

## STUDY OF Cr(VI) PHOTOREDUCTION CATALYZED BY CdO-ZEOLITE

*Kajian Fotoreduksi Ion Cr(VI) yang Terkatalisis oleh CdO-Zeolit*

Endang Tri Wahyuni, Mudasir, Saudur Sinambela

Chemistry Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Gadjah Mada University, Yogyakarta

## ABSTRACT

An attempt to decrease Cr(VI) ions in the solution which is more toxic than Cr(III) has performed by assisting the photoreduction of Cr(VI) ions catalysed by oxide Cd(II) supported in the zeolite pores (CdO-zeolite). The research consists of preparation, characterization, and photoactivity examination of CdO-zeolite. The preparation was carried out by ion-exchange method, which was followed by oxidation by flowing oxygen gas at 300°C. Analysis to determine the Cd adsorbed by zeolite and characterization to determine  $E_g$  as photocatalyst character was carried out by AAS and diffuses reflectance UV-Visible spectrophotometry (DRUV-Vis) methods, respectively. Photoreduction process was carried out in a closed reactor by radiating a suspension of Cr(VI) solution and CdO-zeolite with UV lamp for period of times. The concentration of unreduced Cr(VI) in the solution was determined by UV-Visible spectrophotometer as biphenyl carbacide complex. The results of the analysis and characterization indicated that the amount of Cd in CdO-zeolite is 46,832 mg/g and  $E_g$  of CdO-zeolite (3,26 eV) is larger than  $E_g$  of CdO (2,38 eV). Photocatalytic examination showed that the photoreduction results are proportional with the  $E_g$  values, i.e the results of Cr(VI) catalyzed by CdO-zeolit are higher than that of by CdO. Photoreduction of 50 mL solution Cr(VI) 25 ppm at pH = 7 catalyzed by 50 mg CdO- zeolite for 25 hours has given maximum result of 65,89 %.

**Keywords:** photoreduction, zeolite.

## PENDAHULUAN

Logam kromium (Cr) merupakan salah satu logam berat yang keberadaannya di lingkungan dapat berasal dari pembuangan air limbah industri kimia, seperti *plating* logam, penyamakan kulit, zat warna dan cat. Dalam larutan berair Cr dapat ditemukan sebagai Cr(III) yang berbentuk kationik dan Cr(VI) yang berupa anionik. Cr(VI) telah diketahui mempunyai sifat toksik yang lebih tinggi daripada Cr(III), karena Cr(VI) yang berupa anion  $\text{HCrO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$  dan  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  mampu menembus membran sel darah dengan cepat dan berikatan dengan fraksi globin dari hemoglobin, yang tidak dapat terjadi pada kation  $\text{Cr}^{3+}$ . Oleh karena itu ambang batas Cr(VI) di dalam perairan yang diizinkan relatif sangat rendah yaitu 0,05 mg/L [1]. Hal ini mendorong dilakukannya pengembangan metode pengolahan Cr(VI) dalam larutan guna menurunkan konsentrasi atau bahkan menghilangkan anion tersebut.

Beberapa metode penurunan konsentrasi anion Cr(VI) yang telah dilaporkan antara lain bioadsorpsi [2,3], adsorpsi dengan tanah gambut [4], pertukaran anion dengan menggunakan zeolit

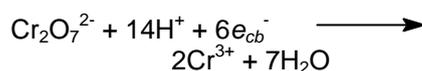
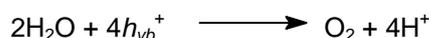
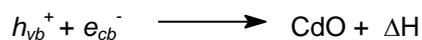
terfosfatasi [5], reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dengan reduktor zat organik [6,7,8], dan fotoreduksi yang terkatalisis yaitu reduksi yang diinduksi oleh energi cahaya dan dipercepat oleh fotokatalis ZnO [9,10]. Fotokatalisis oleh ZnO dapat terjadi karena ZnO mempunyai struktur semikonduktor-n yang dapat menyediakan elektron sehingga akan meningkatkan (*sensitizing*) reaksi fotoreduksi. Lebih jauh dilaporkan oleh Selli *et al* [9] dan Santosa [10] bahwa efektivitas fotoreduksi tersebut dapat meningkat nyata dengan penambahan asam humat. Dengan adanya asam humat yang berupa padatan, ZnO dapat terdispersi merata sehingga luas permukaan aktifnya meningkat.

Peningkatan permukaan aktif fotokatalis dapat juga dilakukan dengan menurunkan ukuran partikel oksida tersebut. Penurunan ukuran partikel ZnO dapat diperoleh antara lain dengan cara mempreparasi oksida tersebut di dalam struktur zeolit [11,12], karena rongga zeolit dapat membatasi pertumbuhan partikel oksida tersebut. Lestari [13] telah membuktikan bahwa ZnO-zeolit dapat mengkatalisis fotoreduksi ion Cr(VI) dengan aktivitas yang lebih tinggi daripada ZnO tanpa zeolit.

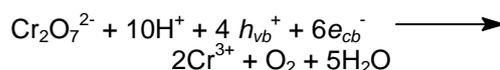
Selain ZnO, fotokatalis yang juga berstruktur semikonduktor-n adalah CdO [14]. Preparasi CdO di dalam rongga zeolit juga dilaporkan dapat meningkatkan harga  $E_g$  [11,15] sebagai ukuran kemampuan suatu fotokatalis. Harga  $E_g$  yang lebih besar diharapkan dapat memberikan aktivitas fotokatalitik yang juga lebih tinggi, namun pengujian aktivitas fotokatalitik CdO-zeolit pada fotoreduksi Cr(VI) belum dilakukan. Hal ini yang mendorong untuk dilakukannya kajian fotoreduksi ion Cr(VI) yang terkatalisis oleh oksida Cd dalam struktur zeolit.

CdO dapat bertindak sebagai fotokatalis karena mempunyai struktur semikonduktor yang dikarakterisasi oleh pita valensi terisi elektron dan pita konduksi yang kosong yang terpisah dengan jarak sebesar  $E_g$ , yang disebut dengan energi *band gap*, sebagaimana terlihat dalam gambar 1.

Jika suatu semikonduktor dikenai energi foton  $h\nu$  yang besarnya sama atau lebih besar dari  $E_g$  dari semikonduktor tersebut, maka sebuah elektron,  $e^-$ , akan dipromosikan dari pita valensi ke pita konduksi meninggalkan sebuah lubang atau *hole* pada pita valensi,  $h_{vb}^+$ . Elektron yang terbentuk pada permukaan fotokatalis tersebut dapat bereaksi dengan suatu aseptor elektron atau oksidator sehingga terjadi reaksi reduksi. Sementara jika spesies  $h_{vb}^+$  pada permukaan katalis bertemu dengan donor elektron atau aseptor proton atau zat reduktor maka akan berlangsung reaksi oksidasi. Jika oksidator maupun reduktor tidak tersedia dalam sistem, maka  $e^-$  dan  $h_{vb}^+$  dapat bergabung kembali sambil melepaskan energi panas [14]. Tahap reaksi fotoreduksi Cr(VI) terkatalisis oleh CdO dengan adanya oksigen dalam larutan dapat ditulis sebagai berikut :



Reaksi total:



Dari persamaan di atas dapat dilihat dengan jelas bahwa peran CdO adalah menyediakan elektron yang akan ditangkap ion Cr(VI) sehingga berlangsung reaksi reduksi menghasilkan ion Cr(III), yang kurang bersifat racun daripada ion Cr(VI).

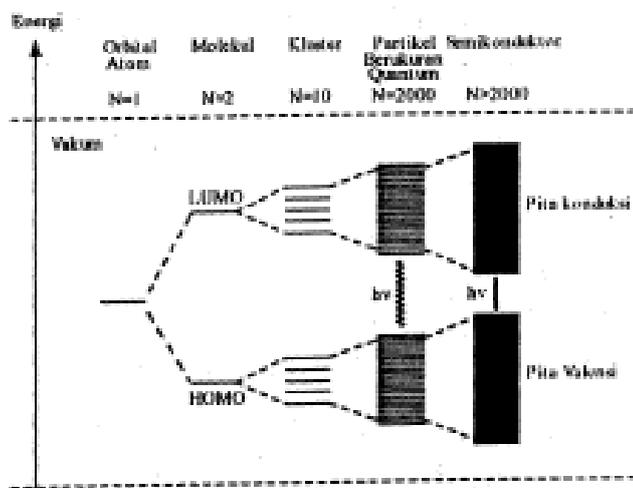
### METODOLOGI

#### Bahan Penelitian :

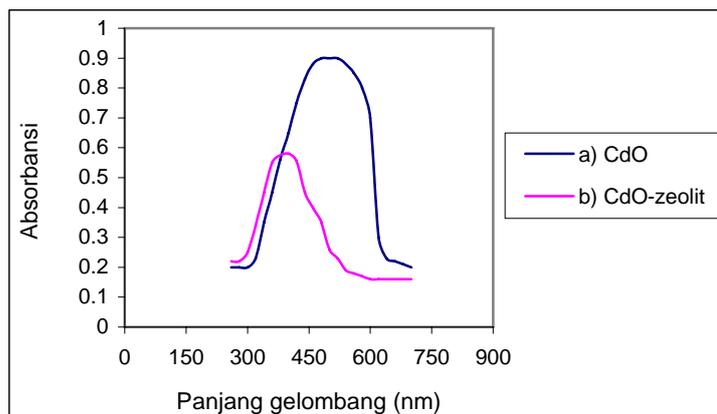
Garam  $K_2Cr_2O_7$ ,  $Cd(NO_3)_2$ , Zeolit alam dari Wonosari DIY.

#### Alat Penelitian :

Alat-alat gelas laboratorium kimia, spektrofotometer serapan atom-Shimadzu, spektrofotometer UV-Vis-Shimadzu, spektrofotometer difusi reflektansi UV-Visibel (DRUV)-Jasco550 yang ada di Department of Chemical Engineering, the Queensland University-Australia, dan reaktor fotokimia yang dirancang sendiri.



Gambar 1 Struktur pita pada semikonduktor {Ket.  $h\nu = E_g$ } [14]



Gambar 2 Spektra DRUV-Visibel dari CdO dan CdO-zeolit

### Prosedur Penelitian :

Penelitian terdiri dari preparasi dan karakterisasi oksida CdO(II) di dalam struktur zeolit alam, dan proses fotoreduksi ion Cr(VI) yang dikatalisis dengan CdO maupun CdO-zeoliteolit.

Preparasi dilakukan dengan metode pertukaran ion antara ion Cd(II) 0,025M dalam 50 mL dengan 0,5 gram struktur zeolit alam, yang disertai pengadukan selama 24 jam. Padatan zeolit yang telah menyerap Cd(II) dipisahkan dari suspensinya kemudian dikalsinasi pada temperatur 300°C sambil dialiri gas O<sub>2</sub> selama 3 jam dan diberi notasi CdO-zeoliteolit. Sampel CdO-zeoliteolit dianalisis guna penentuan kandungan Cd dalam sampel tersebut dan dikarakterisasi dengan spektrometer DRUV-Vis. pada  $\lambda = 700-250$  nm guna penentuan harga  $E_g$ -nya.

Proses fotoreduksi dilakukan dengan cara menyinari suspensi larutan Cr(VI) 25 mg/L sebanyak 50 ml dan 25 mg CdO-zeoliteolit dengan lampu UV 38 watt dengan panjang gelombang 300-400 nm yang disertai pengadukan selama waktu yang bervariasi. Larutan hasil fotoreduksi disaring dan larutannya dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis sebagai kompleks difenil karbasid guna penentuan konsentrasi ion Cr(VI) yang tak tereduksi. Langkah yang sama dilakukan dengan menggunakan fotokatalis CdO-zeoliteolit, CdO, dan reaksi tanpa katalis pada berbagai waktu reaksi, serta untuk larutan Cr(VI) dengan konsentrasi dan pH yang bervariasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Analisis dan Karakterisasi

Hasil analisis terhadap CdO-zeolit diperoleh kandungan Cd dalam CdO-zeolit sebesar :

46,823 mg/g, dan hasil karakterisasi berupa spektra DRUV-Visibel disajikan sebagai gambar 2.

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa serapan maksimal CdO dan CdO-zeolit masing-masing muncul pada  $\lambda = 520$  nm dan  $\lambda = 380$  nm. Dengan menggunakan hubungan  $E_g = 1240/\lambda$  dapat diketahui harga  $E_g$  CdO dan CdO-zeolit masing-masing = 2,38 eV dan 3,26 eV. Hasil ini juga sesuai dengan hasil penelitian Zhao, *et al* [11]. Jadi jelas bahwa preparasi CdO dalam rongga zeolit dapat meningkatkan harga  $E_g$  yang diharapkan aktivitas katalitiknya juga meningkat. Pembuktian dan pembahasan aktivitas fotokatalitik CdO-zeolit pada reaksi fotoreduksi ion Cr(VI) dikemukakan di bawah ini.

### Hasil Fotoreduksi Ion Cr(VI) yang Terkatalisis oleh CdO-zeolit

Dalam proses fotoreduksi digunakan lampu UV 38 watt dengan panjang gelombang 390-300 nm atau energi sebesar : 3,12 - 4,12 eV, sebagai sumber cahaya. Energi lampu tersebut masih lebih rendah daripada  $E_g$  yang dimiliki oleh CdO maupun CdO-zeolit, sehingga fotokatalis CdO akan dapat menghasilkan spesies fotoaktif,  $e^-$  dan  $h^+$ , yang terletak pada permukaan katalis. Fotoreduksi Cr(VI) terjadi jika tersedia elektron ( $e^-$ ) yang akan ditangkap oleh ion Cr(VI).

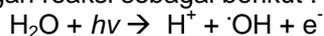
Dalam penelitian ini telah dikaji pengaruh waktu penyinaran, konsentrasi dan pH larutan Cr(VI) terhadap efektivitas fotoreduksi ion Cr(VI).

### Pengaruh waktu penyinaran terhadap hasil fotoreduksi

Pengaruh waktu penyinaran terhadap hasil fotoreduksi dipelajari dengan menentukan jumlah % Cr(VI) yang tereduksi, baik tanpa adanya fotokatalis maupun dengan adanya CdO dan CdO-zeolit, pada berbagai waktu penyinaran,

dan hasilnya disajikan sebagai gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penyinaran sampai dengan 25 jam menghasilkan kenaikan hasil fotoreduksi yang relatif besar, dan kenaikan tersebut semakin kecil dengan waktu penyinaran lebih lama dari 25 jam. Pada awal reaksi, kontak antara larutan Cr(VI) dengan permukaan katalis dapat berlangsung lebih efektif. Pada waktu yang semakin lama, semakin banyak produk Cr(III) yang dihasilkan sehingga mengurangi efektivitas fotokatalisis.

Selain itu dapat dilihat juga bahwa fotoreduksi ion Cr(VI) tanpa adanya fotokatalis dapat berlangsung, meskipun relatif lambat. Hal ini terjadi karena,  $H_2O$  dengan adanya  $h\nu$  akan melepaskan elektron disertai dengan terbentuknya radikal OH dan ion  $H^+$  sesuai dengan reaksi sebagai berikut :



Elektron yang terbentuk akan ditangkap oleh Cr(VI) sehingga terjadi reduksi yang membentuk Cr(III).

Gambar 3 juga memperlihatkan bahwa penambahan fotokatalis CdO maupun CdO-zeolit, dapat meningkatkan hasil fotoreduksi ion Cr(VI) secara signifikan. Peningkatan ini dapat terjadi karena fotokatalis CdO dan CdO-zeolit dapat melepaskan elektron apabila dikenai cahaya dengan energi  $h\nu$  yang sama atau lebih besar dari  $E_g$  yang dimilikinya, sesuai reaksi [14]:



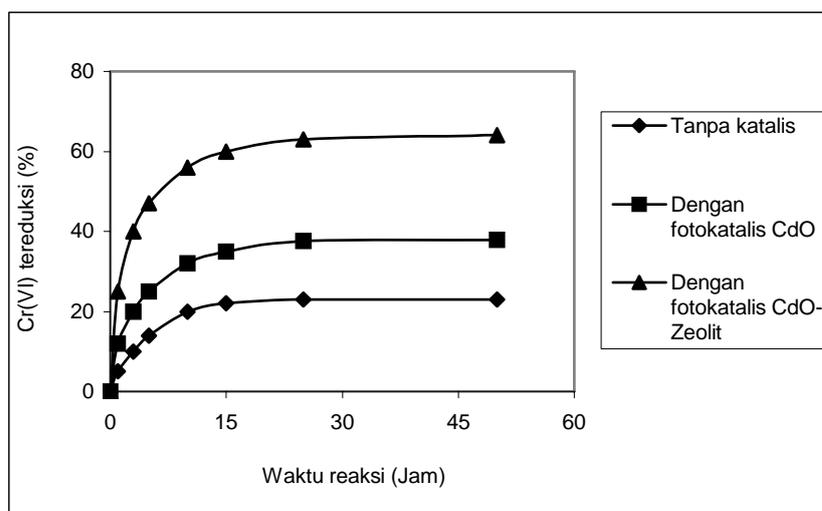
Jumlah elektron yang dilepaskan oleh fotokatalis tersebut relatif lebih banyak daripada yang dihasilkan oleh air. Dengan demikian

elektron yang akan ditransfer ke dalam spesies Cr(VI), selain berasal dari  $H_2O$  juga berasal dari CdO dan CdO-zeolit dalam jumlah yang relatif banyak. Hal ini menghasilkan proses reduksi Cr(VI) yang lebih efektif, sehingga akan meningkatkan hasil fotoreduksi.

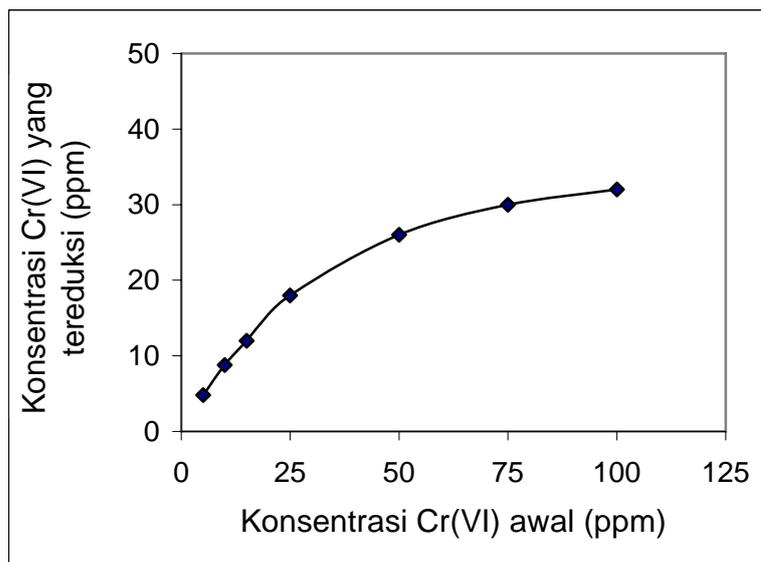
Lebih jauh dapat diketahui bahwa fotoreduksi yang dikatalisis CdO-zeolit lebih efektif daripada yang dikatalisis oleh CdO. Fenomena ini dapat dijelaskan berdasarkan harga  $E_g$  maupun ukuran partikel CdO. Dari hasil karakterisasi telah diketahui bahwa harga  $E_g$  (CdO-zeolit) lebih besar daripada  $E_g$  (CdO bulkform), yang akan menghasilkan spesies fotoaktif yang lebih banyak. Selain itu, karena pertumbuhan partikel oksida Cd(II) dalam zeolit terbatas oleh rongga zeolit maka ukuran partikel CdO dalam CdO-zeolit lebih kecil daripada ukuran partikel CdO. Hal ini akan memberikan luas permukaan lebih besar. Harga  $E_g$  yang lebih besar dan ukuran partikel yang lebih kecil atau luas permukaan yang lebih besar akan menghasilkan efektivitas reaksi fotokatalisis yang lebih tinggi.

#### Pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) terhadap hasil fotoreduksi

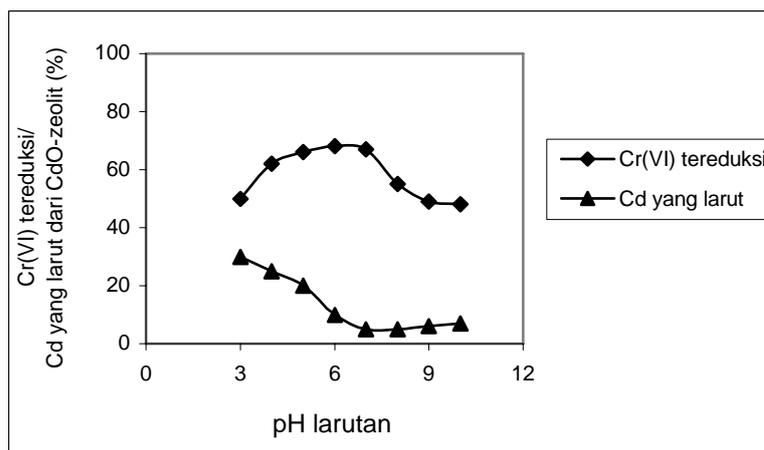
Pengaruh konsentrasi awal Cr(VI) dalam larutan terhadap hasil fotoreduksi dipelajari dengan cara menyinari suspensi dari CdO-zeolit dan larutan Cr(VI) dengan konsentrasi yang bervariasi selama 25 jam. Jumlah ion Cr(VI) yang tidak tereduksi dalam larutan disajikan dalam gambar 4.



Gambar 3 Pengaruh waktu penyinaran terhadap hasil fotoreduksi Cr(VI)



**Gambar 4** Pengaruh konsentrasi larutan Cr(VI) terhadap hasil fotoreduksi



**Gambar 5** Pengaruh pH larutan Cr(VI) terhadap hasil fotoreduksi Cr(VI)

Gambar 4 memperlihatkan bahwa kenaikan konsentrasi Cr(VI) dari 5 mg/L sampai 25 mg/L menghasilkan peningkatan jumlah Cr(VI) yang tereduksi secara tajam, sedangkan kenaikan konsentrasi Cr(VI) yang lebih tinggi daripada 25 mg/L tidak memberikan kenaikan hasil fotoreduksi yang signifikan. Dalam penelitian ini digunakan berat fotokatalis dan energi radiasi UV yang tetap, sehingga jumlah elektron yang dihasilkan oleh fotokatalis sebagai hasil penyerapan energi  $h\nu$  juga tetap dan tertentu. Jika jumlah elektron yang tersedia masih lebih besar daripada yang diperlukan oleh ion Cr(VI) maka fotoreduksi akan berlangsung, yang meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah ion Cr(VI), sampai mencapai maksimal sesuai dengan jumlah elektron yang tersedia. Akibatnya, meskipun jumlah ion Cr(VI)

terus dinaikkan tidak akan meningkatkan fotoreduksi Cr(VI). Jadi konsentrasi awal Cr(VI) sebesar 25 mg/L merupakan konsentrasi optimum dengan hasil fotoreduksi sebesar sekitar 30 mg/g atau 65,89 %.

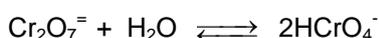
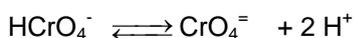
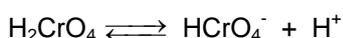
#### **Pengaruh pH larutan Cr(VI) terhadap hasil fotoreduksi**

Pengaruh pH larutan Cr(VI) perlu untuk dipelajari karena spesiasi Cr(VI) maupun Cd(II) ditentukan oleh pH larutan, yang juga dapat mempengaruhi proses fotoreduksi Cr(VI) terkatalisis oleh CdO-zeolit. Kajian pengaruh pH dilakukan dengan cara menentukan jumlah Cr(VI) yang tereduksi dan jumlah Cd yang larut dari CdO-zeolit pada pH yang bervariasi. Jumlah

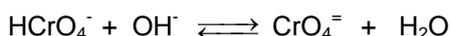
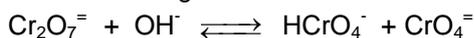
Cr(VI) yang tereduksi dan Cd yang larut dari CdO-zeolit disajikan dalam gambar 5.

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan pH dari 3 sampai 6 dapat meningkatkan hasil reduksi Cr(VI), pada pH 6-7 tidak memberikan perbedaan hasil, sedangkan kenaikan pH 7-10 ternyata menyebabkan penurunan hasil fotoreduksi. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan hubungan pH larutan dengan spesies Cr(VI) maupun spesies Cd.

Ion Cr(VI) dapat mengalami perubahan spesies dengan adanya perubahan pH sesuai reaksi berikut [16] :



Selain itu, pada kondisi basa akan terjadi hidrolisis sebagai berikut :



Dalam larutan dengan pH yang lebih rendah dari 1, spesies utama Cr(VI) adalah  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ , sedangkan pada pH antara 2-6 terdapat keseimbangan antara spesies  $\text{HCrO}_4^-$  dan  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , dan pada pH lebih tinggi dari 6  $\text{CrO}_4^{2-}$  merupakan spesies utama. Kemudahan untuk tereduksi dari ketiga anion tersebut secara berurutan adalah  $\text{HCrO}_4^-$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ , dan  $\text{CrO}_4^{2-}$ . Hal ini menjelaskan mengapa pada pH 4-7 hasil fotoreduksi relatif tinggi, sedangkan pada pH basa terjadi penurunan hasil fotoreduksi. Didasarkan pada spesies Cr(VI) tersebut, seharusnya pada pH 3 hasil fotoreduksi yang relatif tinggi, namun data menunjukkan hasil yang rendah. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan spesies Cd pada berbagai pH larutan.

Pada pH asam, Cd(II) terlarut sebagai ion  $\text{Cd}^{2+}$  dan mengendap sebagai  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  pada pH basa. Endapan ini tidak larut dalam larutan basa. Terlarutnya Cd dari CdO-zeolit pada pH 3 akan mengurangi jumlah CdO dalam CdO-zeolit. Hal ini didukung oleh data pada gambar 4 yang menunjukkan bahwa pada pH yang lebih rendah, jumlah Cd yang larut dari CdO-zeolit lebih tinggi dan kelarutan CdO sangat kecil dan tetap pada > 7. Terlarutnya Cd dari CdO-zeolit akan menurunkan jumlah elektron yang dihasilkan, sehingga efektivitas fotoreduksi Cr(VI) menjadi berkurang. Pada pH > 7, CdO dalam CdO-zeolit tetap stabil, sehingga seharusnya tidak mempengaruhi hasil fotoreduksi. Dengan demikian jelas bahwa penurunan hasil reduksi pada pH >6 disebabkan oleh pembentukan

spesies  $\text{CrO}_4^{2-}$  yang aktivitas oksidasinya rendah atau lebih sulit tereduksi.

## KESIMPULAN

1. Kandungan Cd dalam CdO-zeolit hasil preparasi adalah 24,6 mg/g dengan Energi *band gap* ( $E_g$ ) = 3,26 eV, yang lebih tinggi daripada  $E_g$  dari CdO = 2,38 eV.
2. Penggunaan fotokatalis oksida Cd(II) dapat meningkatkan hasil fotoreduksi Cr(VI), dan aktivitas fotokatalis CdO-zeolit lebih tinggi daripada CdO.
3. Fotoreduksi ion Cr(VI) yang terkatalisis CdO-zeolit sangat dipengaruhi oleh pH larutan
4. Hasil fotoreduksi ion Cr(VI) dari 50 ml larutan Cr(VI) 25 mg/L yang maksimal yaitu 65,89 %, dapat tercapai pada pH larutan = 7 dengan menggunakan 25 mg CdO-zeolit selama waktu penyinaran = 25 jam

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Prof. Dr. G.Q. Lu dan Indriana Kartini, S.Si.,M.Si di Department of Chemical Engineering, the Queensland University-Australia, atas bantuannya dalam analisis dengan spektrofotometer DRUV-Visibel.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, 1991, *Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup, No. Kep. 03/MENKLH/1991 tentang Pedoman Penetapan Baku Mutu Lingkungan*, Sekretariat Menteri Negara KLH-RI, Jakarta.
2. Mulyani, B., 2001, *Pemanfaatan Saccaromyces cerevisiae sebagai Boadsorben Krom (III) dan Krom (VI)*, Tesis S-2, Pascasarjana UGM, Yogyakarta
3. Koesnarpadi, S., 2001, *Transformasi Kromium (VI) menjadi Kromium (III) oleh Bakteri Pseudomonas putida*, Tesis S-2, Pascasarjana, UGM Yogyakarta
4. Herdiansyah, 2001, *Adsorpsi Ion Bikromat oleh Tanah Gambut*, Tesis-S2 Pascasarjana, UGM Yogyakarta.
5. Rahayu, N., 1996, *Uji Pertukaran Anion antara Ion Cr(VI) dengan Zeolit Alam Terfosfatasi*, Skripsi S-1 Jurusan Kimia FMIPA UGM, Yogyakarta
6. Pettine, M., Campanella, L., and Millero. F. J., 2002, *Environ. Sci. Technol.*, 36: 901-907
7. Kozuh, N., Stupar, J. and Gorenc, B., 2000, *Environ. Sci. Technol.*, 34: 112-119

8. Kim, C., Zhou, Q., Deng, D., Thornton, E.C., and Xu, H., 2001, , *Environ,Sci. Technol*, 35, 2219-2225
9. Selli, E., Giorgi, A., and Bidoglio, G., 1996, *Environ. Sci. Technol.*, 598-604
10. Santoso, U. T., 2001, *Kajian Kinetika Reduksi Fotoreduksi Cr(VI) oleh Asam Humat*, Tesis S-2, Pascasarjana UGM, Yogyakarta
11. Zhao, X.S., Lu, G. Q. and Millar, G. J., 1996, *J. Porous Mater.*, 3, 61-66
12. Linangkung, L., 2002, *Pemanfaatan Limbah Padat Cd-Zeolit Sebagai Bahan Semikonduktor Fotokatalis*, Skripsi S-1 Jurusan Kimia FMIPA UGM, Yogyakarta.
13. Lestari, A.D.N., 2003, *Kajian Fotoreduksi ion Cr(VI) yang Terkatalisis ZnO-zeolit*, Skripsi S-1, Jurusan Kimia F.MIPA-UGM Yogyakarta
14. Hoffman, M. R., Martin, S. T., Choi, W. and Bahnemann, D.W., 1995, , *J. Chem. Rev.*, 95, 69-96
15. Rachmanto, D., 2002, *Penggunaan Zeolit Alam sebagai Adsorben ion Cd(II) dalam Air dan Kemungkinan Pemanfaatan Cd-Zeolit sebagai Bahan Fotokatalis*, Skripsi S-1 Jurusan Kimia FMIPA UGM, Yogyakarta
16. Cotton, F. A. and Wilkinson, G., 1987, *Advanced Inorganic Chemistry*, 5<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, New York