

Kinetika Pelarutan Silika Amorf dari Lumpur Panas Bumi Dieng

Nurdin Riyanto, P. Sumardi, Indra Perdana*
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta

Abstract

Dieng's geothermal power plant generates not only energy but also wastes as sludge that contains around 50% silica in an amorphous state. The waste has a great potential to be used as a source of micro-amorphous silica synthesis to fulfill industrial needs. This research aimed to study the dissolution kinetics of amorphous silica. In the present work, the alkali – solubilization process by means of the dissolution of amorphous silica in an agitated flask was studied by varying process temperatures (50 – 90°C), stirring speed (150 – 450 rpm), Na/Si molar ratio (2 – 3), and silica particle size (0,0069 – 0,01975 cm). Experimental results showed that the rate of geothermal silica dissolution increased with temperature and stirring speed. Meanwhile, Na/Si molar ratios and silica particle sizes showed no significant influence on the dissolution process. Calculation results indicated that the dissolution process involved a solid – liquid reaction that occurred at the solid surface. The activation energy of the reaction was $33 \pm 1,3 \text{ kJ mol}^{-1}$ and the dependence of the reaction rate constant on the temperature can be written as:

$$k'_r = 0.0234 \exp \left[-3992 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{323} \right) \right]$$

in a temperature range of 50 – 90°C. The influence of stirring speed on the interface mass transfer coefficient (k_c) could be expressed in a correlation of the dimensionless numbers: $Sh = 6,07 Re^{0.263} Sc^{0.333}$ which Re number was in a range of 0,1 – 10.

Keywords : geothermal sludge, amorphous silica, alkali-solubilization, dissolution kinetics.

Abstrak

Lumpur geotermal yang dihasilkan dari proses operasi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dieng mengandung silika amorf sebesar ~50 %, yang sangat potensial untuk dijadikan sumber kebutuhan silika amorf untuk dunia industri. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinetika pelarutan silika amorf dari lumpur panas bumi dengan menvariasikan variabel – variabel yang mempengaruhinya. Pada penelitian ini, *alkali-solubilization* yang merupakan proses pelarutan silika dalam larutan NaOH dalam labu berpengaduk dipelajari dengan memvariasikan variabel suhu (50 – 90°C), kecepatan pengadukan (150 – 450 rpm), perbandingan molar Na/Si (2 – 8), dan ukuran diameter padatan (0,0069 – 0,01975 cm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju pelarutan silika amorf dari limbah geotermal meningkat dengan naiknya suhu dan kecepatan pengadukan. Namun, ukuran padatan dan perbandingan molar pereaksi tidak menunjukkan pengaruh yang berarti terhadap proses pelarutan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa proses pelarutan silika amorf dapat didekati dengan reaksi padat-cair dimana reaksi terjadi di permukaan padatan dengan nilai energi aktivasi reaksi sebesar $33 \pm 1,3 \text{ kJ/mol}$ dan tetapan laju reaksi sebagai berikut:

$$k'_r = 0.0234 \exp \left[-3992 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{323} \right) \right]$$

yang berlaku untuk kisaran suhu 50 – 90 °C . Pengaruh kecepatan putaran pengaduk terhadap laju perpindahan massa padat – cair (k_c) dapat dinyatakan dalam hubungan bilangan tak berdimensi: $Sh = 6,07 Re^{0.263} Sc^{0.333}$ untuk kisaran bilangan Re sekitar 0,1 – 10.

Kata kunci : lumpur geotermal, silika amorf, alkali-solubilization, kinetika pelarutan.

Pendahuluan

Silika dalam dunia industri dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, diantaranya untuk industri pasta gigi, karet, sebagai anti-*cake agent* pada industri roti (Kirk

dan Othmer, 1998), adsorbent dan *catalyst support* (Iler, 1979). Selain itu karena sifatnya yang higroskopis silika juga dapat digunakan sebagai bahan penjerap air. Pada saat ini, dengan berkembangnya teknologi nano-material, silika dapat diproses menjadi bentuk nano silika yang penggunaannya jauh lebih luas dan lebih bernilai ekonomis seperti untuk industri semikonduktor,

* Alamat korespondensi: iperdana@chemeng.ugm.ac.id

industri berteknologi tinggi (Okutani, 2009; Sun dan Gong, 2001). Selain itu silika ini juga dipakai sebagai bahan aditif dalam kosmetik, obat-obatan, dan industri keramik (Kalapathy, dkk., 2000).

Sumber silika di Indonesia cukup melimpah, baik yang terdapat dalam bentuk mineral kwarsa (*quartz*), maupun dalam bentuk amorf (*amorphous silica*). Produksi silika dari pasir kwarsa tidak cukup ekonomis karena memerlukan proses pada suhu tinggi (Iler, 1979; Kirk dan Othmer, 1998). Produksi silika yang cukup menjanjikan adalah yang bersumber dari limbah biomassa seperti abu sekam padi (*rice husk*) (Okutani, 2009; Sun dan Gong, 2001), *bagasse* atau yang berasal dari limbah pertambangan seperti abu batubara dan lumpur panas bumi. Silika yang terkandung dalam biomassa (tumbuhan), abu batubara dan lumpur panas bumi umumnya bersifat amorf (*amorphous silica*). Silika dalam bentuk amorf jauh lebih disukai untuk aplikasi di industri karena sifatnya yang jauh lebih reaktif dibandingkan dalam bentuk kristalnya (Joley, 1961).

Karena sifatnya yang amorf, silika dari lumpur panas bumi dapat dipungut pada suhu yang relatif rendah (Zaky, dkk., 2008). Dalam penelitian ini, silika dipungut dan dimurnikan dengan cara dilarutkan dan direaksikan dalam larutan natrium hidroksida (NaOH) menghasilkan senyawa natrium silikat yang kemudian dipisahkan untuk diproses menjadi silika amorf dengan kemurnian yang lebih tinggi. Proses reaksi dan pelarutan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti konsentrasi NaOH, suhu, ukuran butir, dan turbulensi cairan di sekitar padatan silika. Kinetika pelarutan silika amorf dalam larutan NaOH (atau larutan basa lainnya) sangat penting diketahui untuk optimasi proses pemungutan silika.

Penelitian tentang kinetika pelarutan silika di dalam air atau di dalam larutan elektrolit yang pernah dilakukan antara lain adalah kinetika pelarutan kwarsa (*crystalline silica*) dalam larutan anionik (Berger, dkk. 1994), kinetika pelarutan silika amorf (*amorphous silica*) di dalam larutan alkali (Niibori, dkk., 2000; Okunev, dkk., 1999). Penelitian tentang kinetika pelarutan tersebut umumnya menggunakan sumber silika komersil (silika murni). Penelitian tentang interaksi antara silika dan air telah dilakukan oleh beberapa peneliti lain seperti Worley (1994), Rimstidj dan Barnes (1980).

Pada penelitian ini dipelajari kinetika pelarutan silika amorf dari limbah panas bumi

dalam larutan NaOH yang dijalankan secara *batch* dalam tangki berpengaduk. Secara khusus penelitian ini mempelajari pengaruh suhu pelarutan, kecepatan pengadukan, perbandingan bahan dan ukuran butir terhadap proses pelarutan silika geotermal dalam larutan NaOH.

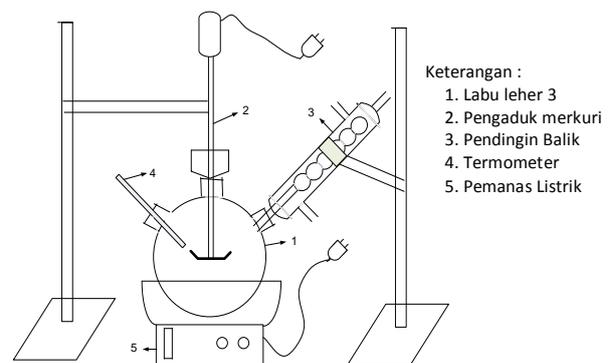
Metode Penelitian

Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian adalah lumpur panas bumi dari PLTP Dieng. Bahan lain yang digunakan adalah aquadest, NaOH, HCl, H₂SO₄, asam oksalat dan ammonium molybdate.

Alat Penelitian

Alat penelitian berupa rangkaian yang terdiri dari labu leher tiga, pengaduk merkuri, pendingin balik, termometer dan pemanas listrik. Rangkaian alat penelitian disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Penelitian

Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan untuk meninjau kinetika pelarutan yang terlibat di dalam proses pemungutan silika amorf, yaitu pada tahap *alkali-solubilization*, dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai variabel yang digunakan untuk meninjau kinetika disolusi silika dalam larutan NaOH.

Variabel	Nilai
Suhu (°C)	50, 60, 75, 90 ^a
Na/Si rasio (mol)	2, 4 ^a , 6, 8
Diameter ukuran butir (cm)	0.1975, 0.0069 ^a
Kecepatan putaran pengaduk (rpm)	200, 350 ^a , 450

^a nilainya tetap, manakala variabel yang lain ingin ditinjau efeknya.

Prosedur Penelitian

Dalam meninjau kinetika pelarutan silika amorf, percobaan dilakukan dengan mencampur 10 gram lumpur geotermal yang telah dikeringkan dan dibersihkan terlebih dahulu ke dalam larutan NaOH 800 ml dengan konsentrasi tertentu (sesuai variabel) dalam labu reaksi yang kemudian dijalankan pada suhu tertentu. Peubah yang dipelajari dalam penelitian ini adalah sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Setiap selang waktu tertentu, sekitar 5 ml larutan dalam labu reaksi diambil untuk dianalisis kandungan natrium silikatnya dengan metoda *yellow silicomolybdate* (Govett, 1961) dengan mengamati absorbansi pada panjang gelombang 410 nm (Eaton,dkk., 2005) dengan menggunakan Shimadzu mini UV-Vis. Absorbansi yang terukur kemudian dikonversi ke konsentrasi natrium silikat terlarut dengan bantuan kurva standar.

Untuk memperoleh produk silika amorf, diakhir proses cairan dipisahkan dari padatan sisa. Selanjutnya larutan Na-silikat dititrasi dengan HCl 1 – 2 N sampai terbentuk gel. Tahapan ini disebut sebagai *acid-precipitation*. Gel yang telah terbentuk kemudian dicuci dengan air hangat bersuhu 60 – 70 °C dan disaring. Hal ini dilakukan berulang – ulang. Setelah diperoleh gel yang berwarna putih cemerlang, kemudian gel tersebut dikeringkan di dalam oven pada suhu 110 – 140 °C selama ±12 jam, tergantung dari kandungan air dalam gel tersebut.

Analisis Hasil

Analisis kandungan silika dalam *silica water glass* dilakukan dengan menggunakan metode *yellow silicomolybdate* yang selanjutnya dianalisis dengan UV-Vis *spectrophotometer* (*Technique 4500-SiO₂ D* dan *ASTM standard technique #D859*). Metode ini digunakan untuk menentukan kadar silika yang terikat dengan natrium sebagai natrium silikat yang dikenal sebagai *molybdate-reactive silica* (Govett, 1960). Warna kuning yang dihasilkan dalam reaksi adalah sebanding dengan konsentrasi *molybdate-reactive silica* tersebut (Worley, 1994), yang selanjutnya warna intensitas tersebut dianalisis dengan menggunakan Shimadzu UV-Vis Spectrophotometer di Laboratorium Analisis dan Instrumentasi, Jurusan Teknik Kimia UGM.

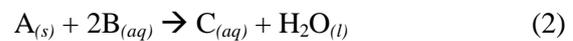
Evaluasi Hasil

Dalam meninjau kinetika pelarutan silika amorf dalam NaOH, diajukan suatu model matematis yang dapat menggambarkan proses

tersebut. Model matematis disusun dengan meninjau bahwa reaksi antara silika dengan amorf adalah reaksi padat – cair dimana reaksi terjadi dipermukaan padatan (silika).



Persamaan (1) dapat disederhanakan dalam bentuk berikut,



Reaksi antara silika dan NaOH dapat didekati dengan model reaksi padat – cair dimana reaksi terjadi di fase padat. Persamaan – persamaan yang terlibat dalam model tersebut adalah sebagai berikut,

i. Neraca massa produk Na-silikat (C) dipermukaan padatan (C_c^s):

$$\frac{dC_c^s}{dt} = k_r' \cdot X_A \left(\frac{m_0}{V} \right) - k_c a \cdot (C_c^s - C_c) \quad (3)$$

ii. Neraca massa silika (A) di padatan X_A :

$$\frac{dX_A}{dt} = -k_r' \cdot X_A \quad (4)$$

iii. Neraca massa Na-silikat (C) dalam badan cairan (C_c):

$$\frac{dC_c}{dt} = k_c a \cdot (C_c^s - C_c) \quad (5)$$

Dengan beberapa persamaan tambahan lainnya untuk mengevaluasi nilai konstanta kecepatan reaksi dan koefisien transfer massanya berturut – turut adalah sebagai berikut;

$$k_r' = k_{r0}' \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (6)$$

dan

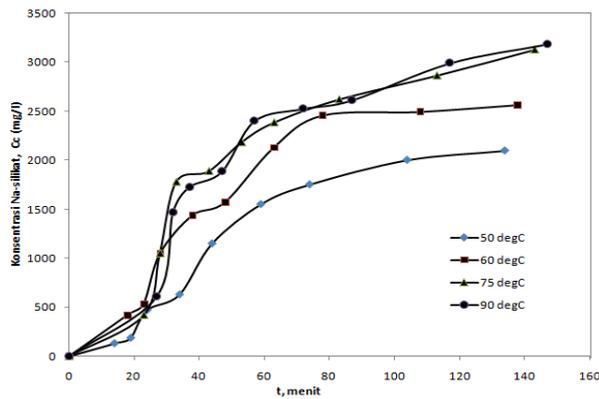
$$Sh = B \left(\frac{d_p^4 \varepsilon}{\vartheta} \right)^m Sc^{0.333} \quad (7)$$

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh variabel penelitian

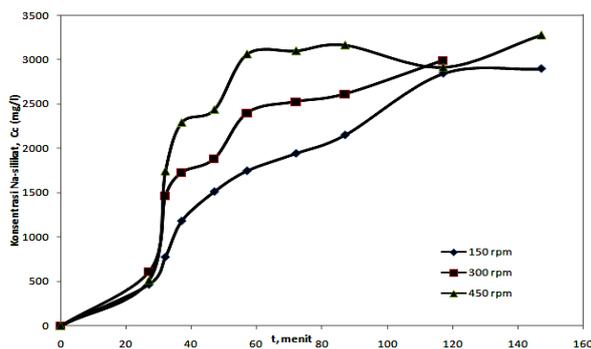
a. Pengaruh suhu pelarutan (T)

Pengaruh suhu reaksi pada kelarutan silika amorf dalam NaOH disajikan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa semakin tinggi suhu reaksi dan semakin lama waktu reaksinya, konsentrasi silika terlarut juga semakin besar. Hal ini dikarenakan bahwa semakin tinggi suhu tenaga kinetis yang dimiliki oleh molekul-molekul reaktan meningkat, sehingga semakin banyak molekul yang memiliki tenaga di atas tenaga pengaktifan reaksinya.



Gambar 2. Hubungan silika terlarut (C_c) dengan suhu reaksi pada berbagai waktu

b. Pengaruh kecepatan putaran pengadukan (N_s)
Terjadinya kenaikan konsentrasi Na-silikat terlarut sebagai fungsi waktu karena untuk waktu yang semakin lama maka jumlah padatan yang terlarut juga bertambah banyak. Dari Gambar 3 juga terlihat bahwa untuk interval waktu yang sama, konsentrasi silika terlarut semakin besar dengan semakin cepatnya putaran pengaduk. Pengaduk akan berpengaruh pada distribusi pereaksi dalam reaktor serta berpengaruh juga pada pembentukan lapisan film. Semakin cepat putaran pengadukan maka akan menaikkan turbulensi fluida tersebut yang akan menurunkan ketebalan lapisan film yang menjadi batas antara pereaksi (dalam hal ini antara padatan dan cairan). Dengan menipisnya lapisan film tersebut akan mengakibatkan transfer massa antar fase semakin cepat.



Gambar 3. Hubungan Na-silikat terlarut (C_c) dengan kecepatan putaran pengaduk (N_s) pada berbagai waktu

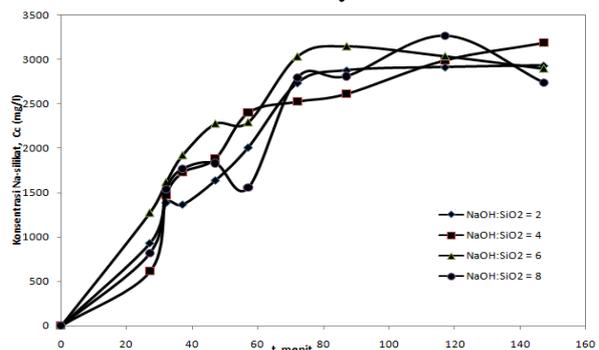
Hal diatas sesuai dengan teori yang telah ada, dimana nilai koefisien transfer massa berbanding lurus dengan koefisien diffusivitas (D) dan berbanding terbalik dengan tebal lapisan film (δ). Sehingga dengan menipisnya lapisan film, maka

akan meningkatkan koefisien transfer massa. Dari hasil penelitian, diperoleh hubungan antara kecepatan pengadukan dengan koefisien perpindahan massa seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Nilai koefisien perpindahan massa, k_c , pada berbagai kecepatan putaran pengaduk

Kecepatan Putaran Pengaduk, N (rpm)	Koefisien perpindahan massa, k_c (cm menit ⁻¹)
150	$6,08 \times 10^{-5}$
300	$1,06 \times 10^{-4}$
450	$1,46 \times 10^{-4}$

c. Pengaruh perbandingan molar rasio (Na/Si)
Gambar 4 memberikan informasi bahwa perbandingan reaktan (dalam hal ini adalah variasi konsentrasi NaOH) tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan pelarutan silika geotermal. Hal ini disebabkan karena jumlah NaOH dalam campuran berlebihan, bila dibandingkan dengan kebutuhan stoikiometrisnya

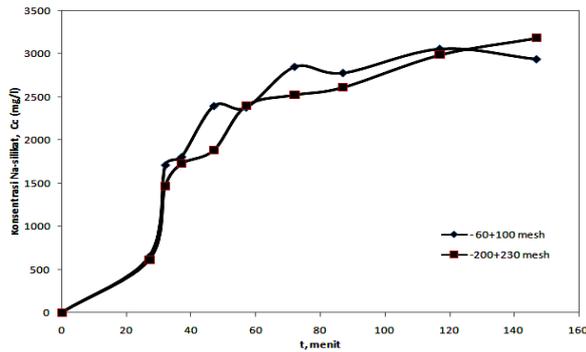


Gambar 4. Hubungan Na-silikat terlarut (C_c) dengan perbandingan reaktan (Na/Si) pada berbagai waktu

Diffusivitas ion hidroksida maupun kation akan meningkat dengan naiknya pH dan kekuatan ionnya dalam larutan (Zaky, dkk., 2008), oleh karenanya jika langkah tersebut merupakan pengontrol reaksi keseluruhan, tentu akan memberikan kecepatan pelarutan yang berbeda-beda tergantung dari kekuatan ionik maupun kekuatan pH dari larutan tersebut. Sebagaimana disebutkan oleh House dan Orr (1992) bahwa kinetika kelarutan silika juga dipengaruhi oleh pH. Semakin besar pH-nya maka kecepatan pelarutannya pun akan semakin besar dan bersifat linear. Demikian juga untuk kekuatan ioniknya (Icenhower dan Dove, 2000).

d. Pengaruh ukuran partikel (rp)
Pada Gambar 5 terlihat bahwa dari dua percobaan dengan ukuran partikel yang

berbeda cukup jauh (yaitu sekitar 30 kali lipatnya) tidak memberikan perbedaan dalam kecepatan pelarutan silika geotermal.



Gambar 5. Hubungan Na-silikat terlarut (C_c) dengan ukuran partikel pada berbagai waktu.

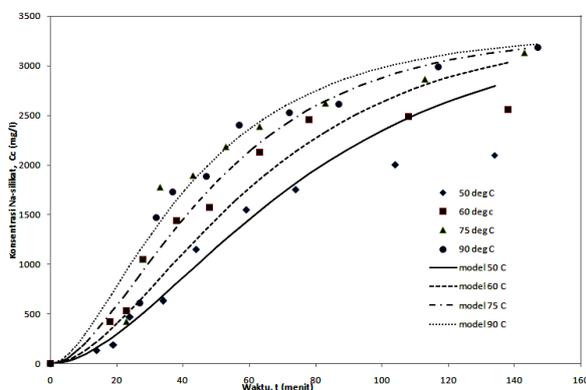
Hal ini menunjukkan bahwa difusi internal diffusi tidak memegang peranan penting dalam proses pelarutan silika geothermal tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa molekul NaOH dapat menjangkau seluruh permukaan padatan silika dan pelarutan terjadi di seluruh permukaan padatan, sehingga molekul NaOH tidak sempat mendifusi ke bagian dalam padatan. Proses pelarutan yang disertai reaksi terjadi di permukaan padatan.

Model kinetika pelarutan silika amorf

Dari hasil perhitungan pelarutan silika amorf pada berbagai suhu diperoleh tetapan reaksi pelarutan sebagai berikut;

$$k'_r = 0.0234 \exp \left[-\frac{33.192}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{323} \right) \right] \quad (8)$$

dengan persen ralat rerata sebesar 15,03 %. Grafik perbandingan antara data eksperimen dengan data model ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan konsentrasi Na-silikat terlarut (C_c) dengan waktu (t) pada berbagai suhu berdasarkan model

Nilai energi aktivasi reaksi pelarutan sebesar $33 \pm 1,3$ kJ/mol. Nilai energi aktivasi yang diperoleh ini relatif cukup kecil. Sebagai pembandingan, Rimstidj dan Barnes (1980) menyatakan bahwa energi aktivasi pelarutan silika quartz (kristalin) dalam air sebesar 67,4 – 76,6 kJ/mol sedangkan untuk silika amorf dalam air sebesar 60,9 – 64,9 kJ/mol. Jika dibandingkan, hasil yang diperoleh dari penelitian ini cukup berbeda. Hal ini disebabkan karena keberadaan ion OH^- dan Na^+ mempercepat pemutusan ikatan antar atom dalam struktur padatan silika tersebut (Xiao dan Lasaga, 1996). Energi aktivasi yang rendah ini juga disebabkan karena pelarutan silika amorf relatif lebih mudah dibandingkan dengan silika quartz. Oleh karenanya, untuk memutus ikatan antar atom dalam struktur amorf dibutuhkan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan pemutusan ikatan antar atom dalam struktur kristal.

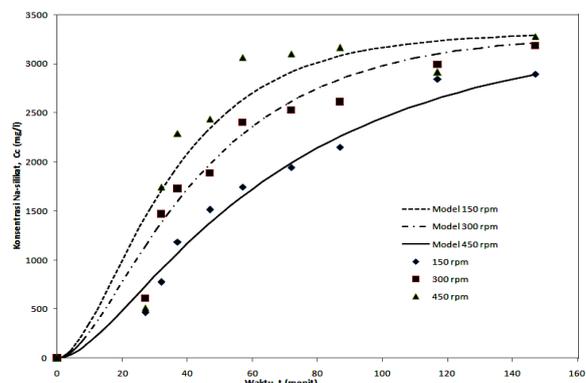
Pada penelitian ini pengaruh putaran pengaduk terhadap kecepatan pelarutan silika dipelajari dengan mempertimbangkan perpindahan massa natrium silika hasil reaksi permukaan ke badan cairan. Secara matematis hal ini dipelajari dengan mencari hubungan tetapan perpindahan massa (k_c) dan laju pengadukan (N_s).

Untuk nilai koefisien difusivitas yang tetap, maka berkurangnya ketebalan lapisan film akan mengakibatkan naiknya nilai k_m . Kenaikan kecepatan putaran pengadukan juga akan menaikkan *power supply* per satuan massa larutan, yang akan mengakibatkan kecepatan pelarutan semakin meningkat, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (9) dan (10).

$$Sh = B \left(\frac{d_p^4 \varepsilon}{\vartheta} \right)^m \left(\frac{\vartheta}{D} \right)^n \quad (9)$$

dengan

$$\varepsilon = \frac{P_M D_i^5 N_s^3}{V} \quad (10)$$



Gambar 7. Hubungan konsentrasi silika terlarut (C_c) dengan waktu (t) pada pada berbagai kecepatan putaran (N_s) berdasarkan model.

Dalam dua persamaan tersebut terlihat bahwa nilai koefisien transfer massa berbanding lurus dengan ε^α , dengan ε adalah *power supply* per satuan massa larutan. Sehingga dengan semakin naiknya kecepatan putaran pengaduk maka nilai ε meningkat, yang kemudian memperbesar nilai k_c .

Persamaan bilangan tak berdimensi yang terlibat dalam proses transfer massa tersebut pada kisaran bilangan Re antara 0,1 – 10 adalah sebagai berikut:

$$Sh = 6,07 Re^{0,263} Sc^{0,333} \quad (11)$$

Nilai pangkat bilangan Reynolds ($m = 0,263$) dalam persamaan ini mendekati pangkat bilangan Reynolds untuk model transfer massa tanpa adanya konveksi paksa (*free convection around a solid sphere*). Dalam kasus tersebut ukuran butir tidak berpengaruh terhadap nilai koefisien transfer massa (k_c) (Cussler, 2000). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yakni variasi ukuran butir tidak berpengaruh terhadap kecepatan pelarutan silika tersebut.

Kesimpulan

Reaksi yang terjadi pada tahap *alkali-solubilization* yang merupakan salah satu tahapan utama dalam ekstraksi sol-gel, dapat didekati dengan pemodelan reaksi padat cair dimana reaksi terjadi di fase padatan. Dari hasil eksperimen dan pengolahan data, diperoleh hubungan konstanta kecepatan reaksi kimia sebagai berikut:

$$k'_r = 0,0234 \exp \left[-3992 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{323} \right) \right]$$

untuk kisaran suhu operasi 50 – 90°C dengan kesalahan relatif sebesar 15 %. Kecepatan putaran pengadukan adalah variabel lain, selain suhu, yang berpengaruh terhadap kecepatan disolusi silika. Diperoleh hubungan bilangan tak berdimensi sebagai berikut yang dapat digunakan untuk mengevaluasi nilai koefisien transfer massa (k_c), sebagai berikut:

$$Sh = 6,07 Re^{0,263} Sc^{0,333}$$

untuk kisaran bilangan Re sekitar 0,1 – 10, dengan kesalahan relatif sebesar 15,9 %.

Daftar Pustaka

- Berger, G., Cadore, E., Schoot, J., dan Dove, P. M., 1994. Dissolution rate of quartz in lead and sodium electrolyte solutions between 25 and 300 oC: Effect of the nature of surface complexes and reaction affinity, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 58(2), 541-551.
- Cussler, E. L., 2000. *Diffusion : Mass transfer in fluid systems*, Cambridge University Press., NY., USA.
- Eaton, A. D., Clescery, L. S., Rice, E. W., dan Greenberg, A.E., Editors, 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 21st Ed., Centennial edition, Port City, Baltimore, Maryland.
- Govett, G. J. S., 1960. Critical factors in the calorimetric determination of silica, *Anal. Chim. Acta.*, 25, 69-80.
- House, W., dan Orr, D. R., 1992. Investigation of the pH dependence of the Kinetic of Quartz dissolution at 25 oC., *Chem. Soc. Faraday Trans.*, 88(2), 233-241.
- Icenhower, J. P., dan Dove, P. M., 2000. The dissolution kinetics of amorphous silica into sodium chloride solutions: effect of temperature and ionic strength, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(24), 4193-4203.
- Iler, R. K., 1979. *The Chemistry of Silica*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Joley, J. G., 1961, The kinetics of the reaction of silica with group I of hydroxide, *Can. J. Chem.*, 39, 200-205.
- Kalpathy, U., Proctor, A., dan Schultz, J., 2000. A simple method for production of pure silica from rice hull ash, *Biores. Technol.*, 73, 257-262.
- Kirk, R. E., dan Othmer, D. F., 1998. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 21., 4th ed., John Wiley and Sons Inc., New York.
- Niibori, Y., Kunita, M., Tochiyama, O., dan Chida, T., 2000. Dissolution rates of amorphous silica in highly alkaline solution, *J.Nucl.Sci.Technol.*, 37(4), 349-357.
- Okunev, A. G., Shaurman, S. A., Danilyuk, A. F., Aristov, Y. I., Bergeret, G., dan Renouprez, A., 1999. Kinetics of the SiO₂ aerogel dissolution in aqueous NaOH solutions: experiment and model, *J. Non-Cryst. Solids*, 260, 21-30.
- Okutani, T., 2009. Utilization of silica in rice hull as raw materials for silicon semiconductors, *J. Met. Mater. Min.*, Vol. 19(2), 51-59.
- Rimstidj, J. D., dan Barnes, H. L., 1980. The kinetics of silica – water reaction, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 44, 1683-1699.
- Sun. L., dan Gong, K., 2001. Silicon-based materials from rice husks and their applications, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 5861-5877.
- Worley, W. G., 1994. *Dissolution Kinetics and Mechanism in Quartz-and-Granite-Water Systems*, Ph.D. dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Xiao, Y., dan Lasaga, A. C., 1996. Ab initio quantum mechanical studies of the kinetics and mechanism of silicates dissolution: OH catalysis, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 60(13), 2283-2295.
- Zaky, R. R., Hessien, M. M., El-Midany, A. A., Khedr, M. H., Abdel-Aal, E. A., dan El-Barawy, K.A., 2008. Preparation of silica nanoparticles from semi-burned rice straw ash, *Powder Technol.*, 185, 31-35.