

Pengaruh Konsentrasi Larutan Natrium Silikat Hasil Pengolahan Limbah *Coal Fly Ash* dan Laju Alir Gas CO₂ untuk Proses Carbon Capture

La Tansa Pramesti Dewi¹, Widya Rosita², Himawan Tri Bayu Murti Petrus³

Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada^{1,2},

Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada³,

e-mail: latansapramestidewi@mail.ugm.ac.id¹, widyar@ugm.ac.id², bayupetrus@ugm.ac.id³

ABSTRACT

Global warming is currently a threat to the earth's weather and climate. Carbon dioxide (CO₂) emissions are the warming effect of the greenhouse effect produced by humans. Many researchers are trying to overcome this problem with carbon dioxide capture solutions. This research proposes a new method for capturing carbon dioxide using a chemical adsorption method using a sodium silicate (Na₂SiO₃) solution. Sodium silicate is obtained by reacting coal fly ash with sodium hydroxide (NaOH). CO₂ gas bubbles are used to create contact between the Na₂SiO₃ solution and CO₂ gas. The research was carried out by observing the solubility of CO₂ in the solution from changes in the parameters used, namely the concentration of the Na₂SiO₃ solution and the CO₂ gas flow rate. The concentration of the sodium silicate solution was varied in a ratio with distilled water of 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, while the gas flow rate was varied at 1, 2, 3, and 4 L/minute. The research results show that the gas flow rate affects the pH. As the gas flow rate increases from 1 L/minute to 4 L/minute, the pH will decrease from 13 to 9.8. This causes fewer Na₂CO₃ deposits to form but the silica settles more quickly. In addition, the test results show that less sodium carbonate is formed as the concentration of sodium silicate is reduced with results of 6.2% to 1.5%.

Keywords: Carbon capture, fly ash, natrium silicate, pH

ABSTRAK

Pemanasan global saat ini menjadi ancaman terhadap cuaca dan iklim bumi. Emisi karbon dioksida (CO₂) merupakan pengaruh pemanasan dari efek rumah kaca yang dihasilkan manusia. Banyak peneliti berupaya untuk mengatasi masalah ini dengan solusi penangkapan karbon dioksida (*carbon capture*). Penelitian ini mengusulkan metode baru untuk menangkap karbon dioksida dengan metode adsorpsi kimiawi menggunakan larutan natrium silikat (Na₂SiO₃). Natrium silikat diperoleh dengan mereaksikan *coal fly ash* dengan natrium hidroksida (NaOH). Gelembung gas CO₂ digunakan agar terjadi kontak antara larutan Na₂SiO₃ dengan gas CO₂. Penelitian dilakukan dengan mengamati kelarutan CO₂ di larutan dari perubahan parameter yang digunakan, yaitu konsentrasi larutan Na₂SiO₃ dan laju alir gas CO₂. Konsentrasi larutan natrium silikat divariasikan pada perbandingan dengan aquades sebesar 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, sedangkan laju alir gas divariasikan pada 1, 2, 3, dan 4 L/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju alir gas mempengaruhi pH. Semakin meningkat laju alir gas dari 1 L/menit sampai dengan 4 L/menit, maka pH akan semakin menurun dari 13 menjadi 9,8. Hal ini menyebabkan semakin sedikit endapan Na₂CO₃ yang terbentuk namun semakin cepat silika mengendap. Selain itu, hasil uji menunjukkan bahwa natrium karbonat yang terbentuk semakin sedikit seiring dengan pengurangan konsentrasi natrium silikat dengan hasil sebesar 6,2% hingga 1,5%.

Kata kunci: Fly ash, natrium silikat, penangkapan CO₂, pH

PENDAHULUAN

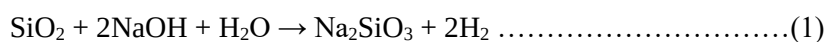
Pemanasan global yang disebabkan oleh peningkatan suhu atmosfer dapat mendorong serangkaian perubahan pada sistem cuaca dan iklim bumi. Peningkatan yang cepat ini terjadi karena manusia terus mengeluarkan gas rumah kaca (GRK) yang memerangkap panas ke atmosfer. Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas rumah kaca yang memegang dua pertiga dari total pengaruh pemanasan dari semua GRK yang dihasilkan manusia. Banyaknya CO₂ di udara akan melebihi 550 ppm pada tahun 2050 jika tidak ada tindakan yang diambil untuk mengurangi emisi CO₂ [1]. Terdapat beberapa tahapan untuk mengurangi emisi gas CO₂ di atmosfer, di antaranya adalah penangkapan CO₂ (CO₂ capture), kompresi CO₂ (CO₂ compression), transpor CO₂ (CO₂ transport), dan penyerapan CO₂ (CO₂ sequestration). Adsorpsi CO₂ menggunakan berbagai adsorben padat juga telah dikembangkan. Girimonte et al (2020) melakukan penelitian terkait adsorpsi CO₂ menggunakan silika mesopori dalam kolom fluidisasi terbatas. Dalam beberapa tahun terakhir, telah banyak penelitian juga yang menunjukkan bahwa logam alkali, terutama

litium dan natrium, dapat digunakan sebagai adsorben karbon dioksida [3]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa keramik natrium seperti natrium metasilikat (Na_2SiO_3) menunjukkan serapan CO_2 yang tidak jauh berbeda dengan litium, namun adsorpsi menggunakan natrium masih belum mendapat begitu banyak perhatian layaknya litium [4]. Penggunaan media padat untuk adsorpsi CO_2 memerlukan proses regenerasi penyerap. Penggunaan cairan penyerap yang dikembangkan pada penelitian ini memberikan solusi terhadap permasalahan tersebut. Selain karena regenerasi adsorben yang tidak diperlukan, silika amorf juga diperoleh sebagai produk yang memiliki nilai ekonomis.

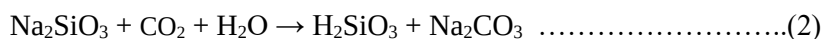
Natrium metasilikat (Na_2SiO_3) dapat disintesis dengan mereaksikan natrium hidroksida (NaOH) dengan silikon dioksida (SiO_2). Silikon dioksida ini dapat ditemukan di alam dengan mudah, salah satunya terdapat pada abu layang batu bara (*coal fly ash*). *Fly ash* adalah produk sampingan pembakaran, sekitar 60–88% dari total sisa pembakaran dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara. *Fly ash* dapat menyebabkan polusi udara polusi air bawah tanah, dan juga dapat berbahaya bagi makhluk hidup jika terhirup, sehingga perlu dicari strategi yang tepat untuk membuangnya [1]. Pemanfaatannya *fly ash* terus meningkat selama beberapa tahun, namun rasio pemanfaatan global rata-rata tetap kurang dari 30%. Dengan demikian, penggunaan hasil reaksi antara *fly ash* dan NaOH sebagai bahan baku Na_2SiO_3 berpeluang dijadikan sebagai adsorben CO_2 yang dapat memberikan manfaat ekonomi dan ramah lingkungan.

TINJAUAN PUSTAKA

Emisi CO_2 adalah masalah penting secara global, terutama untuk pembakaran batubara. Karbon dioksida (CO_2) adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar serta memiliki massa molekul relatif sebesar 44.010 g/mol. Karbon dioksida (CO_2) dapat larut dalam es pada suhu $-5\text{ }^\circ\text{C}$ hingga $-20\text{ }^\circ\text{C}$ dan $0\text{ }^\circ\text{C}$ pada air [5]. Reaksi antara karbon dioksida dan zat lain umumnya hanya terjadi pada suhu tinggi atau dengan menggunakan katalis. Proses perpindahan gas secara difusi yang disertai reaksi antara gas dan cairan adsorben (pelarut) disebut dengan adsorpsi kimia. Metode ini biasanya digunakan untuk menangkap CO_2 dalam skala besar industri. Hal ini karena metode ini sangat selektif dan mampu menyerap CO_2 lebih dari 99% vol [5]. Pada proses adsorpsi, digunakan pelarut/adsorben yang berfungsi untuk melarutkan gas yang diserap, baik secara fisik maupun dengan reaksi kimia, contohnya adsorben berbasis amin seperti MEA (monoethanolamine), DEA (diethanolamine), dan MDEA (methyldiethylamine) [6]. Keramik berbasis alkali seperti Litium Ortosilikat (Li_4SiO_4) juga sangat menjanjikan karena adsorpsi CO_2 yang tinggi, stabilitas sorpsi/desorpsi dan kinetika adsorpsidesorpsi yang cepat [4]. Selain itu natrium metasilikat (Na_2SiO_3) juga dapat digunakan sebagai adsorben CO_2 . Natrium metasilikat (Na_2SiO_3) memiliki ikatan ion yang terbentuk dengan kecenderungan atom untuk mendapatkan atau kehilangan elektron menjadi stabil. untuk saat ini, sintesis Na_2SiO_3 dapat dilakukan dengan cara mereaksikan SiO_2 dengan logam alkali seperti NaOH pada suhu yang relatif rendah, yaitu $95\text{--}105\text{ }^\circ\text{C}$ [6].



Pada proses adsorpsi CO_2 menggunakan Na_2SiO_3 , terjadi reaksi yang terdiri dari beberapa tahap sebagai berikut [11].

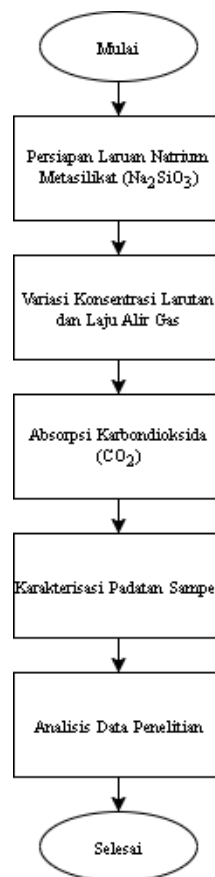


Pada mekanisme reaksi di atas, konsentrasi natrium metasilikat dan keasaman (pH) juga dapat mempengaruhi pembentukan endapan silika. Banyaknya gas CO_2 mempengaruhi pH larutan dan kemungkinan besar akan mempengaruhi jenis garam yang terbentuk, apakah NaHCO_3 atau Na_2CO_3 . Garam Na_2CO_3 terbentuk pada pH basa sekitar 10 sedangkan NaHCO_3 terbentuk pada pH 8 [11]. Natrium metasilikat (Na_2SiO_3) disintesis dengan mereaksikan natrium hidroksida (NaOH) dengan silikon dioksida (SiO_2) yang berasal dari *coal fly ash*. *Fly ash* merupakan salah satu sisa pembakaran yang dihasilkan secara masif selama proses pembakaran batubara [7]. Secara global, produksi *fly ash* tiap tahunnya diperkirakan antara 0,75–1 miliar ton. Jumlah ini diperkirakan akan meningkat beberapa tahun mendatang karena permintaan listrik terutama di negara-negara dengan cadangan batu bara yang besar seperti China dan India, akan dihasilkan lebih banyak *fly ash*. Jika *fly ash* tersebut tidak dikelola dengan baik, dapat menimbulkan konsekuensi kesehatan masyarakat dan lingkungan yang serius. Ancaman lingkungan dari pembuangan *fly ash* muncul karena partikel melayang di udara dan dapat mencemari tanah atau air. Dengan demikian, perlu

banyak penelitian dan pengembangan dalam pemanfaatan *fly ash* karena hal ini akan menghasilkan tingkat pemanfaatan yang tinggi dan memperbaiki dampak lingkungan yang berbahaya dari pembuangannya. Komposisi kimia *fly ash* terdiri dari silika, alumina, dan karbon tidak terbakarnya berguna sebagai prekursor untuk sintesis bahan berpori seperti silika, zeolit atau karbon aktif yang dapat digunakan sebagai adsorben CO_2 yang ekonomis. *Fly ash* yang mengandung kalsium dalam jumlah tinggi dapat berguna untuk penangkapan dan adsorpsi CO_2 secara permanen melalui pembentukan CaCO_3 [8]. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* ini memiliki potensi yang sangat besar untuk digunakan sebagai bahan baku sintesis Na_2SiO_3 . Dengan menggabungkan larutan Na_2SiO_3 dan gas CO_2 dengan proses karbonasi, dapat bertujuan untuk penangkapan CO_2 dan pemanfaatan *coal fly ash* tercapai [9].

METODE

Larutan umpan Na_2SiO_3 hasil reaksi dari *coal fly ash* dan NaOH diencerkan sesuai variasi konsentrasi. Kemudian larutan yang sudah disiapkan kemudian dimasukkan ke dalam labu leher tiga. Waterbath dinyalakan dan suhu diatur hingga 80°C . Gas murni CO_2 dialirkan dari tabung menuju labu leher tiga melewati aerator dengan laju alir sebesar 2 L/menit. Gas lalu masuk ke labu leher tiga bagian bawah dan digelembungkan dengan menggunakan sparger/batu aerator, sehingga terjadi kontak dengan larutan Na_2SiO_3 sehingga gas CO_2 akan terlarut. Langkah yang sama juga dilakukan pada variasi konsentrasi larutan Na_2SiO_3 1:2, 1:3, 1:4, dan 1:5 serta laju alir CO_2 1,2,3, dan 4 L/menit. Nilai pH pada sampel diukur menggunakan pH meter dan dicatat. Sampel tersebut kemudian dipisahkan dengan penyaringan menggunakan kertas Whatman 42, corong Büchner, dan pompa vakum. Padatan hasil penyaringan (residu) dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 15 menit hingga diperoleh residu bebas air. Residu kering kemudian dikurangi ukurannya dengan menggunakan mortar dan alu agar dapat menjadi bubuk halus. Sampel kemudian ditimbang dengan neraca analitis digital dan dianalisis karakteristiknya menggunakan X-Ray Diffraction (XRD).

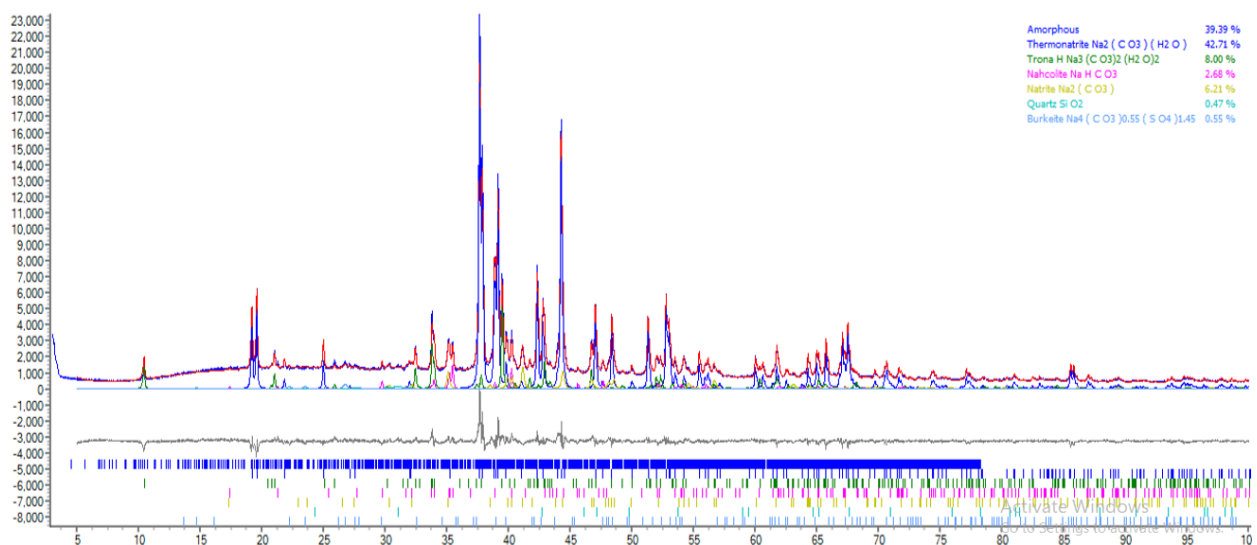


Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

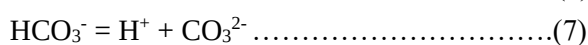
Pada penelitian ini terdapat reaksi adsorpsi CO_2 menggunakan larutan Na_2SiO_3 . Terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi reaksi adsorpsi CO_2 . Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari kecepatan pengadukan, tekanan tabung gas CO_2 , waktu adsorpsi, dan suhu operasi. Adapun variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini, yaitu konsentrasi larutan Na_2SiO_3 dan laju alir gas CO_2 .

Dari hasil karakterisasi XRD menunjukkan pembentukan natrium karbonat dan natrium bikarbonat serta produk sampingan yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pola XRD menunjukkan struktur amorf yang tinggi dari produk untuk semua variasi laju alir gas maupun konsentrasi Na_2SiO_3 . Pada proses kontak antara gas CO_2 dan natrium silikat dapat terbentuk silika amorf dan quartz. Selain itu penelitian yang sama juga dilakukan oleh Shen,dkk. dan Muljani,dkk menunjukkan bahwa terdapat struktur kristal yang diubah dari natrite menjadi trona, hal ini terjadi karena selama proses terjadi peningkatan energi injeksi serta peningkatan CO_2 yang dialirkan. Dengan kata lain, CO_2 telah berhasil ditangkap oleh larutan natrium silikat yang menghasilkan natrium karbonat dan silika amorf.

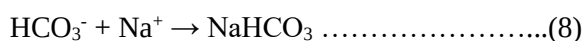


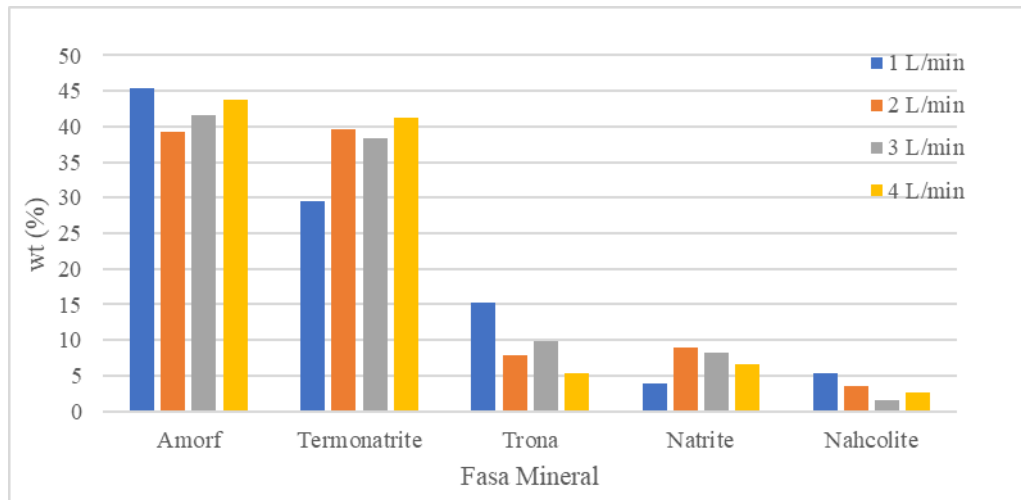
Gambar 2. Hasil analisis XRD dari sampel

Pada proses adsorpsi, terjadi kontak antara gas CO_2 dan larutan Na_2SiO_3 encer di labu leher tiga membentuk ion-ion karbonat (CO_3^{2-}) dan bikarbonat (HCO_3^-). Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa selama Na_2SiO_3 masih ada dalam larutan, karbon dioksida bereaksi dengan Na_2SiO_3 menghasilkan natrium karbonat (Na_2CO_3). Untuk waktu yang lebih lama, CO_2 juga terikat dalam senyawa lain selain Na_2CO_3 . Penambahan CO_2 lebih lanjut ke dalam larutan jenuh Na_2CO_3 ini akan membentuk natrium bikarbonat (NaHCO_3). Laju alir gas mempengaruhi pH. Semakin meningkat laju alir gas, maka pH akan semakin menurun. Hal ini menyebabkan semakin sedikit endapan Na_2CO_3 namun semakin cepat silika mengendap [11]. Laju alir gas yang cepat akan menyebabkan waktu kontak gas-cairan terjadi dengan sangat cepat yang mengakibatkan proses adsorpsi tidak berjalan sempurna. Natrium silikat konsentrasi tinggi yang memiliki pH 13, ketika laju alir gas CO_2 semakin meningkat, maka pH akan menurun, hal ini juga akan mempengaruhi terbentuknya natrium bikarbonat (NaHCO_3) atau natrium karbonat (Na_2CO_3). Konsentrasi natrium silikat yang digunakan dalam percobaan relatif tinggi, sehingga kemungkinan reaksi yang terjadi bila CO_2 kontak dengan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan mekanisme berikut [11].

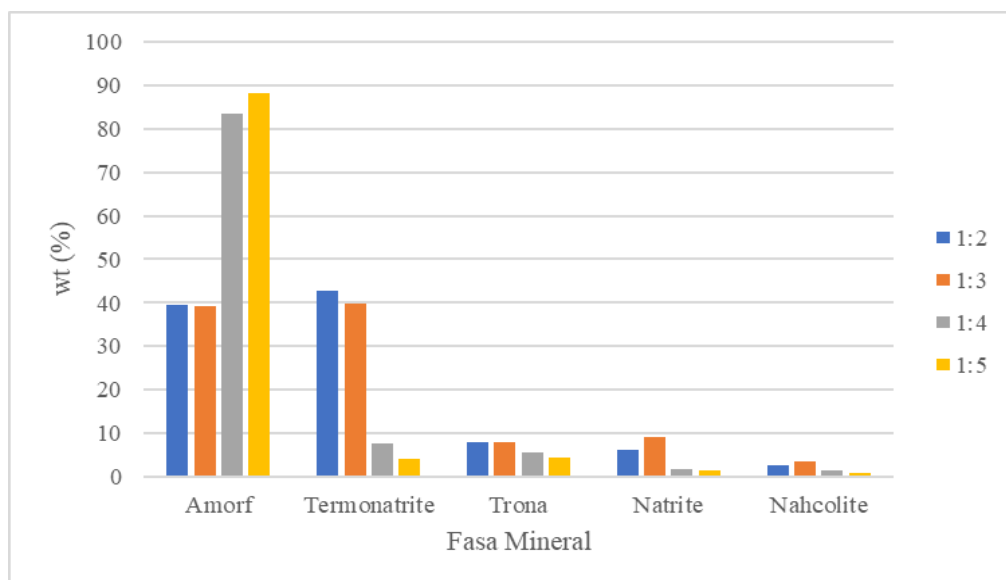


Kemudian Na^+ dapat diendapkan menjadi NaHCO_3 sebagai berikut





Gambar 2. Hasil analisis XRD (%) terhadap residu hasil variasi laju alir

Gambar 3. Hasil analisis XRD (%) terhadap residu hasil variasi konsentrasi larutan Na_2SiO_3

Penelitian adsorpsi CO_2 menggunakan larutan Na_2SiO_3 untuk semua variasi konsentrasi dilakukan pada laju alir gas CO_2 2 L/menit. Adsorpsi gas CO_2 mengakibatkan turunnya pH larutan. Hal ini karena karbon dioksida yang terlarut dalam air akan terhidrasi menjadi H_2CO_3 yang ditunjukkan pada Persamaan (5)-(7). Semakin banyak CO_2 yang dapat larut menyebabkan semakin banyak konsentrasi ion H^+ yang dihasilkan sehingga berakibat pada penurunan pH dari 13 menjadi 9,8. Selain itu, dari hasil data menunjukkan semakin turun konsentrasi Na_2SiO_3 maka natrium karbonat yang terbentuk semakin sedikit. Hal tersebut terjadi karena berkurangnya jumlah molekul Na_2SiO_3 yang kontak dengan gas CO_2 . Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa CO_2 dapat diserap dengan larutan Na_2SiO_3 selama larutan berada di tingkat keasaman rendah atau konsentrasi larutan Na_2SiO_3 yang tinggi.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi larutan dan laju alir merupakan parameter penting dalam adsorpsi CO_2 menggunakan natrium silikat dari *coal fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju alir gas mempengaruhi pH. Semakin meningkat laju alir gas dari 1 L/menit sampai dengan 4 L/menit, maka pH akan semakin menurun dari 13 menjadi 9,8. Hal ini menyebabkan semakin sedikit endapan Na_2CO_3 yang terbentuk namun semakin cepat silika mengendap. Berdasarkan hasil uji menunjukkan bahwa natrium karbonat yang terbentuk semakin sedikit seiring dengan pengurangan konsentrasi natrium silikat dengan hasil sebesar 6,2 hingga 1,5%. Pada larutan dengan konsentrasi Na_2SiO_3

yang tinggi menyerap CO₂ jauh lebih banyak dibandingkan dengan larutan Na₂SiO₃ konsentrasi rendah. Dengan kata lain, CO₂ telah berhasil ditangkap oleh larutan natrium silikat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristek Dikti dan Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dana selama proses penelitian ini berlangsung. Terima kasih kepada rekan-rekan penelitian, yaitu Sasa Aulia, Maulana Istar, Salsabila, Fikry Riyadi, Yasmin Hanifah, Kayla Aleycia, Ahmad Nugroho, Dhana, Daniel, dan Widodo atas dukungan dan kerjasamanya selama penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wang, B., Pan, Z., Cheng, H., Zhang, Z., Cheng, F., 2021a. A review of carbon dioxide sequestration by mineral carbonation of industrial byproduct gypsum. *J. Clean. Prod.* 302, 126930. Wang, H., Liu, X., ... 2021
- [2] R. Girimonte, F. Testa, M. Gallo, R. Buscieti, G. Leone, B. Formisani, *Processes*, 8. 2020
- [3] Rodríguez-Mosqueda, R., & Pfeiffer, H. High CO₂ capture in sodium metasilicate (Na₂SiO₃) at Low Temperatures (30–60°C) through the CO₂-H₂O chemisorption process. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(26), 13452–13461.. 2013
- [4] Sanna, A., & Maroto-Valer, M. M. CO₂ Capture at High Temperature Using Fly Ash Derived Sodium Silicates. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(14), 4080–4088.. 2016.
- [5] Topham, S., Bazzanella, A., Schiebahn, S., Luhr, S., Zhao, L., Otto, A., & Stolten, D. . Carbon Dioxide. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (pp. 1–43). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.. 2014
- [6] Peng, L., Dai, H., Wu, Y., Dai, Z., Li, X., & Lu, X. Performance and adsorption mechanism of a magnetic calcium silicate hydrate composite for phosphate removal and recovery. *Water Science and Technology*, 2017(2), 578–591.. 2017
- [7] Yang, L., Wen, T., Wang, L., Miki, T., Bai, H., Lu, X., Yu, H., & Nagasaka, T.. The stability of the compounds formed in the process of removal Pb(II), Cu(II) and Cd(II) by steelmaking slag in an acidic aqueous solution. *Journal of Environmental Management*, 231, 41–48. 2017
- [8] Yan, F., Jiang, J., Li, K., Liu, N., Chen, X., Gao, Y., et al.,. Green synthesis of nanosilica from coal Fly ash and its stabilizing effect on CaO sorbents for CO₂ capture. *Environ Sci Technol* 51, 7606–7615. 2017
- [9] Kierzkowska, A. M., Pacciani, R., & Müller, C. R.. CaO-Based CO₂ Sorbents: From Fundamentals to the Development of New, Highly Effective Materials. *ChemSusChem*, 6(7), 1130–1148.. 2013
- [10] Shen, P., Sun, Y., Liu, S., Jiang, Y., Zheng, H., Xuan, D., et al., Synthesis of amorphous nano-silica from recycled concrete fines by two-step wet carbonation. *Cem. Concr. Res.* 147, 106526. 2021
- [11] Muljani, S., Setyawan, H., Irianto, F. I., & Fransisco, S. P. CO₂ Capture using Sodium Silicate Solution in a Packed Bed Column . *E3S Web of Conferences*, 328, 01015.. 2021