

MODIFIKASI SILIKA GEL DENGAN GUGUS SULFONAT UNTUK MENINGKATKAN KAPASITAS ADSORPSI Mg(II)

Choiril Azmiyawati

Laboratorium Kimia Anorganik Jurusan Kimia

Fakultas MIPA Universitas Diponegoro Semarang 50275

ABSTRAK

Sintesis silika gel termodifikasi gugus sulfonat telah dilakukan melalui interaksi silika gel dengan larutan γ -glisidoksipropiltrimetoksisilan pada temperatur 90 °C selama 30 menit. Produk yang diperoleh diinteraksikan dengan garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat menghasilkan adsorben. Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan spektrofotometer infra-merah. Ketiga adsorben yang diperoleh digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi Mg(II) pada berbagai pH. Adsorpsi dilakukan dalam sistem batch dan jumlah ion logam teradsorpsi dihitung berdasarkan ion logam tersisa dalam larutan yang diukur menggunakan spektroskopi serapan atom. Adanya interaksi antara silika gel G tipe-60 dan garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat ditunjukkan melalui spektrometer infra-merah pada bilangan gelombang di daerah 1458 cm^{-1} untuk S=O dari gugus sulfonat dan hilangnya bilangan gelombang di daerah 900 cm^{-1} dari gugus epoksi. Kapasitas adsorpsi Mg(II) tertinggi adalah $4,9 \times 10^{-5}$ mol/gram terjadi pada pH 5.

Kata kunci: adsorpsi, silika gel, gugus sulfonat.

MODIFICATION SILICA GEL WITH SULFONIC GROUP TO INCREASE ADSORPTION CAPACITY OF Mg (II)

ABSTRACT

Synthesis of silica gel modified sulfonic group was carried out by interaction silica gel G type-60 with γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane at 90°C for 30 minutes. The product was interacted with monosodium salt of 4-amino-5-hydroxy-2,7-naphthalene-disulfonic acid to yield adsorbent. The adsorbent characterization was done by IR spectrometry. The adsorbent was used to determine the adsorption capacity of Mg(II) at various pH. Adsorption was conducted in a batch system and the amount of adsorbed metal ions was calculated based on metal ions remaining in the solution measured by atomic adsorption spectrometry (AAS). Results showed that interaction between silica gel G type-60 and monosodium salt of 4-amino-5-hydroxy-2,7-naphthalenedisulfonic acid was indicated by IR spectra at 1458 cm^{-1} due to S=O of sulfonic and losing IR spectra at 900 cm^{-1} due to opening epoxy groups. The highest adsorption capacity was $4,9 \times 10^{-5}$ mol/gram occur at pH 5.

Key words: adsorption, silica gel, sulfonic groups.

PENDAHULUAN

Secara alamiah, logam dan mineral hampir selalu ditemukan dalam perairan. Kandungan logam dalam air ditentukan oleh asal sumber air dan jenis air. Misalnya, logam Ca banyak ditemukan dalam air laut sebagai garam karbonat (CaCO_3). Kadmium dalam air tawar biasanya dalam bentuk CdCO_3 . Simkiss dalam Darmono (1995) menyatakan bahwa logam-logam ringan, seperti Na, K, Ca, dan Mg merupakan logam yang keterlibatan ion logamnya dalam makhluk hidup menyangkut

proses fisiologis. Logam berat seperti Zn, Cd, Hg, dan Pb merupakan logam yang terlibat dalam proses enzimatik dan dapat menimbulkan polusi.

Dalam proses kehidupan makhluk hidup, logam dibedakan menjadi dua, yaitu logam esensial dan logam nonesensial. Logam esensial adalah logam yang sangat membantu dalam proses fisiologis makhluk hidup. Logam nonesensial adalah logam yang peranannya dalam tubuh makhluk hidup belum diketahui. Apabila kandungan logam nonesensial tinggi dalam

jaringan tubuh makhluk hidup akan dapat merusak organ-organ tubuh makhluk yang bersangkutan. Beberapa logam yang bersifat esensial, misalnya kalsium (Ca), fosfor (P), dan magnesium (Mg). Ketiga logam itu diperlukan dalam pembentukan tulang pada manusia dan pembentukan kutikula/sisik pada ikan dan udang. Sekitar 70% dari total Mg dalam tubuh ditemukan dalam tulang dan sebagian ditemukan dalam jaringan lunak dan cairan jaringan. Magnesium juga berperan penting dalam aktivitas enzim, terutama enzim fosfat transferase, dekarboksilase, dan asil transferase. Kekurangan logam-logam esensial dalam tubuh hewan atau manusia dapat mengakibatkan penyakit defisiensi. Penyakit ini dapat mengakibatkan penderita terhambat pertumbuhannya, mengalami gangguan reproduksi, dan peka terhadap penyakit infeksi, bahkan dapat mengalami kematian.

Dalam praktik dan industri, silika gel banyak digunakan sebagai adsorben, desikan, pengisi pada kromatografi (sebagai fasa diam), dan sebagai isolator. Silika gel yang memiliki gugus silanol bebas dan gugus siloksan diketahui mampu mengadsorpsi ion logam keras, seperti Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , dan Fe^{3+} . Meskipun demikian, kemampuan gugus silanol mengikat ion logam relatif kecil, sehingga kurang efektif bila digunakan sebagai adsorben logam alkali dan alkali tanah. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efektivitasnya silika gel perlu dimodifikasi.

Penelitian tentang silika gel termodifikasi telah banyak dilakukan. Pada umumnya, modifikasi silika gel dilakukan melalui cara impregnasi dengan suatu senyawa organik seperti DMT (2,5-dimerkapto-1,3,4-tiadiazol), MBT (2-merkaptobenzotiazol), dan MBI (2-merkaptobenzoimidazol). Secara umum penelitian itu sampai pada kesimpulan bahwa adsorpsi silika gel termodifikasi terhadap ion logam yang bersifat sebagai asam lunak adalah

cukup besar, sehingga logam yang ada pada konsentrasi kelumit dapat teradsorpsi.

Secara teori dan dari hasil penelitian, silika gel mampu berikatan dengan senyawa organik yang memiliki afinitas baik terhadap atom Si maupun atom O. Terrada dkk. (1983), Lessi dkk. (1996), dan Wahyuningsih (2000) telah melakukan impregnasi senyawa organik pada permukaan silika gel. Berdasarkan penelitian Terrada dkk. (1983) dan Wahyuningsih (2000), pengikatan senyawa organik oleh silika gel secara langsung kurang efektif. Lessi dkk. (1996) menggunakan 3-kloropropiltrimetoksisilan sebagai senyawa penghubung. Ternyata, pengikatan senyawa organik tersebut lebih efektif melalui senyawa penghubung.

Berdasarkan penelitian tersebut, dalam penelitian ini digunakan γ -glisidoksi propiltrimetoksisilan sebagai senyawa penghubung dan senyawa garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat sebagai senyawa organik. Senyawa yang terbentuk disebut sebagai silika sulfonat, yaitu silika gel yang termodifikasi oleh gugus sulfonat. Sementara itu, proses adsorpsi dilakukan oleh silika gel termodifikasi gugus sulfonat hasil penelitian. Modifikasi gugus sulfonat ini akan memperbanyak sisi aktif permukaan silika gel yang berupa gugus O^- . Berdasarkan prinsip HSAB (*Hard and Soft Acids and Bases*), gugus O^- merupakan basa keras. Diharapkan silika gel ini lebih mampu mengikat asam-asam keras yang dalam hal ini diwakili oleh ion logam alkali tanah, yaitu Mg(II). Jadi, dengan penelitian ini diharapkan akan diperoleh material baru yang dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi ion-ion logam keras.

METODA PENELITIAN

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain satu set eksikator vakum, satu set alat pemanas yang dilengkapi dengan penangas air, labu leher tiga, pendingin balik, termometer, dan

batang pengaduk, penyaring buhner, pH meter, pengocok, oven, ayakan 250 mesh, spektrometer serapan atom dan spektrometer infra-merah.

Bahan-bahan kimia yang digunakan meliputi silika gel G (E. Merck), γ -glisidoksipropil trimetoksisilan (Aldrich), asam nitrat (E. Merck), aseton (E. Merck), dietil eter (E. Merck), garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat (E. Merck), magnesium(II) klorida (E. Merck), kadmium (II) klorida monohidrat (E. Merck), nikel (II) heksahidrat (E. Merck).

Tahapan penelitian ini ada beberapa tahap sebagai berikut:

Tahap pertama. *Pengikatan gugus epoksi pada silika gel.* Silika gel G dicuci dengan larutan HNO_3 20%, akuabides, larutan NaCl 0,5 M, akuabides, aseton, dan dietil eter. Silika gel hasil pencucian kemudian dioven selama 4 jam pada suhu pemanasan 150°C . Padatan yang diperoleh diayak kemudian direaksikan dengan γ -glisidoksipropiltrimetoksisilan pada konsentrasi 10% volume. Campuran ini divakumkan kemudian dipanaskan pada suhu 90°C dengan penangas air selama 30 menit. Pengadukan dilakukan setiap 5 menit. Silika epoksi yang diperoleh disaring dan dicuci dengan akuabides dan aseton, kemudian dikeringkan. Hasil yang diperoleh disebut sebagai Si-Ep. Banyaknya gugus epoksi yang terikat pada silika gel dapat diketahui melalui titrasi potensiometri. Titrasi dilakukan dengan larutan HCl 0,05 M. Titik stoikiometri dapat diketahui dari kurva hubungan pH versus volume HCl yang ditambahkan.

Tahap kedua. *Pengikatan Gugus Sulfonat pada Silika Epoksi (Si-Ep).* Pengikatan gugus sulfonat pada silika epoksi dilakukan dengan mereaksikan silika epoksi dengan senyawa garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat dalam larutan natrium bikarbonat 0,1 M. Reaksi dilangsungkan selama 20 jam. Padatan kemudian dipisahkan dari

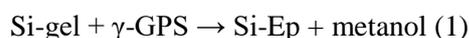
filtratnya dan dicuci dengan akuabides, aseton, dan dietil eter. Pengerinan dilakukan dalam eksikator. Hasil yang diperoleh disebut adsorben Si-SO_3^- (silika sulfonat).

Tahap ketiga. *Pengaruh pH Larutan Logam terhadap Kemampuan Adsorpsi dari Adsorben.* Proses adsorpsi dilakukan dengan sistem *batch*. Sebanyak 0,05 gram adsorben ditambah 10 mL larutan Mg(II) 10 ppm dalam pelarut air. Kondisi pH larutan logam diatur pada pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 8. Campuran digojok menggunakan *shaker* (alat penggojok) selama 2 jam. Campuran kemudian didiamkan selama 24 jam supaya tercapai kesetimbangan. Campuran disaring untuk memisahkan filtrat dengan endapannya. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan spektrometer serapan atom.

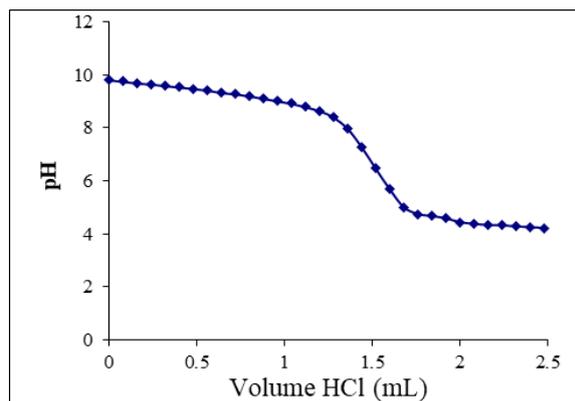
HASIL DAN PEMBAHASAN

Silika gel telah banyak digunakan sebagai padatan pendukung karena memiliki banyak kelebihan, antara lain memiliki banyak sisi aktif pada permukaannya, tidak reaktif untuk pelarut organik, dan memiliki resistensi termal yang tinggi (Arakaki dan Airoidi, 2000). Selain itu, silika gel tidak mengalami *swelling* (pembengkakan) serta memiliki kekuatan ikatan dan stabilitas yang tinggi (Vieira dkk., 1999).

Pengikatan gugus sulfonat pada silika gel dilakukan menggunakan senyawa perantara yang mengandung gugus epoksi. Pengikatan gugus epoksi pada silika gel mengikuti persamaan (1).



Dalam penelitian ini, proton pada gugus silanol dari silika gel akan dilepaskan untuk membentuk ikatan antara Si dari silika gel dengan O^- gugus metoksi dari γ -glisidoksipropiltrimetoksisilan. Produk yang diperoleh disebut sebagai silika epoksi (Si-Ep) dengan produk samping metanol. Pengikatan gugus ini ditunjukkan oleh spektrometer infra-merah yaitu pada bilangan gelombang di daerah 900 cm^{-1} yang karakteristik untuk gugus epoksi.



Gambar 1. Kurva titrasi Si-Ep10%

Evaluasi jumlah gugus epoksi yang terikat pada silika gel ditentukan melalui metode titrimetri. Sejumlah silika epoksi direaksikan dengan natrium tiosulfat agar dihasilkan basa. Gugus-OH yang dititrasi pada proses penentuan gugus epoksi berasal dari pembukaan cincin epoksida (oksirana).

Perhitungan berdasarkan kurva titrasi menunjukkan bahwa kandungan gugus epoksi yang terikat dalam silika gel sebanyak 373 $\mu\text{mol/gSi-ep}$ (27,97%). Perhitungan ini didasarkan pada penentuan gugus silanol dengan LiCH_3 berkisar 4 mmol/g silika (Nuryono, 2001). Dengan demikian jika setiap 1 molekul γ -GPS bereaksi dengan 3 gugus silanol (persamaan 1) maka paling banyak hanya 1,33 mmol/g γ -glisidopropiltrimetoksisilan yang dapat tertempel. Sedikitnya jumlah epoksi yang tertempel pada reaksi ini dapat dipahami karena adanya gugus silanol yang tersembunyi dalam pori-pori. Hasil ini cukup menggembirakan karena reaksi berlangsung dalam medium air, sementara untuk penempelan gugus epoksi pada silika gel dengan media bebas air pernah dilakukan oleh Nuryono (2001) diperoleh kurang lebih 33,75% untuk konsentrasi γ -GPS. Pengikatan senyawa garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat dilakukan berdasarkan persamaan reaksi (2)

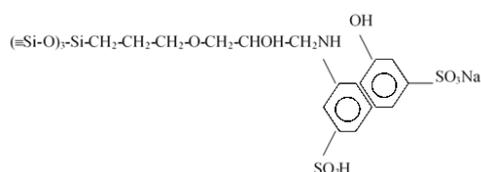
Gugus epoksi akan terbuka oleh adanya asam. Oleh karena senyawa pengoplingnya adalah garam asam, maka H^+ dari sulfonat akan menyerang gugus epoksi dan sekaligus

membuka cincin epoksida tersebut. Selanjutnya atom C yang kehilangan 1 elektronnya akan bermuatan parsial positif sehingga dapat diserang oleh N dari senyawa pemodifikasi.

Beberapa tahap yang dilakukan dalam pengikatan gugus sulfonat meliputi pelarutan garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalena-disulfonat, reaksi garam tersebut dengan silika epoksi, dan analisis gugus fungsional melalui spektrofotometer infra-merah.

Dari data spektra senyawa hasil modifikasi diperoleh informasi mengenai adanya gugus sulfonat, yaitu pada bilangan gelombang 1458 cm^{-1} yang berasal dari vibrasi rentangan (uluran) asimetri $\text{S}(=\text{O})_2$. Ini menunjukkan bahwa gugus sulfonat telah terikat pada silika epoksi. Gugus -OH ditunjukkan oleh bilangan gelombang di daerah 3.400 cm^{-1} . Keyakinan ini didukung oleh hilangnya gugus epoksi, terlihat dari hilangnya bilangan gelombang di daerah 900 cm^{-1} . Terikatnya gugus sulfonat juga ditunjukkan oleh meningkatnya intensitas bilangan gelombang dari gugus -OH pada daerah sekitar 3.400 cm^{-1} . Penambahan gugus -OH ini berasal dari pembukaan cincin epoksi dan dari gugus sulfonatnya.

Munculnya pita lemah pada daerah bilangan gelombang 1.630 cm^{-1} dan 1.560 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi tekukan gugus N-H dari amina sekunder. Pita ini biasanya muncul di daerah 1.620-1.560 cm^{-1} . Dengan mempertimbangkan hasil yang diperoleh dari spektra IR dapat dipastikan bahwa gugus sulfonat telah terikat pada silika epoksi. Rumus struktur dari silika sulfonat ditunjukkan pada Gambar 3.

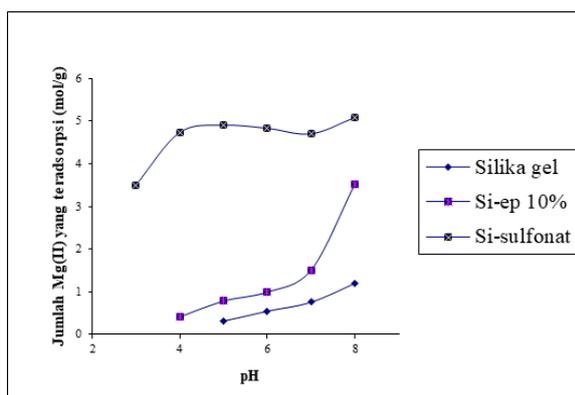


Gambar 3. Rumus Struktur Silika Gel termodifikasi gugus sulfonat.

Sifat adsorpsi dari adsorben hasil sintesis dikaji melalui evaluasi pengaruh pH terhadap kemampuan adsorpsi Mg(II). Untuk mengetahui kemampuan silika gel termodifikasi gugus sulfonat memiliki kemampuan yang lebih tinggi daripada yang tidak termodifikasi gugus sulfonat, digunakan tiga macam adsorben. Ketiga adsorben itu adalah silika gel, silika epoksi, dan silika sulfonat. Ketiga adsorben diperlakukan sama dan digunakan untuk mengikat ion logam Mg(II). Dengan pertimbangan bahwa secara teori silika gel tanpa dimodifikasi seperti yang telah dilaporkan Jansen (1992), mampu mengadsorpsi ion logam keras seperti Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, dan Fe²⁺, meskipun dalam jumlah relatif kecil. Dari hasil penelitian diperoleh data pengaruh pH terhadap kemampuan adsorpsi ion logam Mg(II) dari ketiga adsorben yang disajikan dalam Gambar 2 dan diperjelas pada Tabel 1.

Dari Gambar 2 terlihat jelas perbedaan jumlah ion Mg(II) yang dapat teradsorpsi oleh masing-masing adsorben pada pH yang sama. Dari setiap pH diperoleh bahwa urutan kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi ion logam Mg(II) adalah sebagai berikut:

Si-gel < Si-Ep < Si-sulfonat



Gambar 2. Pengaruh pH terhadap kemampuan adsorpsi ketiga adsorben.

Pada silika gel, ion logam Mg(II) mulai teradsorpsi pada pH 5. Silika epoksi mulai mengadsorpsi ion logam Mg(II) pada pH 4. Pada silika sulfonat adsorpsi ion logam Mg(II) mulai terjadi pada pH yang lebih rendah, yaitu di

sekitar pH 2,5. Hal ini dapat dijelaskan adanya perbedaan situs aktif pada setiap adsorben tersebut. Silika gel, memiliki sisi aktif berupa gugus silanol dan siloksan. Pada silika epoksi, selain memiliki gugus silanol dan siloksan, sebagian permukaan silika gel juga tertutupi oleh gugus epoksi. Pada silika sulfonat, selain adanya situs aktif silanol dan siloksan juga terdapat gugus sulfonat yang tertempel berkat terbukanya gugus epoksi.

Penambahan gugus epoksi pada silika epoksi mengakibatkan adanya penambahan gugus O yang potensial terhadap pengikatan ion logam, sehingga kapasitas adsorpsi Si-ep lebih besar daripada silika gel. Pada silika sulfonat, terjadi penambahan ion O⁻ yang terbentuk karena lepasnya ion Na⁺ dan dari lepasnya proton dari gugus sulfonat pada garam mononatrium asam 4-amino-5-hidroksi-2,7-naftalenadisulfonat. Penambahan jumlah ion O⁻ ini akan meningkatkan kemampuan silika sulfonat terhadap pengikatan ion logam.

Tabel 1. Pengaruh pH terhadap kemampuan adsorpsi Mg(II) dari ketiga adsorben.

pH	Silika gel (10 ⁻⁵ mol/g)	Si-ep (10 ⁻⁵ mol/g)	Si-sulfonat (10 ⁻⁵ mol/g)
2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	3,50
4	0,00	0,41	4,73
5	0,32	0,78	4,90
6	0,55	0,99	4,83
7	0,76	1,51	4,70
8	1,20	3,52	5,08

Interaksi ion logam dengan adsorben dalam larutan selain ditentukan oleh sifat ion logam sendiri juga sangat dipengaruhi oleh harga pH. Sebagaimana terlihat pada Gambar 2 adsorpsi meningkat dengan kenaikan pH. Pada pH tinggi (larutan basa), silika gel bermuatan netto negatif. Pada pH rendah (larutan bersifat asam), silika gel bermuatan netto positif sampai netral. Pada pH rendah, gugus aktif permukaan adsorben

dapat terprotonasi sehingga tidak efektif digunakan dalam proses adsorpsi ion logam.

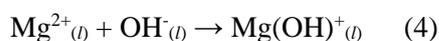
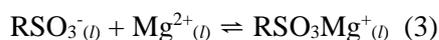
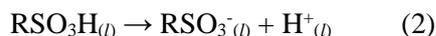


Oleh karena itu, dapat dipahami bila pada pH kurang dari 5, silika gel belum mampu mengadsorpsi ion Mg(II) karena gugus silanol terprotonasi.

Untuk silika epoksi, pada pH rendah gugus epoksi tidak stabil dan dapat terbuka akibat adanya proton membentuk gugus -OH. Berarti ada keterlibatan asam. Oleh karena itu, pada pH di bawah 4 gugus epoksi sudah terbuka membentuk gugus OH, sehingga pada pH tersebut H⁺ dari gugus -OH sangat sulit lepas karena kondisi larutan asam. Akibatnya, gugus -OH tidak mampu memfungsikan O⁻ sebagai sisi keras. Jadi, dapat dipahami bahwa pada pH rendah (kondisi asam) silika epoksi belum mampu mengikat ion logam Mg(II). Pada pH lebih besar dari 4 kemungkinan gugus -OH sudah dapat melepaskan H⁺, sehingga sisi aktif O⁻ dapat mengikat ion logam Mg(II) yang merupakan basa keras. Pada pH lebih besar dari 5 pengikatan ion logam juga dibantu oleh adanya gugus silanol pada silika gel, mengingat tidak semua gugus silanol dalam silika gel tersubstitusi oleh gugus epoksi.

Untuk silika sulfonat pada pH sangat rendah (pH 2) gugus sulfonat mengalami protonasi H⁺, sehingga kemampuan mengadsorpsi ion logam Mg(II) sangat rendah.. Pada pH di atas 2 sebagai asam relatif kuat, gugus sulfonat terprotonasi melepaskan H⁺ (persamaan 2) dan terbentuk situs bermuatan negatif yang mampu mengadsorpsi secara efektif (persamaan 3). Pada pH di atas 4,0 adsorpsi ion logam cenderung konstan sampai pH 8,0. Pada pH itu, peningkatan kemampuan mengikat ion dari gugus sulfonat, diikuti oleh penurunan efektivitas ion Mg(II) berikatan dengan sulfonat karena membentuk spesies hidroksida Mg(OH)⁺

(persamaan 4). Hal ini mengakibatkan kemampuan adsorpsi konstan.



KESIMPULAN

Pengikatan gugus epoksi dan gugus sulfonat pada permukaan silika gel akan meningkatkan kemampuan silika gel dalam mengadsorpsi ion logam Mg(II).

DAFTAR PUSTAKA

- Arakaki, L. N. H., and Airoidi, C., 2000, Ethyleneimine in the synthetic routes of a new silylating agent: Chelating Ability of Nitrogen and Sulfur Donor Atom After Anchoring onto The Surface of Silica Gel, *Polyhedron* 19: 367-373.
- Darmono, 1995, *Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*, UI Press, Jakarta.
- Jansen, K., 1992, *Zeolit Crystal Growth and the Structure on an Atomic Scale*, Disertasi, Den Haag.
- Lessi, P., Filho, N. L. D., Moreira, J. C., and Campos, J. T. S., 1996, Sorption and Preconcentration of Metal Ions on Silica Gel Modified with 2,5-dimercapto-1,3,4-thiadiazole, *Anal. Chim. Acta*, 327: 183-190.
- Nuryono, 2001, Sintesis Silika Termodifikasi Eter-Mahkota 15C5 da 18C5 Sebagai Fasa Diam pada Kromatografi Ion, Seminar Nasional Kimia IX, *Kimia anorganik dalam Pemanfaatan Sumber Daya Alam Indonesia*, Yogyakarta 21 Mei 2001.
- Pearson, R. G., 1963, Physical and Inorganic Chemistry, Hard and Soft Acids and Bases, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 85, number 22, 3533-3539.
- Terada, K., Matsumoto, K., dan Kimuro, H., 1983, Sorption of Copper(II) by Some Complexing Agents Loaded on Various Supports, *Anal. Chim. Acta*, vol 153: 237-247.
- Vieira, E. F. S., Cestari, A. R., Simoni, J. de A., and Airoidi, C., 1999, Use of Calorimetric Titration to Determine Thermochemical Data for Interaction of Cations with

Mercapto-Modified Silica Gel, *Therm. Act.*,
328: 247-252.

Wahyuningsih, S., 2000, *Modifikasi Permukaan
Silika Gel 60 Secara Impregnasi Langsung
dengan 2,5-dimerkapto-1,3,4-tiadiazol*

*untuk Adsorpsi Selektif Ion Logam
Tembaga(II) dan Besi(III)*, Tesis,
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.