

## Pengaruh Konsentrasi Larutan Natrium Silikat Hasil Pengolahan Limbah *Coal Fly Ash* dan Laju Alir Gas CO<sub>2</sub> untuk Proses Carbon Capture

La Tansa Pramesti Dewi<sup>1</sup>, Widya Rosita<sup>2</sup>, Himawan Tri Bayu Murti Petrus<sup>3</sup>  
Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada<sup>1,2</sup>,  
Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada<sup>3</sup>,  
e-mail: [latansapramestidewi@mail.ugm.ac.id](mailto:latansapramestidewi@mail.ugm.ac.id)<sup>1</sup>, [widyar@ugm.ac.id](mailto:widyar@ugm.ac.id)<sup>2</sup>, [bayupetrus@ugm.ac.id](mailto:bayupetrus@ugm.ac.id)<sup>3</sup>

### ABSTRACT

Global warming is currently a threat to the earth's weather and climate. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) 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 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) solution. Sodium silicate is obtained by reacting coal fly ash with sodium hydroxide (NaOH). CO<sub>2</sub> gas bubbles are used to create contact between the Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solution and CO<sub>2</sub> gas. The research was carried out by observing the solubility of CO<sub>2</sub> in the solution from changes in the parameters used, namely the concentration of the Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> solution and the CO<sub>2</sub> 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 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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 (CO<sub>2</sub>) 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 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>). Natrium silikat diperoleh dengan mereaksikan *coal fly ash* dengan natrium hidroksida (NaOH). Gelembung gas CO<sub>2</sub> digunakan agar terjadi kontak antara larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan gas CO<sub>2</sub>. Penelitian dilakukan dengan mengamati kelarutan CO<sub>2</sub> di larutan dari perubahan parameter yang digunakan, yaitu konsentrasi larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan laju alir gas CO<sub>2</sub>. 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 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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 CO<sub>2</sub>, pH

### PENDAHULUAN

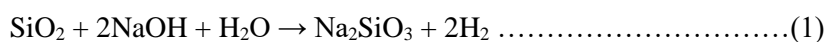
Pemanasan global yang disebabkan oleh peningkatan suhu atmosfer dapat mendorong serangkaian perubahan pada sistem cuaca dan iklim bumi. Peningkatan yang cepat ini terjadi karena manusia terus mengeluarkan gas rumah kaca (GRK) yang memerangkap panas ke atmosfer. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan gas rumah kaca yang memegang dua pertiga dari total pengaruh pemanasan dari semua GRK yang dihasilkan manusia. Banyaknya CO<sub>2</sub> di udara akan melebihi 550 ppm pada tahun 2050 jika tidak ada tindakan yang diambil untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> [1]. Terdapat beberapa tahapan untuk mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> di atmosfer, di antaranya adalah penangkapan CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> capture), kompresi CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> compression), transpor CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> transport), dan penyerapan CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> sequestration). Adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan berbagai adsorben padat juga telah dikembangkan. Girimonte et al (2020) melakukan penelitian terkait adsorpsi CO<sub>2</sub> 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 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) menunjukkan serapan  $\text{CO}_2$  yang tidak jauh berbeda dengan litium, namun adsorpsi menggunakan natrium masih belum mendapat begitu banyak perhatian layaknya litium [4]. Penggunaan media padat untuk adsorpsi  $\text{CO}_2$  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.

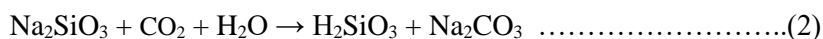
Natrium metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dapat disintesis dengan mereaksikan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dengan silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ). Silikon dioksida ini dapat ditemukan di alam dengan mudah, salah satunya terdapat pada abu layang batu bara (*coal fly ash*). *Fly ash* 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  $\text{NaOH}$  sebagai bahan baku  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  berpeluang dijadikan sebagai adsorben  $\text{CO}_2$  yang dapat memberikan manfaat ekonomi dan ramah lingkungan.

## TINJAUAN PUSTAKA

Emisi  $\text{CO}_2$  adalah masalah penting secara global, terutama untuk pembakaran batubara. Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar serta memiliki massa molekul relatif sebesar 44.010 g/mol. Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) 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  $\text{CO}_2$  dalam skala besar industri. Hal ini karena metode ini sangat selektif dan mampu menyerap  $\text{CO}_2$  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 ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) juga sangat menjanjikan karena adsorpsi  $\text{CO}_2$  yang tinggi, stabilitas sorpsi/desorpsi dan kinetika adsorpsidesorpsi yang cepat [4]. Selain itu natrium metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) juga dapat digunakan sebagai adsorben  $\text{CO}_2$ . Natrium metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) memiliki ikatan ion yang terbentuk dengan kecenderungan atom untuk mendapatkan atau kehilangan elektron menjadi stabil. Untuk saat ini, sintesis  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dapat dilakukan dengan cara mereaksikan  $\text{SiO}_2$  dengan logam alkali seperti  $\text{NaOH}$  pada suhu yang relatif rendah, yaitu  $95\text{--}105\text{ }^\circ\text{C}$  [6].



Pada proses adsorpsi  $\text{CO}_2$  menggunakan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , terjadi reaksi yang terdiri dari beberapa tahap sebagai berikut [11].

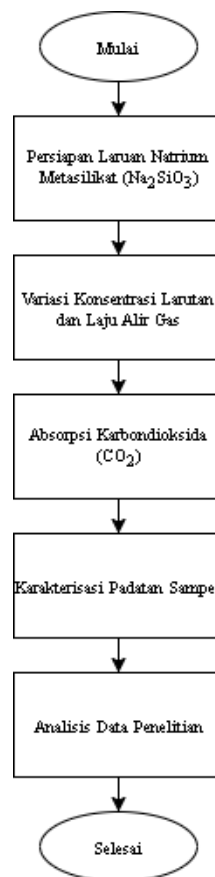


Pada mekanisme reaksi di atas, konsentrasi natrium metasilikat dan keasaman (pH) juga dapat mempengaruhi pembentukan endapan silika. Banyaknya gas  $\text{CO}_2$  mempengaruhi pH larutan dan kemungkinan besar akan mempengaruhi jenis garam yang terbentuk, apakah  $\text{NaHCO}_3$  atau  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Garam  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  terbentuk pada pH basa sekitar 10 sedangkan  $\text{NaHCO}_3$  terbentuk pada pH 8 [11]. Natrium metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) disintesis dengan mereaksikan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dengan silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) 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<sub>2</sub> yang ekonomis. *Fly ash* yang mengandung kalsium dalam jumlah tinggi dapat berguna untuk penangkapan dan adsorpsi CO<sub>2</sub> secara permanen melalui pembentukan CaCO<sub>3</sub> [8]. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* ini memiliki potensi yang sangat besar untuk digunakan sebagai bahan baku sintesis Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Dengan menggabungkan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan gas CO<sub>2</sub> dengan proses karbonasi, dapat bertujuan untuk penangkapan CO<sub>2</sub> dan pemanfaatan *coal fly ash* tercapai [9].

## METODE

Larutan umpan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sehingga gas CO<sub>2</sub> akan terlarut. Langkah yang sama juga dilakukan pada variasi konsentrasi larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 1:2, 1:3, 1:4, dan 1:5 serta laju alir CO<sub>2</sub> 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).

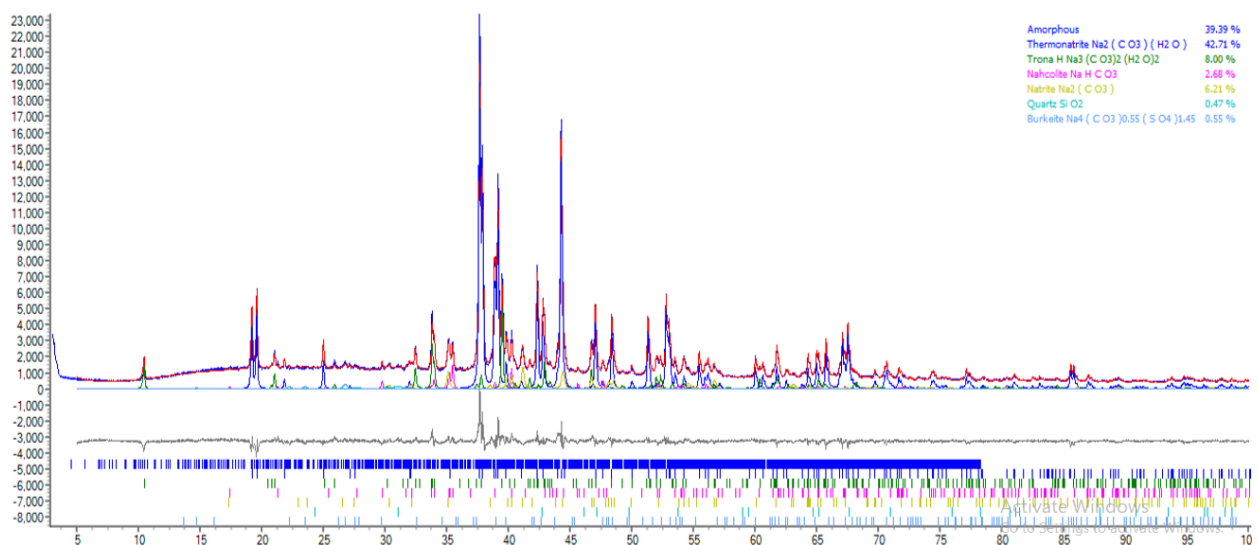


Gambar 1. Diagram alir penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

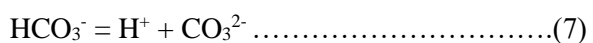
Pada penelitian ini terdapat reaksi adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi reaksi adsorpsi CO<sub>2</sub>. Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari kecepatan pengadukan, tekanan tabung gas CO<sub>2</sub>, waktu adsorpsi, dan suhu operasi. Adapun variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini, yaitu konsentrasi larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan laju alir gas CO<sub>2</sub>.

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<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Pada proses kontak antara gas CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> yang dialirkan. Dengan kata lain, CO<sub>2</sub> telah berhasil ditangkap oleh larutan natrium silikat yang menghasilkan natrium karbonat dan silika amorf.

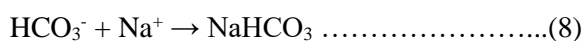


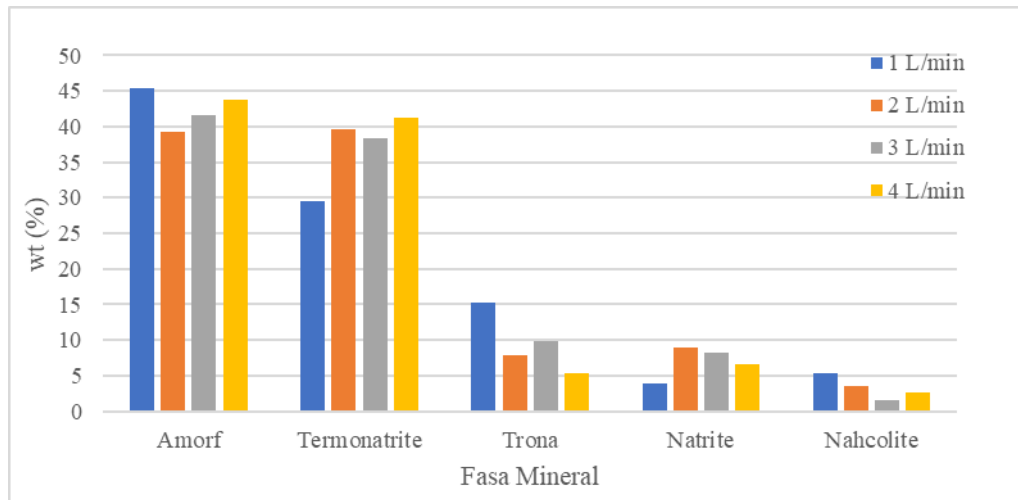
Gambar 2. Hasil analisis XRD dari sampel

Pada proses adsorpsi, terjadi kontak antara gas CO<sub>2</sub> dan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> encer di labu leher tiga membentuk ion-ion karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) dan bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa selama Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> masih ada dalam larutan, karbon dioksida bereaksi dengan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> menghasilkan natrium karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Untuk waktu yang lebih lama, CO<sub>2</sub> juga terikat dalam senyawa lain selain Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Penambahan CO<sub>2</sub> lebih lanjut ke dalam larutan jenuh Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ini akan membentuk natrium bikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>). Laju alir gas mempengaruhi pH. Semakin meningkat laju alir gas, maka pH akan semakin menurun. Hal ini menyebabkan semakin sedikit endapan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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<sub>2</sub> semakin meningkat, maka pH akan menurun, hal ini juga akan mempengaruhi terbentuknya natrium bikarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) atau natrium karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Konsentrasi natrium silikat yang digunakan dalam percobaan relatif tinggi, sehingga kemungkinan reaksi yang terjadi bila CO<sub>2</sub> kontak dengan larutan natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dengan mekanisme berikut [11].

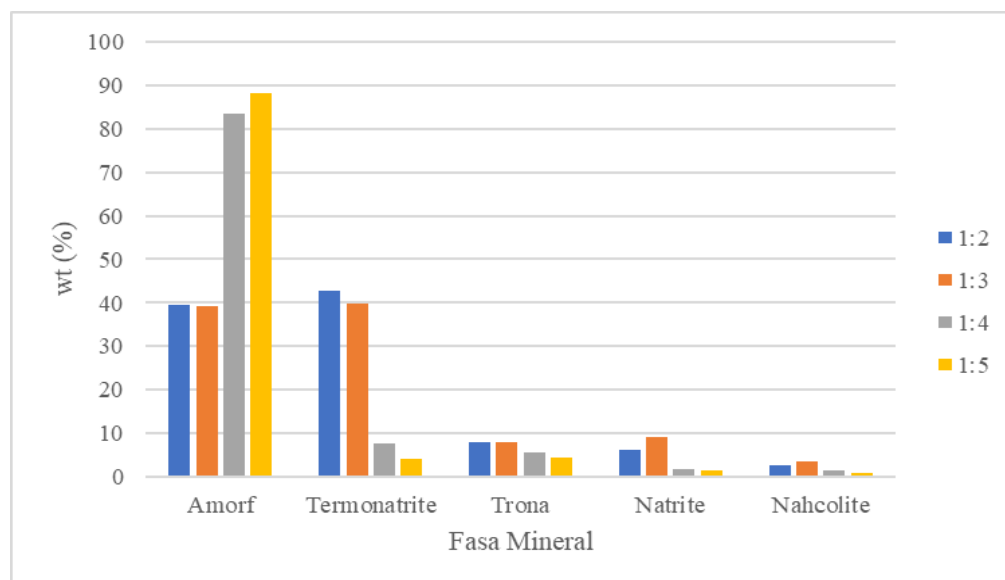


Kemudian Na<sup>+</sup> dapat diendapkan menjadi NaHCO<sub>3</sub> sebagai berikut





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



Gambar 3. Hasil analisis XRD (%) terhadap residu hasil variasi konsentrasi larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Penelitian adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> untuk semua variasi konsentrasi dilakukan pada laju alir gas CO<sub>2</sub> 2 L/menit. Adsorpsi gas CO<sub>2</sub> mengakibatkan turunnya pH larutan. Hal ini karena karbon dioksida yang terlarut dalam air akan terhidrasi menjadi H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang ditunjukkan pada Persamaan (5)-(7). Semakin banyak CO<sub>2</sub> yang dapat larut menyebabkan semakin banyak konsentrasi ion H<sup>+</sup> yang dihasilkan sehingga berakibat pada penurunan pH dari 13 menjadi 9,8. Selain itu, dari hasil data menunjukkan semakin turun konsentrasi Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> maka natrium karbonat yang terbentuk semakin sedikit. Hal tersebut terjadi karena berkurangnya jumlah molekul Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang kontak dengan gas CO<sub>2</sub>. Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa CO<sub>2</sub> dapat diserap dengan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> selama larutan berada di tingkat keasaman rendah atau konsentrasi larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang tinggi.

## KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi larutan dan laju alir merupakan parameter penting dalam adsorpsi CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 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<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

yang tinggi menyerap CO<sub>2</sub> jauh lebih banyak dibandingkan dengan larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> konsentrasi rendah. Dengan kata lain, CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> capture in sodium metasilicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) at Low Temperatures (30-60°C) through the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O chemisorption process. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(26), 13452–13461. 2013
- [4] Sanna, A., & Maroto-Valer, M. M. CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> capture. *Environ Sci Technol* 51, 7606–7615. 2017
- [9] Kierzkowska, A. M., Pacciani, R., & Müller, C. R.. CaO-Based CO<sub>2</sub> 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. CO<sub>2</sub> Capture using Sodium Silicate Solution in a Packed Bed Column . *E3S Web of Conferences*, 328, 01015. 2021