

Pengaruh Laju Alir Biogas dan Ukuran Partikel Pembentuk Pelet terhadap Penyisihan Karbon Dioksida (CO₂) dalam Biogas dengan Proses Adsorpsi - Desorpsi Menggunakan Adsorben Berbasis Zeolit Alam untuk Peningkatan Kualitas Biogas

Effect of Mixed Biogas Flow Rate and Particle Size Pelletizer on Adsorption - Desorption System for Carbon Dioxide (CO₂) Removal in Biogas using Natural Zeolite - Based Adsorbent to Improve the Biogas Quality

Rivaldi Sidabutar*, Bambang Trisakti, Irvan

Departemen Teknik Kimia, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan, 20155, Indonesia

*Email: rivaldi@usu.ac.id

Article history:

Diterima : 3 November 2022
Direvisi : 22 November 2022
Disetujui : 20 Januari 2023
Mulai online : 24 Maret 2023

E-ISSN: 2337-4888

How to cite:

Rivaldi Sidabutar, Bambang Trisakti, Irvan. (2023). Pengaruh Laju Alir Biogas dan Ukuran Partikel Pembentuk Pelet terhadap Penyisihan Karbon Dioksida (CO₂) dalam Biogas dengan Proses Adsorpsi - Desorpsi Menggunakan Adsorben Berbasis Zeolit Alam untuk Peningkatan Kualitas Biogas. Jurnal Teknik Kimia USU, 12(1), 31-38.

ABSTRAK

Adsorpsi merupakan proses molekul fluida mengalami kontak pada permukaan suatu material padat. Penelitian ini bertujuan untuk penyisihan gas karbon dioksida (CO₂) dalam biogas menggunakan pelet adsorben berbasis zeolit alam dengan proses adsorpsi dan desorpsi CO₂ dari adsorben menggunakan udara. Penyisihan CO₂ dilakukan untuk menentukan persen penyisihan CO₂ (*removal efficiency*) dengan variasi laju alir biogas (100 mL/menit, 300 mL/menit, dan 500 mL/menit) dan variasi jenis pelet adsorben (ukuran partikel, waktu aktivasi, waktu kalsinasi, dan perlakuan aktivasi dealuminasi). Penentuan persen penyisihan CO₂ dilakukan dengan mengalirkan biogas ke dalam kolom dan dikontakkan dengan adsorben secara kontinu selama 30 menit dan gas keluaran ditampung dalam *gas collector* untuk dianalisa kandungan CO₂ sisa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyisihan CO₂ terbaik yaitu 97,7% menggunakan adsorben dengan ukuran partikel 140 *mesh*, kalsinasi 4 jam, waktu aktivasi 90 menit, dan aktivasi dealuminasi pada laju alir 100 mL/menit. Karakteristik kurva *breakthrough* menyajikan karakteristik profil "S" pada laju alir konstan (100 mL/menit).

Kata kunci: adsorpsi, desorpsi, adsorben, zeolit, karbon dioksida

ABSTRACT

Adsorption is the process of fluid molecules contacting the surface of a solid material. This study aims to remove carbon dioxide (CO₂) gas in biogas using natural zeolite-based adsorbent pellets by adsorption and desorption of CO₂ from the adsorbent using air. CO₂ removal was carried out to determine the percentage of CO₂ removal efficiency with variations in biogas flow rates (100 mL/minute, 300 mL/minute, and 500 mL/minute) and variations in the type of adsorbent pellets (particle size, activation time, calcination time, and dealumination activation treatment). Determination of the percentage of CO₂ removal is carried out by flowing the biogas into the column and contacting it with the adsorbent continuously for 30 minutes and the output gas is collected in a gas collector to analyze the remaining CO₂ content. The results showed that the best CO₂ removal was 97.7% using an adsorbent with a particle size of 140 mesh, 4 hours of calcination, 90 minutes of activation time, and dealumination activation at a flow rate of 100 mL/minute. The breakthrough characteristic curve presents the characteristic "S" profile at constant flow rate (100 mL/minute).

Keyword: adsorption, desorption, adsorbent, zeolite, carbon dioxide



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.10134>

1. Pendahuluan

Biogas dapat diproduksi melalui proses digestasi anaerobik dari bahan-bahan organik seperti kotoran, air selokan, bahan dari tanaman, dan potongan sisa tanaman lain [1]. Biogas dikategorikan sebagai energi terbarukan [2]. Limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) yang mengandung karbohidrat, lemak, dan protein umumnya digunakan sebagai bahan baku untuk produksi biogas. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa 1 ton LCPKS dapat menghasilkan sekitar 28 m³ [3].

Biogas yang dihasilkan tergantung pada rasio C/N dari material, konsentrasi, pH dan suhu [1]. Biogas terdiri dari senyawa metana (CH₄) sebesar 50%-70%, karbon dioksida (CO₂) sebesar 30%-40%, hidrogen (H₂) sebesar 5%-10%, nitrogen (N₂) sebesar 1%-2%, air (H₂O) sebesar 0,3%, dan hidrogen sulfida (H₂S) [4]. Setiap 15 m³ biogas dengan kandungan CO₂ sebesar 35% menghasilkan energi 98 kWh, sedangkan 13 m³ biogas dengan kandungan CO₂ 5% menghasilkan energi 125 kWh [5]. Dalam aplikasi penggunaan biogas, kandungan CO₂ maksimal yang diinjeksikan ke dalam mesin sebesar 1,5%-4,5% [6]. Dalam standar Swedia SS 15 54 38, syarat ambang batas total CO₂, O₂ dan N₂ maksimum yang diperbolehkan untuk injeksi biogas sebagai bahan bakar kendaraan adalah 4%-5% volume [7].

Pemisahan gas CO₂ dari biogas secara umum meliputi adsorpsi kimia dan fisika, *pressure swing adsorption* (PSA), pemisahan *cryogenic*, pemisahan menggunakan membran dan fiksasi CO₂ secara biologi dan kimia [4]. Salah satu metode yang dapat dilakukan yaitu melalui proses adsorpsi. Adsorpsi menggunakan bahan berpori dapat menangkap CO₂ karena membutuhkan konsumsi energi yang rendah untuk meregenerasi adsorben. Material yang digunakan sebagai adsorben ideal untuk penyerapan CO₂ umumnya material yang memiliki kapasitas adsorpsi yang besar dan sangat selektif [8]. Salah satu adsorben padat yang berpotensi untuk memurnikan metana tersebut adalah zeolit [9]. Zeolit adalah bahan yang mudah mengikat CO₂ yang terkandung dalam biogas sehingga sangat cocok digunakan dalam proses pemurnian biogas [10]. Struktur pada zeolit dapat digunakan untuk adsorpsi kandungan H₂O, CO₂, sulfur dioksida (SO₂) dan H₂S, tetapi tidak dapat mengadsorpsi gas CH₄ dan kemampuan penyerapan zeolit terhadap gas – gas tersebut sampai 25 % [11]. Luas permukaan aktif zeolit hingga 200 m²/g [12].

Pada zeolit alam, adanya molekul air dalam pori dan oksida bebas di permukaan dapat menutupi pori-pori atau situs aktif dari zeolit sehingga dapat menurunkan kapasitas adsorpsi [13]. Agar proses adsorpsi zeolit berlangsung lebih cepat maka sebelum digunakan sebaiknya dilakukan proses aktivasi terlebih dahulu. Proses aktivasi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara fisik dengan proses heat treatment dan secara kimiawi dengan menggunakan larutan asam atau basa [14].

Banyak penelitian terdahulu dilakukan untuk penyisihan CO₂ dalam biogas dengan proses adsorpsi. Alonso et al. (2010) melakukan penelitian mengenai pemurnian dan peningkatan kualitas biogas menggunakan proses adsorpsi. Adsorben yang digunakan yaitu zeolit sintetis dan zeolit alam. Biogas yang digunakan merupakan biogas sintetis campuran antara metana, karbon dioksida dan hidrogen sulfat dengan kemurnian > 99%. Rasio molar CH₄/CO₂/H₂S yang digunakan yakni 59,95/39,95/0,1. Proses adsorpsi menggunakan metode *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dengan kajian selektivitas, kapasitas dan regenerasi adsorben zeolit. Siklus penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan biogas sintetis, adsorpsi pada temperatur *ambient*, tahap penurunan tekanan (*depressurization step*) dan tahap desorpsi dengan menggunakan nitrogen sebagai gas *inert* dengan kecepatan 0,46 cm/s. Proses adsorpsi dilakukan dalam kolom adsorber dengan tekanan 3 bar - 7 bar pada temperatur 25 °C dengan kecepatan alir gas 0,5 cm/s-1 cm/s. Hasil yang diperoleh menunjukkan zeolit alam (*clinoptilolite*) merupakan adsorben terbaik, mampu menghilangkan 173,9 mg CO₂/g clinoptilolit dengan kecepatan alir biogas 1 cm/s [15].

Penelitian yang dilakukan oleh Haunchhum dan Pinakeswar (2014) adalah penyisihan CO₂ dari gas buangan industri yang mengakibatkan gas rumah kaca. Adsorben yang digunakan yaitu zeolit sintetis 13X, zeolit 4A dan karbon aktif (AC). Gas buang sebagai umpan adalah campuran udara dan CO₂ (13,8 vol%) dengan laju alir masuk sebesar 15 L/menit. Kolom adsorpsi beroperasi pada tekanan 1 bar dengan variasi suhu adsorpsi 25 sampai 60 °C. Hasil yang diperoleh menunjukkan isotherm adsorpsi CO₂ tertinggi menggunakan zeolit 13X dengan kemampuan penyerapan 4,2 mol CO₂/kg adsorben pada tekanan hingga 1 bar pada suhu 25 °C. Karbon aktif memberikan kapasitas adsorpsi terendah yakni 2,828 mol CO₂/kg adsorben. Model Langmuir cocok untuk kedua tipe zeolit dan model Freundlich cocok untuk karbon aktif. Pada tahap regenerasi, desorpsi dilakukan dengan meningkatkan temperatur udara sampai 100 °C. Hasil yang didapatkan bahwa, penyerapan CO₂ tertinggi menggunakan zeolit 13X pada semua siklus bertekanan rendah (1 bar) [16].

Penelitian yang dilakukan oleh Sugiarto et al. (2013) mengenai purifikasi biogas sistem kontinu menggunakan zeolit. Penelitian dilakukan dengan membuat alat pemurnian (*purifier*) dengan pengisi padat granular zeolit yang dipasang pada sistem digester biogas. Zeolit diaktivasi secara fisika dengan pemanasan pada suhu 300 °C - 400 °C. Pemisahan CO₂ dilakukan dengan mengalirkan biogas ke dalam *purifier* dengan variasi jumlah *bed* yaitu 1, 2, 3, 4 dan 5. Variasi waktu penyerapan 15 menit, 30 menit, 45 menit dan 60 menit.

Tekanan alat purifikasi 15 cmH₂O. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin lama waktu antara pemurnian biogas dengan zeolit, kadar CO₂ cenderung menurun dengan persentase terendah yaitu 21,3% dan kadar CH₄ meningkat hingga persentase tertinggi 74,7% pada adsorber dengan 5 buah bed dan waktu adsorpsi 60 menit. Dari perbandingan antara purifikasi kontinu dan *batch*, bahwa purifikasi sistem *batch* menghasilkan penurunan kadar CO₂ yang lebih efektif dan peningkatan kadar CH₄ yang lebih tinggi hingga 76,2%. Namun kekurangannya adalah kapasitas purifikasi biogas yang rendah karena tidak dialirkan terus-menerus [17]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh laju alir biogas dan ukuran partikel pembentuk pelet adsorben terhadap efisiensi penyisihan CO₂ dalam biogas pada sistem purifikasi batch dan kontinu.

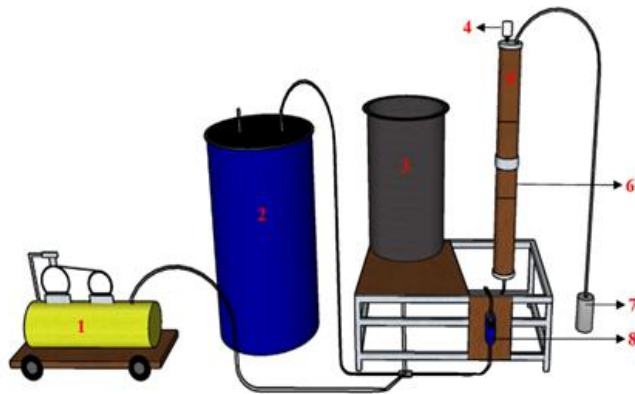
2. Metode

Bahan dan Alat

Bahan baku zeolit alam yang digunakan sebagai pelet adsorben diperoleh dari PT. Indah Sari Windu, Jawa Barat, Indonesia. Biogas dengan kandungan karbon dioksida (CO₂) sebesar 45%-55% (v/v). Bahan tambahan adalah *aquadest* (H₂O) sebagai perekat dalam pembuatan partikel zeolit menjadi bentuk pelet.

Peralatan utama yang digunakan adalah kolom adsorpsi dengan diameter dalam 9,1 cm dan tinggi 91 cm. *Bed adsorber* setinggi 45 cm sebagai tempat adsorben ditempatkan dibagian tengah kolom. Kolom juga memiliki manometer sebagai pengontrol tekanan adsorpsi dan flowmeter sebagai pengontrol laju alir biogas. Peralatan pendukung yaitu *air chamber*, *air supply*, tangki CO₂. Alat analisa yang digunakan adalah SAZQ *Biogas Analyzer* untuk menganalisa kandungan CO₂ sebelum dan sesudah proses adsorpsi dan desorpsi.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Ekologi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara (USU), Medan. Proses pembuatan adsorben dilakukan pada berbagai jenis ukuran mesh dan perlakuan. Variasi ukuran mesh yaitu 70 *mesh*, 110 *mesh*, 140 *mesh*, variasi perlakuan waktu kalsinasi selama 2 jam, 3 jam dan 4 jam, waktu aktivasi selama 30 menit, 60 menit dan 90 menit dan aktivasi dealuminasi (asam klorida (HCl) + natrium hidroksida (NaOH)). Proses adsorpsi dilakukan dengan terlebih dahulu memasukkan adsorben ke dalam kolom, kemudian biogas dimasukkan kedalam *air chamber* hingga tercapai konsentrasi CO₂ konstan sebesar 45% (v/v). Laju alir gas campuran diatur pada variasi 100 mL/menit, 300 mL/menit dan 500 mL/menit. Proses adsorpsi dilakukan selama 30 menit pada tekanan 1 atm. Adapun skema rangkaian peralatan adsorpsi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema rangkaian peralatan adsorpsi

Keterangan:

1. *Air Supply*
2. Tabung Biogas
3. *Air chamber*
4. *Manometer* terbuka
5. Kolom Adsorpsi
6. Bed Adsorben
7. *Gas collector*
8. *Gas flowmeter*

Pada proses desorpsi digunakan udara sebagai carrier dengan variasi temperatur pada *ambient*, 30 °C dan 40 °C. Analisa gas CO₂ sesudah proses adsorpsi untuk data persen penyisihan CO₂ secara keseluruhan dilakukan diakhir proses adsorpsi (gas keluaran ditampung selama proses adsorpsi) sedangkan untuk data kinetika adsorpsi dan desorpsi, analisa CO₂ dilakukan setiap satu menit sekali selama 30 menit.

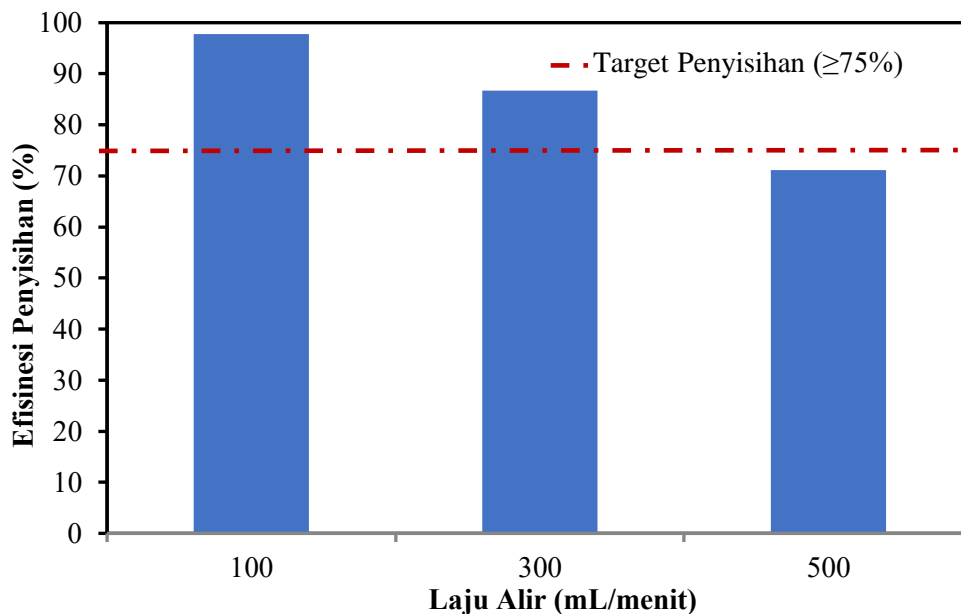
3. Hasil

Pengaruh Laju Alir terhadap Persen Penyisihan CO₂ dari Biogas dengan Perlakuan Aktivasi Dealuminasi

Persen penyisihan pada suatu proses adsorpsi sangat penting untuk diketahui sehingga efektivitas penyerapan dari pada adsorben yang digunakan dapat ditentukan. Penentuan persen penyisihan karbon dioksida (CO₂) dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jenis adsorben yang sama dan memvariasikan laju alir biogas pada 100 mL/menit, 300 mL/menit, dan 500 mL/menit dengan waktu adsorpsi selama 30 menit menggunakan jenis pelet adsorben ukuran partikel 140 mesh, waktu kalsinasi 4 jam, waktu aktivasi 90 menit dengan aktivasi dealuminasi (HCl + NaOH) disajikan pada Gambar 2. Penyisihan CO₂ menggunakan pelet adsorben yang dicetak dari tepung zeolit ukuran 140 mesh dengan waktu kalsinasi 4 jam, waktu aktivasi 90 menit, dan laju alir biogas pada 100 mL/menit, 300 mL/menit dan 500 mL/menit dengan aktivasi dealuminasi (asam klorida (HCl) + natrium hidroksida (NaOH)).

Dari hasil penelitian, persen penyerapan CO₂ pada masing-masing laju alir adalah 97,7%, 86,6% dan 71,1%. Ini artinya, jika laju alir semakin lambat maka persen penyisihan CO₂ akan semakin tinggi.

Hasil ini sesuai dengan yang dilaporkan oleh Kesnawaty, (2010) jika laju alir rendah maka waktu kontak gas-adsorben di dalam kolom adsorpsi menjadi lebih lama [18]. Sehingga persentase penyisihan menjadi tinggi karena cukup waktu untuk molekul gas berdifusi ke dalam pori-pori adsorben [19]. Selain itu, Basu et al. (2012) mengatakan bahwa tingkat perpindahan massa meningkat pada laju alir yang lebih tinggi menyebabkan saturasi lebih cepat. Sebaliknya, kapasitas adsorpsi mengalami penurunan dengan kenaikan laju alir karena waktu tinggal adsorbat di dalam kolom lebih pendek. Zona transfer massa bergerak lebih cepat dan koefisien perpindahan massa lebih tinggi karena bilangan Reynolds lebih tinggi. Hal ini terlihat dari perbedaan konsentrasi gas keluaran kolom untuk kedua laju alir. Hal ini merupakan indikasi difusi intra-partikel lambat di dalam mikropori dari adsorben, adanya partikel non homogen dan berbagai pola aliran [20].

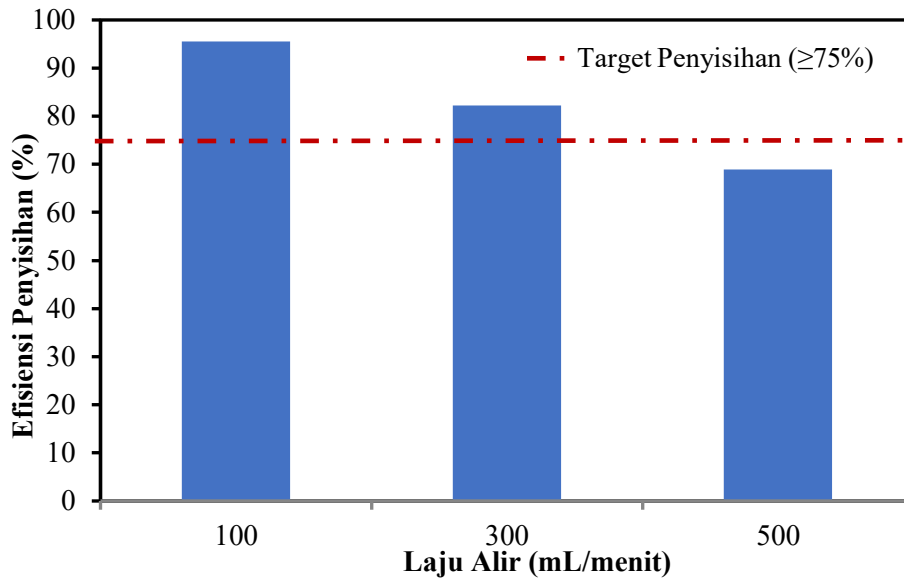


Gambar 2. Grafik pengaruh laju alir terhadap persen penyisihan CO₂ dalam biogas

Pengaruh Laju Alir terhadap Persen Penyisihan CO₂ dari Biogas dengan Perlakuan Aktivasi Dealuminasi

Penentuan persen penyisihan karbon dioksida (CO₂) dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jenis adsorben yang sama dan memvariasikan laju alir biogas pada 100 mL/menit, 300 mL/menit, dan 500 mL/menit dengan waktu adsorpsi selama 30 menit menggunakan jenis pelet adsorben ukuran partikel 140 mesh, waktu kalsinasi 2 jam, waktu aktivasi 60 menit dengan aktivasi dealuminasi (asam klorida (HCl) + natrium hidroksida (NaOH)) disajikan pada Gambar 3.

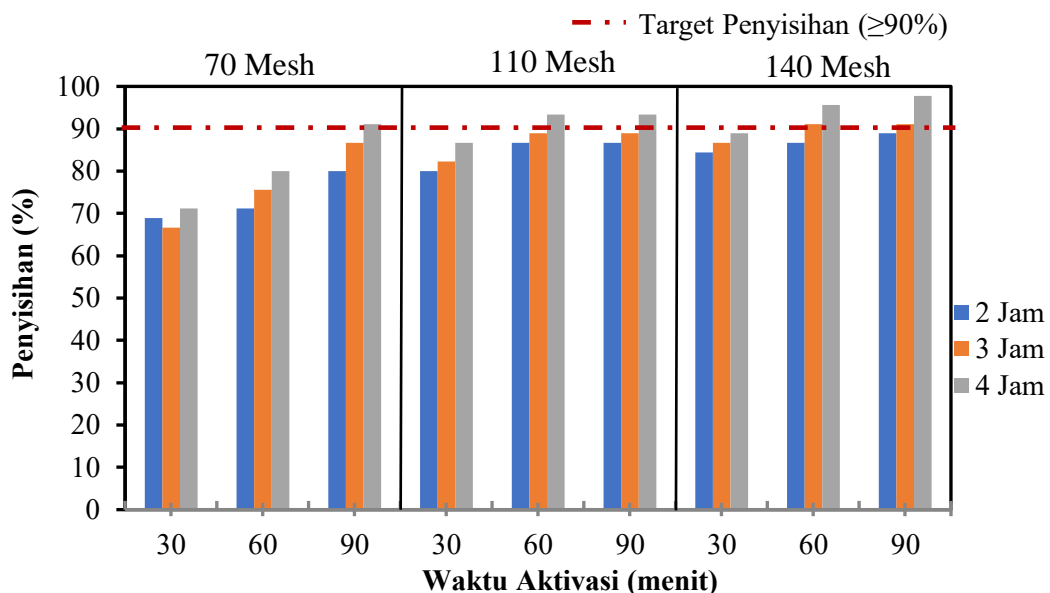
Dari hasil penelitian, persen penyerapan CO₂ pada masing-masing laju alir adalah 95,5%, 82,2% dan 68,8%. Ini artinya, jika laju alir semakin lambat maka persen penyisihan CO₂ akan semakin tinggi. Hasil ini sesuai dengan yang dilaporkan oleh Kesnawaty (2010). Jika laju alir rendah maka waktu kontak gas-adsorben di dalam kolom adsorpsi menjadi lebih lama sehingga persentase penyisihan menjadi tinggi karena cukup waktu untuk molekul gas berdifusi ke dalam pori-pori adsorben [19].



Gambar 3. Grafik pengaruh laju alir terhadap persen penyisihan CO₂ dalam biogas dengan perlakuan aktivasi dealuminasi (H₂SO₄+NaOH)

Pengaruh Ukuran Partikel Pembentuk Pelet terhadap Persen Penyisihan Karbon Dioksida (CO₂) dari Biogas

Untuk mengetahui hubungan keberhasilan adsorben zeolit sebagai adsorben penyisihan karbon dioksida (CO₂), maka perlu dilihat bagaimana efektifitas penyisihan CO₂ menggunakan partikel adsorben yang berbeda-beda untuk mencapai suatu target penyisihan CO₂ [12]. Pada penelitian ini digunakan pelet adsorben berbasis zeolit alam berbentuk tepung dengan ukuran 70 mesh, 110 mesh dan 140 mesh yang masing-masing dikalsinasi selama 2 jam, 3 jam dan 4 jam waktu aktivasi selama 30 menit, 60 menit, 90 menit dengan aktivasi dealuminasi (asam klorida (HCl) + natrium hidroksida (NaOH)). Persen penyisihan CO₂ dari biogas untuk masing-masing jenis pelet adsorben dengan ukuran partikel zeolit 70 mesh, 110 mesh dan 140 mesh disajikan pada Gambar 4.

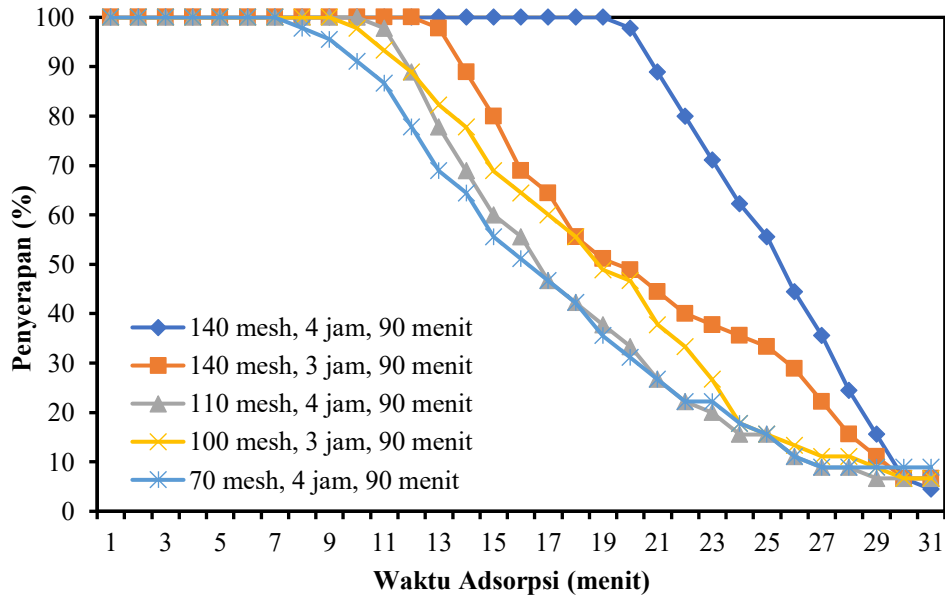


Gambar 4. Grafik pengaruh ukuran partikel pembentuk pelet terhadap persen penyisihan CO₂ dalam biogas

Target yang hendak dicapai pada penelitian ini adalah menghasilkan pelet adsorben yang mampu mereduksi gas CO₂ dari biogas hingga tersisa ± 10%. Oleh karena biasanya kandungan CO₂ di dalam biogas adalah sekitar 30%-40 % [21]. Walaupun keberadaan CO₂ di dalam biogas tidak menurunkan nilai kalor, tetapi kebanyakan *engine* bekerja optimum menggunakan biogas sebagai bahan bakar jika kandungan CO₂ di dalam biogas tersebut ≤ 10% [7].

Data Kinetika Penyisihan Karbon Dioksida (CO₂)

Data kinetika penyisihan karbon dioksida (CO₂) dari biogas penting untuk diketahui sehingga efektivitas penyisihan suatu gas pada adsorben dapat ditentukan [22]. Kinetika penyisihan CO₂ menggunakan variasi jenis pelet adsorben pada laju alir 100 ml/menit dengan dealuminasi (asam klorida (HCl) + natrium hidroksida (NaOH)) disajikan pada Gambar 4 dan variasi laju alir biogas pada jenis pelet adsorben ukuran partikel 140 mesh, dikalsinasi selama 4 jam dan waktu aktivasi 90 menit disajikan pada Gambar 5. Dari hasil penelitian, adsorben terbaik dengan waktu terobos paling lama adalah jenis adsorben 140 mesh, 4 jam, 90 menit pada laju alir 100 mL/menit, aktivasi dealuminasi (HCl + NaOH) dengan waktu terobos 19 menit. Ini artinya, jika laju alir semakin lambat maka persen penyisihan CO₂ akan semakin tinggi.



Gambar 5. Grafik data kinetika penyisihan CO₂ dalam biogas pada laju alir 100 mL/menit dengan variasi jenis pelet adsorben

Dari hasil penelitian Jenis pelet adsorben terbaik yaitu ukuran partikel 140 mesh, dikalsinasi selama 4 jam, dan waktu aktivasi 90 menit dengan perlakuan aktivasi dealuminasi (HCl+NaOH) persen penyisihan CO₂ mencapai 97,7% pada laju alir 100 mL/menit. Terdapat 5 jenis pelet adsorben yang mampu mereduksi gas CO₂ dalam biogas (45% v/v) sehingga tersisa ≤ 10%. Lima jenis adsorben dan kemampuan penyerapan dalam mereduksi gas CO₂ dari biogas sampai ≤ 10% disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Jenis Adsorben yang Mampu Mereduksi CO₂ sampai ≤ 10%

Jenis Adsorben	Konsentrasi CO ₂ Masuk (% v/v)	Konsentrasi CO ₂ keluar (% v/v)	Efisiensi Penyisihan (%)
1	45	2	97,77
2	45	3	95,55
3	45	3	93,33
4	45	4	93,33
5	45	4	91,11

Keterangan Tabel 2:

Jenis Adsorben 1: 140 mesh, 4 jam, 90 menit

Jenis Adsorben 2: 140 mesh, 3 jam, 90 menit

Jenis Adsorben 3: 110 mesh, 4 jam, 90 menit

Jenis Adsorben 4: 110 mesh, 3 jam, 90 menit

Jenis Adsorben 5: 70 mesh, 4 jam, 90 menit

4. Kesimpulan

Laju alir yang semakin lambat dalam proses penyisihan CO₂ membuat waktu tinggal gas dalam kolom semakin lama, sehingga semakin banyak CO₂ yang terjerap pada adsorben, sehingga didapat laju alir terbaik

yaitu 100 mL/menit. Jenis pelet adsorben terbaik yaitu ukuran partikel 140 *mesh*, dikalsinasi selama 4 jam, dan waktu aktivasi 90 menit dengan perlakuan aktivasi dealuminasi (asam klorida (HCl)+ natrium hidroksida (NaOH)) persen penyisihan CO₂ mencapai 97,7 % pada laju alir 100 ml/menit. Berdasarkan hasil ini, selanjutnya akan dilakukan uji coba menggunakan gas asli yang berasal dari proses digestasi (biogas) untuk mengetahui efektivitas penyisihan CO₂ dalam *multi component* dan dapat diaplikasikan pada kasus pemurnian CO₂ dalam biogas.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada TALENTA Universitas Sumatera Utara Tahun 2022 sebagai penyandang dana penelitian.

6. Konflik Kepentingan

Semua penulis tidak memiliki konflik kepentingan (*conflict of interest*) pada publikasi artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] I. J. Dioha, C. Ikeme, T. Nafi'u, N. I. Soba, and M. B. S. Yusuf, "Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production," *Int. Res. J. Nat. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 30–39, 2014.
- [2] P. G. Adinurani *et al.*, "Optimization of concentration and EM4 augmentation for improving bio-gas productivity from *Jatropha curcas* Linn capsule husk," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 3, no. 1, pp. 73–78, 2014,
- [3] Y. S. Madaki and L. Seng, "Palm oil mill effluent (POME) from Malaysia palm oil mills: Waste or resource," *Int. J. Sci. Environ. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 1138–1155, 2013.
- [4] M. R. Al Mamun, M. R. Karim, M. M. Rahman, A. M. Asiri, and S. Torii, "Methane enrichment of biogas by carbon dioxide fixation with calcium hydroxide and activated carbon," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 58, pp. 476–481, 2015,
- [5] S. Mihic, "Biogas fuel for internal combustion engines," *Ann. Fac. Eng. Hunedoara*, vol. 2, no. 3, pp. 179–190, 2004,
- [6] C. G. Galante, L. Pezzola, N. Priano, S. Scaramellini, and A. Sottocornola, Methane from biogas the process, cleaning and projects, TPG 4140 Natural Gas Semester Report, 2012.
- [7] F. Battista, D. Fino, and G. Mancini, "Optimization of biogas production from coffee production waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 200, pp. 884–890, 2016,
- [8] S. J. J. Titinchi, M. Piet, H. S. Abbo, O. Bolland, and W. Schwieger, "Chemically modified solid adsorbents for CO₂ capture," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 8153–8160, 2014,
- [9] S. K. Wahono, R. Maryana, M. Kismurtono, K. Nisa, and C. D. Poeloengasih, "Modifikasi zeolit lokal Gunung Kidul sebagai upaya peningkatan performa biogas untuk pembangkit listrik," *Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses*, pp. D-11-1–D-11-6, 2010.
- [10] L. Wahyu, N. Setyaningsih, Z. I. Asmira, and N. C. W. Fitri, "Aktivasi dan aplikasi zeolit alam sebagai adsorben logam kromium dalam air limbah industri penyamakan kulit," *Eksergi*, vol. 14, no. 1, pp. 7–11, 2017.
- [11] S. K. Wahono and W. A. Rizal, "Biogas filter based on local natural zeolite materials," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2014,
- [12] A. Yamliha, B. D. Argo, and W. A. Nugroho, "Pengaruh ukuran zeolit terhadap penyerapan karbondioksida (CO₂) pada aliran biogas," *J. Bioproses Komod. Trop.*, vol. 1, no. 2, pp. 67–72, 2013.
- [13] S. Sriatun, O. A. Manasikana, and A. Darmawan, "Modifikasi zeolit alam dengan ligan edta untuk adsorpsi ion logam Pb²⁺ dan Cd²⁺," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 11, no. 2, pp. 43–47, 2008,
- [14] N. Hamidi, I. N. G. Wardana, and D. Widhiyanuriyawan, "Peningkatan kualitas bahan bakar biogas melalui proses pemurnian dengan zeolit alam," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 2, no. 3, pp. 227–231, 2011.
- [15] A. Alonso-Vicario *et al.*, "Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 134, pp. 100–107, 2010,
- [16] Sugiarto, T. Oerbandono, D. Widhiyanuriyawan, and F. S. P. Putra, "Purifikasi biogas sistem kontinyu menggunakan zeolit," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [17] L. Hauchhum and P. Mahanta, "Carbon dioxide adsorption on zeolites and activated carbon by pressure swing adsorption in a fixed bed," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 349–356, 2014,
- [18] D. A. Kesnawaty, "Uji kapasitas adsorpsi gas karbon monoksida (CO) menggunakan oksida logam dan karbon aktif," Skripsi, Universitas Indonesia, Depok, 2010.
- [19] S. Kutluay, O. Baytar, and Ö. Şahin, "Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for dynamic adsorption of benzene in gas phase onto activated carbon produced from *elaegnus angustifolia* seeds,"

- J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–10, 2019,
- [20] M. Dutta, J. K. Basu, H. Faraz, N. Gautam, and A. Kumar, “Fixed-bed column study of textile dye direct blue 86 by using a composite adsorbent,” *Sch. Res. Libr.*, vol. 4, no. 2, pp. 882–891, 2012.
- [21] F. M. Baena-Moreno, M. Rodríguez-Galán, F. Vega, T. R. Reina, L. F. Vilches, and B. Navarrete, “Converting CO₂ from biogas and MgCl₂ residues into valuable magnesium carbonate: A novel strategy for renewable energy production,” *Energy*, vol. 180, pp. 457–464, 2019,
- [22] M. A. I. Sarker, “Equilibrium and mass transfer behaviour of CO₂ adsorption on zeolites, carbon molecular sieve, and activated carbons,” Thesis, University of Regina, Regina, 2012.