

PENGOLAHAN LIMBAH LOGAM BERAT *CHROMIUM* (VI) DENGAN FOTOKATALIS TiO₂

Slamet, Riyadi Syakur dan Wahyu Danumulyo

Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik,
Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

E-mail: slamet@che.ui.edu

Abstrak

Reduksi fotokatalitik terhadap limbah logam berat Cr(VI) dengan menggunakan fotokatalis TiO₂ telah dilakukan dalam fotoreaktor tangki berpengaduk dan fotoreaktor sirkulasi. Reduksi Cr(VI) dilakukan dengan katalis TiO₂ murni hasil preparasi dari bahan awal TiCl₄ dan Ti-*acac* dan katalis TiO₂ yang dimodifikasi dengan penambahan 1% Cu atau CuO. Katalis hasil preparasi dikarakterisasi dengan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), XRD (*X-Ray Diffraction*), BET (*Brunauer-Emmett-Teller*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Seluruh katalis hasil preparasi diuji aktivitasnya dan dibandingkan dengan katalis komersial TiO₂ *Merck* dan *Degussa P-25*. Parameter-parameter yang diuji meliputi test blanko, variasi jenis katalis, efek penambahan EDTA (*ethylenediaminetetraacetic acid*), pengaruh pH larutan, variasi konsentrasi awal Cr(VI), dan pengaruh penambahan karbon aktif. Hasil uji aktivitas fotokatalitik menunjukkan bahwa penambahan EDTA sebagai *hole scavenger* dapat meningkatkan aktivitas fotokatalisis sebesar 10 %. Laju reduksi Cr(VI) lebih cepat terjadi pada pH rendah dan pada konsentrasi awal Cr(VI) yang rendah. Penambahan karbon aktif dapat meningkatkan aktifitas fotokatalisis sekitar 5%, karena adanya efek sinergis antara karbon aktif dengan katalis. Katalis serbuk TiO₂ murni yang dipreparasi dari bahan awal TiCl₄ memiliki aktivitas tertinggi dalam mereduksi limbah Cr(VI) menjadi Cr(III), dengan konversi sekitar 80%. Hal ini disebabkan oleh tingginya luas permukaan dan kristal anatase yang terbentuk. Fotoreduksi limbah Cr(VI) yang dilakukan dengan katalis film dalam reaktor sirkulasi belum menunjukkan hasil yang signifikan. Oleh karena itu perlu dikembangkan lagi sistem reaktor yang lebih efektif untuk katalis bentuk film.

Abstract

Photocatalytic Treatment of Heavy Metal Waste Cr(VI) with TiO₂ Photocatalyst. The photocatalytic reduction of hexavalent chromium/Cr(VI) using TiO₂ and copper-doped TiO₂ as photocatalysts have been studied in stirred tank and circulating photoreactors. All photocatalysts were characterized with FTIR (*Fourier Transform Infra Red*), BET (*Brunauer-Emmett-Teller*), XRD (*X-Ray Diffraction*) and SEM (*Scanning Electron Microscope*). TiO₂ *Merck* and *Degussa P-25* are the commercial photocatalysts used to compare the photocatalytic activity of all the prepared catalysts. Blank test experiments as well as the effect of dopants, EDTA (*ethylenediaminetetraacetic acid*) and activated carbon addition were studied. Cr(VI) reduction on various pH and initial Cr(VI) concentration were also conducted. The results of the experiments showed that the addition of EDTA as a hole scavenger can increase the activity of all catalysts at about 10%. Rate of Cr(VI) photoreduction is more feasible at low pH and low initial Cr(VI) concentration. The addition of activated carbon (AC) increases the photocatalytic activity at about 5% due to the synergy effect between catalyst and AC. Pure TiO₂ powder prepared from TiCl₄ has the highest activity in reducing Cr(VI) with the conversion of 80% due to the high crystalline (anatase) and surface area. Photoreduction of Cr(VI) over TiO₂ film photocatalyst in circulating photoreactor has not shown a significant result yet. Therefore it is needed to improve furthermore the photoreactor system especially for the film type photocatalyst.

Keyword: photoreduction, hexavalent chromium waste, TiO₂

1. Pendahuluan

Dengan semakin pesatnya perkembangan industri dan semakin ketatnya peraturan mengenai limbah industri serta tuntutan untuk mewujudkan pembangunan yang berwawasan lingkungan, maka teknologi pengolahan

limbah yang efektif dan efisien menjadi sangat penting. Salah satu limbah yang berbahaya adalah limbah logam berat Chromium (VI) yang biasanya berasal dari industri pelapisan logam (*electroplating*), industri cat/pigmen dan industri penyamakan kulit (*leather tanning*). Limbah Cr(VI) menjadi populer karena sifat

karsinogenik yang dimilikinya. Chromium terdapat di alam dalam 2 bentuk oksida, yaitu oksida Cr(III) dan Cr(VI). Uniknya, hanya Cr(VI) yang bersifat karsinogenik sedangkan Cr(III) tidak. Tingkat toksisitas Cr(III) hanya sekitar 1/100 kalinya Cr(VI). Bahkan dari penelitian lebih lanjut, ternyata Cr(III) merupakan suatu jenis nutrisi yang dibutuhkan tubuh manusia dengan kadar sekitar 50-200 µg/hari. Cr(VI) mudah larut dalam air dan membentuk *divalent oxyanion* yaitu *chromate* (CrO_4^{2-}) dan *dichromate* ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sedangkan Chromium trivalent/Cr(III) mudah diendapkan atau diabsorpsi oleh senyawa-senyawa organik dan anorganik pada pH netral atau alkalin [1-3].

Dengan demikian Cr(VI) harus direduksi menjadi Cr(III) untuk menurunkan tingkat toksisitasnya. Beberapa upaya pengolahan limbah Cr(VI) yang telah dilakukan seperti reduksi kimia, *ion exchange*, adsorpsi dengan batu bara atau karbon aktif dan reduksi dengan bantuan bakteri memiliki kelemahan yaitu diperlukannya energi yang sangat tinggi dan/atau bahan kimia yang sangat banyak. Kelemahan inilah yang membuat metode fotokatalitik lebih prospektif dan lebih unggul untuk diaplikasikan [2,3].

Teknologi fotokatalisis merupakan kombinasi dari proses fotokimia dan katalis yang terintegrasi untuk dapat melangsungkan suatu reaksi transformasi kimia. Reaksi transformasi tersebut berlangsung pada permukaan bahan katalis semikonduktor yang terinduksi oleh sinar [4]. Beberapa jenis semikonduktor yang dapat dipakai untuk proses fotokatalisis dari kelompok oksida misalnya: TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO , WO_3 , atau SnO_2 , sedangkan dari kelompok sulfida adalah CdS , ZnS , CuS , FeS , dan lain-lain. Diantara sekian banyak jenis semikonduktor, hingga saat ini serbuk TiO_2 (terutama dalam bentuk kristal anatase) memiliki aktivitas fotokatalitik yang tinggi, stabil dan tidak beracun [5]. Secara komersial serbuk TiO_2 juga mudah didapat dan diproduksi dalam jumlah besar.

Dalam penelitian ini reduksi Cr(VI) dilakukan dengan menggunakan katalis serbuk TiO_2 . dan tembaga-titania. Beberapa variabel yang diteliti adalah pengaruh penambahan EDTA, pH larutan, konsentrasi awal Cr(VI), dan pengaruh penambahan karbon aktif terhadap aktivitas fotokatalitik dalam mereduksi Cr(VI). Fotoreduksi limbah Cr(VI) juga dilakukan dengan katalis film menggunakan fotoreaktor sirkulasi.

2. Eksperimental

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *reagent-grade*. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, TiCl_4 , dan NH_4OH dibeli dari *Merck*. Titanium diisopropoksi bisasetilasetonat (*Ti-acac*) dengan kadar 75 % dalam 2-propanol dibeli dari *Aldrich*. TiO_2 komersial yang digunakan adalah dari *Merck* dan *Degussa P25*.

Katalis serbuk TiO_2 dipreparasi dari bahan awal TiCl_4 dengan prosedur preparasi seperti pada acuan [2]. Katalis film TiO_2 dipreparasi dari bahan awal *Ti-acac* dengan pelarut etanol dan isopropanol. Sol yang terbentuk diimobilisasi pada kaca *soda lime plate* (SLP) sehingga dihasilkan katalis dalam bentuk film. Imobilisasi katalis dilakukan dengan cara pencelupan (*dip coating*) sebanyak 10 kali dengan kecepatan penarikan 60 mm/menit, kemudian dikalsinasi pada suhu 500°C selama 2,5 jam, yang dilakukan sebanyak 3 kali.

Sebelum digunakan untuk *coating* (pelapisan) plat gelas SLP dicuci terlebih dahulu dengan cara merendamnya dalam NaOH 2M selama 10 jam. Plat gelas tersebut dibilas dengan air aquadest. Kemudian drendam dalam larutan 0,1 M HCl , dan akhirnya dicuci dengan air demin. Pengeringan dilakukan pada *vacuum furnace* selama 1 jam dengan suhu 120°C .

Larutan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ dibuat dengan mencampurkan serbuk $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dan air bebas mineral. Jumlah $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ yang dicampurkan diatur sesuai loading yang diinginkan yaitu 1% berat Cu dalam TiO_2 . Kedalam larutan kemudian dimasukkan TiO_2 *Merck* atau TiO_2 hasil preparasi. Campuran diaduk dengan kecepatan tinggi menggunakan *hot plate-stirrer* otomatis dengan temperatur 80°C sampai terbentuk pasta kering. Pasta kering kemudian dikeringkan dalam *vacuum furnace* pada temperatur 110°C selama 20 jam serta dikalsinasi dalam *atmospheric furnace* pada temperatur antara $450\text{-}500^\circ\text{C}$ selama 3-5 jam. Katalis Cu/TiO_2 diperoleh dengan cara mereduksi katalis CuO/TiO_2 menggunakan gas hidrogen.

Aktivitas fotokatalitik diuji dengan mengukur penurunan konsentrasi Cr(VI) terhadap waktu irradiasi. Fotoreaktor *batch* yang digunakan terbuat dari bahan *Pyrex*, berbentuk tangki berpengaduk untuk katalis serbuk dan reaktor sirkulasi untuk katalis film. Sumber energi foton diperoleh dari Lampu Merkuri (*High Pressure Mercury Lamp*) dengan daya 175 watt merk *General Electric*.

Kondisi operasi standar yang dipakai dalam pengujian adalah: reaksi dilakukan pada pH 2, penambahan EDTA sebagai *hole scavenger* dilakukan dengan perbandingan $[\text{EDTA}] : [\text{Cr}(\text{VI})] = 5 : 2$. Konsentrasi katalis yang digunakan dalam uji aktivitas adalah 5 g/l. Parameter-parameter yang diuji meliputi test blanko reduksi Cr(VI), variasi jenis dan bentuk katalis, efek penambahan EDTA, pengaruh pH larutan, variasi konsentrasi awal Cr(VI), dan pengaruh penambahan karbon aktif.

Analisis penurunan konsentrasi Cr(VI) dilakukan dengan menggunakan AAS (*Atomic Absorption*

Spectrometer) tipe CTA 2000 buatan *Chem-Tech Analytical*.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa semua katalis hasil preparasi mempunyai pita serapan ikatan hidroksil dan ikatan Ti-O dan untuk katalis yang di-*doping*, semuanya memiliki pita serapan ikatan Cu-O.

Hasil analisis XRD dan BET dapat dilihat pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa penambahan dopan Cu tidak mengubah struktur kristal katalis karena baik katalis yang di-*doping* maupun tidak, tetap mempunyai fasa anatase sebesar 100 %. Oleh karena itu untuk katalis CuOTiM, walaupun tidak dilakukan analisis XRD dapat diprediksi bahwa struktur kristalnya juga 100 % anatase karena kita telah mengetahui bahwa proses penambahan dopan yang dilakukan tidak mengubah struktur kristal katalis.

Dari Tabel 1 tersebut juga diperlihatkan bahwa ternyata penambahan dopan dapat menurunkan luas permukaan katalis. Hal ini terjadi karena dopan tersebut dapat menutupi pori katalis, atau proses kalsinasi yang dilakukan setelah impregnasi dopan dapat menyebabkan terjadinya sintering yang dapat menurunkan luas permukaan katalis.

Hasil analisis SEM/EDX (Gambar 1) menunjukkan bahwa morfologi permukaan katalis yang di-*doping* maupun yang tidak di-*doping*, memperlihatkan perbedaan yang tidak terlalu jauh. Penambahan dopan Cu dapat memperkecil ukuran agregat TiO₂ dan menjadi lebih homogen ukurannya. Dari analisis EDX pada satu titik di permukaan katalis yang di-*doping*, diperoleh kandungan Cu yang terdeteksi adalah sebesar 0,33 % untuk CuTi dan sebesar 0,09 % untuk CuOTi.

Uji aktivitas reduksi Cr(VI) dilakukan dengan menggunakan empat jenis katalis dari hasil preparasi dan dua jenis katalis komersil (TiO₂ *Degussa P-25* dan TiO₂ *Merck*) sebagai pembanding. Hasil uji variasi katalis dapat dilihat pada Gambar 2. Dari Gambar 2 tersebut, dapat dilihat bahwa TiO₂ merupakan katalis teraktif diantara katalis-katalis lainnya. Jika dikaitkan dengan hasil karakterisasi BET dan XRD, maka hasil tersebut merupakan hal yang logis karena TiO₂ mempunyai luas permukaan yang paling besar diantara katalis lainnya dan mempunyai struktur kristal 100 % anatase.

Penambahan dopan katalis pada 2 jenis katalis yang berbeda yaitu pada TiO₂ *Merck* dan pada TiO₂ (hasil preparasi dengan bahan awal TiCl₄), ternyata justru menurunkan aktivitas katalis. Penambahan dopan CuO pada TiO₂ *Merck* menurunkan konversi sebesar 6,85 %, sedangkan untuk penambahan dopan Cu pada TiO₂,

aktivitas turun sebesar 6,1 % dan untuk dopan CuO, turun sebesar 22,45 %. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa penambahan dopan sebesar 1 % pada TiO₂ *Merck* dan TiO₂ hasil preparasi, mempunyai efek yang negatif pada aktivitas katalis dalam mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Ini berarti bahwa besar *loading* dopan yang ditambahkan belum tepat sehingga dopan belum dapat berfungsi dengan baik sebagai *electron trap* yang seharusnya dapat menghambat laju rekombinasi *electron-hole*. *Loading* Cu sebesar 1 % yang ditambahkan diduga berlebih, sehingga bisa jadi mengakibatkan pelingkupan/penutupan permukaan TiO₂ yang merupakan tempat reaksi reduksi Cr(VI) berlangsung.

Pengaruh Penambahan EDTA dapat dilihat pada Gambar 3, yang menunjukkan bahwa penambahan EDTA dapat menaikkan konversi reduksi Cr(VI) sebesar 11,7 %. Kenaikan ini disebabkan karena EDTA dapat berfungsi sebagai *hole scavenger*, sehingga dapat mengurangi laju rekombinasi *electron-hole*. Dengan turunnya laju rekombinasi *electron-hole* diharapkan lebih banyak elektron yang sampai ke permukaan katalis sehingga Cr(VI) lebih banyak tereduksi. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Khalil dkk [3] dan Navio dkk [6].

Uji aktivitas dengan variasi pH dilakukan pada 3 kondisi yang berbeda yaitu pada pH 2, 7, dan 10. Pengujian tersebut dilakukan dengan katalis TiO₂ (5 gr/l) dengan penambahan EDTA dengan perbandingan [EDTA] : [Cr(VI)] = 5 : 2. Pengaruh variasi pH terhadap proses reduksi Cr(VI) dapat dilihat pada Gambar 4.

Dari Gambar 4 tersebut, dapat dilihat bahwa semakin rendah pH larutan (semakin asam) maka laju reduksi Cr(VI) semakin meningkat pula. Untuk waktu reaksi selama 5 jam, pada pH 10 Cr(VI) yang tereduksi sebesar 47,67 %, pada pH 7 tereduksi sebesar 57,23 % dan pada pH 2 tereduksi sebesar 73,97 %. Fenomena ini dapat terjadi karena dengan semakin rendahnya pH, maka konsentrasi ion H⁺ akan meningkat. Dari persamaan reaksi reduksi Cr (VI) diketahui bahwa reaksi *over all* reduksi Cr(VI) membutuhkan atau mengkonsumsi proton (H⁺) sehingga dengan semakin banyak/tersedianya proton maka kesetimbangan reaksi akan bergeser ke kanan dan laju reaksi reduksi Cr (VI) akan semakin meningkat.

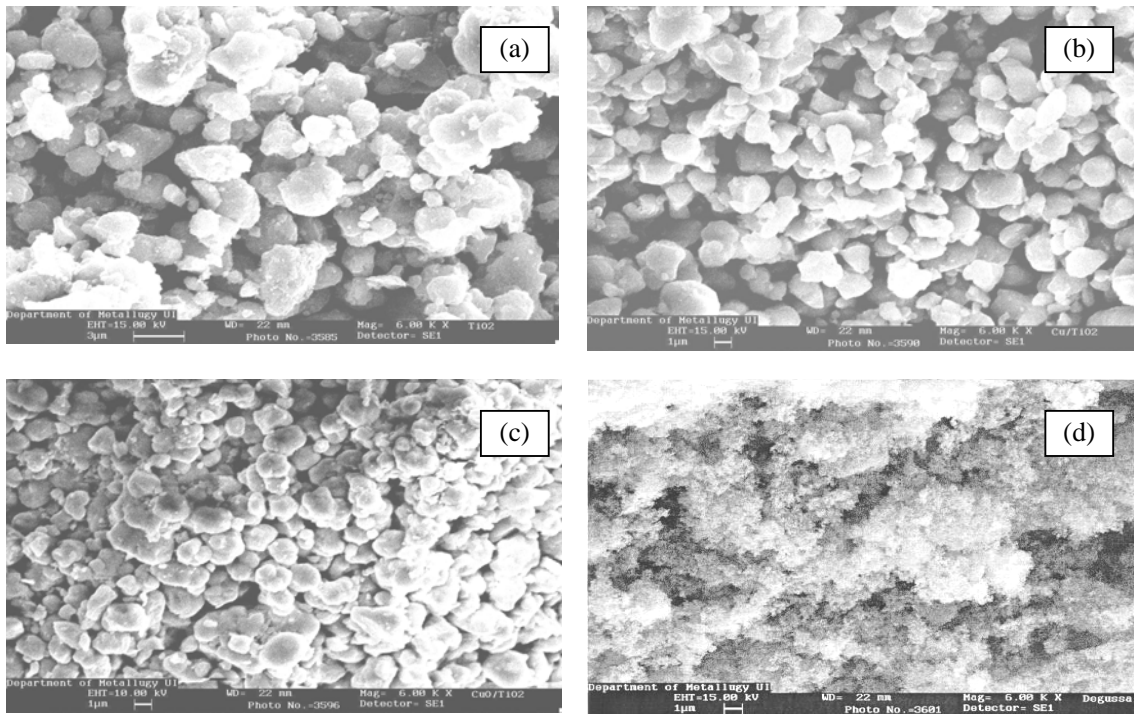
Pengujian pengaruh konsentrasi awal Cr (VI) bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) terhadap laju reduksi Cr(VI), sehingga konstanta laju reaksinya dapat ditentukan. Katalis yang digunakan adalah TiO₂ hasil preparasi, dengan kondisi operasi pH 2 dan penambahan EDTA dengan perbandingan [EDTA]:[Cr(VI)] = 5 : 2. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 1. Hasil karakterisasi XRD dan BET

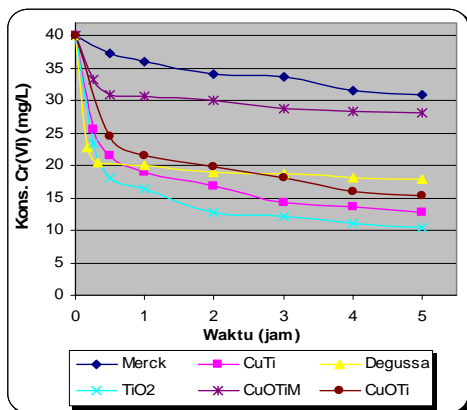
Katalis	Deskripsi	Hasil XRD		Luas permukaan (m ² /g)
		% Rutile	% Anatase	
TiO ₂	TiO ₂ dari TiCl ₄	0	100	75,4
TiO ₂ - <i>acac</i>	TiO ₂ dari Ti- <i>acac</i>	0	100	34,3
CuTi	Cu/TiO ₂	0	100	60,7
CuOTi	CuO/TiO ₂	0	100	73,4
CuOTiM	CuO/TiO ₂ Merck	-	-	4,4
Merck [#]	TiO ₂ Merck	0	100	14,4
Degussa P-25	TiO ₂ Degussa P-25	21	79	59*

Ket : * = dari literatur [3]

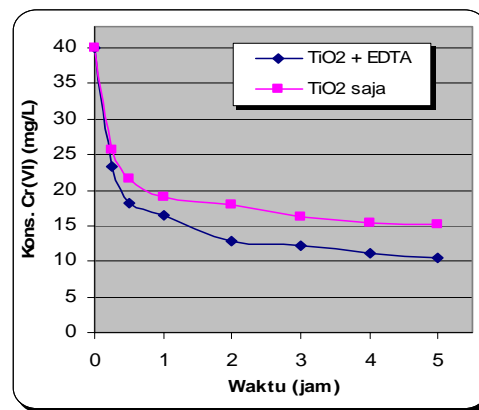
= dari literatur [7]



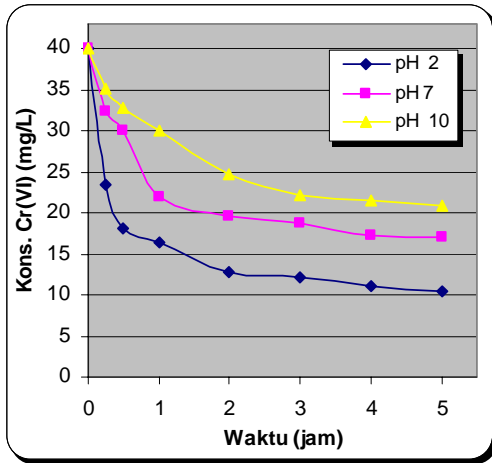
Gambar 1. Hasil Karakterisasi SEM katalis serbuk (a): TiO₂ (dari TiCl₄), (b): CuTi, (c): CuOTi, (d): Degussa P-25



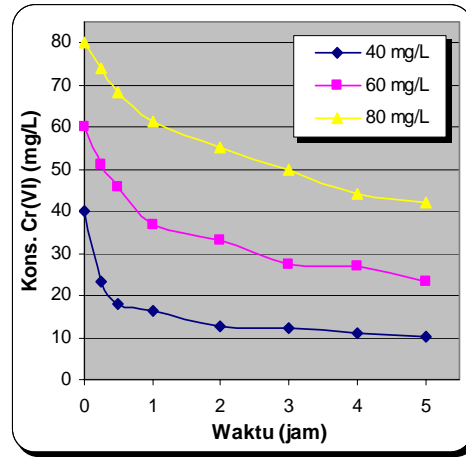
Gambar 2. Variasi jenis katalis



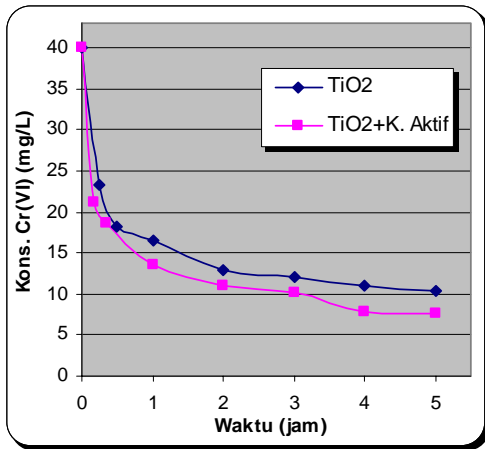
Gambar 3. Pengaruh penambahan EDTA



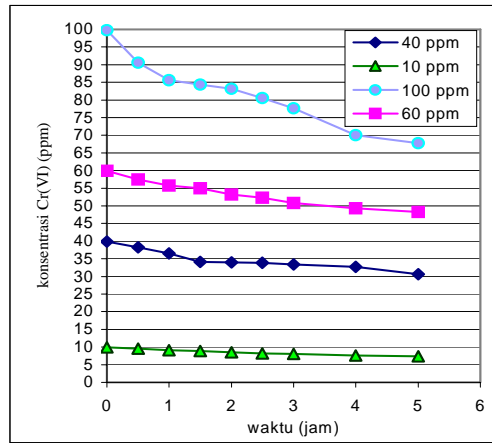
Gambar 4. Pengaruh pH larutan



Gambar 5. Variasi konsentrasi awal



Gambar 6. Pengaruh penambahan karbon aktif



Gambar 7. Uji katalis film dengan reaktor sirkulasi

Dari Gambar 5 tersebut, dapat dilihat bahwa jika konsentrasi awal Cr(VI) dinaikkan maka laju reduksinya turun. Semakin besar konsentrasi awal Cr(VI) berarti jumlah molekul yang berada pada larutan makin banyak pula dan kemampuan katalis untuk mengadsorpsi dan mereduksinya semakin kecil. Pada konsentrasi awal Cr(VI) 40 mg/L, katalis mampu mereduksi Cr(VI) sampai 73,97 %, pada konsentrasi Cr(VI) 60 mg/L, Cr(VI) tereduksi sebesar 61,5 % dan pada konsentrasi 80 mg/L, Cr(VI) tereduksi sebesar 47,27 %. Hal ini menunjukkan bahwa proses reduksi Cr(VI) pada konsentrasi rendah mempunyai laju yang lebih cepat.

Harga konstanta laju reaksi reduksi Cr(VI) dapat ditentukan dengan menggunakan metode *initial rate* [8]. Dari acuan [3] diketahui bahwa reaksi reduksi Cr(VI) mempunyai orde 1 maka dari hasil perhitungan, didapat bahwa reaksi reduksi Cr(VI) mempunyai konstanta laju reaksi (k) yaitu 1,061 jam⁻¹.

Pengujian efek penambahan karbon aktif dilakukan dengan perbandingan [karbon aktif]:[Cr(VI)] = 5:1, menggunakan katalis TiO₂ (5 gr/l). Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 6. Dari Gambar 6 tersebut, diketahui bahwa penambahan karbon aktif dapat meningkatkan konversi reduksi sebesar 6,75 %. Peningkatan konversi Cr(VI) ini disebabkan karena adanya efek sinergi dari perpaduan katalis dan karbon aktif. Efek sinergi tersebut dapat terjadi karena karbon aktif dapat mengadsorpsi molekul-molekul Cr(VI) diikuti dengan adanya perpindahan massa Cr(VI) dari karbon aktif ke permukaan katalis.

Uji kinerja katalis film TiO₂ dengan reaktor sirkulasi dapat dilihat pada Gambar 7. Dari Gambar 7 terlihat bahwa aktivitas katalis film dengan reaktor sirkulasi masih cukup rendah. Rendahnya aktivitas tersebut lebih disebabkan oleh sistem fotoreaktor sirkulasi yang belum efektif, sehingga kontak antara katalis-reaktan-UV

belum optimal. Dari Gambar 8 tersebut juga dapat dievaluasi bahwa orde reaksi = 1,46 dan konstanta laju reaksi (k) = 0,115 [$\text{mol}^{0,46}/\text{L}^{0,46}\cdot\text{jam}$], sehingga persamaan laju reaksinya ialah :

$$-r [\text{mol/L}\cdot\text{jam}] = 0,115 \cdot C_A^{1,46}$$

dengan C_A adalah konsentrasi limbah Cr(VI) dengan satuan mol/L.

4. Kesimpulan

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa semua katalis yang dipreparasi mempunyai struktur kristal anatase. Penambahan dopan tembaga 1% tidak mempengaruhi terhadap struktur kristal tersebut, akan tetapi dapat menurunkan luas permukaan katalis dan memperkecil ukuran agregat katalis. Katalis TiO_2 murni yang dipreparasi dari bahan awal TiCl_4 memiliki aktivitas tertinggi dalam mereduksi limbah Cr(VI) menjadi Cr(III), dengan konversi sekitar 80%. Hal ini disebabkan oleh tingginya luas permukaan dan kristal anatase yang terbentuk.

Penambahan dopan Cu sebesar 1 % pada katalis TiO_2 yang dipreparasi dari TiCl_4 diperkirakan berlebih sehingga dapat mengakibatkan tertutupnya sebagian permukaan TiO_2 yang merupakan tempat terjadinya reaksi reduksi Cr(VI). Akibatnya aktivitas fotoreduksi Cr(VI) menurun. Penambahan EDTA sebagai *hole scavenger* dapat meningkatkan aktivitas fotokatalisis dalam mereduksi Cr(VI) sekitar 10%. Laju reduksi Cr(VI) lebih cepat terjadi pada pH rendah dan pada

konentrasi awal Cr(VI) yang rendah. Penambahan karbon aktif sebagai adsorben dapat meningkatkan aktivitas fotokatalisis sekitar 5%.

Fotoreduksi limbah Cr(VI) yang dilakukan dengan katalis film dalam reaktor sirkulasi belum menunjukkan hasil yang signifikan. Oleh karena itu perlu dikembangkan lagi sistem reaktor yang lebih efektif untuk katalis bentuk film.

Daftar Acuan

- [1]. D.E. Kimbrough, Y. Cohen, A. M. Winer, *Critical Reviews in Environ. Sci. and Technol.* 29 (1999)1.
- [2]. Slamet, N. Suryantini, R. Syakur, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Proses Kimia IV*, Depok, Indonesia, 2002, p.C11.2–11.8.
- [3]. L.B. Khalil, W. Mourad, M.W. Rophael, *Appl. Catal. B*, 17 (1998) 267.
- [4]. I. Sopyan, *Alami* 3 (1998) 45.
- [5]. I. Sopyan, *Majalah BPPT No. LXXXVIII* (1998) 129.
- [6]. J.A. Navio, G. Colon, M. Trillas, J. Peral, X. Domenech, J.J. Testa, J. Padron, D. Rodriguez, M.I. Litter, *Appl. Catal. B* 16 (1998) 187.
- [7]. E. Kostina, Skripsi Sarjana, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 2000.
- [8]. H.S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 2nd Ed., Prentice Hall International Series, 1992.