

PENJERAPAN GAS CO HASIL PEMBAKARAN SAMPAH MENGGUNAKAN SORBENT TERMODIFIKASI DALAM REAKTOR *FIXED BED*

Mariana^{1*)}, Farid Mulana¹⁾, dan Purwana Satriyo²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh, 23111

²⁾Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh
Jl. Tgk. Hasan Krueng Kalee No. 10, Darussalam, Banda Aceh, 23111

^{*)}Penulis korespondensi : mariana_hasyim@yahoo.com

Abstract

ADSORPTION OF CO FROM WASTE COMBUSTION USING MODIFIED SORBENT IN A FIXED BED REACTOR. *Gases produced by garbage burning consist of dangerous gases such as CO, SO₂ and other gases. Technology for reducing dangerous gases from incinerator outlet can be done by using a dry or wet process. The dry process is more economical process because of simple process, easy maintenance and no liquid waste as product. However, the weakness of the dry process is low absorption conversion and low gas removal efficiency. One way to overcome these problems is to use sorbent which has high reactivity. An inexpensive sorbent that commonly used is Ca(OH)₂. The aim of this research was to increase the reactivity of Ca(OH)₂ sorbent by using diatomaceous earth and compost as a source of silica and biosorbent, respectively. Diatomaceous earth contains CaO, SiO₂ and Al₂O₃ and compost contains bacteria as a biosorbent that can convert CO to CO₂ and CH₄. The reaction between SiO₂ and Ca(OH)₂ would form calcium silicate hydrate (CaO.SiO₂.2H₂O) that has a high porosity and reactivity. The results showed that the reactivity of Ca(OH)₂ sorbent increased by addition of diatomaceous earth and compost. The results also showed that the sorption of CO gas increases with increasing of height of sorbent bed and temperature. The highest CO gas sorption was obtained at temperature of 150°C and sorbent bed height of 6 cm using the modified sorbent with Ca(OH)₂/DE/compost ratio of 3:1:1.*

Keywords: *fixed bed reactor; gas sorption; sorbent Ca(OH)₂/Diatomaceous earth/compos*

Abstrak

Gas hasil pembakaran sampah terdiri dari gas-gas yang berbahaya seperti CO, SO₂ dan lain sebagainya. Teknologi penghilangan gas-gas tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan proses kering maupun proses basah. Penghilangan dengan proses kering lebih ekonomis karena sederhana, mudah pemeliharaan dan tidak menghasilkan limbah cair. Namun demikian, kelemahan proses kering adalah konversi absorpsi rendah dan efisiensi penyisihan gas relatif kecil. Salah satu cara mengatasi masalah tersebut di atas adalah dengan menggunakan sorbent yang mempunyai reaktifitas yang tinggi. Sorbent yang umum digunakan dan murah adalah Ca(OH)₂. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan reaktifitas sorbent Ca(OH)₂ dengan menggunakan tanah diatomeae sebagai sumber silika dan kompos sebagai sumber biosorbent. Tanah diatomea umumnya mengandung CaO, SiO₂ dan Al₂O₃. Reaksi antara SiO₂ dengan Ca(OH)₂ membentuk kalsium silicate hidrat (CaO.SiO₂.2H₂O) yang mempunyai porositas dan reaktifitas yang tinggi. Kompos mengandung bakteri sebagai biosorbent yang dapat mengubah gas CO menjadi CO₂ dan CH₄. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktifitas sorbent Ca(OH)₂ meningkat dengan penambahan DE dan kompos. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penjerapan gas CO meningkat dengan meningkatnya tinggi unggun sorbent dan temperatur. Penjerapan gas CO tertinggi diperoleh pada penggunaan modifikasi sorbent Ca(OH)₂/DE/kompos (3:1:1), temperatur 150°C dan tinggi unggun sorbent 6 cm dari variabel yang dilakukan.

Kata kunci: *fixed bed reaktor; penjerapan gas; sorbent Ca(OH)₂/tanah diatome/kompos*

PENDAHULUAN

Jutaan sampah dibuang ke lingkungan setiap harinya. Sebagian besar sampah ditumpuk dalam bentuk *landfill* di permukaan tanah, dibuang ke sungai atau laut tanpa penanganan terlebih dahulu. Sampah merupakan masalah yang paling serius terutama untuk daerah perkotaan yang berpenduduk pesat. Salah satu penanganan sampah dapat dilakukan melalui proses pembakaran di dalam sebuah *incinerator* (alat pembakaran sampah).

Gas-gas hasil pembakaran sampah dalam *incinerator* umumnya mengandung: (1) debu; (2) gas-gas seperti sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), carbon monoksida (CO), asam hydroklorik; (3) dan logam-logam. Semua gas-gas tersebut di atas sangat berbahaya karena dapat bereaksi dengan radikal bebas di udara membentuk asam yang dapat menyebabkan terjadinya hujan asam dan penipisan lapisan ozon. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya panas global bumi serta dapat menyebabkan berbagai penyakit seperti iritasi pernapasan, batuk dan sebagainya yang dapat meningkatkan angka kematian.

Berbagai teknologi proses penyisihan gas hasil pembakaran telah dilakukan (Iizuka dkk., 2013; Kanai dkk., 2012; Fujioka dkk., 2012; Castilho dkk., 2013). Proses yang umum digunakan adalah proses kering dan proses basah. Penggunaan proses kering mempunyai beberapa keunggulan dari proses basah antara lain: (1) murah; (2) mudah penanganan; dan (3) tidak menghasilkan limbah cair. Salah satu proses pemisahan gas secara kering yang efektif, sederhana, mudah penanganan dan murah adalah menggunakan reaktor *fixed bed* dengan menggunakan absorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Namun demikian proses ini juga mempunyai beberapa kelemahan antara lain adalah rendahnya konversi sorbent dan efisiensi pemisahan gas (Mariana dkk., 2003; Seno dkk., 1996; Uchida dkk., 1979).

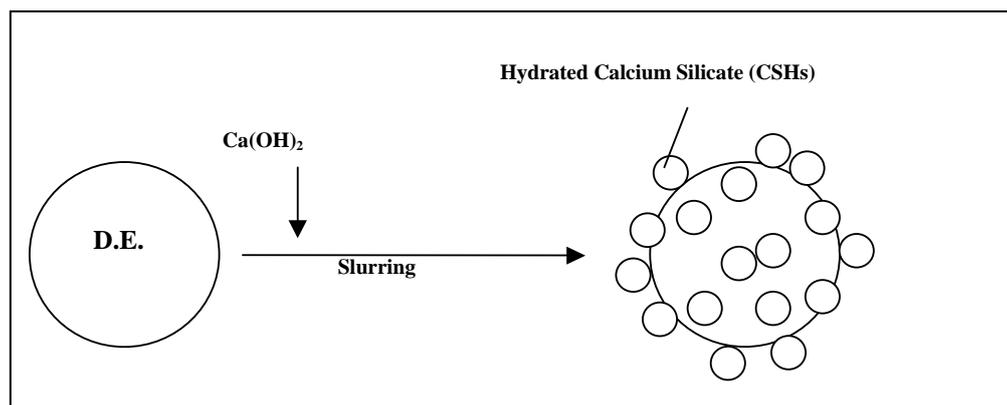
Untuk meningkatkan efisiensi pemisahan gas dan meningkatkan reaktivitas sorbent (konversi kalsium), berbagai variasi bahan tambahan (*additive*) dapat ditambahkan kedalam sorbent. Sorbent yang diperoleh dengan mencampur kalsium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) di dalam air dengan bahan mengandung silika dapat meningkatkan konversi kalsium dibandingkan dengan

konversi kalsium yang diperoleh tanpa campuran *additive* (Garea dkk., 1996). Penambahan kompos ke dalam sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bisa meningkatkan pemisahan gas CO yang disebabkan oleh bakteri sebagai *biosorbent* akan mengubah gas CO menjadi gas CO_2 dan CH_4 (Suprpto, 2003).

Berbagai literatur mengemukakan bahwa reaksi *pozzolanic* antara silika dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di dalam larutan (*slurry*) membentuk kalsium silikat hidrat (*hydrated calcium silicates* (CSHs)) dan kalsium alumina (CAHs) yang tinggi yang dapat meningkatkan reaktivitas dari sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Liu dkk., 2002; Ho dan Shih, 1992; Ishizuka dkk., 2000). Gambar 1 menunjukkan model reaksi *pozzolanic* $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan silika yang mengandung DE.

Beberapa literatur juga menyebutkan bahwa reaktivitas sorbent sangat tergantung pada luas permukaan kontak sorbent (*specific surface area*) (Klinspor dkk., 1983; 1984). Secara jelas pengaruh luas permukaan kontak terhadap laju reaksi dengan menggunakan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebagai sorbent padat telah dilaporkan oleh beberapa literatur (Irabien dkk., 1992; Ortiz dkk., 1993). Tsuchiai dkk (1995) menyebutkan bahwa penghilangan gas maksimum diperoleh ketika pada waktu sebuah sorbent mencapai diameter pori rata-rata (*mean pore diameter*) maksimum, tetapi pada saat itu luas permukaan kontak spesifik (*specific surface area*) belum mencapai maksimum. Renado dkk. (1999) menunjukkan bahwa volume *mesopore* dan *macropore* merupakan komponen yang paling utama yang berhubungan dengan reaktivitas sorbent dan konversi penyisihan gas.

Lin dan Shih (2003) menyebutkan bahwa peningkatan luas permukaan kontak spesifik (*specific surface area*) sangat dipengaruhi oleh peningkatan volume total pori. Jozewicz dkk. (1987) menyebutkan bahwa peningkatan spesies hidrat (*hydrated species*) yang terdapat di dalam permukaan sorbent dapat meningkatkan reaktivitas padatan dan diharapkan untuk menghilangkan hidrasi air dengan pengontakan sorbent dan gas panas untuk menghasilkan pori baru yang mempunyai luas permukaan kontak baru. Peristiwa ini umumnya dikenal dengan proses kalsinasi.



Gambar 1. Model reaksi *pozzolanic* $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan silika yang terkandung dalam DE (Liu, 2002)

Jika reaktifitas sorbent sangat tergantung pada luas permukaan kontak spesifik (*specific surface area*) dan volume total pori, maka sangatlah penting untuk meningkatkan luas permukaan kontak spesifik dan volume pori dari sebuah sorbent padat melalui proses kalsinasi.

Kompos adalah hasil penguraian parsial atau tidak lengkap dari campuran bahan-bahan organik yang dapat dipercepat secara artifisial oleh populasi berbagai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembab, dan *aerobik* atau *anaerobic*. Pengomposan adalah proses dimana bahan organik mengalami penguraian secara biologis, khususnya oleh mikroba-mikroba yang memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi. Membuat kompos adalah mengatur dan mengontrol proses alami tersebut agar kompos dapat terbentuk lebih cepat. Proses ini meliputi membuat campuran bahan yang seimbang, pemberian air yang cukup, pengaturan aerasi, dan penambahan aktivator pengomposan.

Kompos sangat bermanfaat untuk mengurangi tingkat cemaran udara yang berasal dari sumber-sumber zat pencemar berupa bahan organik mudah menguap yang banyak digunakan sebagai pelarut pada industri kimia, industri polimer dan laboratorium seperti gas CO dan senyawa hidrokarbon lainnya (Supriyono, 1999). Penelitian tentang modifikasi sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan DE dan kompos sejauh ini belum diketemukan.

Penelitian ini difokuskan pada persiapan absorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang mempunyai reaktifitas yang tinggi dengan penambahan *additive* tanah diatome (DE) dan kompos.

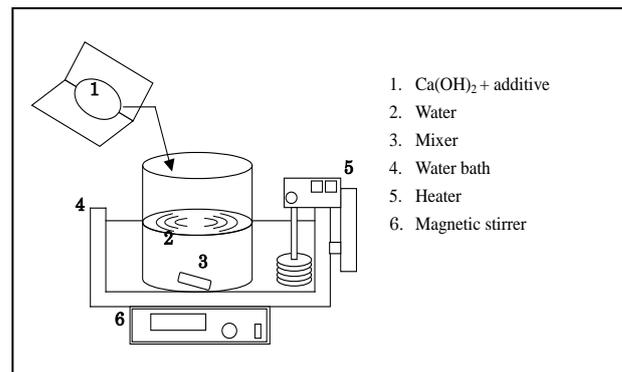
METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan adalah berupa: (1) $\text{Ca}(\text{OH})_2$; (2) tanah diatome; (3) kompos; dan (4) aquades. Kapur hidrat (*hydrated lime*) yang digunakan dalam percobaan ini adalah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ murni (99.9% - $\text{Ca}(\text{OH})_2$), sedangkan tanah diatome (DE) yang digunakan berasal dari NAD dengan komposisi: $\text{SiO}_2 = 33,94\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,89\%$ dan *innert* = 61,17% (Data primer, Baristan, 2009). Sedangkan kompos yang digunakan merupakan pupuk kompos olahan limbah sawit dengan komposisi: air = 45-50%, abu = 12,6%, N = 2-3%, C = 35,1%, P = 0,2-04%, K = 4-6%, Ca = 1-2%, Mg = 0,8-1,0%, C/N = 15,03% dan bahan organik > 50% (Supriyono, 1999).

Peralatan yang dipersiapkan meliputi: (1) erlenmeyer; (2) pipet volum; (3) aluminium foil; (4) corong pemisah; (5) gelas ukur; (6) magnetic stirrer/water batch; dan (6) termometer. Persiapan sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{DE}$ ditunjukkan pada Gambar 2.

Tanah diatome dan kompos dihaluskan dan diayak sesuai dengan variable proses yang dilakukan. Kapur hidrat dan additive DE, bersama-sama dengan 100 g air dimasukkan ke dalam beaker *polypropylene conical* pada berbagai variasi rasio $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{additives}$

dengan rasio berat air/padatan ($\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{additives}$) adalah 10.



Gambar 2. Skema reaktor *batch* berpengaduk

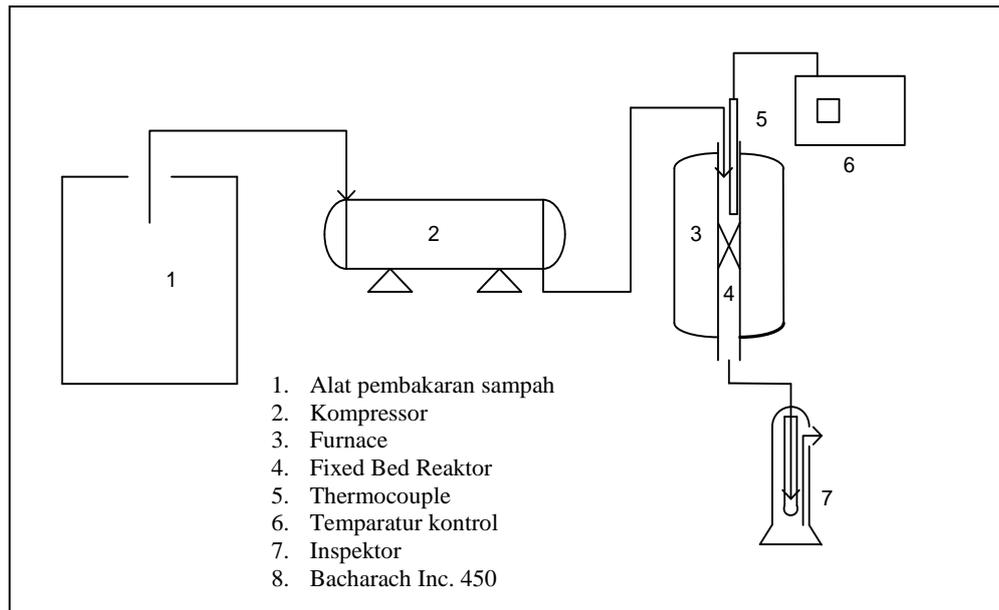
Beaker kemudian ditutup dan dimasukkan ke dalam was water bath pada temperatur 65°C . Kemudian diaduk dengan magnetic stirrer selama 2 jam. Setelah diaduk, slurry dikeringkan selama 24 jam pada temperature 120°C dan solid kemudian dikalsinasi pada berbagai variasi temperature selama 2 jam. Cake hasil pengeringan dihaluskan dan kemudian dilakukan analisa spesifik surface area (SBET). Cake sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{DE}$ dengan kehalusan 350 mesh dicampur dengan kompos 350 mesh dengan perbandingan 3:1:1.

Sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{DE}/\text{kompos}$ kemudian dimasukkan ke dalam *fixed bed* reaktor pada ketinggian tertentu (2 cm, 4 cm, 6 cm) untuk test aktifitas. SEM, Hitachi S-3000N digunakan untuk melihat morfologi sorbent. Konsentrasi gas masuk dan keluar reaktor dianalisa dengan menggunakan Bacharach.Inc 450 Analyzer. Adapun skema proses penjerapan gas masing-masing ditunjukkan pada Gambar 3.

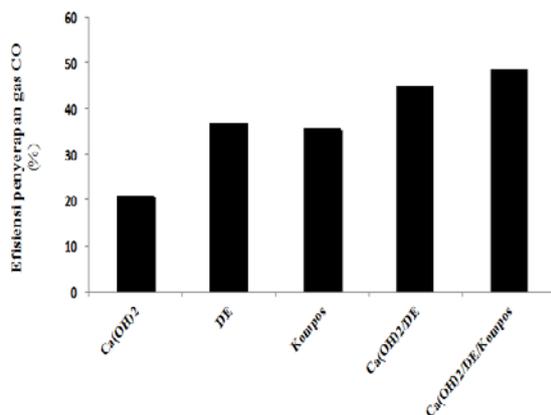
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Jenis Sorbent Terhadap Efisiensi Penjerapan Gas

Gambar 4 menunjukkan bahwa efisiensi penjerapan gas CO untuk semua jenis *sorbent* berada diatas 10%. Efisiensi penjerapan gas CO yang paling tinggi adalah pada *sorbent* $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{DE}+\text{kompos}$ yaitu sebesar 48,761% dalam variabel percobaan yang dilakukan. Hal ini dikarenakan sorbent memiliki kandungan gugus silika yang berfungsi sebagai peningkat reaktifitas *sorbent* serta adanya komponen kompos seperti bakteri yang dapat menguraikan gas CO menjadi gas metana dengan adanya Hidrogen dan gas CO_2 dengan adanya oksigen. Menurut Suprpto (2003), kehadiran kompos di dalam sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dapat meningkatkan penurunan konsentrasi CO di dalam gas hasil pembakaran.



Gambar 3 Skema rangkaian proses penjerapan gas

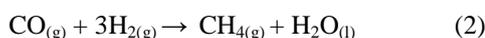


Gambar 4. Pengaruh jenis sorbent terhadap efisiensi penjerapan gas pada T=150°C dan tinggi unggun 6 cm

Penurunan konsentrasi CO ini dikarenakan terdapat bakteri *anaerobic* seperti *Methanobacterium* dan *Methanocarcina* dapat mengubah gas CO menjadi metana dengan adanya *hydrogen*. Hidrogen terbentuk dari reaksi antara Ca(OH)₂ dengan gas CO hasil pembakaran (Alizar, 2005).



Karbonmonoksida dioksidasi dan berlaku sebagai donor electron selama pertumbuhan berbagai bakteri Clostridia. Beberapa bakteri aerobik yang lain dalam bentuk populasi campuran dapat mengubah gas CO menjadi metana dengan adanya hidrogen (Suprpto, 2003).

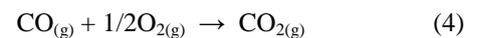


Beberapa bakteri anaerobik *Methano-carcina* dan *Methanobacterium* dengan adanya hidrogen dapat

mengubah gas CO menjadi CH₄ dan tanpa menggunakan oksigen dapat mengoksidasi CO menjadi CO₂ (Kluyver dan Schellen, 1974).

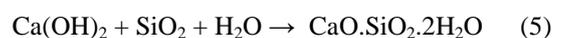


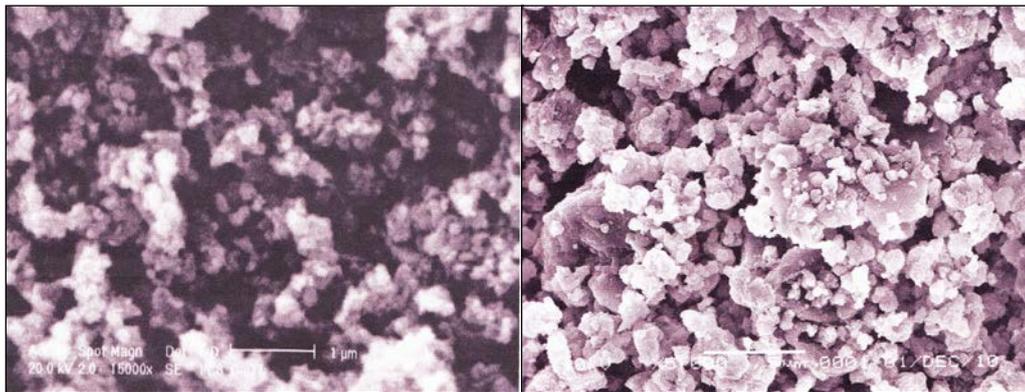
Spesies seperti Carboxydomonas, Hydrogennomonas, Bacillus dan bakteri pengoksidasi tanah dapat mengoksidasi gas CO menjadi CO₂ (Hubley, 1974).



Di samping hal tersebut di atas penjerapan gas CO lebih tinggi menggunakan modifikasi sorbent Ca(OH)₂/DE/kompos dikarenakan porositas sorbent Ca(OH)₂+DE lebih besar dibandingkan sorbent Ca(OH)₂ murni. Hal ini dapat dilihat dari hasil analisa SEM yang ditunjukkan pada Gambar 5.

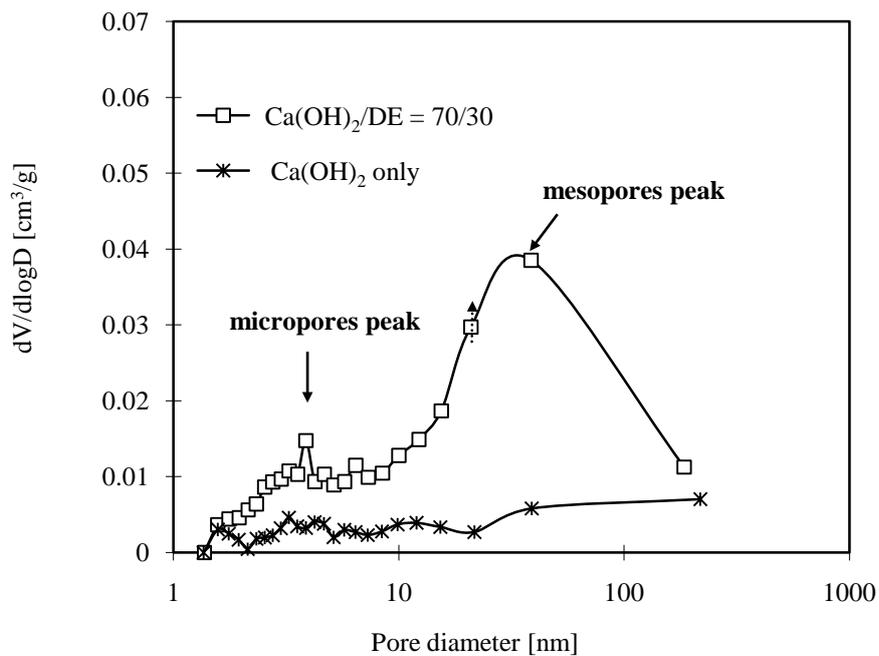
Gambar 5 menunjukkan bahwa porositas sorbent Ca(OH)₂+DE lebih besar daripada porositas sorbent Ca(OH)₂ murni, sehingga efisiensi penjerapan gas lebih tinggi pada sorbent Ca(OH)₂+DE. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Mariana (2003) yang menyatakan bahwa sorbent Ca(OH)₂+DE mempunyai porous yang lebih besar dari sorbent Ca(OH)₂ murni seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Reaksi pozzolanic antara silika dengan Ca(OH)₂ di dalam larutan (*slurry*) membentuk kalsium silikat hidrat (*hydrated calcium silicates* (CSHs)) dan kalsium alumina (CAHs) yang tinggi yang dapat meningkatkan reaktivitas dari sorbent Ca(OH)₂ (Liu dkk., 2002), seperti yang ditunjukkan pada reaksi berikut:





(a) (b)

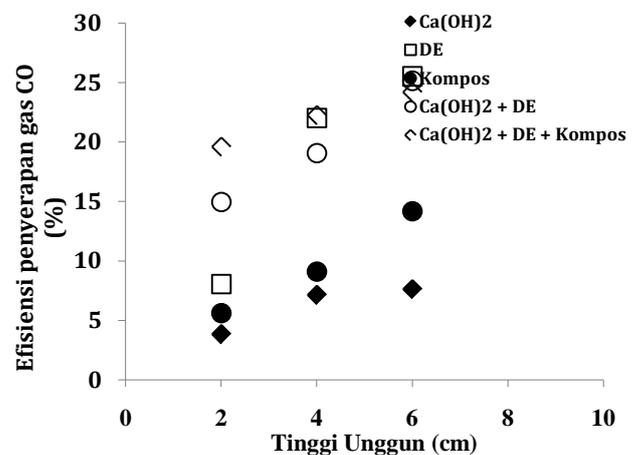
Gambar 5. Profil SEM untuk: (a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (b) $\text{Ca}(\text{OH})_2+\text{DE}$



Gambar 6. Pengaruh jenis *sorbent* terhadap diameter pori (Mariana, 2003)

Pengaruh Tinggi Unggun Terhadap Efisiensi Penjerapan Gas

Secara umum tinggi unggun berpengaruh terhadap efisiensi penjerapan gas, semakin tinggi unggun maka efisiensi penjerapan gas akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena kontak antara *sorbent* dengan gas semakin lama, sehingga gas yang terserap akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Suprpto (2003) yang menyatakan bahwa semakin tinggi unggun maka efisiensi penjerapan gas akan semakin besar, pada tinggi unggun 15 cm gas yang terserap adalah 45% sedangkan pada tinggi unggun 75 cm gas yang terserap adalah 91,06%. Gambar 7 memperlihatkan pengaruh ketinggian unggun terhadap efisiensi penjerapan gas untuk masing-masing *sorbent*.

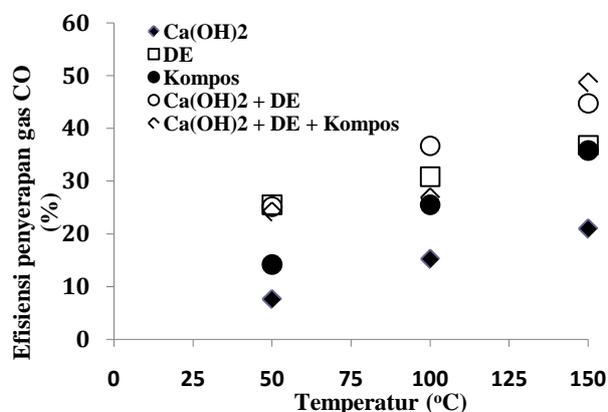


Gambar 7. Hubungan antara tinggi unggun terhadap efisiensi penjerapan gas pada $T=50^\circ\text{C}$

Unggun merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi penyisihan gas CO hasil pembakaran dengan menggunakan proses absorpsi. Unggun yang tinggi akan memperlama gas hasil pembakaran melewati *sorbent* sehingga akan memperbanyak kontak antara gas dan *sorbent*. Ketinggian ungun juga akan mempengaruhi *pressure drop* yang dihasilkan dimana dengan laju alir dan waktu reaksi yang sama. Setiap jenis *sorbent* akan terjadi perbedaan tekanan pada ungun bagian atas dan ungun bagian bawah. Gambar 7 juga menunjukkan bahwa *sorbent* Ca(OH)₂+DE+Kompos dan sorbent DE dapat menyisihkan gas CO terbanyak pada saat tinggi ungun maksimum 6 cm dibandingkan pada saat tinggi ungun 2 dan 4 cm. Pada *sorbent* lainnya terjadi penurunan gas CO yang terserap disaat ungun maksimum. Hal ini dapat terjadi oleh beberapa faktor antara lain faktor tekanan dan porositas *sorbent*.

Pengaruh temperatur terhadap konsentrasi gas yang terserap

Gambar 8 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur maka efisiensi penjerapan gas semakin meningkat dalam range variabel penelitian yang dilakukan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Jozewicz (1987) yang menyatakan bahwa semakin tinggi temperatur maka luas permukaan *sorbent* akan semakin luas, sehingga gas yang terserap semakin banyak. Jozewicz (1987) juga menyebutkan bahwa peningkatan *hydrated species* yang terdapat di dalam permukaan *sorbent* dapat meningkatkan reaktifitas padatan dan diharapkan untuk menghilangkan hidrasi air dengan pengontakan *sorbent* dan gas panas untuk menghasilkan pori baru yang mempunyai luas permukaan kontak baru. Efisiensi penjerapan gas CO yang paling bagus adalah 48,761% menggunakan *sorbent* Ca(OH)₂+DE+kompos pada temperatur 150°C.



Gambar 8. Hubungan antara temperatur reaksi terhadap efisiensi penjerapan gas

Gambar 8 juga menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur, maka peningkatan efisiensi penjerapan gas CO dengan sorbent Ca(OH)₂+DE+kompos semakin signifikan dibandingkan keempat sorbent lainnya. Hal ini

disebabkan karena porositas sorbent semakin meningkat dengan meningkatnya temperatur karena terjadinya proses penghilangan hidrasi air dengan pengontakan sorbent menghasilkan pori baru yang mempunyai luas permukaan kontak baru (Jozewicz dkk. (1987). Hal ini juga sesuai dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Jayshri (2012).

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi ungun dan temperatur, maka efisiensi penjerapan gas semakin tinggi. *Sorbent* yang paling baik untuk menyerap gas CO adalah *sorbent* Ca(OH)₂/DE/kompos sebesar 48,761%, pada tinggi ungun 6 cm dan temperatur 150°C. Kompos dapat dijadikan sebagai *sorbent* karena memiliki kemampuan untuk mendegradasikan gugus CO menjadi gugus Metana oleh adanya bakteri *anaerob*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional yang telah membiayai penelitian ini sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Kompetitif Penelitian Sesuai Prioritas Nasional Nomor: 399/SP2H/PL/Dit.Litabmas/IV/2011, tanggal 14 April 2011. Ucapan terimakasih juga kepada member Lab Operasi Teknik Kimia, Unsyiah dan mahasiswa yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alizar (2005), *Teknologi Bahan Konstruksi*, Pusat Pengembangan Bahan Ajar, UMB.
- Castilho, S., Kiennemann, A., Francisco, M.C.P and Dias, A.P.S (2013), Sorbents for CO₂ capture from biogenesis calcium wastes, *Chemical Engineering Journal*, 226, pp. 146-153.
- Fujioka, S., Kaneko, K., Terasaka, K., Sasada, Y., Goshima, T. and Kobayashi, D. (2012), Development of Multislit-Bubble Distributor for Gas Adsorption, *J. Chem. Eng. Japan*, 45, 9, pp. 691-695.
- Garea, A., Viguri, J.R. and Irabien, A. (1996), Kinetics of Flue Gas Desulfurization at Low Temperatures: Fly ash/Ca(OH)₂ (3/1) Sorbent Behavior,"*Chem. Eng. Sci.*, 52, 5, pp. 715-732.
- Ho, C.S, and Shih, S.M. (1992), Ca(OH)₂/Fly Ash Sorbents for SO₂ Removal, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, pp. 1130-1135.
- Iizuka, A., Yamasaki, A. and Yanagisawa, Y. (2013), Cost Evaluation for a Carbon Dioxide Sequestration Process by Aqueous Mineral Carbonation of Waste Concrete, *J. Chem. Eng. Japan*, 46, 4, pp. 326-334.

- Irabien, Cortabitart, A.F. and I. Ortiz (1992), Kinetics of Flue Gas Desulfurization at Low Temperatures, Nonideal Surface Adsorption Model, *Chem. Eng. Sci.* 47, pp. 1533-1543.
- Ishizuka, T., Tsuchiai, H., Murayama, T., Tanaka, T. and Hattori, H. (2000), Preparation of Active Absorbent for Dry-Type Flue Gas Desulfurization from Calcium Oxide, Coal Fly Ash, and Gypsum, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, pp. 1390-1396.
- Jayshri A. T., Ravikrishna, V.T., Kartik, S.I., Vivek, K., Arti, N.V., Nitin, K.L., Rajesh, B.N., Yenkie, M.K.N and Sadhana, S.R. (2012), N-doped mesoporous alumina for adsorption of carbon dioxide, *Journal of Environmental Sciences*, 24, 11, pp. 1972-1978.
- Jozewicz, Chang, W., Brna, J., Sedman, T. (1987), Reactivation of Solids from Furnace Injection of Limestone for SO₂ Control, *Environ. Sci. Technol.* 21, 7, pp. 664-670.
- Kanai, Y., Terasaka, K., Suwabe, M., Fujioka, S. and Kobayashi, D. (2012), Development of Slurry Bubble Column with Lithium Silicate to Recover Hot Hot CO₂ Gas from Flue Gas, *J. Chem. Eng. Japan*, 45, 9, pp. 639-644.
- Klingspor, J., Karlsson, H.T. and Bjerle, I. (1983), A Kinetic Study of the Dry SO₂-Limestone Reaction at Low Temperature, *Chem. Eng. Com.*, 22, pp. 81.
- Klingspor, J., A. Stromberg, H.T. Karlsson and I. Bjerle (1974), "Similarities Between Lime and Limestone in Wet-dry Scrubbing," *Chem. Eng. Proc.*, 18, 239, 1984
- Kluyer, A.J. and Schullen, C.G.T.P. (1974), *Arch Biochemical*.
- Lin, R.B and Shih, S.M. (2003), Characterization of Ca(OH)₂/fly ash sorbent for flue gas desulfurization, *Power Tech*, 131, pp. 212-222.
- Liu, C.F, Shih, S.M. and Lin, R.B. (2002), Kinetic of the Reaction of Ca(OH)₂/Fly Ash Sorbent with SO₂ at Low Temperatures, *Chem. Eng. Sci.*, 57, pp. 93-104.
- Mariana, Chen, C., Tsujimura, Y., Maezawa, A. and Uchida, S. (2003), Experiments on SO₂ Absorption in a Bag Filter Based on the Grain Model, *J. Chin. Inst. Chem. Engrs.*, 34, 2, pp. 2009-2011.
- Renedo, M.J., Fernandez, J., Garea, A., Ayerbe, A. and Irabien, J.A. (1999), Microstructural Changes in the Desulfurization Reaction at Low Temperature, *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, pp. 1384-1390.
- Seno, T., Maezawa, A., Fujiwara, T. and Uchida, S. (1996), Simultaneous Absorption of Acid Gases by Slaked Lime in Bag Filter System, *Proc. of 4th Joint Int. Conf. On Separation Technology (ISST02-JK)*, Tokyo, Japan, pp. 263-266.
- Suprpto, J (2003), *Pengolahan Gas Karbon Monoksida dalam Gas Buang dengan Biofilter* Universitas Diponegoro, Semarang.
- Supriyono (1999), *Pencemaran udara bisa merusak ruku dan gangguan kesehatan staf perpustakaan*, Media pustakawan, 4, hal. 3-9.
- Tsuchiai, H, Ishizuka, T., Ueno, T., Hattori, H. and Kita, H (1995), Highly Active Sorbent for SO₂ Removal prepared from Coal Fly Ash, *Ind. Eng. Chem. Res.* 34, pp.1404-1411.
- Uchida, S., Kageyama, S., Nogi, M. and Karakida, H. (1979), Reaction Kinetics of HCl and Limestone, *J. Chin. Inst. Chem. Eng.*, 10, pp. 45-49