granular pada suhu 100°C dan dikalsinasi pada suhu 400°C. Untuk mencegah rontoknya TiO₂ dari penyangga AC, maka ditambahkan SiO₂ yang didapat dari larutan TEOS. Karakterisasi BET dilakukan untuk mengetahui luas permukaan dan ukuran pori katalis. Pengujian aktifitas katalis dilakukan dengan mengalirkan fenol 30 ppm ke dalam reaktor pipa anulus Pyrex yang di sekelilingnya dipasang 8 buah lampu UV pada selubung reaktor dengan intensitas iluminasi 144 µW/m². Larutan fenol dialirkan ke dalam reaktor secara kontinyu dengan kecepatan 35 mL/menit dan lama pengujian 8 jam. Perubahan konsentrasi fenol dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 500 nm. Kondisi optimum dari pengujian ini dicapai dengan menggunakan katalis TiO₂/SiO₂/AC dengan komposisi (rasio berat) 2,4:0,047:97,5 yang berhasil menyisihkan 30 ppm fenol dengan konversi sebesar 100 %.

Kata kunci: Fotokatalisis, adsorpsi, fenol dan TiO₂, karbon aktif.

Abstract

The integration of adsorption and photocatalysis process is considered to have a better prospect in handling of organic wastes. The combination of catalyst consisting of TiO₂ photocatalyst and active carbon (AC) adsorbent has been evaluated to treat a phenol waste. Preparation of catalyst was conducted by evaporating all dilution of TiO₂ slurry, which has been mixed with the granular of active carbon at a temperature of 100°C and calcined at a temperature of 400°C. SiO₂ which obtained from TEOS solutions was added to prevent a falling off TiO₂ from AC support. Characterization of BET was conducted to find out the surface area as well as pore size of the catalyst. Activity test of the catalyst material was done by conducting of 30 ppm phenol solution in annular Pyrex glass reactor that surrounded by 8 UV lamps, which have the total illumination intensity of 144 µW/m². The phenol solution was continuously poured in the reactor with rate of 35 ml/min for about 8 hours. The phenol concentration was analyzed with spectrophotometer at wavelength of 500 nm. The optimum condition of this examination was reached by using a catalyst of TiO₂/SiO₂/AC with composition of 2.4:0.047:97.5 (weight ratio), and succeeded in eliminating of 30 ppm phenol with 100 % conversion.

Keywords: Photocatalysis, adsorption, phenol and TiO₂, active carbon.

1. Pendahuluan

Masalah pencemaran air dewasa ini dan tingginya kebutuhan akan air bersih, menuntut penanganan yang serius dalam pengolahannya. Salah satu limbah berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungannya adalah limbah organik seperti fenol. Dalam konsentrasi tertentu

keberadaan senyawa ini dapat menyebabkan gangguan fisiologis terhadap ikan, menghambat beberapa aktivitas mikroorganisme dan beberapa biota laut pada proses nitrifikasi. Senyawa ini juga memberi efek yang berbahaya terhadap kesehatan manusia [1]. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup RI No. 51/MENLH/10/1995 dan Keputusan

Menteri Kesehatan RI Nomor 907/MENKES/SK/ VII/2002, senyawa fenol dinyatakan aman keberadaannya dalam air untuk kehidupan ekosistem aquatic pada konsentrasi 0,5 – 1,0 mg/L, sedangkan ambang batas senyawa (turunan) fenol dalam baku mutu air minum adalah maksimal 0,01 mg/L [2-3].

Proses adsorpsi adalah salah satu metode pengolahan limbah yang sederhana dan banyak dipakai untuk limbah organik. Namun dalam proses adsorpsi terdapat beberapa kelemahan, yaitu diperlukannya proses regenerasi adsorben ketika sudah jenuh dengan senyawa organik. Disamping itu, polutan organik yang telah diadsorpsi dalam adsorben masih tetap berbahaya, karena tidak dapat didegradasi menjadi senyawa lain yang tidak berbahaya seperti CO_2 dan H_2O . Di sisi lain proses fotokatalitik dengan katalis semikonduktor telah terbukti mampu mendegradasi secara efektif berbagai jenis polutan organik, baik dalam fasa gas maupun cair. Oksidasi fotokatalisis dapat mendegradasi senyawa-senyawa organik dengan mengubahnya menjadi produk inorganik yang aman bagi lingkungan, yaitu CO_2 dan H_2O [4-5]. Akan tetapi daya adsorpsi material fotokatalis umumnya lebih rendah dibandingkan dengan material adsorben, sehingga laju degradasi fotokatalitik cukup rendah.

Dengan mengkombinasikan kedua proses/material tersebut (adsorben dan fotokatalis) diharapkan proses degradasi polutan organik dapat berlangsung lebih efektif. TiO_2 Degussa P25 adalah salah satu semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis untuk mengolah limbah-limbah organik karena bersifat inert, stabil dan pengoksidator kuat [6]. Pada awalnya para peneliti menggunakan reaktor sistem *slurry* untuk melaksanakan reaksi fotokatalisis, dimana TiO_2 dicampurkan ke dalam air yang diolah lalu diiluminasi dengan sinar UV yang sesuai. Proses fotokatalisis dengan sistem katalis *slurry* memiliki kendala teknis dalam hal memisahkan *slurry* TiO_2 dari air yang telah diolah [6-7]. Selain itu sistem *slurry* tidak mudah diterapkan dalam sistem aliran kontinyu, sehingga dalam penelitian ini

dipakai sistem TiO_2 yang di-immobilisasi pada material lain yang berfungsi sebagai penyangga. Karbon aktif (AC) adalah salah satu penyangga dengan daya adsorpsi cukup baik dan sering dipakai sebagai material pengolahan limbah organik. Namun kelemahan dari kombinasi serbuk TiO_2 dengan AC adalah terjadinya perontokan fotokatalis dari penyangganya sehingga dapat menurunkan kinerja katalis dalam mendegradasi limbah. Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan menambahkan SiO_2 sebagai penambah kekuatan mekanik, yang dapat diperoleh dari larutan TEOS. Disamping itu, dari beberapa peneliti terdahulu [4,7] belum diperoleh komposisi paduan TiO_2 -AC yang optimal dengan kinerja yang baik.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan paduan TiO_2 -AC dengan komposisi yang optimal pada proses pengolahan limbah fenol.

2. Percobaan

Pada sub-bab ini akan diuraikan secara rinci bahan-bahan dan tahapan yang diperlukan dalam pembuatan katalis paduan TiO_2 -AC. Selanjutnya prosedur pengujian katalis untuk pengolahan limbah fenol juga dijelaskan lebih rinci.

2.1. Preparasi Katalis

Preparasi katalis TiO_2 /Karbon aktif dilakukan dengan menguapkan seluruh cairan *slurry* TiO_2 yang bercampur dengan adsorben karbon aktif. Sebelumnya karbon aktif yang tersedia dalam bentuk butiran dicuci terlebih dahulu dengan air sampai tidak terdapat pengotor lagi, kemudian dikeringkan selama 1 jam di dalam *atmospheric furnace* pada suhu 250 °C. Sol TiO_2 dibuat dengan cara mencampurkan serbuk TiO_2 Degussa P25 dengan air bebas mineral, kemudian dilakukan sonifikasi dengan menggunakan alat *ultrasonic cleaner* selama 30 menit. Setelah itu ditambahkan larutan TEOS ke dalam sol TiO_2 tersebut dan dilakukan sonifikasi kembali selama 30 menit.

Pada saat penambahan larutan TEOS ke dalam sol TiO_2 pH campuran turun dari 4

menjadi 2 – 1,17. Derajat keasaman larutan mempengaruhi ukuran partikel TiO₂, semakin asam atau basa maka ukuran partikel katalis semakin kecil, yang berarti luas permukaannya semakin besar. Dalam keadaan pH asam permukaan TiO₂ akan bermuatan positif sehingga daya tolak antar partikel TiO₂ akan semakin besar, akibatnya TiO₂ dapat terdistribusi secara merata di seluruh permukaan cairan [8].

Kemudian campuran tersebut dievaporasi dengan suhu 100°C sampai semua cairan teruapkan (\pm 30 menit, 1 jam), dikeringkan di dalam furnace pada suhu 100°C selama 2 jam, dan dikalsinasi pada suhu 400°C selama 1 jam. Kalsinasi pada suhu tersebut masih tergolong aman untuk karbon aktif dan TiO₂ jenis anatase [7].

2.2. Uji Aktivitas Katalis

Pengujian aktivitas katalis dilakukan selama 8 jam menggunakan reaktor fotokatalitik yang terbuat dari kaca Pyrex berbentuk silinder anulus. Selubung reaktor terbuat dari aluminium foil yang di sisi dalamnya dilengkapi dengan delapan buah UV *black light lamp* berdaya @ 10 Watt, dengan panjang gelombang maksimum 365 nm dan intensitas cahaya 144 μ W/m². Selubung ini berfungsi untuk menjaga agar sinar radiasi dari lampu ultraviolet tidak terpancar keluar reaktor sehingga sinar ultraviolet dapat diserap secara maksimal oleh katalis.

Dalam pengoperasiannya, limbah fenol dengan konsentrasi awal 30 ppm (sebanyak \pm 20 L) dialirkan ke dalam reaktor yang berisi fotokatalis melalui bagian bawah reaktor dengan laju alir 35 mL/menit. Pada selang waktu tertentu, konsentrasi fenol yang keluar reaktor dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 500 nm.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

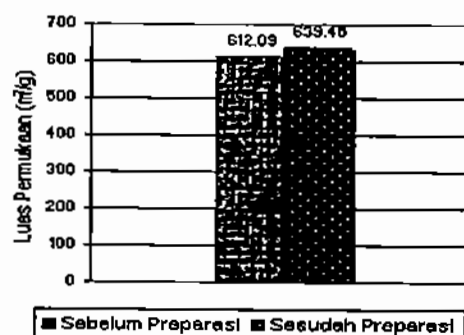
Beberapa hal yang akan dibahas dalam sub-bab ini adalah hasil dari karakterisasi dan uji kinerja katalis. Aspek-aspek yang akan dibahas pada uji kinerja katalis meliputi pengaruh UV, berat katalis,

loading TiO₂, dan loading SiO₂ dalam katalis.

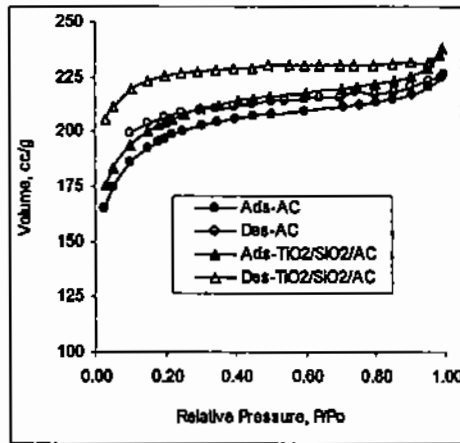
3.1. Karakterisasi BET

Karakterisasi BET dilakukan dengan menggunakan alat *Autosorb-6B, Gas Sorption System*, buatan Quantachrome. Karakterisasi ini dilakukan untuk mengetahui luas permukaan dan distribusi ukuran pori karbon aktif sebelum dan sesudah dipreparasi. Karbon aktif 'sebelum preparasi' adalah AC murni yang sebelumnya telah dicuci dan dikeringkan pada suhu 250 °C selama 1 jam, sedangkan karbon aktif 'setelah preparasi' adalah AC yang telah dimodifikasi dengan TiO₂ dengan komposisi (rasio berat) TiO₂/SiO₂/AC sebesar 2,4:0,203:97,5.

Hasil dari karakterisasi BET ini dapat dilihat pada Gambar 1, yang menunjukkan bahwa luas permukaan (*single point BET*) karbon aktif sebelum dipreparasi lebih kecil daripada setelah dipreparasi. Peningkatan luas permukaan pori karbon aktif ini dikarenakan abu dan pengotor lainnya yang terdapat dalam karbon aktif terlepas ketika dilakukan proses pemanasan dan kalsinasi. Lepasnya pengotor-pengotor ini dapat membuka pori-pori karbon aktif tersebut [9]. Walaupun demikian, perbedaannya tidak menunjukkan angka yang cukup signifikan. Hal ini diperkirakan karena adanya TiO₂ dan SiO₂ yang melapisi permukaan karbon aktif tersebut. Ketika pori-pori karbon aktif terbuka, sebagian celah yang terbuka tersebut diisi oleh TiO₂ dan SiO₂.



Gambar 1. Perbandingan Luas Permukaan (BET) Adsorben Karbon Aktif Sebelum dan Sesudah Preparasi



Gambar 2.
Kurva Adsorpsi-Desorpsi Karbon Aktif Murni dan $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$

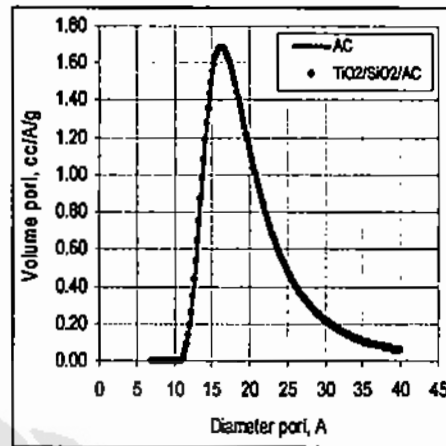
Gambar 2 (hasil karakterisasi BET) menunjukkan kurva histerisis untuk AC dan $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$. Kurva histerisis tersebut memiliki bentuk yang mirip dengan kurva Tipe I dari kelima tipe kurva adsorpsi *isotherm* yang ada, dan sering disebut dengan tipe Langmuir. Kurva adsorpsi fisik tipe ini umumnya terjadi pada material mikropori seperti karbon aktif atau zeolit [10]. Volume pori setelah dipreparasi mengalami peningkatan, sehingga sifat mikropori dari katalis setelah dipreparasi menjadi lebih baik dibandingkan sebelum dipreparasi. Tabel 1 berikut menunjukkan sebagian data hasil karakteristik BET.

Tabel 1.
Hasil Karakterisasi BET

Parameter	Sebelum Preparasi (AC murni)	Setelah Preparasi ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$)
Diameter pori (\AA)	16,4	16,4
Volume pori (cm^3/g)	0,347	0,369
Luas permukaan (m^2/g)	612,09	639,45

Berdasarkan hasil karakteristik BET yang terlihat pada Gambar 3, dapat diketahui dengan jelas bahwa diameter adsorben sebelum dipreparasi dan setelah

dipreparasi tidak mengalami perubahan, yaitu sebesar $16,4 \text{ \AA}$. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif termasuk jenis mikropori karena memiliki diameter pori lebih kecil dari 20 \AA [11].

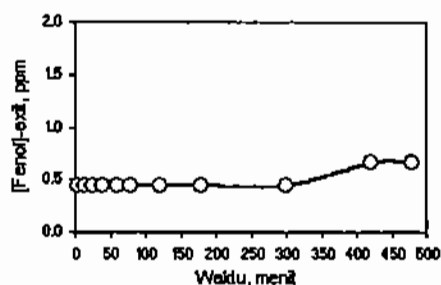


Gambar 3.
Kurva Distribusi Pori Katalis (DA method) Sebelum (AC) dan Sesudah Preparasi ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$)

3.2. Uji Adsorpsi Fenol Dengan Karbon Aktif

Pengujian ini dilakukan untuk melihat kemampuan karbon aktif dalam mengadsorpsi fenol, disamping untuk melihat perbandingan kinerjanya dalam mendegradasi fenol setelah dikombinasi dengan TiO_2 . Gambar 4 menunjukkan aktifitas karbon aktif murni dalam mengadsorpsi fenol. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa konsentrasi fenol hasil adsorpsi mengalami penurunan dari konsentrasi fenol awal 30 ppm menjadi 0,43 ppm atau turun sebesar 98,57 % dalam waktu 5 menit dan tetap pada konsentrasi tersebut sampai menit ke-300, kemudian pada menit berikutnya sampai menit ke-480 konsentrasi fenol keluaran reaktor mulai sedikit naik menjadi 0,65 ppm. Sejak menit ke-480 sampai seterusnya diperkirakan konsentrasi fenol hasil adsorpsi akan terus mengalami kenaikan yang menunjukkan bahwa adsorben karbon aktif semakin berkurang daya serapnya. Hal ini disebabkan dalam kolom fixed bed, adsorbat dikontakkan secara terus menerus

tetap. Diperkirakan pula jumlah konsentrasi fenol yang terserap dalam padatan cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu, sehingga daya serapnya akan menurun dengan semakin dekatnya titik jenuh adsorben tersebut.



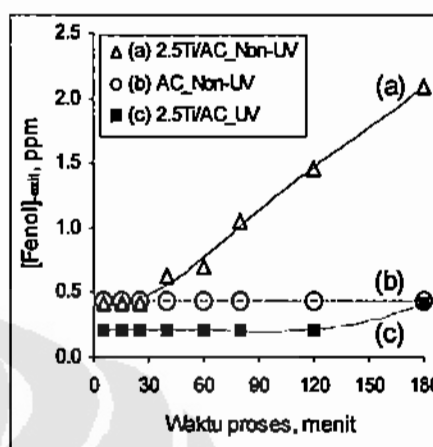
Gambar 4.
Adsorpsi Fenol dengan AC Murni
(Konsentrasi Awal 30 ppm)

Besarnya jumlah fenol yang teradsorpsi pada proses ini menunjukkan bahwa karbon aktif merupakan adsorben yang sangat kuat terhadap fenol. Hal ini juga membuktikan bahwa karbon aktif memang sesuai dipakai sebagai adsorben untuk pemisahan polutan-polutan organik. Pada proses adsorpsi dengan karbon aktif, juga terjadi selektivitas adsorpsi. Di dalam air karbon aktif lebih memilih molekul-molekul organik dan substansi-substansi yang non-polar. Seperti diketahui bahwa air lebih tinggi polaritasnya daripada fenol, momen dipol air ialah sebesar 1,84 D [12] sedangkan Fenol sebesar 1,2 D [13], sehingga dapat dipastikan bahwa karbon aktif akan lebih menyukai fenol dibanding air. Fenomena inilah yang membuat karbon aktif mempunyai kemampuan yang kuat untuk menyerap fenol.

3.3. Uji Adsorpsi dan Fotokatalisis Pada Katalis $TiO_2/SiO_2/AC$

Percobaan ini dilakukan untuk menguji aktifitas TiO_2 yang menempel pada adsorben karbon aktif untuk melihat pengaruhnya dalam mendegradasi senyawa fenol. Pengujian ini dilakukan menggunakan katalis $TiO_2/SiO_2/AC$ sebanyak 25 gram dengan komposisi 2,4:0,203:97,5 (rasio berat). Pada prosesnya percobaan dilakukan dengan menyalakan

lampu UV yang ada di sekeliling reaktor. Berikutnya percobaan dilakukan tanpa menyalakan lampu UV. Larutan 30 ppm fenol dialirkan secara kontinu ke dalam reaktor dengan laju 35 mL/menit. Hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5.
Pengaruh TiO_2 dan UV Terhadap Konsentrasi Fenol Keluaran (Konsentrasi Awal 30 ppm)

Gambar 5 menunjukkan bahwa proses penyisihan fenol dengan penyinaran lampu UV lebih baik dibandingkan tanpa penyinaran lampu UV (kurva a vs c). Pada saat pengujian dengan penyinaran lampu UV, ketika katalis dikontakkan dengan fenol diduga terjadi dua proses secara simultan, yaitu adsorpsi dan fotokatalisis. Hal ini juga diperkuat dari kurva (c) pada Gambar 5 yang lebih rendah dari kurva (b), selain kurva (a), yang hanya menggambarkan proses adsorpsi saja. Reaksi fotokatalisis terjadi karena penyinaran radiasi elektromagnetik (seperti sinar UV) pada permukaan fotokatalis yang menyebabkan fotokatalis teraktivasi [14]. Jika fotokatalis semikonduktor teraktivasi oleh cahaya (energi foton) yang besarnya setara dengan energi *band gap*, maka akan memiliki kemampuan untuk membentuk radikal hidroksil yang dapat mengoksidasi polutan organik [8]. Dengan kata lain, degradasi (oksidasi) ini hanya dapat terjadi dibawah efek cahaya (*photocatalytic effect*) [15]. Hal ini menyebabkan pada pengujian dengan penyinaran lampu UV konsentrasi fenol keluaran menjadi lebih kecil dan

persentase penyisihan fenol lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penyinaran lampu UV. Diduga fenomena ini terjadi karena sebagian cairan limbah fenol terkonversi menjadi produk intermediet [4,16] yang bersifat sementara.

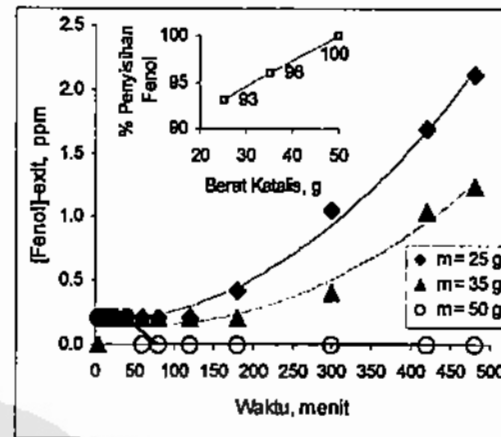
Walaupun dalam penelitian ini tidak dianalisa mekanisme reaksi, tetapi disinyalir bahwa pada awalnya fenol teroksidasi menjadi *hidroquinon* dan *cathecol* yang kemudian teroksidasi lagi menjadi *maleic acid*. Asam ini akhirnya teroksidasi menjadi CO_2 dan H_2O [4,16]. Peristiwa ini diduga menyebabkan konsentrasi fenol yang teradsorpsi oleh katalis menjadi lebih kecil dan akibatnya penyisihan fenol menjadi lebih tinggi. Pada pengujian tanpa penyinaran lampu UV proses yang terjadi hanya proses adsorpsi biasa. Hal ini ditandai dengan tingginya konsentrasi fenol keluaran dibandingkan dengan konsentrasi fenol keluaran hasil pengujian yang menggunakan lampu UV.

Selain itu katalis yang digunakan tanpa UV juga lebih cepat mencapai titik jenuhnya. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 5, dimana pada pengujian tanpa penyinaran lampu UV konsentrasi fenol keluaran pada menit ke-5 sampai menit ke-25 adalah 0,43 ppm. Setelah lewat dari 25 menit, konsentrasi fenol keluaran terus mengalami kenaikan sampai proses berakhir. Berbeda dengan pengujian menggunakan lampu UV, konsentrasi fenol keluaran hanya sebesar 0,21 ppm pada menit ke-5 sampai menit ke-120. Setelah lewat dari 120 menit, konsentrasi fenol keluaran mulai mengalami sedikit kenaikan. Diperkirakan fenomena tersebut dapat terjadi karena pada saat proses dilakukan dengan penyinaran lampu UV katalis mengalami regenerasi selama proses berlangsung, sehingga titik jenuh katalis tersebut dicapai dalam waktu yang relatif jauh lebih lama.

3.4. Pengaruh Berat Katalis

Pengujian dilakukan dengan menggunakan katalis yang sama yaitu dengan komposisi $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC} = 2,4 : 0,203 : 97,5$ (rasio berat), dengan berat

katalis yang divariasikan adalah 25 g, 35 g, dan 50 g. Masing-masing pengujian dilakukan dengan penyinaran lampu UV. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 6. berikut ini.



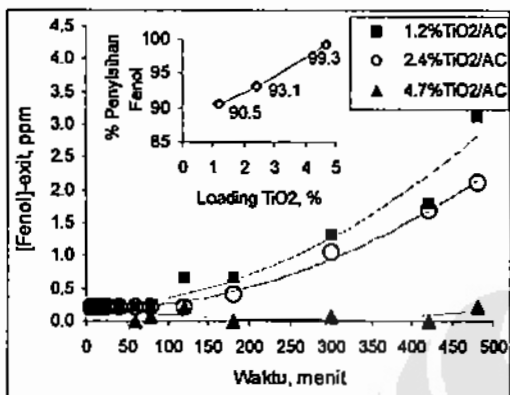
Gambar 6. Pengaruh Berat Katalis Terhadap Konsentrasi Fenol Keluaran (Konsentrasi Awal 30 ppm)

Gambar 6 menunjukkan semakin banyak katalis yang digunakan, maka konsentrasi fenol keluaran reaktor akan semakin rendah dan persen penyisihan fenol semakin tinggi. Fenomena ini terjadi karena dengan semakin banyaknya katalis yang digunakan, maka ketinggian katalis di dalam reaktor semakin besar, sehingga waktu kontak fenol dengan katalis semakin lama. Kondisi ini juga menyebabkan waktu tinggal menjadi lebih besar sehingga jumlah fenol yang teradsorpsi dan terdegradasi oleh katalis menjadi semakin tinggi pula. Dari pengujian ini katalis dengan berat 50 gram dinilai yang paling baik, karena sudah diperoleh konsentrasi fenol keluaran yang sesuai dengan standar baku mutu air untuk air minum, yaitu $< 0,01 \text{ mg/L}$ [3].

3.5. Pengaruh Loading TiO_2 Dalam Katalis

Kandungan TiO_2 dalam katalis divariasikan, yaitu: 1,2; 2,4; dan 4,7 % berat. Adapun kandungan SiO_2 dalam katalis mengikuti banyaknya TiO_2 , yaitu 8,36 % berat TiO_2 atau 2,5 % mol TiO_2 . Berat katalis untuk masing-masing pengujian adalah sama, yaitu 25 gram, dengan konsentrasi awal fenol sebesar 30 ppm.

Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 7, yang menunjukkan bahwa fenol yang terkonversi akan semakin tinggi dengan semakin banyaknya kandungan TiO₂ dalam katalis. Seperti yang telah diketahui bahwa dalam proses fotokatalisis, tahap pertama adalah terjadinya adsorpsi reaktan dalam fasa fluida yang dalam hal ini adalah fenol ke permukaan katalis [17].



Gambar 7.

Pengaruh Loading TiO₂ Terhadap Konsentrasi Fenol Keluaran (Konsentrasi Awal 30 ppm)

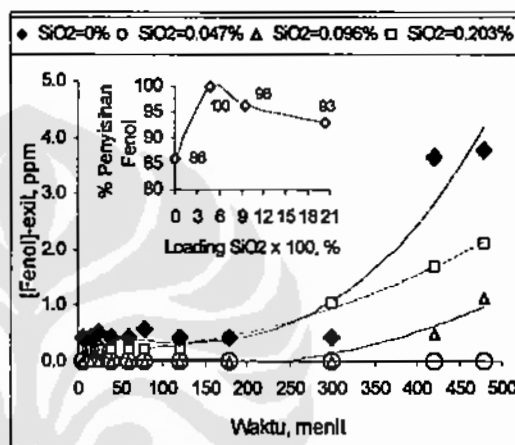
Katalis TiO₂ yang disangga oleh karbon aktif dengan kemampuan adsorpsinya yang kuat akan menyerap sejumlah besar fenol untuk kemudian mengalami reaksi didalam fasa yang teradsorpsi [17]. Semakin banyak TiO₂ di dalam katalis akan meningkatkan jumlah pasangan hole dan elektron yang dihasilkan, sedangkan jumlah foton yang dipakai untuk mengoksidasi fenol mempunyai nilai yang sama untuk masing-masing katalis. Hal ini menyebabkan fenol yang terkonversi menjadi CO₂ dan H₂O menjadi lebih banyak [5,16,18].

Dari hasil pengujian ini terbukti katalis dengan loading TiO₂ terbanyak mempunyai tingkat penyisihan tertinggi, yaitu 99,33 % dengan konsentrasi fenol keluaran sebesar 0,21 ppm. Nilai konsentrasi fenol keluaran tersebut sudah memenuhi standar baku mutu air untuk kehidupan sistem aquatik [2]. Uji pengaruh loading TiO₂ terhadap konsentrasi keluaran fenol juga pernah dilakukan oleh Alemany, dkk (1997) pada penelitian degradasi fenol dalam air menggunakan katalis Titania dengan penyangga Silika [16]. Dari variasi loading

TiO₂ yang dilakukan dalam penelitian mereka, yaitu 6,92 %, 17,96 %, 28,56 % dan 49,02 % berat Silika, diperoleh hasil dengan persentase TiO₂ 49,02 % konsentrasi fenol keluaran memiliki nilai yang paling kecil. Fenomena yang terjadi pada penelitian mereka mempunyai kesamaan dengan hasil penelitian ini.

3.6. Pengaruh loading SiO₂ dalam katalis

Pengaruh jumlah SiO₂ didalam katalis dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 2 berikut.



Gambar 8.

Pengaruh Loading SiO₂ Terhadap Konsentrasi Fenol Keluaran (Konsentrasi Awal 30 ppm)

Tabel 2.

Data Hasil Uji Pengaruh Loading SiO₂

SiO ₂ (% berat)	0	0,047	0,096	0,203
Konsentrasi fenol keluaran (ppm)	3,79	0	1,12	2,11
Penyisihan fenol (%)	86	100	96	93

Dari Gambar 8 dan Tabel 2 dapat dilihat bahwa kondisi optimum tercapai pada katalis dengan kandungan SiO₂ = 0,047 % berat. Kemudian jika kandungan SiO₂ dalam katalis dinaikkan menjadi 0,096 % berat dan 0,203 % berat, maka konsentrasi fenol keluaran akan semakin meningkat (% penyisihan fenol turun) seiring dengan bertambahnya waktu kontak fenol dan katalis. Peristiwa ini terjadi dikarenakan dengan semakin banyaknya jumlah SiO₂ yang terdapat pada katalis, maka ketebalan lapisan permukaan katalis juga semakin

bertambah, sehingga dapat menutupi pori-pori penyangga katalis dan dapat menghalangi cahaya yang akan diadsorpsi di permukaan katalis [19]. Hal ini menyebabkan sebagian TiO_2 tidak dapat teraktivasi, sehingga proses fotokatalisis menurun [19]. Selain itu peristiwa ini juga diduga menyebabkan jumlah fenol yang teradsorpsi di dalam katalis ikut berkurang karena menurunnya kemampuan adsorpsi katalis (karbon aktif) dengan meningkatnya ketebalan lapisan SiO_2 .

Untuk katalis yang tidak mengandung SiO_2 , konversi fenol keluaran selama 8 jam menunjukkan angka yang paling rendah. Hal ini ditunjukkan dengan semakin tingginya konsentrasi fenol keluaran setelah katalis dikontakkan dengan fenol selama 8 jam. Fenomena ini dikarenakan terjadinya perontokan TiO_2 dari permukaan katalis yang semakin banyak dengan meningkatnya waktu kontak, sehingga fenol yang terdegradasi juga semakin sedikit. Selain itu katalis akan lebih cepat mendekati titik jenuh karena fenol yang terkonversi menjadi CO_2 dan H_2O berkurang, sehingga proses regenerasi katalis pun berkurang.

Kondisi optimum dari pengujian ini adalah dengan menggunakan katalis $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$ dengan komposisi 2,4:0,047:97,5 (rasio berat), yang berhasil menyisihkan fenol sebesar 100% untuk lama pengujian 8 jam. Jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Guan, dkk (2003) tentang efek penambahan dan mekanisme SiO_2 pada sifat superhydrophilic film TiO_2 [20], Fenomena yang terjadi mempunyai kemiripan dengan penelitian ini. Dalam penelitian tersebut, gelas kaca yang dilapisi dengan TiO_2 tanpa penambahan SiO_2 , memiliki kemampuan yang paling rendah dalam mereduksi sudut kontak dari air. Variasi SiO_2 yang diuji dalam penelitian tersebut adalah 0, 10, 20, 30, 40, dan 50 % mol. Hasil optimum dicapai pada loading SiO_2 40 % mol TiO_2 . Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak loading SiO_2 di dalam suatu katalis belum tentu dapat membuat kemampuan katalis tersebut menjadi lebih baik.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

1. Karbon aktif merupakan adsorben yang mempunyai daya adsorpsi yang sangat kuat dan sesuai untuk mengadsorpsi senyawa organik seperti fenol. Hal ini terbukti dengan tingginya daya adsorpsi karbon aktif terhadap fenol, yaitu 98 %.
2. Hasil karakterisasi BET menunjukkan bahwa karbon aktif yang sudah dimodifikasi dengan TiO_2 mengalami peningkatan luas permukaan, diameter pori, dan volume pori. Hasil BET juga menunjukkan bahwa karbon aktif merupakan *microporous adsorbent*.
3. Hasil uji adsorpsi dan fotokatalisis menunjukkan bahwa jika lampu UV dinyalakan, proses yang terjadi dalam pengolahan limbah fenol adalah kombinasi proses fotokatalisis dan adsorpsi secara simultan. Jika lampu UV tidak dinyalakan yang terjadi hanya proses adsorpsi biasa.
4. Kondisi optimum yang didapatkan pada penelitian ini adalah pengolahan limbah fenol menggunakan 25 g katalis $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{AC}$ dengan komposisi 2,4:0,047:97,5 (rasio berat), yang berhasil menyisihkan 30 ppm fenol yang dialirkan selama 8 jam dengan laju 35 mL/menit, dengan konversi penyisihan fenol sebesar 100%.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Ditjen Dikti, Kementerian Pendidikan Nasional RI, atas bantuan finansialnya pada penelitian ini melalui proyek Penelitian Hibah Bersaing XIV.

Daftar Acuan

- [1]. _____, www.msds.go.id, "Material Safety Data Sheet (MSDS) for Phenol", 2005
- [2]. _____, www.bapedal.go.id, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 51/MENLH/10/1995, tentang *Baku*

- Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri, 2001.
- [3]. _____, Keputusan Menteri Kesehatan RI Nomor 907/MENKES/SK/VII/2002, tentang Syarat-syarat dan Pengawasan Kualitas Air Minum, 2002.
- [4]. J. Matos, J. Laine, and J.M. Herrmann, Synergy effect in the photocatalytic degradation of Phenol on a Suspended Mixture of Titania and Activated Carbon, *Appl. Catal. B: Environmental*, 18: 3-4 (1998) 282-291.
- [5]. V. Augugliaro, M.J. López-Muñoz, L. Palmisano and J. Soria, Influence of pH on the Degradation Kinetics of Nitrophenol Isomers in a Heterogenous photocatalytic System, *Appl. Catal. A: General*, 101: 1 (1993) 7-13.
- [6]. J. Gunluardi, Fotokatalis Pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya, *Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II*, Jakarta, 2001, hal. 1-15.
- [7]. M. Bideau, B. Claudel, C. Dubien, L. Faure, and H. Kazouan, On the immobilization of titanium dioxide in the photocatalytic oxidation of spent waters, *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*, 91 (1995) 137-144.
- [8]. R.A. Meinzer and P.J. Birbara, Photocatalytic Semiconductor Coating, *US Patent 5.593.737*, 1997.
- [9]. K. Othmer, "Adsorption", *Encyclopedia of Chemical Technology*, vol. I, Wiley-Interscience, 1994.
- [10]. Quantachrome Corp, "Autosorb-6B, Gas Sorption System", *Manual Book*, New York, 1992.
- [11]. D.M. Ruthven, *Principels of Adsorption an Adsorption Process*, Willey-Interscience Publication, 1984
- [12]. R.J. Fessenden and J.S. Fessenden, *Kimia Organik*, Jilid 2, Erlangga, Jakarta 1989.
- [13]. A.A. Elliott and J.R. Elliot, Voltage-Dependent Inhibition of RCK1 K⁺ Channels by Phenol, p-Cresol, and Benzyl Alcohol, *Molecular Pharmacology*, 51 (1997) 475-483.
- [14]. B.E. Butters and A.L. Powell, System and Methode for Photocatalytic Treatment of Contaminated Media, *US Patent*, 6.136.203, 2000.
- [15]. T. Chopin, D. Dupuis and C. Lehaut, Titanium Dioxide-Based Photocatalytic Coating Substrate and Titanium Dioxide Based Organic Dispersions, *US Patent*, 6.037.298, 2000.
- [16]. L.J. Alemany and M.A. Banares, Photodegradation of phenol in water using silica-supported titania catalysts, *Appl. Catal. B: Environ.*, 13:3-4 (1997) 289-297.
- [17]. H.S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2nd edition, Prentice Hall, New Jersey, USA , 1992.
- [18]. O.A.W. Prihanto, Penyisihan Senyawa Fenol dengan Teknik Ozonasi Berganda pada Suasana Basa dalam Kolom Injeksi Ozon Berganda, *Skripsi Sarjana*, TGP FTUI, 2000.
- [19]. Y. Xiauli, S Huixiang and W Dahui, Photoelectrocatalytic Degradation of Phenol Using a TiO₂/Ni Thin-film Electrode, *Korean J. Chem. Eng.*, 20: 4 (2003) 679-684.
- [20]. K. Guan, B. Lu and Y. Yin, Enhanced effect and mechanism of SiO₂ addition in super-hydrophilic property of TiO₂ films, *Surf. Coat. Technol.*, 173: 2-3 (2003) 219-223.