

Pemurnian Biogas Menggunakan Proses Adsorpsi Dengan Karbon Aktif Sebagai Adsorben

Berlian Mustika Sari*, Riyas Hadi Prasajo, Nana Dyah Siswati*

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: 21031010177@student.upnjatim.ac.id, nanadyahsiswati22@gmail.com

Diterima: 20 April 2025

Disetujui: 28 April 2025

Abstract

Biogas is a renewable energy source produced by the anaerobic digestion of organic matter. However, impurities such as carbon dioxide (CO_2) found in raw biogas can reduce its quality as a fuel. Therefore, a purification process is needed to increase the amount of methane (CH_4) in the biogas. Adsorption using activated carbon as an adsorbent is one of the efficient purification techniques. Due to its porous structure and large surface area, activated carbon is very good at absorbing gas pollutants. By using the adsorption method to reduce the concentration of CO_2 , this study aims to increase the amount of methane (CH_4) in biogas. Changes in the height of the activated carbon adsorption column and the gas flow rate are part of the technique. With an ideal adsorption efficiency of 96.65% at an adsorbent height of 20 cm and a flow rate of 200 ml/min, the results show that activated carbon is efficient in adsorbing CO_2 . After the adsorption process, the CH_4 content increased to 98.51%, which meets the requirements of the Indonesian National Standard (SNI) for biogas quality. This research advances the technology for the purification of biogas, which can be used as a renewable energy source.

Keywords: *biogas, purification, adsorption, activated carbon, methane*

Abstrak

Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan melalui dekomposisi anaerobik bahan organik. Meskipun demikian, biogas terdiri dari gas pengotor seperti karbon dioksida (CO_2), yang dapat menurunkan kualitasnya sebagai sumber bahan bakar. Oleh karena itu, penting untuk menerapkan proses pemurnian guna meningkatkan konsentrasi metana (CH_4) dalam biogas. Metode pemurnian yang efektif melibatkan penggunaan adsorpsi, dengan memanfaatkan karbon aktif sebagai adsorben. Luas permukaan yang tinggi dan struktur berpori dari karbon aktif memungkinkannya untuk menyerap gas pengotor secara efektif. Penelitian ini berupaya untuk meningkatkan konsentrasi metana (CH_4) dalam biogas dengan menurunkan kadar CO_2 melalui metode adsorpsi. Pendekatan yang digunakan menggabungkan penyesuaian laju aliran gas di samping elevasi kolom adsorben karbon aktif. Penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif menunjukkan kemanjuran yang signifikan dalam menyerap CO_2 , mencapai persentase adsorpsi optimal sebesar 96,65% pada ketinggian adsorben 20 cm dan laju aliran 200 ml/menit. Kandungan CH_4 setelah proses adsorpsi meningkat menjadi 98,51%, sesuai dengan standar kualitas biogas yang ditetapkan oleh SNI. Studi ini memajukan teknologi pemurnian biogas, menjadikannya sebagai sumber energi terbarukan yang layak.

Kata Kunci: *biogas, pemurnian, adsorpsi, karbon aktif, metana*

1. Pendahuluan

Biogas dihasilkan selama proses produksi energi sebagai gas yang dihasilkan dari aktivitas anaerobik atau fermentasi, yang terjadi melalui mekanisme biologis. Biogas merupakan peluang yang menjanjikan dalam pengembangan sumber energi alternatif. Selain hemat biaya, biogas menunjukkan manfaat lingkungan yang signifikan. Intinya, proses produksi biogas sederhana: melibatkan penempatan substrat, seperti kotoran hewan atau manusia, ke dalam unit pencernaan (digester), menutupnya dengan rapat, dan setelah beberapa waktu, gas dihasilkan yang dapat berfungsi sebagai sumber energi [1]. Penggunaan kotoran sapi dapat mengatasi salah satu masalah, khususnya kelebihan limbah ternak yang susah diatur. Menurut [2] diasumsikan bahwa setiap sapi dan kerbau di Indonesia dapat menghasilkan sekitar 20-25 kg limbah setiap hari. Ada beberapa cara untuk mengolah kotoran sapi, termasuk membuat biogas, untuk mengurangi jumlah limbah yang terbuang dan berpotensi mencemari lingkungan. Hal ini memberikan peluang bagi Indonesia untuk memulai pengelolaan limbah ternak untuk produksi energi terbarukan, seperti biogas [3]. Bahan-bahan organik yang bisa dimanfaatkan untuk produksi biogas meliputi kotoran ternak, daun kering yang sudah gugur, limbah organik dari pasar, air limbah rumah tangga, limbah dari industri

makanan, dan berbagai jenis limbah organik lainnya [4]. Untuk meningkatkan efektivitas produksi biogas, kotoran sapi atau hewan ruminansia dapat dimanfaatkan karena mengandung bakteri penghasil gas metana yang berasal dari sistem pencernaan hewan tersebut [5]. Selain itu, kotoran sapi memiliki kandungan berupa 22,59% selulosa, 18,32% hemiselulosa, 10,20% lignin, 34,72% karbon organik total, dan 1,26% nitrogen total. Kandungan selulosa dan hemiselulosa yang cukup tinggi inilah yang berperan penting dalam proses pembentukan biogas [6]

Penggunaan biogas sebagai bahan bakar dibatasi secara signifikan oleh kemurniannya. Penyertaan CO_2 dan uap air sebagai pengotor membuat biogas tidak layak untuk digunakan. Operasi pemurnian biogas diperlukan untuk meningkatkan kandungan gas metana. Sejumlah proses pemurnian biogas telah ditetapkan, termasuk metode adsorpsi. Teknologi adsorpsi dalam biogas memanfaatkan gagasan adsorpsi gas, khususnya untuk CO_2 , untuk meningkatkan persentase konsentrasi CH_4 dalam biogas. Pekerjaan ini menggunakan adsorben karbon aktif (padat) untuk pemurnian biogas melalui metode adsorpsi [7]. Gas CO_2 memiliki konsentrasi yang relatif tinggi, mencapai 45%. Karakteristik gas CO_2 yang tidak mudah terbakar mengurangi nilai kalor biogas dan membuat proses kompresi untuk transportasi menjadi tidak layak secara ekonomi. Komponen gas CO_2 yang substansial mengakibatkan rendahnya efisiensi panas yang dihasilkan, sehingga kualitas nyala biogas menjadi kurang optimal. Produk biogas biasanya terdiri dari Metana (CH_4) 50-70%, Karbon Dioksida (CO_2) 30-49%, Nitrogen (N_2) 0-1%, Hidrogen (H_2) 0-5%, Hidrogen Sulfida (H_2S) 0,1-0,3%, dan uap air (H_2O) [8].

Pemurnian biogas mencakup berbagai teknik, termasuk adsorpsi kimia fisika, adsorpsi ayunan tekanan (PSA), dan pemisahan membran. Penyerapan atau adsorpsi kimia fisika lebih disukai karena efektivitas biaya dan kemudahan aplikasi untuk masyarakat umum. Bahan-bahan yang digunakan dalam adsorpsi, seperti karbon aktif, mudah diakses dan bahkan dapat diproduksi oleh masyarakat umum secara mandiri. Karbon aktif adalah zat dengan potensi sebagai adsorben untuk pemurnian biogas. Menurut [9] efektivitas metode adsorpsi dalam pemurnian biogas dapat mencapai 94,0007% hal ini ditunjukkan dari persen CO_2 yang mengalami penyusutan mulai dari 50% CO_2 menjadi 2,9997% CO_2 .

Sejumlah penelitian tentang pemurnian biogas telah dilakukan. Penelitian yang dirujuk menurut [10] membahas pemurnian biogas, menyoroti bahwa laju aliran dan berat adsorben dapat berfungsi sebagai variabel dalam proses ini. Proses yang paling optimal terjadi pada variabel laju aliran 0,025 L/s, yang ditandai dengan peningkatan gas metana sebesar 34,01% dan penurunan gas CO_2 sebesar 35,04%. Penelitian terpisah dilakukan oleh [9] yang meneliti variabel laju aliran, tinggi unggun, dan tekanan, yang menghasilkan hasil optimal untuk adsorpsi CO_2 pada biogas pada tinggi unggun 9,46 cm. Lebih lanjut, penelitian yang dilakukan oleh [11] yang melibatkan variabel tinggi adsorben dan waktu tinggal, dengan memanfaatkan pelet eceng gondok dan sekam padi sebagai adsorben, mencapai persentase penyerapan CO_2 tertinggi sebesar 95,01% pada tinggi adsorben 12 cm.

Penelitian ini melibatkan pemanfaatan jenis adsorben karbon aktif tertentu untuk memodelkan kolom adsorpsi lapisan tetap, dengan variasi ketinggian adsorben dan laju aliran gas yang memasuki kolom. Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tersebut peneliti akan melakukan pemurnian biogas dengan proses adsorpsi menggunakan karbon aktif sebagai adsorben dan mencari laju alir biogas terbaik, mencari tinggi adsorben yang terbaik untuk proses pemurnian biogas menggunakan proses adsorpsi.

2. Metode Penelitian

Material

Pada penelitian ini, bahan-bahan yang digunakan adalah biogas yang di dapatkan dari desa kalipucang, Pasuruan dan karbon aktif berukuran 30 mesh yang didapatkan dari marketplace online. Biogas sample yang digunakan memiliki kandungan yaitu Metana (CH_4 , 55,3388%) dan Karbon Dioksida (CO_2 , 39,8678%). Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah serangkaian alat adsorpsi sebagai tempat proses adsorpsi yang terdiri atas gas holder biogas bahan baku dan produk, compressor, rotameter, dan kolom adsorpsi.

1. Analisa Bahan Baku dengan Alat Gas Chromatography

Analisa bahan dengan alat gas chromatography (GC) untuk mengetahui kadar awal kandungan gas metana dan juga karbondioksida pada bahan baku biogas. Analisis dilakukan dengan mengambil sampel menggunakan syringe men-inject sampel kedalam alat gas chromatography dan diuji selama 7 menit. Kemudian hasil daripada uji bahan baku akan ditampilkan didalam grafik yang menyatakan luas area daripada gas yang terdeteksi di dalam alat gas chromatography. Kemudian hasil bahan baku yang diuji dihitung untuk diketahui persen dari masing-masing gas.

$$\text{Kadar CH}_4(\%) = \frac{\text{Luas Area CH}_4}{\text{Luas Area Total}} \times 100\%$$

$$\text{Kadar CO}_2(\%) = \frac{\text{Luas Area CO}_2}{\text{Luas Area Total}} \times 100\%$$

2. Proses Adsorpsi

Biogas yang berada di dalam gas holder akan dialirkan menggunakan kompresor yang terhubung dengan rotameter. Rotameter yang digunakan untuk mengatur variabel laju alir dibuka sesuai variabel agar biogas dapat mengalir kedalam kolom adsorpsi. Kolom adsorpsi yang berisikan karbon aktif dengan variabel ketinggian karbon aktif terdapat proses adsorpsi yang berlangsung, sebelum akhirnya ditampung pada gas holder produk.

3. Analisa Produk Dengan Alat Gas Chromatography

Biogas yang telah melalui proses adsorpsi kemudian dilakukan analisa menggunakan alat gas chromatography. Analisis dilakukan dengan mengambil sampel menggunakan syringe men-inject sampel kedalam alat gas chromatography dan diuji selama 7 menit. Kemudian hasil daripada uji produk akan ditampilkan didalam grafik yang menyatakan luas area daripada gas yang terdeteksi di dalam alat gas chromatography. Kemudian hasil bahan baku yang diuji dihitung untuk diketahui persen dari masing-masing gas dengan rumus perhitungan yang sama seperti sebelumnya.

4. Analisa Persen Kenaikan CH₄ dan Persen Penurunan CO₂

Setelah didapatkan hasil persentase CH₄ dan CO₂ daripada biogas yang telah melalui proses adsorpsi selanjutnya akan dilakukan perhitungan kenaikan CH₄ dan penurunan CO₂. Kenaikan gas CH₄ dan penurunan CO₂ dapat dihitung dengan rumus:

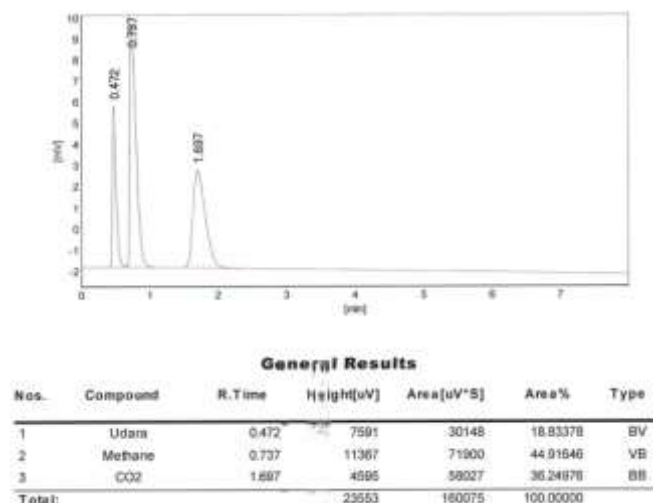
$$\text{Kenaikan CH}_4 = \frac{\text{Kadar Akhir} - \text{Kadar Awal}}{\text{Kadar Awal}} \times 100\%$$

$$\text{Penurunan CO}_2 = \frac{\text{Kadar Awal} - \text{Kadar Akhir}}{\text{Kadar Awal}} \times 100\%$$

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisis Bahan Baku

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh hasil pengukuran kandungan biogas sebelum pemurnian pada kolom adsorpsi seperti pada gambar berikut:



Gambar 1. Hasil Uji Bahan Baku dengan Gas Chromatography

Pada **Gambar 1** merupakan hasil daripada uji gas chromatography yang dilakukan pada sample awal biogas. Dapat dilihat bahwasanya terdapat 3 kandungan yang terdeteksi dalam gas chromatography yaitu Udara, Metana (CH₄) dan Karbon dioksida (CO₂). Dalam perhitungannya udara yang bersifat sebagai carier biogas dapat diabaikan dan oleh karena itu perhitungan selanjutnya hanya akan menggunakan metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂). Banyak daripada kandungan yang terdapat dalam biogas dapat dilihat pada besarnya area yang terlampir pada gambar diatas, dapat dilihat bahwasanya luas area daripada kurva metana sebesar 71.900 dan luas area daripada kurva karbon dioksida sebesar 58.027. Perhitungan yang digunakan

sendiri merupakan rumus dari pada persen dimana luas area salah satu gas dibagi dengan luas area gas total, berikut merupakan hasil daripada kandungan sample biogas awal yang disajikan didalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Kandungan Bahan Baku Biogas

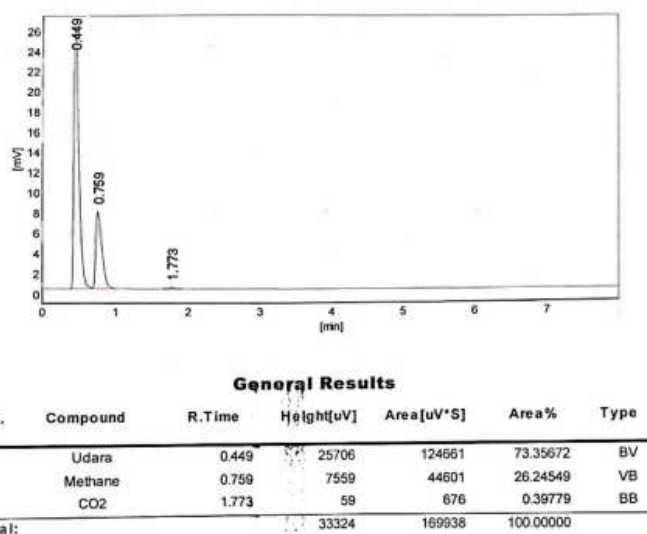
Jenis Gas	Jumlah (%)
Metana (CH ₄)	55,3388
Karbondioksida (CO ₂)	39,8678

Komposisi biogas yang ditampilkan pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa kualitas biogas yang dihasilkan melalui proses pada digester anaerobik tergolong cukup baik, hal ini ditunjukkan dari komposisi gas metana yang mendominasi kandungan biogas sebesar 55,3388%. Menurut [12], metana merupakan gas yang paling mendominasi dibandingkan dengan gas-gas lainnya karena merupakan hasil utama dari proses fermentasi kotoran sapi, dengan kadar sekitar 50–70%. Sementara itu, data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa gas CO₂ juga terdapat dalam jumlah yang cukup besar di dalam biogas, yaitu sebesar 44,6612%. Keberadaan CO₂ dalam proporsi tersebut dapat mengurangi nilai energi biogas, karena CO₂ termasuk salah satu jenis gas pengotor.

Pada tahun 2014 [13] melakukan standarisasi terhadap kandungan daripada biogas yang diproduksi pada tekanan tinggi, standar mutu biogas bertekanan tinggi disusun dengan maksud untuk melindungi konsumen agar mendapatkan produk biogas yang bermutu dan mendukung pemanfaatannya secara komersial sebagai bahan bakar, dikatakan bahwasanya minimal kandungan dari CH₄ berada di 80% volume total, sementara untuk CO₂ maksimal sebesar 18% dari volume total.

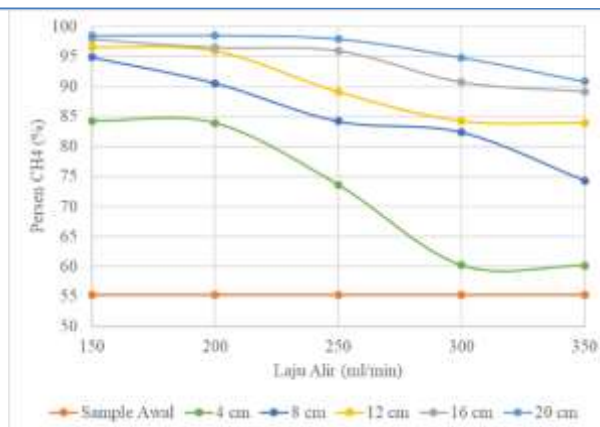
Hasil Analisis Produk

Profil komposisi gas setelah melalui proses adsorpsi oleh karbon aktif dengan variabel berupa laju alir gas dan tinggi adsorben dapat dilihat pada **Gambar 2**.



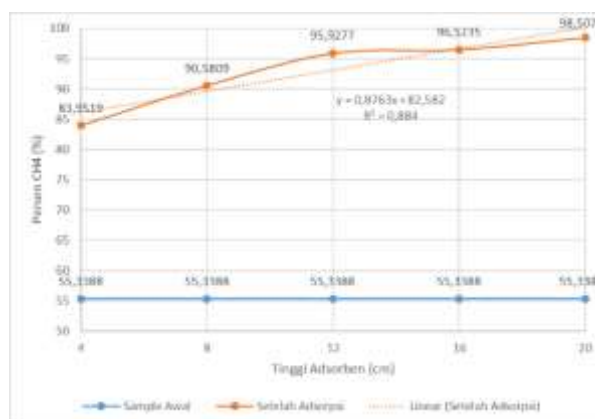
Gambar 2. Hasil Analisis Produk Pada Variabel 200ml/min dan tinggi 20cm

Berikut merupakan hasil daripada uji biogas menggunakan alat gas chromatography pada variabel laju alir 200 ml/min dan tinggi adsorben 20cm. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwasanya komponen yang digunakan dalam perhitungan ialah metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂). Dapat dilihat bahwasanya luas area CH₄ sebesar 44.601 dan luas area CO₂ sebesar 676. Pada hasil daripada variabel variabel lainnya digunakan metode yang sama dalam perhitungannya yaitu luas area salah satu gas dibagi luas area total. Setelah didapatkan nilai daripada biogas produk dapat diketahui hubungan masing-masing variabel pada beberapa **Gambar 3**.



Gambar 3. Kandungan CH₄ sebelum dan sesudah

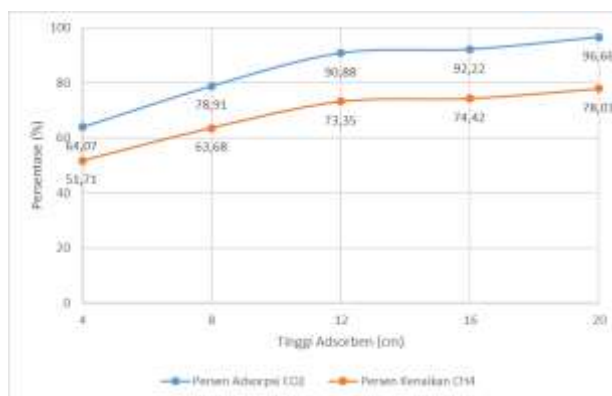
Berdasarkan **Gambar 3** diatas dapat dilihat bahwasanya kadar CH₄ pada tiap perbandingan laju alir selalu mengalami kenaikan dengan bertambahnya tinggi dari adsorben. Hal tersebut dikarenakan bahan yang digunakan sebagai adsorben mengalami regenerasi pada setiap variable nya sehingga adsorben belum mencapai titik jenuhnya. Adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah karbon aktif dengan ukuran yang seragam sebesar 30 mesh, adsorben memiliki cara kerja untuk menyerap CO₂ dan secara tidak langsung meningkatkan kandungan CH₄ pada biogas. Semakin tinggi adsorben yang digunakan mengakibatkan waktu kontak antara adsorbat dengan permukaan adsorben semakin lama sehingga kadar CH₄ yang diperoleh semakin tinggi, hal tersebut dikarenakan hubungan antara waktu kontak berbanding lurus dengan adsorpsi CO₂. Tinggi adsorben paling baik dalam mengadsorpsi CO₂ adalah 20 cm dengan diperoleh kadar CH₄ dari rentang 98,5% hingga 90,8%. Hal tersebut telah sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh [14] mengemukakan bahwa persentase CH₄ yang lebih tinggi dapat dicapai dengan laju aliran yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengalami peningkatan tingkat penyerapan saat laju aliran menurun.



Gambar 4. Kenaikan CH₄ pada laju alir 200ml/min

Berdasarkan **Gambar 4** disajikan hubungan antara tinggi adsorben dan persen metana (CH₄) yang dihasilkan dalam proses adsorpsi khususnya pada laju alir 200ml/min. Pada sumbu X, tinggi adsorben bervariasi dari 4 hingga 20 cm, sedangkan pada sumbu Y, persentase CH₄ berkisar antara 55% hingga 100%. Data menunjukkan bahwa pada kondisi awal, sebelum penerapan proses adsorpsi, persentase CH₄ berada pada 55,338%. Namun, setelah penerapan proses adsorpsi, terdapat peningkatan yang signifikan dalam persentase CH₄ seiring dengan meningkatnya tinggi adsorben, di mana persentase metana meningkat dari 83,9519% pada 4 cm hingga mencapai 98,5070% pada 20 cm. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi secara efektif meningkatkan kadar metana, yang merupakan parameter penting dalam evaluasi kualitas biogas. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa peningkatan tinggi adsorben berbanding lurus dengan peningkatan persen CH₄ yang dihasilkan.

Hal ini telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [15] yang menyatakan bahwa persentase penyerapan CO₂ pada proses pemurnian biogas meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi adsorben. Hal ini dikarenakan semakin tinggi adsorben pada kolom gelembung maka semakin lama waktu kontak pada kolom, sehingga dapat meningkatkan adsorpsi pada karbon aktif.



Gambar 5. Persen Adsorpsi CO₂ dan Persen Kenaikan CH₄

Berdasarkan **Gambar 5** disajikan hubungan antara tinggi adsorben dan persen adsorpsi CO₂ beserta persen kenaikan CH₄, peningkatan tinggi adsorben berbanding lurus dengan persen adsorpsi CO₂, yang sesuai dengan teori bahwa peningkatan area permukaan adsorben akan meningkatkan efisiensi penyerapan gas tersebut. Pada ketinggian 4 cm, persen adsorpsi CO₂ relatif rendah (64,07%), namun saat tinggi adsorben ditingkatkan, terjadi peningkatan yang signifikan hingga 96,66% pada 20 cm. Di sisi lain, persen kenaikan CH₄ juga menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya tinggi adsorben, dari 51,71% menjadi 78,01%.

Standar Nasional Indonesia (SNI) menetapkan bahwa biogas harus memiliki kadar metana minimal 80% untuk memenuhi standar kualitas yang ideal. Kadar metana yang tinggi sangat penting karena metana adalah komponen utama yang menentukan nilai kalor dan efisiensi pembakaran biogas. Dengan kadar metana 80%, biogas dianggap sudah layak untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti bahan bakar untuk memasak, pembangkit listrik, atau sebagai bahan bakar kendaraan. Dalam penelitian yang telah dilakukan, biogas yang dihasilkan memiliki kadar metana sebesar 98%. Angka ini jauh melebihi standar SNI, menunjukkan bahwa proses produksi biogas dalam penelitian ini sangat optimal. Kadar metana yang tinggi menunjukkan rendahnya kandungan gas-gas pengotor seperti karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S), yang dapat menurunkan kualitas biogas.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa, karbon aktif sebagai adsorben dalam penelitian ini dapat mengadsorpsi CO₂ sebanyak 10,93% hingga 96,65% pada biogas sehingga dapat meningkatkan kandungan CH₄ sebesar 8,66% hingga 78% dengan variabel laju alir dan tinggi dari adsorben. Kadar adsorpsi optimal diperoleh pada tinggi adsorben 20 cm dan laju alir 200 ml/min dengan hasil berupa kandungan CH₄ sebesar 98,5070% dan kandungan CO₂ sebesar 1,4930% dengan persen kenaikan CH₄ berada di angka 78%. Hasil adsorpsi optimal sudah memenuhi ketentuan baku mutu biogas yang dikeluarkan oleh SNI dengan kandungan CH₄ sebesar 98,5070% (SNI:80%) dan CO₂ sebesar 1,4930% (SNI:18%).

5. Saran

Mempertimbangkan menambah variabel tinggi adsorben pada variabel penelitian untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi sehingga hasil yang diperoleh dapat lebih mendekati kondisi optimum.

6. Daftar Pustaka

- [1] N. Nadliriyah and Triwikantoro, "Pemurnian Produk Biogas dengan Metode Absorpsi Menggunakan Larutan Ca(OH)₂," *Sains Dan Seni Pomits*, vol. 3, 2014, [Online]. Available: www.kolumbus.fi;
- [2] O. Sjoftan, "Pengolahan Kotoran Ternak Sebagai Sumber Pupuk dan Nilai Tambah Ekonomi Masyarakat Dimasa Pandemi," 2021, Accessed: Mar. 04, 2025. [Online]. Available: <http://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/view/2403%0Ahttp://conference.unsri.ac.id/index.php/lahansuboptimal/article/download/2403/1322>
- [3] W. Fidela *et al.*, "Pemanfaatan Kotoran Sapi Menjadi Biogas Sebagai Upaya Pengendalian Limbah Peternakan," *Jurnal Ekologi, Masyarakat, dan Sains*, vol. 5, no. 2, pp. 186–192, Sep. 2024, doi: 10.55448/ems.

- [4] Marsudi, "Produksi Biogas Dari Limbah Rumah Tangga Sebagai Upaya Mengatasi Krisis Energi Dan Pencemaran Lingkungan," *Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 1, no. 2, Dec. 2012.
- [5] R. Subagyo and R. Wijaya, "Pembuatan Biogas Dengan Variasi Starter Ragi Dan Kotoran Sapi Berbahan Baku Sampah Organik," *Kinematika: Scientific Journal of Mechanical Engineering. Universitas Lambung Mangkurat.*, vol. 2, no. 1, pp. 53–65, 2017.
- [6] N. T. Saputra, L. Kalsum, and R. Junaidi, "Pemurnian Biogas dari Co-Digestion Limbah Cair Industri Tahu dengan Kotoran Sapi Menggunakan Absorben MEA Pada Kolom Isian," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 8, no. 3, 2023.
- [7] Ritonga, Abdul Mukhlis, Masrukhi Masrukhi, and Ahmad Mafrukhi. "Peningkatan Kualitas Biogas Melalui Proses Pemurnian Dengan Purifier Bertingkat Seri Menggunakan Adsorben Arang Aktif Dan Zeolit." *Rona Teknik Pertanian* 14.1 (2021): 1-14.
- [8] Y. Suprianti, "Pemurnian Biogas untuk meningkatkan Nilai Kalor melalui Adsorpsi Dua Tahap Susunan Seri dengan Media Karbon Aktif," *ELKOMIKA*, vol. 4, no. 2, pp. 185–196, 2016.
- [9] Nasrul, Dara Sabhira. "Optimasi Proses Penyerapan CO₂ dengan Adsorben Karbon Aktif Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) dan Response Surface Methodology (RSM)." *Jurnal Latihan 1.2* (2021): 1-14.
- [10] Susilo, Bambang, et al. "Rancang Bangun Sistem Pemurnian Biogas Menggunakan Metode Biofiksasi-Adsorpsi oleh Mikroalga Chlorella Vulgaris dan Karbon Aktif." *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems-Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem* 5.1 (2017): 27-34.
- [11] Indrawati, Rosiana, and Joko Susilo. "Pemanfaatan Pelet Eceng Gondok Dan Sekam Padi Sebagai Adsorben Pada Pemurnian Biogas." *Jurnal Rekayasa Lingkungan* 20.2 (2020).
- [12] R. Goswami et al., "An Overview of Physico-chemical Mechanisms of Biogas Production by Microbial Communities: A step Towards Sustainable Waste Management," *Biotech*, vol. 6, Feb. 2016, doi: 10.1007/s13205-016-0395-9.
- [13] Badan Standardisasi Indonesia, "(SNI 8019:2014) Tentang Standar mutu biogas bertekanan tinggi," 2014.
- [14] F. Fourqoniah, L. Kalsum, and S. Yulianti, "Biogas Purification by Adsorption Method Using Activated Carbon and Zeolite Adsorbents," *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, vol. 7, no. 2, p. 153, Oct. 2023, doi: 10.20961/equilibrium.v7i2.77835.
- [15] Purba, E., C. N. Yogia, and P. D. R. Sari. "Biogas Purification by CO₂ Reduction in Bubble Column Using Ca (OH)₂ and NaOH." *International Conference on Sustainable Biomass (ICSB 2019)*. Atlantis Press, 2021.