

PENGOLAHAN LIMBAH ORGANIK (FENOL) DAN LOGAM BERAT (Cr⁶⁺ ATAU Pt⁴⁺) SECARA SIMULTAN DENGAN FOTOKATALIS TiO₂, ZnO-TiO₂, DAN CdS-TiO₂

Slamet, R. Arbianti, dan Daryanto

Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

E-mail: slamet@che.ui.edu

Abstrak

Dalam penelitian ini limbah logam berat (Cr dan Pt) dan organik (fenol) diolah secara simultan dengan metode fotokatalitik yang relatif masih baru, kemudian dilanjutkan dengan *recovery* terhadap logam berat Cr dan Pt. Percobaan fotokatalisis dilakukan menggunakan katalis berbasis TiO₂ dalam fotoreaktor batch. *Recovery* logam Cr dan Pt masing-masing dilakukan dengan metode presipitasi dan *leaching*. Hasil penelitian menunjukkan adanya efek sinergisme antara reduksi logam berat (Cr⁶⁺ atau Pt⁴⁺) dan oksidasi senyawa organik (fenol) pada sistem fotokatalitik, yaitu dapat meningkatkan konversi masing-masing. Penambahan dopan ZnO (*loading* optimal = 0,5% berat) dapat meningkatkan kinerja fotokatalis TiO₂ dalam mereduksi Cr(VI), meskipun tidak terlalu signifikan. *Loading* CdS (pada TiO₂) yang optimal adalah sebesar 1% berat, memberikan aktivitas tertinggi dengan konversi reduksi Cr(VI) dan oksidasi fenol masing-masing ≥ 97 % dan 93 %. Reduksi Platinum menggunakan fotokatalis 0,5%ZnO-TiO₂ dan 1%CdS-TiO₂ terbukti cukup efektif dengan konversi > 99 % selama 2 jam reaksi. Proses *recovery* Cr(III) mencapai hasil optimal pada pH = 9, dengan efisiensi *recovery* sebesar 91 %. Suhu *leaching* optimal pada proses *recovery* Pt adalah 100 °C, dengan efisiensi *recovery* sebesar 86 %.

Abstract

Simultaneous Treatment of Organic (Phenol) and Heavy Metal (Cr⁶⁺ or Pt⁴⁺) Wastes over TiO₂, ZnO-TiO₂ and CdS-TiO₂ Photocatalysts. Treatment of heavy metal (Cr⁶⁺ and Pt⁴⁺) and organic (phenol) wastes has been studied using the relatively new method, i.e. simultaneous photocatalytic process over TiO₂ photocatalysts in the batch photoreactor. Following the photocatalytic reduction of the heavy metal wastes, recovery of Cr and Pt was carried out by precipitation and leaching method, respectively. The experimental results show that in the simultaneous photocatalytic system, there is a synergism effect between the photocatalytic reduction of heavy metal waste (Cr⁶⁺ or Pt⁴⁺) and the oxidation of organic waste (phenol), so that increasing the conversion of each other. Dopant of ZnO with the optimum loading (0.5 wt%) could slightly increase the performance of TiO₂ photocatalyst in photocatalytic treatment of the wastes. Whereas CdS dopant with the optimum loading of 1 wt% could significantly enhance the performance of TiO₂ photocatalyst in simultaneous Cr(VI) reduction and phenol oxidation with the highest conversion of ≥ 97 % and 93 %, respectively. Photocatalytic reduction of Pt(IV) under 0.5%ZnO-TiO₂ and 1%CdS-TiO₂ photocatalysts effectively occurred with a high conversion (> 99 %) in 2 hours irradiation of UV. The optimum precipitation condition of Cr(III) recovery was achieved at pH = 9, with the efficiency of recovery was 91 %. Optimum temperature of leaching process in Pt recovery was 100 °C, with the efficiency of recovery was 86 %.

Keywords: photocatalysis, TiO₂, phenol degradation, recovery of Cr and Pt

1. Pendahuluan

Dengan semakin pesatnya aktivitas perindustrian dewasa ini, berbagai jenis limbah logam berat dan organik yang dihasilkan dapat menjadi permasalahan serius bagi kesehatan dan lingkungan. Limbah logam

berat Cr(VI), yang merupakan salah satu jenis limbah berbahaya, dapat berasal dari industri cat, pelapisan logam (*electroplating*), dan penyamakan kulit (*leather tanning*). Krom terdapat di alam dalam dua bentuk oksida, yaitu Cr(VI) atau *chromium hexavalent* dan Cr(III) atau *chromium trivalent*. Cr(VI) mudah larut

dalam air dan membentuk *divalent oxyanion* yaitu kromat (CrO_4^{2-}) dan dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). Tingkat toksisitas Cr(VI) sangat tinggi sehingga bersifat racun terhadap semua organisme untuk konsentrasi $> 0,05$ ppm. Cr(VI) bersifat karsinogenik dan dapat menyebabkan iritasi pada kulit manusia. Sementara itu, toksisitas Cr(III) jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan Cr(VI), yaitu sekitar 1/100 kalinya, sehingga untuk mengolah limbah krom maka Cr(VI) harus direduksi terlebih dahulu menjadi Cr(III). Disamping itu, Cr(III) mudah diendapkan atau diabsorpsi oleh senyawa-senyawa organik dan anorganik pada pH netral atau alkalin [1-3].

Contoh limbah logam berat lainnya yang merupakan hasil kegiatan industri serta memiliki nilai strategis dan ekonomis yang tinggi adalah Platina (Pt). Dalam cairan, logam tersebut berbentuk ion Pt(IV). Logam Pt biasa dipakai sebagai katalis dalam dunia industri seperti industri automotif, kilang minyak, dan industri pemurnian bahan kimia. Selain itu juga dipakai sebagai material penahan korosi dalam industri kimia, elektronika, dan industri perawatan kesehatan gigi. Pengolahan limbah Pt dapat dilakukan dengan cara mereduksi Pt (IV) menjadi Pt (0) yang akan terdeposit di permukaan katalis, selanjutnya dapat diambil kembali dalam bentuk Pt murni setelah melewati proses *recovery* [4].

Fenol merupakan salah satu senyawa organik yang berasal dari buangan industri yang berbahaya bagi lingkungan dan manusia. Dalam konsentrasi tertentu senyawa ini dapat memberikan efek yang buruk terhadap manusia, antara lain berupa kerusakan hati dan ginjal, penurunan tekanan darah, pelemahan detak jantung, hingga kematian. Senyawa ini dapat dikatakan aman bagi lingkungan jika konsentrasinya berkisar antara 0,5 – 1,0 mg/l sesuai dengan KEP No. 51/MENLH/ 10/1995 dan ambang batas fenol dalam air baku air minum adalah 0,002 mg/l seperti dinyatakan oleh BAPEDAL.

Salah satu alternatif yang potensial untuk mengolah limbah logam berat dan organik secara simultan adalah dengan proses fotokatalisis. Mekanisme dasar yang memungkinkan terjadinya proses tersebut adalah terbentuknya pasangan *electron-hole* pada permukaan katalis semikonduktor ketika diinduksi oleh energi foton yang sesuai [5,6]. Elektron yang tereksitasi dan sampai ke permukaan katalis dapat mereduksi logam berat tersebut, sedangkan *hole* yang terbentuk dapat menghasilkan radikal $\bullet\text{OH}$ yang akan mendegradasi (mengoksidasi) limbah organik seperti fenol [6]. Dalam penelitian ini reduksi Cr(VI) dan Pt(IV) dilakukan menggunakan fotokatalis serbuk berbasis TiO_2 dengan menambahkan dopan CdS atau ZnO. Beberapa variabel yang diteliti terdiri dari jenis dan *loading* dopan pada katalis TiO_2 , jenis limbah, serta konsentrasi awal limbah.

Limbah Cr(VI) yang telah direduksi menjadi Cr(III) masih larut dalam limbah. Oleh karena itu dapat dilakukan proses lanjut (*recovery*) untuk mengambil krom dari larutan limbah, sekaligus untuk mengurangi kadar Cr(III) yang masih bersifat racun walaupun dengan tingkat toksisitas yang rendah. Logam Pt merupakan logam yang memiliki nilai ekonomi tinggi karena jumlahnya yang terbatas dan permintaannya cukup tinggi. Untuk itu perlu dilakukan proses *recovery* agar dapat diperoleh kembali Pt murni. Metode *recovery* terhadap logam berat dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti *presipitasi*, *ion exchange*, *leaching*, dan ekstraksi [7]. Dalam penelitian ini *recovery* Pt dilakukan dengan metode *leaching* menggunakan pelarut aqua regia [8], sedangkan *recovery* krom dengan metode *presipitasi* pada pH basa [9]. Beberapa variabel yang diteliti pada proses *recovery* ini adalah suhu pemasakkan pada *recovery* Pt dan pH larutan pada *recovery* krom.

2. Eksperimental

Dalam penelitian ini katalis dasar yang digunakan adalah TiO_2 Degussa P25. Bahan untuk membuat dopan CdS adalah $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, sedangkan dopan ZnO dibuat dari $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Bahan untuk membuat pelarut aqua regia adalah larutan HCl 37 % dan HNO_3 65 %. Semua bahan tersebut (kecuali TiO_2 dari Degussa) adalah *reagent-grade* dari Merck.

Dopan CdS dibuat melalui reaksi presipitasi antara larutan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ dengan perbandingan tertentu. Endapan kuning CdS yang terbentuk dicuci dengan air bebas mineral (air demin) untuk menghilangkan NaNO_3 , lalu disaring dengan pompa vakum. Sol CdS kemudian dicampurkan dengan sol TiO_2 dan diaduk, dilanjutkan dengan ultrasonifikasi selama 1 jam. Selanjutnya campuran tersebut dipanaskan (*hydrothermal treatment*) hingga terbentuk pasta. Kemudian dikeringkan di dalam *vacuum furnace* pada suhu 150 °C selama 2 jam, dilanjutkan dengan kalsinasi pada 500 °C selama 30 menit. Katalis yang diperoleh adalah CdS- TiO_2 , dengan *loading* CdS yang bervariasi.

Katalis ZnO- TiO_2 dengan *loading* ZnO tertentu dibuat dengan cara impregnasi serbuk TiO_2 ke dalam larutan Zn-nitrat. Langkah selanjutnya seperti pemanasan, pengeringan, dan kalsinasi adalah sama dengan pada pembuatan katalis CdS- TiO_2 .

Aktivitas fotokatalitik diuji untuk mengolah limbah sintesis Cr(VI) dan fenol atau Pt(IV) dan fenol secara simultan. Limbah fenol, krom dan platina masing-masing dibuat dari serbuk fenol, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dan H_2PtCl_6 yang dilarutkan ke dalam air demin dengan konsentrasi tertentu. Reaktor *batch* yang digunakan terbuat dari tabung Pyrex dengan volume ± 650 ml. Reaktor

dilengkapi dengan 6 buah lampu *black light UV* masing-masing daya dengan 10 W) sebagai sumber cahaya, yang berjarak ± 15 cm dari dasar reaktor, dan dikelilingi oleh reflektor yang berdimensi $40 \times 46 \times 40 \text{ cm}^3$ untuk mengoptimalkan radiasi sinar UV dan mencegah pengaruh sinar lain dari luar. Pengaduk magnetik di dasar reaktor dijalankan untuk mencegah terjadinya endapan katalis.

Katalis dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam reaktor yang berisi larutan limbah dengan konsentrasi tertentu. Kondisi operasi standar dalam uji aktivitas ini adalah: pH 2, *loading* katalis 1 g/l, dan waktu reaksi selama 5 jam. Analisis perubahan konsentrasi Cr(VI) dan fenol dilakukan dengan *UV-VIS Spectrophotometer* buatan Labomed Inc. USA tipe *Spectro UV-VIS RS*. Analisis hasil reduksi Pt dilakukan menggunakan AAS (Atomic Absorbtion Spectrometer) tipe A 55 B buatan *Varian Spectra Analytical*.

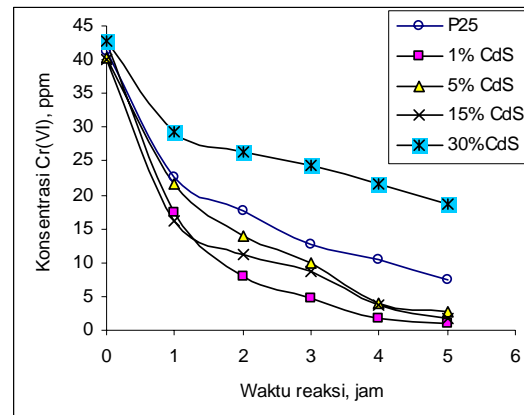
Recovery krom dilakukan dengan menambahkan NaOH pada larutan limbah akhir sampai mencapai pH tertentu. Variasi pH yang dilakukan pada *recovery* krom adalah 8, 9, dan 10. *Recovery* Pt dilakukan dengan melarutkan endapan katalis sisa ke dalam larutan aqua regia, kemudian memanaskannya selama selang waktu tertentu. Aqua regia didapat dengan cara mencampurkan larutan HCl dan HNO₃ dengan perbandingan tertentu. Campuran antara katalis dengan larutan aqua regia tersebut dipanaskan selama 1 jam dengan variasi suhu 80, 100, dan 110 °C. Analisis hasil *recovery* baik Pt maupun krom dilakukan menggunakan alat AAS.

3. Hasil dan Pembahasan

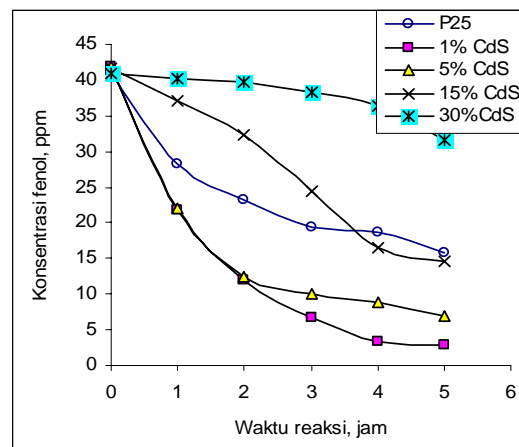
Hasil uji aktivitas katalis komersial TiO₂ Degussa (P25) dan CdS-TiO₂ untuk reduksi 40 ppm Cr(VI) dan oksidasi 40 ppm fenol secara simultan dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2. Kedua gambar tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi limbah Cr(VI) dan fenol terus menurun secara simultan dengan bertambahnya waktu reaksi. Setelah sampai jam ke-5, konversi kedua limbah tersebut pada masing-masing katalis dapat dilihat pada Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa katalis 1%CdS-TiO₂ memiliki aktivitas tertinggi dalam mereduksi Cr(VI) dan mengoksidasi fenol secara simultan. Dengan kata lain *loading* CdS yang optimal dalam meningkatkan kinerja katalis TiO₂ Degussa P25 adalah sebesar 1 %. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan katalis CdS-TiO₂ yang dibuat dengan metode sol-gel. Pada uji limbah tunggal, semakin besar *loading* CdS aktivitas reduksi Cr(VI) semakin tinggi. Sebaliknya semakin besar *loading* CdS aktivitas oksidasinya semakin rendah. Pada pengujian limbah biner (krom dan fenol secara simultan) ternyata justru katalis dengan *loading* CdS sebesar 1 % memiliki aktivitas reduksi dan oksidasi tertinggi karena pada

loading CdS 1 % mampu mengoptimalkan antara kemampuan reduksi dan oksidasinya [10].

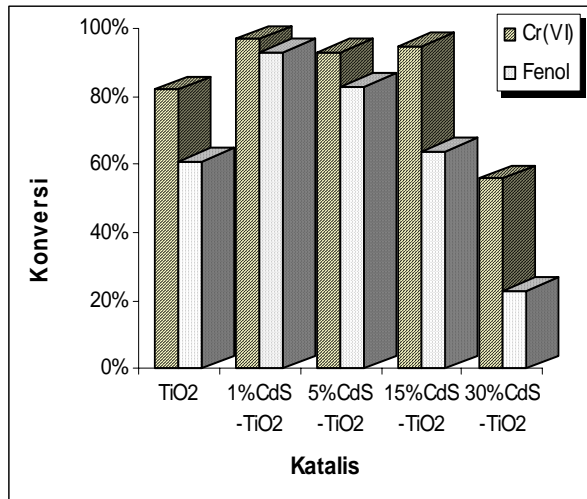
Dari Gambar 3 di atas terlihat bahwa katalis dengan 1% CdS mampu mengoksidasi fenol secara maksimal dengan konversi sebesar 93% pada jam ke-5. Hal ini didukung oleh hasil penelitian lain yang menemukan bahwa katalis 1% CdS paling baik dalam mengoksidasi limbah fenol tunggal [10]. *Loading* CdS yang besar dan posisi pita valensi CdS yang berada di atas pita valensi TiO₂ (lebih negatif), dapat menyebabkan sebagian *hole* di TiO₂ tidak mengoksidasi fenol, melainkan akan diisi oleh elektron dari CdS maupun TiO₂ sendiri dan *hole* akan mengambil elektron terdekat. Tetapi bila jumlah CdS hanya sedikit, maka *hole* dari TiO₂ sebagian besar akan digunakan untuk mengoksidasi limbah fenol sehingga konversi fenol akan semakin besar. Akibatnya elektron yang ada juga akan lebih efektif dalam mereduksi logam berat.



Gambar 1. Hasil reduksi Cr(VI) pada sistem limbah biner (*loading* katalis 1 g/L, volume limbah 300 ml)



Gambar 2. Hasil oksidasi fenol pada sistem limbah biner (*loading* katalis 1 g/L, volume limbah 300 ml)



Gambar 3. Pengaruh loading CdS pada TiO₂ terhadap konversi Cr(VI) dan fenol (loading katalis 1 g/L, V = 300 ml, t = 5 jam)

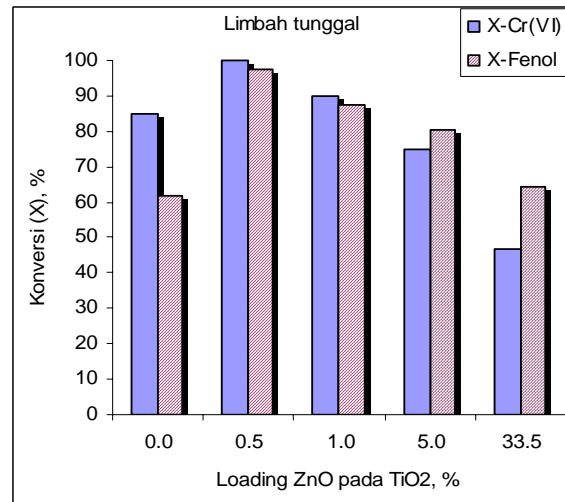
Gambar 4 dan 5 menunjukkan bahwa katalis ZnO/TiO₂ dengan loading ZnO 0,5% memiliki aktivitas paling optimal. Pada loading ZnO hingga 0,5% kristal ZnO dapat berfungsi sebagai donor elektron dari pita konduksi ZnO ke pita konduksi TiO₂, akibatnya dapat mengurangi laju rekombinasi pasangan elektron-hole sehingga proses redoks semakin efektif. Sementara itu pada loading ZnO yang tinggi menyebabkan sebagian permukaan aktif dari TiO₂ tertutupi oleh kristal ZnO, sehingga menurunkan aktivitas katalis. Dengan demikian penambahan dopan ZnO yang semula dapat menjadi pendonor elektron yang mencegah terjadinya rekombinasi elektron-hole tidak berperan secara optimal. Kemungkinan ZnO yang terlalu banyak juga dapat berfungsi sebagai penghalang terjadinya reaksi reduksi Cr(VI).

Apabila dibandingkan antara limbah tunggal (Gambar 4) dengan limbah simultan (Gambar 5) terlihat bahwa proses simultan memiliki efisiensi pengolahan limbah yang lebih tinggi. Hal tersebut terjadi karena fenol dapat berfungsi sebagai hole scavenger, sehingga penambahan fenol akan menyebabkan terhambatnya rekombinasi elektron-hole. Dengan demikian elektron akan lebih leluasa dalam mereduksi Cr(VI). Dengan kata lain dalam pengolahan limbah secara simultan reaksi reduksi-oksidasi dapat berjalan secara sinergis.

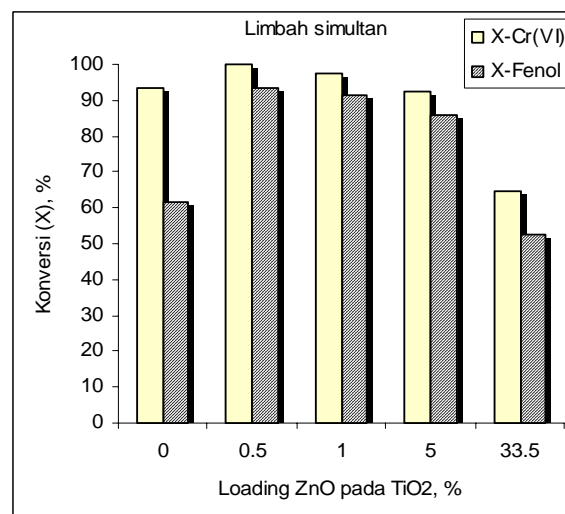
Recovery krom dilakukan dengan cara mengendapkan Cr(III) hasil reduksi Cr(VI) pada kondisi basa menggunakan larutan NaOH. Endapan yang terbentuk merupakan senyawa Cr(OH)₃. Massa Cr(III) yang ter-recovery dihitung dari selisih antara massa krom total

sebelum di-recovery dengan massa krom total sesudah recovery. Efisiensi recovery krom didapat dari perbandingan antara massa Cr(III) yang ter-recovery dengan massa Cr(VI) yang tereduksi menjadi Cr(III).

Pengaruh pH terhadap recovery krom dapat dilihat pada Gambar 6, yang menunjukkan bahwa efisiensi recovery Cr(III) yang tertinggi dicapai pada kondisi pH 9 yaitu sebesar 91 %. Dengan demikian diperoleh kondisi optimum untuk recovery Cr(III) menggunakan metode presipitasi adalah pada pH 9.



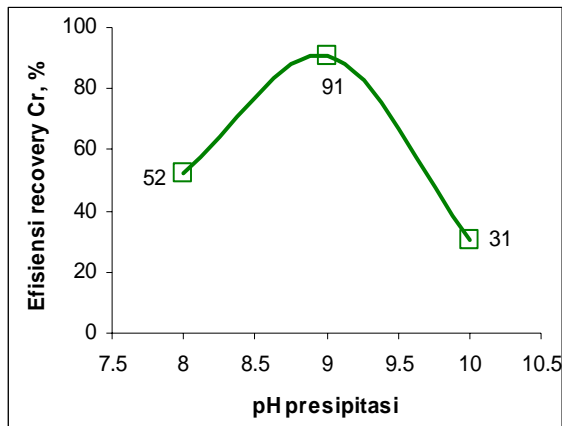
Gambar 4. Pengaruh loading ZnO pada TiO₂ untuk pengolahan limbah tunggal (loading katalis 3 g/L, volume limbah 300 ml, t = 4 jam)



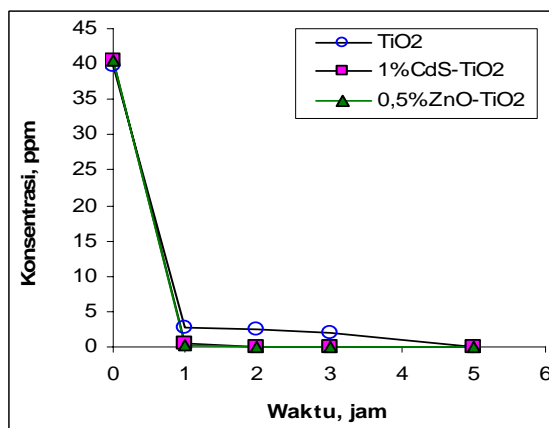
Gambar 5. Pengaruh loading ZnO pada TiO₂ untuk pengolahan limbah simultan (loading katalis 3 g/L, volume limbah 300 ml, t = 4 jam)

Uji aktivitas reduksi Pt(IV) dilakukan menggunakan katalis TiO_2 (Degussa P25), 1% CdS-TiO_2 , dan 0,5% ZnO-TiO_2 , dengan penambahan metanol sebesar 10 % volume. Penambahan metanol dapat meningkatkan aktivitas reduksi Pt(IV) karena dapat berfungsi sebagai *hole scavenger* yang dapat mengurangi laju rekombinasi pasangan *electron-hole* sehingga lebih banyak elektron yang sampai pada permukaan katalis untuk mereduksi Pt [11].

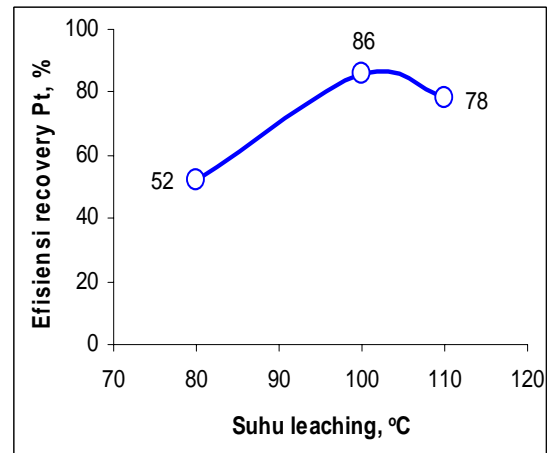
Hasil reduksi Pt(IV) tersebut disajikan pada Gambar 7, yang menunjukkan bahwa laju reduksi paling besar terjadi pada jam pertama, dengan konversi > 90 %. Katalis 0,5% ZnO-TiO_2 dan 1% CdS-TiO_2 memiliki aktivitas reduksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan katalis TiO_2 P25, karena pada jam kedua katalis-katalis tersebut dapat mengkonversi 99,7 % Pt(IV) sedangkan konversi katalis TiO_2 lebih rendah yaitu sebesar 93 %.



Gambar 6. Pengaruh pH terhadap efisiensi *recovery* Cr



Gambar 7. Hasil reduksi Pt (IV) dengan variasi jenis katalis (*loading* katalis 1 g/L, volume limbah 400 ml)



Gambar 8. Pengaruh suhu terhadap efisiensi *recovery* Pt

Hal ini membuktikan bahwa penambahan dopan CdS atau ZnO pada loading optimal, dapat meningkatkan aktivitas TiO_2 baik dalam mereduksi Cr(VI) maupun Pt(IV).

Setelah reduksi terhadap Pt(IV) selesai, selanjutnya dilakukan proses *recovery* Pt. Endapan katalis yang telah dipisahkan dari larutannya kemudian dicampur dengan larutan aqua regia dan dipanaskan pada suhu tertentu selama satu jam. Pengaruh suhu terhadap efisiensi *recovery* Pt dapat dilihat pada Gambar 8, yang menunjukkan bahwa suhu optimum untuk proses *recovery* Pt adalah sebesar 100 °C dengan efisiensi *recovery* sebesar 86 %. Proses *recovery* untuk mengambil kembali Pt memerlukan aqua regia sebagai senyawa pengoksidasi dan berlangsung pada suhu di sekitar titik didih aqua regia yaitu sekitar 109 °C [8].

Efisiensi *recovery* Pt pada suhu 80 °C masih cukup rendah, yaitu sebesar 52 %. Hal tersebut dikarenakan suhu *leaching* sebesar 80 °C masih jauh di bawah titik didih aqua regia. Sebaliknya proses *leaching* pada suhu tinggi (110 °C) menghasilkan efisiensi *recovery* yang juga lebih rendah dibandingkan dengan *leaching* pada suhu 100 °C yaitu sebesar 78 %. Rendahnya efisiensi *recovery* tersebut dikarenakan pada suhu 110 °C banyak sekali terjadi penguapan sehingga mengurangi kandungan HCl dan HNO_3 dalam aqua regia. Uap tersebut tidak semuanya dapat di-*reflaks* sehingga banyak yang terlepas ke udara. Dengan demikian pada penelitian ini didapat hasil *recovery* yang optimum pada suhu 100 °C.

Hasil *recovery* Pt tersebut dapat dibandingkan dengan penelitian lainnya yang dilakukan oleh Barakat dkk [8] dimana pada penelitian tersebut didapat konversi optimum *recovery* Pt menggunakan metode *leaching* sebesar 98 % pada kondisi suhu 109 °C selama 1,5 jam.

Perbedaan hasil ini disebabkan oleh beberapa hal diantaranya kondisi alat refluks dan waktu yang berbeda.

4. Kesimpulan

Limbah organik (fenol) dan logam berat (Cr^{6+} atau Pt^{4+}) dapat diolah secara simultan dengan proses fotokatalitik, bahkan saling sinergis karena konversi pengolahan masing-masing limbah meningkat. Hasil uji kinerja katalis menunjukkan bahwa dopan CdS dengan *loading* optimal sebesar 1 % dan dopan ZnO dengan *loading* optimal sebesar 0,5 % dapat meningkatkan kinerja fotokatalis TiO_2 baik dalam mereduksi Cr(VI) maupun Pt(IV). Penambahan 1 % CdS atau 0,5 % ZnO pada TiO_2 dapat meningkatkan konversi reduksi Cr(VI) dan konversi degradasi fenol secara signifikan pada sistem limbah biner krom dan fenol yang diolah secara simultan. Reduksi fotokatalitik terhadap 40 ppm Pt(IV) menunjukkan hasil yang baik pada pH 2, konsentrasi katalis 1 g/l, dan penambahan metanol 10 % dengan konversi sebesar 99,7 % pada dua jam pertama. Proses *recovery* krom dengan metode presipitasi menunjukkan hasil yang optimum pada kondisi pH 9 dengan efisiensi *recovery* sebesar 91 %. *Recovery* Pt yang dilakukan dengan metode *leaching* menggunakan aqua regia mencapai hasil optimum pada suhu 100 °C, dengan efisiensi *recovery* sebesar 86 %.

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada DRPM-UI yang telah memberikan

bantuan dana atas penelitian ini, melalui Proyek Penelitian RUUI 2003/2004.

Daftar Acuan

- [1] D.E. Kimbrough, Y. Cohen, A.M. Winner, Critical Reviews in Environ. Sci. and Technol. 29 (1999) 1.
- [2] Slamet, R. Syakur, W. Danumulyo, J. Makara Seri Teknologi 7 (2003) 25.
- [3] L.B. Khalil, W. Mourad, M.W. Rophael, Appl. Catal. B: Environ. 17 (1998) 267.
- [4] T.N. Angelidis, E. Skouraki, Appl. Catal. A: General 142 (1996) 387.
- [5] A.L. Linsebigler, G. Lu, J.T. Yates, Chem. Rev. 95 (1995) 735.
- [6] J.M. Herrmann, Catal. Today 53 (1999) 115.
- [7] R.A. Meyer, Willey Encyclopedia Series In Environmental Science, vol. 4, Wiley, Canada, 1998, p. 245.
- [8] M.A. Barakat, M.H.H. Mahmoud, Hydro-metallurgy 72 (2004) 179.
- [9] R.B. Long, Separation Process in Waste Minimization, Wiley, New York, 1996.
- [10] A.R. Kurniansyah, Skripsi Sarjana, Departemen TGP FT, Universitas Indonesia, Indonesia, 2004.
- [11] J.A. Navio, G. Colon, M. Trillas, J. Peral, X. Domenech, J.J. Testa, M.I. Litter, Appl. Catal. B: Environ. 16 (1998) 187.