

ADSORPSI MULTI LOGAM Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) DAN Ni(II) PADA HIBRIDA ETILENDIAMINO-SILIKA DARI ABU SEKAM PADI

Dyah Purwaningsih

Staff Jurdik Kimia FMIPA UNY

ABSTRAK

Dalam penelitian ini telah dipelajari adsorpsi multi logam Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) dan Ni(II) pada silica gel (SG) dan hibrida etilendiamino-silika (HDS) yang dihasilkan dari penelitian sebelumnya (Purwaningsih, 2007). Adsorpsi Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) dan Ni(II) dilakukan dengan sistem batch selama 60 menit dengan variasi konsentrasi ion logam. Ion logam yang teradsorpsi dihitung dari selisih konsentrasi sebelum dan sesudah adsorpsi yang dianalisis dengan AAS. Data yang dihasilkan, digunakan untuk menentukan parameter termodinamika dengan model isotherm adsorpsi Langmuir.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jika dibandingkan SG, kapasitas adsorpsi pada HDS untuk Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) mengalami peningkatan, sedangkan untuk Cu(II) dan Pb(II) mengalami penurunan. Data energi adsorpsi ion logam secara umum relatif rendah untuk Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) dan Ni(II) adalah 22,36; 22,70; 13,36; 23,45; dan 13,90 kJ/mol, yang mengindikasikan bahwa interaksi antara HDS dengan ion logam terjadi melalui fisisorpsi untuk Cr(III) dan Ni(II) dan kemisorpsi untuk Ag(I), Pb(II) dan Cu(II).

Kata kunci: adsorpsi, multi logam, hibrida etilendiamino-silika

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan oleh logam berat menjadi masalah yang cukup serius seiring dengan penggunaan logam berat dalam bidang industri yang semakin meningkat. Logam berat banyak digunakan karena sifatnya yang dapat menghantarkan listrik dan panas serta dapat membentuk logam paduan dengan logam lain (Raya, 1998).

Efek logam berat dapat berpengaruh langsung hingga terakumulasi pada rantai makanan walaupun pada konsentrasi yang sangat rendah (Fahmiati, 2004). Logam berat tersebut dapat ditransfer dalam jangkauan yang sangat jauh sehingga akhirnya berpengaruh terhadap kesehatan manusia walaupun dalam jangka waktu yang cukup lama dan jauh dari sumber pencemar. Beberapa logam berat yang dapat mencemari lingkungan dan bersifat toksik adalah krom (Cr), perak (Ag), kadmium (Cd), timbal (Pb), seng (Zn), merkuri (Hg), tembaga (Cu), besi (Fe), molibdat (Mo), nikel (Ni), timah (Sn), kobalt (Co) dan unsur-unsur yang termasuk ke dalam logam ringan seperti arsen (As), aluminium (Al) dan selenium (Se).

Penanganan limbah logam berat telah banyak dilakukan untuk mengatasi pencemaran dan resiko keracunan bagi makhluk hidup. Proses adsorpsi diharapkan dapat mengambil ion-ion logam berat dari perairan. Teknik ini lebih menguntungkan daripada teknik yang lain dilihat dari segi biaya yang tidak begitu besar serta tidak adanya efek samping zat beracun (Blais dkk, 2000). Metode adsorpsi umumnya berdasar interaksi ion logam dengan gugus fungsional yang ada pada permukaan adsorben melalui interaksi pembentukan kompleks dan biasanya terjadi pada permukaan padatan yang kaya gugus fungsional seperti -OH, -NH, -SH dan -COOH (Stum dan Morgan, 1996). Pada proses adsorpsi mencakup dua (2) hal penting yaitu kinetika adsorpsi dan termodinamika adsorpsi. Kinetika adsorpsi meninjau proses adsorpsi berdasarkan laju adsorpsi sedangkan pada termodinamika adsorpsi ditinjau

tentang kapasitas adsorpsi dan energi adsorpsi yang terlibat dalam proses adsorpsi.

Di Indonesia sedang dikembangkan teknik pengolahan sekam padi sebagai adsorben untuk membantu mengatasi masalah limbah logam berat tersebut. Sekam padi merupakan limbah agro industri yang melimpah di Indonesia terutama di pulau Jawa. Abu sekam padi diperoleh melalui pembakaran sekam padi. Sekam padi sendiri merupakan limbah pertanian yang cukup banyak dihasilkan yaitu untuk setiap 50 juta ton padi yang diproduksi dihasilkan 13 juta ton sekam padi per tahun dengan pemanfaatan yang masih sangat minimal. Abu sekam padi yang berasal dari pembakaran sekam padi mengandung silika kadar tinggi yaitu 87-97% serta sedikit alkali dan alkali tanah sebagai unsur minor. Tingginya kandungan silika abu sekam padi ini yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku material berbasis silika seperti silika gel. Silika gel dapat disintesis melalui proses sol-gel dengan melakukan kondensasi larutan natrium silikat dalam suasana asam.

Silika gel termodifikasi material anorganik dan juga gugus fungsional organik dewasa ini telah menjadi subyek penelitian yang menarik dengan berbagai kemungkinan aplikasinya. Kegunaan dari material sangat tergantung pada sifat permukaannya. Modifikasi permukaan secara kimia biasanya dilakukan melalui pengikatan organosilan yang sesuai dengan pengikatan ujung gugus fungsional yang diinginkan. Silika gel merupakan substrat yang menarik untuk organosilanisasi sebab permukaannya yang didominasi gugus hidroksil dapat bereaksi cepat dengan agen organosilan. Ikatan antara Si-O-Si-C yang terbentuk mempunyai sifat ganda dengan stabilitas kimia yang tinggi. Kualitas dan daya tahan dari material organosilan tergantung terutama pada sifat alamiah dari ikatan dengan permukaannya (Cestari, 2000). Prinsip dasar dari proses sol-gel ini adalah perubahan atau transformasi dari spesies Si-OR dan Si-OH menjadi siloksan (Si-O-Si). Silika gel yang mempunyai gugus silanol bebas (-Si-OH) dan gugus siloksan (-Si-O-Si-) diketahui mampu mengadsorpsi ion logam keras. Purwaningsih (2007) telah berhasil mensintesis silika gel (SG) dan hibrida etilendiamino-silika (HDS) dan melakukan adsorpsi terhadap Cr(III) dan Cr(VI). Dari hasil penelitian ternyata terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi untuk Cr(III) dan Cr(VI) pada HDS bila dibandingkan dengan SG.

Penelitian ini mempelajari selektivitas adsorpsi ion-ion multi logam Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II), dan Ni(II) pada SG dan HDS. Pada HDS, selain gugus silanol dan siloksan terdapat tambahan gugus aktif yaitu gugus amina (-NH₂) dari senyawa organik aktif yang diimobilisasikan. Berdasarkan sifat kebasaaan Lewis dari gugus amina (-NH₂) dengan logam-logam Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) dan Ni(II) maka diharapkan HDS yang dihasilkan dapat digunakan sebagai adsorben yang selektif mengadsorpsi logam-logam tersebut.

METODOLOGI PENELITIAN

a. Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: Silika Gel (SG), Hibrida etilendiamino-silika (HDS), Ni(NO₃)₂, AgNO₃, Pb(NO₃)₂, Cr(NO₃)₂.9H₂O, Cu(NO₃)₂.3H₂O, akuades.

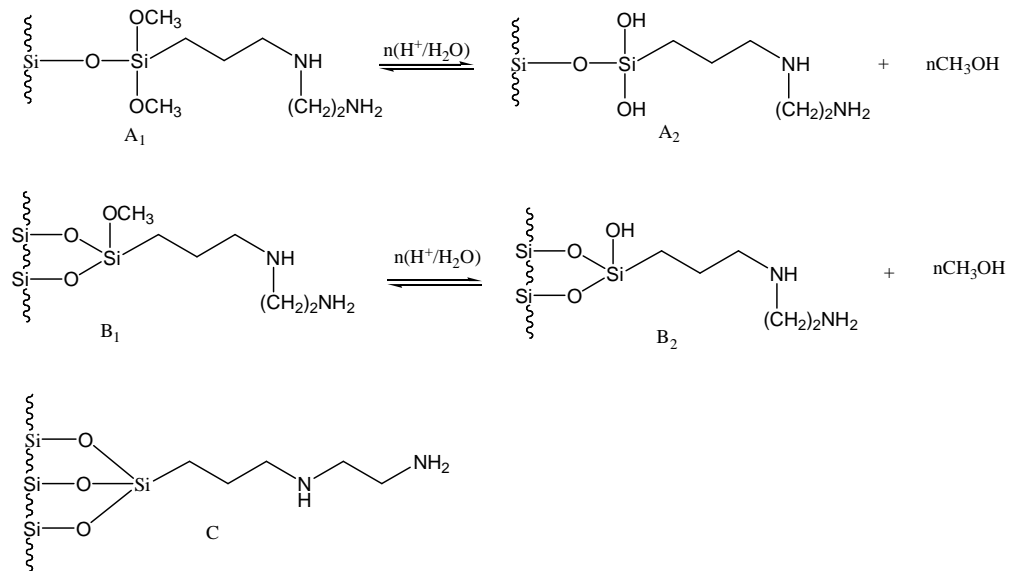
b. Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi timbangan analitik, pemusing, pH meter, pengaduk magnet, stirring Hot Plate, alat-alat gelas (beker gelas, pipet volume, pro pipet, labu takar, gelas ukur, dan gelas arloji) dan peralatan plastik (gelas, sendok, corong, dan botol plastik). Untuk analisis hasil adsorpsi digunakan spektrofotometer serapan atom (AAS).

c. Prosedur Penelitian

Sebanyak 50 mg HDS ditempatkan dalam gelas plastik. Adsorpsi dilakukan dalam sistem batch dengan cara menambahkan 50 mL larutan multilogam Cr(III), Pb(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) dengan variasi konsentrasi 20, 60, 100, 140, 180, 220, 260, 300 mg/L. Campuran adsorben dan larutan logam diaduk dengan pengaduk magnet selama 60 menit. Selanjutnya larutan disentrifuse dengan kecepatan 2000 rpm untuk memisahkan supernatan dan adsorben. Masing-masing supernatan dianalisis dengan spektrometer serapan atom (AAS) untuk menentukan jumlah ion logam yang teradsorpsi. Hal yang sama dilakukan untuk SG terhadap larutan multi logam tersebut.

PEMBAHASAN



Gambar 1. Model Kemungkinan Variasi Permukaan Hibrida Etilendiamino-Silika

Dalam bahasan ini dibandingkan sifat termodinamika adsorpsi SG dan HDS dengan teknik *batch* terhadap ion campuran multilogam (Ag(I), Ni(II), Cu(II), Pb(II), dan Cr(III)). Pembahasan meliputi penentuan kapasitas dan energi adsorpsi. Adsorpsi dilakukan dengan mencampurkan larutan multilogam (Ag(I), Ni(II), Cu(II), Pb(II), dan Cr(III)) pada variasi konsentrasi dengan 50 mg adsorben (SG dan HDS) selama 60 menit pada temperatur kamar (25 °C). Waktu ini sesuai dengan hasil yang dilaporkan oleh Oscik (1982) yang menyatakan bahwa kesetimbangan adsorpsi ion logam pada berbagai adsorben umumnya tercapai setelah lebih kurang satu jam. Penentuan kapasitas adsorpsi menggunakan model isoterm Langmuir didasarkan pada kurva isoterm adsorpsi yang menghubungkan konsentrasi ion logam kesetimbangan ($\mu\text{mol/L}$) pada adsorben (SG dan HDS) dengan jumlah ion logam yang teradsorpsi ($\mu\text{mol/g}$).

Ni(II), Cu(II), Pb(II), dan Cr(III)) semakin naik dengan meningkatnya konsentrasi ion logam. Pada konsentrasi yang relatif tinggi kenaikan konsentrasi ion logam tidak lagi disertai dengan kenaikan adsorpsi multilogam secara signifikan pada adsorben (SG dan HDS) di mana kurva cenderung konstan (horizontal) dan bahkan ada yang mengalami penurunan. Kecenderungan tersebut seperti terlihat pada Ag(I) yang menunjukkan bahwa pada konsentrasi yang relatif tinggi, situs aktif

adsorben (SG dan HDS) telah jenuh oleh Ag(I) dan terjadi penyerapan tunggal (*monolayer adsorption*) yang saling berkompetisi dalam larutan multilogam.

Oscik (1982) menjelaskan bahwa isoterm Langmuir adalah model adsorpsi isotermal yang menggunakan asumsi bahwa permukaan adsorben mempunyai sejumlah situs aktif, setiap situs aktif dapat mengadsorpsi satu molekul adsorbat dan bila setiap situs aktif yang telah mengadsorpsi adsorbat maka adsorben sudah tidak dapat mengadsorpsi lagi. Adsorpsi secara kimia terjadi karena adanya interaksi antara situs aktif adsorben dengan adsorbat yang melibatkan ikatan kimia. Interaksi kimia hanya terjadi pada lapisan penyerapan tunggal (*monolayer adsorption*) permukaan dinding sel adsorben (Oscik, 1982).

Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan antara zat teradsorpsi dalam sejumlah tertentu berat adsorben (SG dan HDS) dalam satuan keseimbangan. Proses adsorpsi yang terjadi antara ion logam dan adsorben (SG dan HDS) diasumsikan mengikuti pola isoterm Langmuir, sehingga penentuan kapasitas adsorpsi dan energi adsorpsi sebagai kajian termodinamika digunakan persamaan Langmuir. Isoterm adsorpsi Langmuir dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{C}{m} = \frac{1}{bK} + \frac{1}{b}C$$

di mana C adalah konsentrasi kesetimbangan, m adalah jumlah zat teradsorpsi per gram adsorben, b adalah kapasitas adsorpsi dan K adalah konstanta kesetimbangan. Dengan memplotkan data yang diperoleh dari hasil penelitian ke grafik C/m dengan C menghasilkan garis lurus dengan slop 1/b dan intersep 1/bK. Dari grafik C/m dengan C dapat ditentukan parameter-parameter isotherm adsorpsi Langmuir. Energi total adsorpsi per mol dapat dihitung dari persamaan :

$$E_{ads} = -\Delta G^{\circ}_{ads} = RT \ln K$$

K adalah tetapan kesetimbangan adsorpsi yang diperoleh dari persamaan Langmuir dan energi total adsorpsi sama dengan energi bebas Gibbs (Oscik, 1982). Tabel 2 menunjukkan nilai hasil perhitungan kapasitas adsorpsi (b) dan energi adsorpsi (E) pada adsorben SG dan HDS.

Tabel 1. Parameter termodinamika adsorpsi multilogam pada adsorben SG dan HDS

Adsorben	Ion logam	Parameter isotherm adsorpsi Langmuir			
		b (μmol/g)	K (L/mol) x 10 ³	E (kJ/mol)	R ²
SG	Ni(II)	31,98	553,67	33,20	0,98
	Pb(II)	34,90	26,41	25,20	0,94
	Cu(II)	75,29	20,19	23,77	0,92
	Ag(I)	19,45	8,75	19,68	0,98
	Cr(III)	46,71	12,69	22,89	0,98
HDS	Ni(II)	45,80	0,38	13,90	0,96
	Pb(II)	18,21	5,08	22,70	0,95
	Cu(II)	35,67	12,61	23,45	0,96
	Ag(I)	153,85	5,23	22,36	0,94
	Cr(III)	62,19	0,57	13,36	0,96

Kapasitas adsorpsi. Dari Tabel 1 dapat dilihat hubungan antara kapasitas adsorpsi dengan logam teradsorpsi dari larutan multilogam (Ag(I), Ni(II), Cu(II), Pb(II), dan Cr(III)). Kapasitas adsorpsi logam pada SG dan HDS sangat bervariasi. Setelah dilakukan modifikasi SG dengan EDAPTMS melalui proses sol-gel menjadi HDS secara keseluruhan kapasitas adsorpsi untuk Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) mengalami peningkatan, sedangkan Cu(II) dan Pb(II) mengalami penurunan.

Peningkatan kapasitas adsorpsi Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) disebabkan oleh bertambahnya jenis dan jumlah situs aktif (gugus amin) yang berperan dalam adsorpsi untuk berinteraksi dengan ion logam karena adanya proses modifikasi seperti yang terlihat pada Ag(I). Atom N dari gugus etilendiamin

(-NH₂) berfungsi sebagai donor pasangan elektron (basa Lewis) yang kuat dan akan memberikan ikatan koordinasi yang kuat antara atom N dengan Ag(I), sehingga berada pada lapisan terdalam dari ke-5 ion logam lainnya yang saling terhidrasi dalam berkompetisi membentuk lapisan multilayer. Martell dan Hancock (1996) menjelaskan bahwa dalam larutan air ada dua lapisan koordinasi yang dikelilingi oleh molekul H₂O yaitu lapisan koordinasi dalam dan luar, pada lapisan koordinasi dalam ikatan yang terjadi antara ion logam dengan atom O dari molekul H₂O adalah ikatan koordinasi sedangkan pada lapisan koordinasi luar ikatan yang terjadi antara atom O dari molekul H₂O pada lapisan luar dengan atom H dari molekul H₂O pada lapisan dalam adalah ikatan hidrogen.

Kapasitas adsorpsi dari HDS untuk mengadsorpsi ion logam Cr(III) dalam larutan multilogam juga meningkat dan Cr(III) stabil atau dominan di urutan kedua setelah pada SG. Hal ini disebabkan karena Cr(III) merupakan logam keras yang cocok untuk berikatan dengan N dari gugus -NH₂ yang bersifat basa keras sesuai dengan prinsip HSAB (*Hard Soft Acids and Bases*), sehingga HDS yang telah dimodifikasi itu dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion logam terlarut yang ditunjukkan dengan peningkatan kapasitas adsorpsi dari Cr(III) dan berada di urutan kedua setelah Ag(I). Dapat dimungkinkan juga akan terjadi ikatan antara situs aktif dari HDS (atom N dari gugus -NH₂) dengan atom H dari H₂O yang terikat pada ion logam Cr(III) dalam medium sehingga terjadi interaksi untuk membentuk ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen yang terbentuk ini relatif lemah jika dibandingkan dengan ikatan kovalen (tunggal, rangkap dan koordinasi) atau ikatan ion (Huheey, 1993), maka harga kapasitas Cr(III) berada di urutan kedua setelah Ag(I). Hal yang sama terjadi pada ion Ni(II).

Untuk Cu(II) dan Pb(II) terjadi penurunan kapasitas adsorpsi. Hal ini dapat dimungkinkan karena Cu(II) dan Pb(II) dalam larutan membentuk ion terhidrat dengan molekul air menjadi [Cu(H₂O)₆]²⁺ dan [Pb(H₂O)₆]²⁺ sehingga pada permukaan HDS yang mempunyai situs aktif (gugus -NH₂) akan berinteraksi secara tidak langsung membentuk ikatan hidrogen, ikatannya relatif lemah maka Cu(II) dan Pb(II) teradsorpsi lebih sedikit dibandingkan dengan Ni(II), Cr(III) dan Ag(I).

Dari hasil kapasitas adsorpsi yang diperoleh maka dapat disimpulkan bahwa adsorpsi kation multilogam (Ag(I), Ni(II), Cu(II), Pb(II), dan Cr(III)) yang dilakukan secara simultan terjadi kompetisi antara kation logam dalam memperebutkan sisi aktif dalam permukaan adsorben (SG dan HDS) yang dapat mempengaruhi kemampuan adsorpsinya terhadap ion logam terlarut. Harga kapasitas adsorpsi sangat bervariasi, jika dibandingkan dengan SG pada HDS terjadi kenaikan kapasitas adsorpsi untuk Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) sedangkan untuk Cu(II) dan Pb(II) mengalami penurunan.

Energi adsorpsi. Dari Tabel 2 terlihat bahwa energi adsorpsi dalam larutan multilogam pada SG yang secara berurutan adalah Ni(II) > Pb(II) > Cu(II) > Cr(III) > Ag(I), dan pada HDS yang secara berurutan adalah Cu(II) > Pb(II) > Ag(I) > Cr(III) > Ni(II). Berdasarkan data tersebut maka pada SG energi adsorpsi logam Ni(II), Pb(II), Cu(II), Cr(III) dan Ag(I) yang secara berurutan yaitu 33,20; 25,20; 23,77; 19,68 dan 22,89 kJ/mol, dapat dikategorikan terjadi adsorpsi secara kimia (kemisorpsi) yang melibatkan ikatan langsung antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Seperti yang dijelaskan oleh Adamson (1997) bahwa adsorpsi kimia (kemisorpsi) apabila energi adsorpsi lebih dari 20,92 kJ/mol.

Setelah dilakukan modifikasi silika melalui proses sol-gel menjadi HDS, secara keseluruhan energi adsorpsi dari ion logam mengalami penurunan. Hal ini diduga bahwa pada permukaan HDS yang terdapat atom N dari gugus $-NH_2$ berinteraksi secara tidak langsung dengan atom H dari H_2O

yang terikat pada ion logam dalam medium air, hingga membentuk ikatan hidrogen. Interaksi secara tidak langsung ini menyebabkan ikatan antara atom H dari H_2O yang terikat pada ion logam dengan situs aktif dari HDS (atom N dari gugus $-NH_2$) relatif lemah maka energi yang dilepaskan menjadi kecil, sehingga energi adsorpsi logam Cu(II), Pb(II), Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) mengalami penurunan.

Secara umum, pada HDS terlihat bahwa energi adsorpsi Cu(II), Pb(II), dan Ag(I), yang secara berurutan lebih besar yaitu 23,45; 22,70 dan 22,36 kJ/mol, dapat dikategorikan terjadi adsorpsi secara kimia (kemisorpsi) yang melibatkan ikatan langsung antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Ion Cr(III) dan Ni(II) yang secara berurutan memiliki nilai energi adsorpsi lebih kecil yaitu 13,36 dan 13,90 kJ/mol sehingga keduanya dapat dikategorikan terjadi adsorpsi secara fisik (fisorpsi). Akan tetapi untuk adsorpsi Cr(III) dan Ni(II) kemungkinan terjadi secara kimia dan fisik, hanya saja interaksi fisik lebih dominan dibandingkan interaksi secara kimia. Hal ini dimungkinkan karena selain adsorpsi secara kimia terdapat juga kontribusi adsorpsi secara fisik, sebab pada kenyataannya hampir tidak semua adsorpsi hanya mengikuti satu jalur mekanisme saja (Nuryono dkk. 2004).

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kajian adsorpsi multilogam pada hibrida etilendiamino-silika menunjukkan bahwa urutan kapasitas adsorpsi adalah Ag(I), Cr(III), Ni(II), Cu(II) dan Pb(II)
2. Jika dibandingkan pada silika gel (SG), kapasitas adsorpsi pada HDS untuk Ag(I), Cr(III) dan Ni(II) mengalami peningkatan, sedangkan untuk Cu(II) dan Pb(II) mengalami penurunan.
3. Data energi adsorpsi ion logam secara umum relatif rendah untuk Ag(I), Pb(II), Cr(III), Cu(II) dan Ni(II) adalah 22,36; 22,70; 13,36; 23,45; dan 13,90 kJ/mol, yang mengindikasikan bahwa interaksi antara HDS dengan ion logam terjadi melalui fisorpsi untuk Cr(III) dan Ni(II) dan kemisorpsi untuk Ag(I), Pb(II) dan Cu(II).

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Agus Prabowo, Sri Wahyuningsih dan Agus Rosyid yang telah membantu pengumpulan data dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A.W., 1990, Physical Chemistry of Surface, 5th ed., John Wiley and Sons Inc., Toronto
- Airoldi, C., dan Arakaki, L.N.N., 2001, Immobilization of Ethylenesulfide on Silica Surface Through Sol-Gel Process and Some Thermodynamic Data of Divalent Cation Interaction, *Polyhedron*, 20, 929-936
- Barber, S., and Barber, C.B., 1980, Rice Bran Chemistry and Technology, Avi. Publ. Co. Westport, Connecticut, 790-851.
- Blais, J.F., Dufresne, B., dan Mercier, G., 2000, State of The Art of Technologies for Metal Removal from Industrial Effluents, *Rev. Sci. Eau* 12 (4), 687-711
- Brinker, C.J., dan Scherer, W.J., Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing, Academic Press, San Diego.
- Cestari, A.R., Viera, E.F.S., Simoni, J.d.A., dan Airoldi, C., 2000, Thermochemical Investigation on The Adsorption of Some Divalent Cations on Modified Silicas obtained from Sol-Gel Process, *Thermochemica Acta*, 348, 25-31
- Darmono, 1995, Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup, UI Press, Jakarta
- Enymia, Suhanda dan Sulistarihani, N., 1998, Pembuatan Silika Gel Kering dari Abu Sekam Padi Untuk Bahan Pengisi Karet Ban, *Jurnal Keramik dan Gelas Indonesia*, 7, 1-9.
- Foschiera, J.L., Pizzolato, T.M., dan Benvenuti, E.V., 2001., FTIR Thermal Analysis on Organofunctionalized Silica Gel, *J. Braz. Chem. Soc.*, 12(2), 159-164.
- Huheey, J. E., 1993, *Inorganic Chemistry: Principle of Structure and Reactivity*, 4th Edition, Harper Collins College Publishers, New York.
- Jal, P.K., Patel, S., dan Misra, B.K., 2004, Chemical Modification of Silica by Immobilization of Functional Groups for Extractive Concentration of Metal Ions, *Talanta*, 65, 1005-1028.
- Jansen, K., 1992, Zeolite Crystal Growth and the Structure on an Atomic Scale, Disertasi, Deen Haag.
- Kamath, S.R., dan Proctor, A., 1998, Silica Gel from Rice Hull Ash: Preparation and Characterization, *Cereal Chemistry*, 75, 484-487.
- Nuzula, F., 2004, Adsorpsi Cd^{2+} , Ni^{2+} dan Mg^{2+} pada 2- Merkapto Benzimidazol yang Diimmobilisasikan pada Silika Gel, Tesis, FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Oscik, J., 1982. Adsorption, Ellis Horwood Ltd. England.
- Purwaningsih, D., Narsito, Nuryono., 2007, Interaksi Cr(III) dan Cr(VI) pada

Gugus Etilendiamin yang Terimobilisasi Silika Melalui
Proses Sol-Gel, Tesis, FMIPA, UGM, Yogyakarta.

- Raya, I., 1998, Studi Kinetika Adsorpsi Ion Logam Al(III) dan Cr (III) pada Adsorben chaetoceros calcitrans yang Terimobilisasi pada Silika Gel, Thesis, FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Scott, R.P.W., 1993, Silica Gel and Bonded Phase, John Willey & Sons Ltd., Chichester.
- Shaw, D.J., 1980, Introduction to Colloid and Surface Chemistry, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Stum W, dan Morgan, J.J., 1996, Aquatic Chemistry, John Wiley and Sons, New York.
- Suhendrayatna, 2001, Heavy Metal Bioremoval by Microorganism: A Literature Study, Sinergi Forum PPI Tokyo Institute of Technology, Tokyo.
- Terrada, K., Matsumoto, K., dan Kimora, H., 1983, Sorption of Copper (II) by Some Complexing Agents Loaded on Various Support, Anal. Chim. Acta, 153, 237-247.
- Zuryati, U.K., 2005, Pembuatan Silika Gel dari Abu Sekam Padi Menggunakan Asam Sitrat dan Asam Klorida serta Karakterisasinya, Skripsi, FMIPA UGM, Jogjakarta.