

PENGARUH SUBFRAKSINASI DAN pH TERHADAP SENSITISASI ASAM HUMAT PADA FOTOREDUKSI Cr(VI) MENJADI Cr(III) OLEH SEMIKONDUKTOR ZnO

THE EFFECT OF SUBFRACTIONATION AND pH ON SENSITIZATION OF HUMIC ACID ON PHOTOREDUCTION OF Cr(VI) TO Cr(III) BY ZnO SEMICONDUCTOR

Uripto Trisno Santoso¹, Herdiansyah², Sri Juari Santosa³, Dwi Siswanta³

¹FMIPA Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan

²FKIP Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Kalimantan Selatan

³FMIPA Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

ABSTRAK

Pengaruh subfraksinasi dan pH terhadap sensitisasi asam humat (AH) pada fotoreduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh semikonduktor ZnO telah diteliti. AH diekstraksi dari tanah gambut yang berasal dari Kecamatan Gambut, Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan. Subfraksinasi AH menjadi subfraksi asam humat (SAH) dilakukan dengan menggunakan metode sentrifugasi. Fotoreduksi dilakukan dengan menggunakan dua buah lampu UV 30 watt model TUV (produksi Philips) yang diletakkan di dalam kotak penyinaran pada jarak sekitar 20 cm di atas sampel. Pada setiap percobaan, sebanyak 500 mL sampel diradiasi dengan cahaya UV. Semikonduktor ZnO (produksi Merck) disuspensikan ke dalam air dengan konsentrasi 2 g/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SAH yang berbobot molekul lebih rendah menunjukkan efektivitas yang lebih baik sebagai sensitizer daripada SAH yang berbobot molekul lebih besar. Keasaman medium dapat mempengaruhi sensitisasi SAH pada fotoreduksi Cr(VI) oleh ZnO. Kemampuan SAH untuk mensensitisasi fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO pada pH 5 lebih baik daripada kemampuan sensitisasinya pada pH 1.

Kata kunci: asam humat, subfraksi, sensitisasi, fotoreduksi.

ABSTRACT

The effect of subfractionation and pH on sensitization of humic acid (HA) on photoreduction of Cr(VI) to Cr(III) by ZnO semiconductor has been carry out. HA extracted from Gambut peat soil, Banjar District, South Kalimantan. Subfractionation of HA to humic acid subfraction (HAS) are performed by centrifugation method. The photoreduction was performed using two UV lamps 30 watt (Philip, TUV model) that was placed in the box at 20 cm above the sample. Each experiment used a 500 mL suspension illuminated with UV light. The semiconductor was ZnO produced by Merck suspended in water in 2 g/L concentration. The results showed that the sensitization of the lower molecular weight HAS is more effective than the higher molecular weight HAS. The medium acidity can affect HAS ability to sensitize photoreduction of Cr(VI) by ZnO. The HAS ability to sensitize photoreduction of Cr(VI) by ZnO at pH 5 is higher than its ability at pH 1.

Keywords: humic acid, subfraction, sensitization , photoreduction.

PENDAHULUAN

Pencemaran kromium dalam tanah maupun perairan merupakan problem lingkungan yang banyak mendapat perhatian di seluruh dunia (Buerge and Hug, 1998; Wieling, *et al.*, 2001). Toksisitas dan mobilitas Cr(VI) lebih besar daripada Cr(III) sementara Cr(III) dalam jumlah kecil merupakan bahan pokok yang diperlukan untuk metabolisme karbohidrat dalam mamalia (Sperling, *et al.*, 1992). Berdasarkan pada sifat kromium ini maka usaha reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) menjadi perhatian utama dalam usaha mengurangi toksisitas Cr(VI), terutama pada pengolahan limbah sebelum dibuang ke lingkungan (Buerge and Hug, 1998; Kozuh, *et al.*, 2000; Sylvester, *et al.*, 2001).

Dalam kajian reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh berbagai jenis tanah subpermukaan, Eary and Rai (1991) menunjukkan bahwa kapasitas tanah untuk mereduksi Cr(VI) adalah ekuivalen dengan reduksi Cr(VI) oleh Fe(II) dan bahan organik tanah. Hal ini menunjukkan bahwa senyawa humat yang merupakan konstituen utama dalam fraksi organik tanah merupakan sumber yang baik sebagai donor elektron untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) (Wittbrodt and Palmer, 1995).

Hasil studi kinetika reduksi Cr(VI) dalam berbagai jenis tanah (gambut, lempung, kambisol dan tanah pasir) menunjukkan bahwa reduksi Cr(VI) pada

tanah gambut lebih cepat daripada reduksi Cr(VI) pada jenis tanah yang lain (Kozuh, *et al.*, 2000). Untuk mempelajari pengaruh bahan organik terlarut (*soluble organic matter*, SOM) dalam gambut terhadap reduksi Cr(VI), SOM diekstraksi dari gambut menggunakan pelarut air pada keadaan pH netral kemudian digunakan untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Hasilnya menunjukkan bahwa selama 10 hari pengamatan, SOM ini tidak dapat mereduksi Cr(VI). Di pihak lain, apabila tanah kambisol dicampur dengan humus ternyata reduksi Cr(VI) menjadi lebih cepat bila dibandingkan dengan reduksi Cr(VI) oleh tanah kambisol tanpa humus (Kozuh, *et al.*, 2000). Hasil Penelitiannya juga menunjukkan bahwa jenis tanah yang mengandung lebih banyak Fe(II) dan humus akan mereduksi Cr(VI) lebih cepat daripada jenis tanah yang mengandung Fe(II) dan humus relatif sedikit.

Hasil penelitian Santoso (2001) menunjukkan bahwa adanya radiasi ultraviolet dapat meningkatkan laju reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh asam humat. Menurut Gaffney, *et al.* (1996), senyawa humat dapat menyerap dengan efektif energi radiasi cahaya matahari pada panjang gelombang 300 nm sampai 500 nm. Adanya radiasi ultraviolet pada larutan senyawa humat dapat menghasilkan elektron-elektron terlarut (*solvated electrons*) (Nriagu and Simmons, 1994) dan H₂O₂ (Stumm and Morgan, 1996) yang dapat mereduksi Cr(VI) menjadi

Cr(III) (Cotton and Wilkinson, 1999; Svehla, 1990).

Hasil penelitian selanjutnya (Santoso dkk., 2003) menunjukkan bahwa fraksi asam humat dari tanah gambut dapat dijadikan sebagai sensitizer pada fotoreduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh semikonduktor ZnO dan TiO₂. Hasil penelitiannya juga menunjukkan bahwa pada kondisi pH, konsentrasi fotokatalis, asam humat dan Cr(VI) yang sama, aktivitas fotokatalitik ZnO lebih baik daripada TiO₂.

Suatu semikonduktor dapat berfungsi sebagai reduktor atau oksidator dalam reaksi redoks yang terinduksi oleh cahaya berdasarkan struktur elektroniknya. Jika ada foton dengan energi $h\nu$ sesuai atau melebihi energi celah pita maka elektron di pita valensi akan dipromosikan ke pita konduksi menghasilkan pembawa muatan, yaitu elektron pada pita konduksi (e^-) dan *hole* pada pita valensi (h^+). Elektron pita konduksi merupakan oksidator sedangkan *hole* pita valensi merupakan reduktor (Stumm and Morgan, 1996, Hoffmann *et al.*, 1995). Suatu senyawa organik terlarut yang memiliki gugus kromofor dan teradsorp pada permukaan partikel semikonduktor dapat meningkatkan transfer elektron dari pita konduksi ke akseptor elektron dari larutan (Stumm and Morgan, 1996). Karena sebagian besar spesies senyawa humat akan bermuatan negatif pada pH > 2 maka secara elektrostatik, senyawa humat ini dapat

diadsorpsi oleh permukaan semikonduktor yang bermuatan positif. Untuk ZnO, permukaannya akan bermuatan positif pada pH < 9,3 (Selli, *et al.*, 1996). Berdasarkan hal ini, maka pada kondisi pH yang sesuai, senyawa humat dapat dijadikan sebagai sensitizer dalam reaksi fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO.

Penelitian yang lain menunjukkan bahwa fraksi asam humat tidak terdiri dari satu molekul tunggal tetapi terdiri dari berbagai subfraksi asam humat yang memiliki berat molekul yang berbeda-beda (Aiken *et al.*, 1985). Wittbrodt and Palmer (1996) menunjukkan bahwa dalam asam humat terdapat berbagai komponen yang memiliki reaktivitas yang berbeda-beda dalam mereduksi Cr(VI). Hasil ini didukung oleh hasil penelitian Santoso (2001) yang menunjukkan bahwa kinetika laju reduksi dan fotoreduksi Cr(VI) oleh asam humat tidak dapat dimodelkan dengan persamaan laju reaksi orde satu atau dua sederhana tetapi dapat dimodelkan dengan menggunakan model multikomponen kontinyu.

Berdasarkan hal tersebut, dalam makalah ini akan dilaporkan hasil penelitian tentang pengaruh subfraksinasi, pH dan Fe(II) terhadap efektivitas sensitisasi asam humat pada fotoreduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh semikonduktor ZnO.

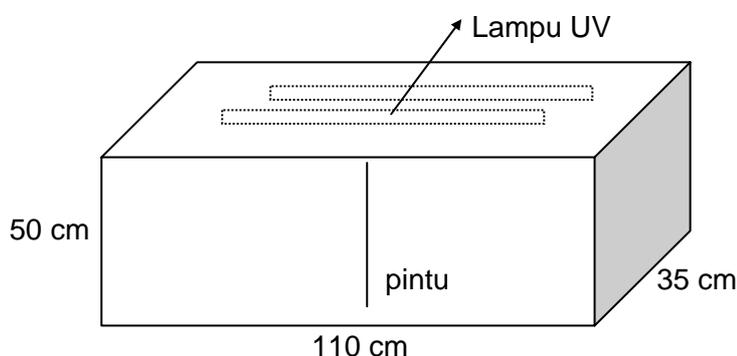
METODE

Bahan

Penelitian ini menggunakan asam humat yang diisolasi dari tanah gambut yang berasal dari Kecamatan Gambut, Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan. Semua bahan kimia yang digunakan berkualitas analitik.

Alat

Analisis Cr(VI) dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis Lambda Bio 20, buatan Perkin Elmer. Ruang penyinaran berupa kotak berukuran 110 cm x 35 cm x 50 cm, yang dilengkapi dengan 2 buah lampu UV 30 watt tipe TUV (Philips) yang memiliki panjang gelombang sekitar 254 nm. Bentuk ruang penyinaran ini diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ruang penyinaran

Cara Penelitian

• Metode subfraksinasi

Isolasi asam humat dari tanah gambut dilakukan dengan mengacu pada prosedur IHSS (*International Humic Substances Society*) (Santoso, 2001). Proses subfraksinasi asam humat (AH) dilakukan dengan menggunakan metode sentrifugasi pada kecepatan putaran yang divariasikan. Larutan AH pH 3 disentrifus pada kecepatan 2000 rpm selama 20 menit. Endapan diambil dan disebut sebagai subfraksi AH 2000. Sisa larutan yang keruh disentrifus lagi pada kecepatan 3000 rpm selama 20 menit, padatan diambil dan disebut sebagai subfraksi AH 3000. Demikian seterusnya untuk variasi rpm (*rotation per minute*): 4000, 5000 dan

6000. Setelah disentrifus 6000 rpm, ternyata supernatan masih keruh-gelap sehingga dilakukan sentrifus lagi pada kecepatan 6000 rpm selama 30 menit dan hasilnya disebut sebagai subfraksi AH 6030. Supernatan hasil sentrifus ini sudah bening sehingga tidak dilakukan subfraksinasi lebih lanjut. Dengan demikian, semakin tinggi kecepatan (rpm) berarti semakin kecil ukuran molekul karena molekul yang lebih besar yang akan lebih mudah mengendap.

• Metode Pengukuran rasio E_4/E_6

Pengukuran rasio E_4/E_6 pada penelitian ini dilakukan dengan mengikuti metode Chen dkk (1977). Sebanyak 25 mg asam humat tanpa subfraksinasi dan hasil

subfraksinasi masing-masing dilarutkan dalam 100 mL NaHCO_3 0,05N. Masing-masing larutan diukur absorbansinya pada panjang gelombang 465 dan 665 nm dengan larutan NaHCO_3 sebagai larutan blangko. Pengukuran dilakukan tiga kali (triplo).

• Metode Fotoreduksi

Suspensi ZnO dibuat dengan cara menambahkan akuades sebanyak (500-x) ml ke dalam reaktor yang berisi ZnO sebanyak 1 gram kemudian diaduk dengan pengaduk magnetik selama 15 menit. Dalam hal ini, x adalah total volume dari Cr(VI), larutan H_2SO_4 1 N, NaOH 1 N dan/atau larutan Fe(II) yang ditambahkan. Penambahan H_2SO_4 1 N atau NaOH 1 N dilakukan untuk pengaturan pH. Dengan demikian, volume total sistem suspensi adalah 500 mL. Jarak antara sumber radiasi UV dengan sampel adalah sekitar 20 cm. Suspensi disinari dengan sinar UV 60 watt dalam ruang penyinaran selama waktu tertentu tanpa dilakukan pengadukan. Berkurangnya konsentrasi Cr(VI) dalam sampel dianalisis secara

spektrofotometer UV-Vis dengan menggunakan pengompleks 1,5-difenilkarbasid pada panjang gelombang 542 nm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data rasio E_4/E_6 dari fraksi asam humat tanpa subfraksinasi (AH TS) dan asam humat hasil subfraksinasi dapat dilihat pada Tabel 1. Data pada tabel 1 menunjukkan bahwa semakin besar rpm, semakin besar rasio E_4/E_6 . Hal ini berarti semakin kecil ukuran molekul semakin besar rasio E_4/E_6 . Hasil sesuai dengan pendapat Tan (1998), bahwa nilai rasio E_4/E_6 yang lebih besar menunjukkan ukuran molekul yang lebih kecil.

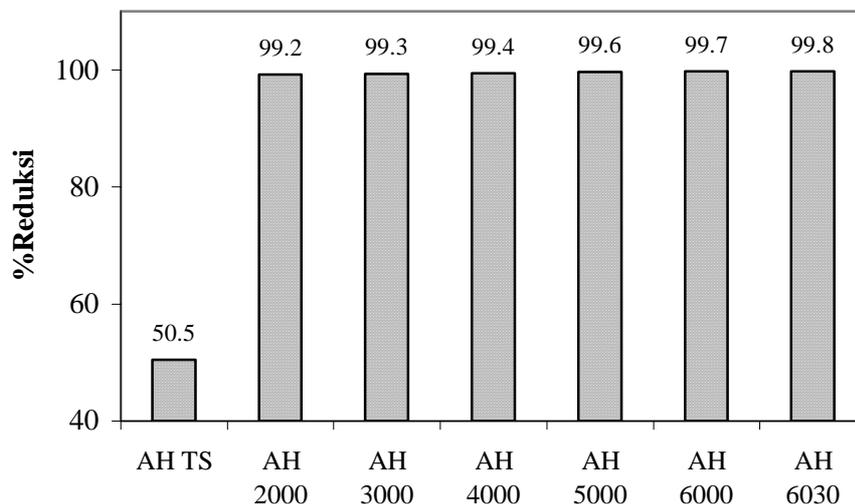
Gambar 2 memperlihatkan hasil fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO dengan sensitizer fraksi dan subfraksi asam humat. Berdasarkan data pada gambar ini tampak bahwa subfraksi asam humat (SAH) yang memiliki ukuran molekul lebih kecil merupakan sensitizer yang lebih baik daripada asam humat

Tabel 1. Rasio E_4/E_6 fraksi AH dan subfraksi AH

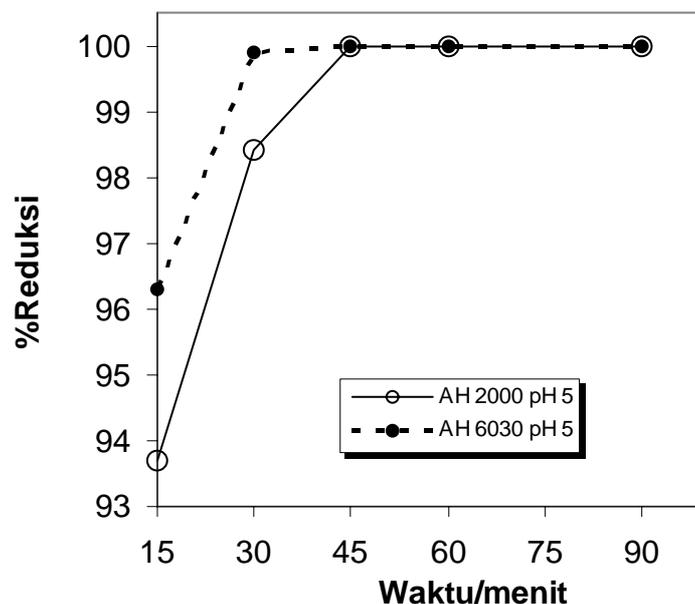
Sampel	Rasio E_4/E_6
AH TS	5,4
AH 2000	5,2
AH 3000	5,5
AH 4000	5,9
AH 5000	6,0
AH 6000	6,5
AH 6030	6,9

tanpa subfraksinasi (AH TS) yang memiliki ukuran molekul lebih besar. Menurut Cabaniss, dkk. (2000), senyawa humat yang memiliki ukuran yang lebih kecil akan bersifat lebih hidrofilik, lebih mudah diadsorpsi, dan memiliki koefisien difusi yang lebih besar. Karena proses sensitisasi dapat berlangsung jika terjadi suatu adsorpsi antara sensitizer dengan bahan semikonduktor maka sensitisasi oleh subfraksi asam fumat yang berukuran lebih kecil pada semikonduktor ZnO akan

lebih efektif daripada sensitisasi oleh asam humat yang berukuran lebih besar. Namun demikian, jika dibandingkan lebih jauh, subfraksi 2000 rpm hingga 6000 rpm memberikan hasil reduksi (%Reduksi) yang hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa subfraksinasi lanjut, misalnya subfraksinasi asam humat dari fraksi AH 2000 rpm ke fraksi 3000 rpm, tidak memberikan peningkatan sensitisasi secara signifikan untuk waktu radiasi selama 30 menit.



Gambar 2. Fotoreduksi Cr(VI) oleh ZnO dengan sensitizer fraksi dan subfraksi asam humat dengan waktu radiasi 30 menit.



Gambar 3. Fotoreduksi Cr(VI) oleh ZnO dengan sensitizer subfraksi AH 2030 dan AH 6030 pada waktu radiasi yang divariasi.

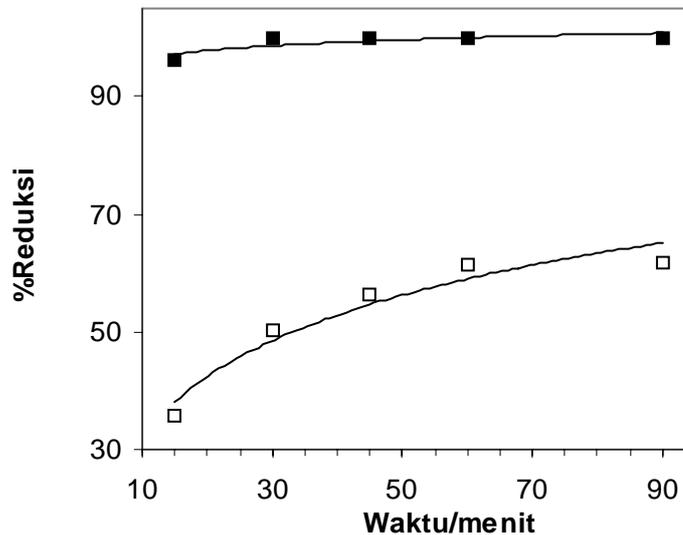
Untuk mengetahui secara lebih jelas pengaruh ukuran molekul subfraksi asam humat terhadap efektivitas sensitisasi, percobaan efektivitas sensitisasi AH 2000 dan AH 6030 pada fotoreduksi Cr(VI) oleh fotokatalis ZnO diulang dengan waktu yang divariasi dari 15 menit hingga 90 menit (Gambar 3). Data pada gambar ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu radiasi, semakin banyak hasil fotoreduksi. Pada waktu radiasi 15 menit, perbedaan efektivitas sensitisasi tampak lebih jelas, yakni AH 6030 lebih efektif daripada AH 2000 sedangkan pada waktu radiasi lebih dari 45 menit, persen fotoreduksi Cr(VI) sudah mencapai 100%. Dengan demikian jika faktor waktu turut diperhitungkan maka dapat dinyatakan bahwa subfraksi asam

humat yang lebih kecil bersifat lebih efektif sebagai sensitizer daripada subfraksi yang lebih besar.

Pengaruh pH terhadap efektivitas sensitisasi AH 6030 terhadap fotoreduksi Cr(VI) oleh ZnO diperlihatkan dalam Gambar 4. Kecenderungan data pada gambar ini memperlihatkan bahwa hasil fotoreduksi Cr(VI) pada pH 5 lebih baik daripada pada pH 1. Dua faktor yang mungkin dapat menyebabkan turunnya hasil fotoreduksi pada kondisi yang lebih asam ini adalah: (1) Pada pH yang lebih asam, ZnO akan mudah larut dan sebagian terdekomposisi menjadi Zn^{2+} (Cotton & Wilkinson, 1999) sehingga sifat aktivitas fotokatalitik ZnO berkurang, dan (2) Pada pH yang lebih asam, semakin banyak gugus karboksilat asam humat

yang terprotonasi sehingga semakin berkurang asam humat yang teradsorpsi oleh permukaan semikonduktor ZnO dan

akibatnya kemampuan asam humat untuk mensensitisasi fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO akan berkurang.



Gambar 4. Sensitisasi AH 6030 pada pH 1 (□) dan pH 5 (■).

KESIMPULAN DAN SARAN

Metode sentrifugasi dengan memvariasi kecepatan putaran per menit (*rotation per minute*, rpm) dapat digunakan untuk men-subfraksinasi asam humat pada berbagai ukuran molekul yang berbeda. Semakin kecil ukuran subfraksi asam humat, rasio E_4/E_6 semakin besar. Subfraksi asam humat, sebagaimana fraksi asam humat, dapat mensensitisasi fotoreduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) oleh semikonduktor ZnO. Subfraksi asam humat yang berukuran lebih kecil memberikan efektivitas sensitisasi yang lebih baik daripada yang berukuran lebih besar. Keasaman medium dapat mempengaruhi sensitisasi asam humat pada fotoreduksi Cr(VI) oleh

semikonduktor ZnO. Kemampuan asam humat untuk mensensitisasi fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO pada pH 5 lebih baik daripada kemampuan sensitisasinya pada pH 1.

Masih banyak parameter yang dapat mempengaruhi efektivitas sensitisasi asam humat pada fotoreduksi Cr(VI) oleh semikonduktor ZnO yang belum dikaji, misalnya pengaruh pengadukan, konsentrasi awal Cr(VI), suhu, termasuk jenis sensitizer yang lain, dan sebagainya. Oleh karena itu, berdasarkan hasil penelitian ini maka dapat disarankan perlunya mengkaji parameter-parameter tersebut jika penelitian ini akan dikembangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Proyek Hibah Pekerti (Penelitian Kerjasama antar Perguruan Tinggi), Proyek Peningkatan Penelitian Pendidikan Tinggi, Ditjen Dikti Depdiknas, yang mendanai penelitian ini melalui kontrak nomor: 317/P4T/DPPM/PHP/IV/2003.

DAFTAR PUSTAKA

- Aiken, G.R., McKnight, D.M., Wershaw, R.L., and MacCarthy, P., 1985, "Humic Substance in Soil, Sedimen and Water: Geochemistry, Isolation and Characterization", John Wiley & Sons, New York.
- Buerge, I.J., and Hug, S.J., 1998, "Influence of Organic Ligan on Chromium(VI) Reduction by Iron(II)", *Environ. Sci. Technol.*, **32**: 2092-2099.
- Cabaniss, S.E., Zhou, Q., Maurice, P.A., Chin, Y.P., and Aiken, G.R., 2000, "A Log Normal Distribution Model for The Molecular Weight of Aquatic Fulvic Acids", *Environ. Sci. Technol.*, **34**: 1103-1109.
- Chen, Y., Senesi, N., and Schnitzer, M., 1997, "Information Provided on Humic Substances by E_4/E_6 Ratios", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**: 352-358.
- Cotton, F.A. and Wilkinson, G., 1999, "Advanced Inorganic Chemistry", 6th ed., John Wiley & Sons, New York.
- Eary, L.E. and Rai, D., 1991, "Chromate Reduction by Subsurface Soils Under Acidic Conditions", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**, 676-683.
- Gaffney, J.S., Marley, A.A. and Clark, S.B., 1996, "Humic and Fulvic Acids: Isolation, Structure and Environmental Role", American Chemical Society, Washington D.C.
- Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Choi, W., and Bahnemann, D.W., 1995, "Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis", *Chem. Rev.*, **95**: 69-96.
- Kozuh, N., Štupar, J., and Gorenc, B., 2000, "Reduction and Oxidation Processes of Chromium in Soils", *Environ. Sci. Technol.*, **34**: 112-119.
- Nriagu, J.O. and Simmons, M.S.(eds), 1994, "Environmental Oxidants", Volume 28, John Willey & Sons, Inc., New York.
- Santoso, U.T., 2001, "Kajian Kinetika Reduksi dan Fotoreduksi Cr(VI) oleh Asam Humat", Tesis S-2, Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Santoso, U.T., Herdiansyah, Santosa, S.J. dan Siswanta, D., 2003, "Kajian Pemanfaatan Asam Humat Tanah Gambut sebagai Sensitizer Reduksi Cr(VI) Menjadi Cr(III) Secara Fotokatalitik", *Prosiding Seminar Nasional Kimia XIII*, FMIPA UGM, Yogyakarta, 4 Oktober 2003.
- Santoso, U.T., Herdiansyah, Trisunaryanti, W. dan Santosa, S.J., 2004, "Study on The Rate of Reduction of Cr(VI) to Cr(III) By Humic Acid Using Continuum Multicomponent Model", *Indonesian Journal of Chemistry*, Vol. **4**, No. 1, pp: 12-25.
- Sperling, M., Xu, S. and Welz, B., 1992, "Determination of Chromium(III) and Chromium(VI) in Water Using Flow Injection on-Line Preconcentration with Selective Adsorption on Activated Alumina and Flame Atomic Adsorption Spectrometric Detection", *Anal. Chem.*, **64**: 3101-3108.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996, "Aquatic Chemistry: Chemical

- Equilibria and Rates in Natural Waters", third edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Svehla, G., 1990, "Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro" (terjemahan Setiono, L. dan Pudjaatmaka, A.H.), jilid 2, PT. Kalman Media Pustaka, Jakarta.
- Sylvester, P., Rutherford, L.A., Gonzalez-martin, A., Kim, J., Rapko, B.M., and Lumetta, G.J., 2001, "Ferrate Treatment for Removing Chromium from High-Level Radioactive Tank Waste", *Environ. Sci. Technol.*, **35**: 216-221.
- Tan, K.H., 1998, "Dasar-dasar Kimia Tanah" (terjemahan), Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Wielinga, B., Mizuba, M.M., Hansel, C.M., and Fendorf, S., 2001, "Iron Promoted Reduction of Chromate by Dissimilatory Iron-Reducing Bacteria", *Environ. Sci. Technol.*, **35**: 522-527.
- Witbrodt, P.R. and Palmer, C.D., 1995, "Reduction of Cr(VI) in the Presence of Excess Soil Fulvic Acid", *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 255-263.
- Witbrodt, P.R. and Palmer, C.D., 1996, "Effect of Temperature, Ionic Strength, Background Electrolytes, and Fe(II) on the Reduction of Hexavalent Chromium by Soil Humic Substances", *Environ. Sci. Technol.*, **30**: 2470-2477.