

Terbit online pada laman: <https://ejournal.umri.ac.id/index.php/JST>

## Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

# Analisis Efektivitas Arang Sekam Padi sebagai Adsorben dalam Pemurnian Biogas dari Kotoran Sapi

Rudy Sutanto\*, I Gede Bawa Susana

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 17 April 2026  
 Diterima : 01 Juni 2026  
 Diterbitkan : 04 Juni 2026

### KATA KUNCI

Arang sekam padi, Biogas, Karbon dioksida, Metana, Pemurnian.

### KORESPONDENSI

\*E-mail: [r.sutanto@unram.ac.id](mailto:r.sutanto@unram.ac.id)

### A B S T R A K

Biogas merupakan sumber energi terbarukan yang dihasilkan melalui proses fermentasi anaerob limbah organik, khususnya kotoran sapi, namun pemanfaatannya masih terbatas akibat tingginya kandungan gas pengotor seperti karbon dioksida ( $CO_2$ ) dan hidrogen sulfida ( $H_2S$ ). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja arang sekam padi sebagai material adsorben dalam proses peningkatan kualitas biogas serta menganalisis pengaruh variasi massa adsorben dan waktu kontak terhadap peningkatan kandungan metana ( $CH_4$ ). Metode penelitian dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu produksi biogas menggunakan digester anaerob, sintesis adsorben melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia, serta pengujian pemurnian menggunakan sistem kolom adsorpsi. Variasi massa adsorben yang digunakan adalah 100 g, 200 g, dan 300 g, dengan waktu kontak masing-masing 5, 10, dan 15 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dan waktu kontak berbanding lurus dengan efisiensi penyerapan  $CO_2$ . Kandungan  $CH_4$  meningkat dari 58,2% menjadi 78,6%, sedangkan  $CO_2$  mengalami penurunan dari 34,5% menjadi 18,2% pada kondisi optimum. Efisiensi penyerapan  $CO_2$  mencapai nilai maksimum sebesar 47,25%. Kinerja tersebut terjadi pada massa adsorben 300 g dan waktu kontak 15 menit, menunjukkan bahwa arang sekam padi memiliki karakteristik pori yang mampu meningkatkan proses adsorpsi secara efektif.

### A B S T R A C T

Biogas is a renewable energy source produced through the anaerobic fermentation process of organic waste, especially cow dung, but its utilization is still limited due to the high content of impurity gases such as carbon dioxide ( $CO_2$ ) and hydrogen sulfide ( $H_2S$ ). This study aims to evaluate the performance of rice husk charcoal as an adsorbent material in the process of improving biogas quality and to analyze the effect of variations in adsorbent mass and contact time on increasing methane ( $CH_4$ ) content. The research method is carried out through three main stages, namely biogas production using an anaerobic digester, adsorbent synthesis through carbonization and chemical activation processes, and purification testing using an adsorption column system. The variations in adsorbent mass used are 100 g, 200 g, and 300 g, with contact times of 5, 10, and 15 minutes, respectively. The results show that the increase in adsorbent mass and contact time is directly proportional to the efficiency of  $CO_2$  absorption. The  $CH_4$  content increased from 58.2% to 78.6%, while  $CO_2$  decreased from 34.5% to 18.2% under optimum conditions. The  $CO_2$  absorption efficiency reached a maximum value of 47.25%. This performance occurred at an adsorbent mass of 300 g and a contact time of 15 minutes, indicating that rice husk charcoal has porous characteristics that can effectively enhance the adsorption process.

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan aktivitas industri

telah mendorong eksploitasi sumber energi fosil secara besar-besaran. Namun, penggunaan energi fosil menimbulkan berbagai permasalahan serius, seperti emisi gas rumah kaca, pencemaran lingkungan, serta

keterbatasan sumber daya yang tidak terbarukan. Oleh karena itu, pengembangan energi alternatif yang bersifat terbarukan dan ramah lingkungan menjadi sangat penting dalam mendukung keberlanjutan energi di masa depan [1]. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial untuk dikembangkan adalah biogas, yang dihasilkan melalui proses degradasi anaerobik bahan organik seperti limbah pertanian, limbah makanan, dan kotoran ternak [2].

Biogas merupakan campuran gas yang umumnya terdiri atas metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), dengan kandungan metana berkisar antara 50–70%, serta sejumlah kecil gas lain seperti hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), uap air, dan senyawa pengotor lainnya [3]. Kandungan metana dalam biogas sangat menentukan nilai kalor dan kualitas energi yang dihasilkan. Semakin tinggi kandungan metana, maka semakin tinggi pula nilai kalor biogas tersebut. Namun, keberadaan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  dalam biogas dapat menurunkan kualitas pembakaran, menyebabkan korosi pada peralatan, serta berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan [4], [5].

Pemanfaatan biogas dari kotoran sapi merupakan salah satu solusi yang efektif dalam mengatasi permasalahan limbah peternakan sekaligus menghasilkan energi terbarukan. Kotoran sapi mengandung bahan organik yang cukup tinggi sehingga sangat potensial untuk diolah menjadi biogas melalui proses fermentasi anaerobik. Selain itu, pemanfaatan limbah ini juga dapat mengurangi emisi gas metana yang tidak terkendali ke atmosfer, yang diketahui memiliki potensi pemanasan global yang lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida [2]. Meskipun demikian, biogas yang dihasilkan dari proses ini masih memiliki kualitas yang rendah akibat kandungan pengotor yang cukup tinggi, sehingga diperlukan proses pemurnian sebelum digunakan secara optimal.

Proses pemurnian biogas (biogas upgrading) bertujuan untuk meningkatkan kandungan metana dengan cara menghilangkan atau mengurangi komponen pengotor seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ . Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk pemurnian biogas, antara lain absorpsi kimia, absorpsi fisik, membran, kriogenik, serta metode adsorpsi [4], [3]. Meskipun metode-metode tersebut efektif, sebagian besar memerlukan biaya investasi dan operasional yang tinggi serta teknologi yang kompleks, sehingga

kurang sesuai untuk diterapkan pada skala kecil atau pedesaan.

Salah satu metode yang relatif sederhana, ekonomis, dan efektif untuk pemurnian biogas adalah metode adsorpsi. Metode ini memanfaatkan kemampuan suatu material adsorben untuk menyerap gas tertentu pada permukaannya. Adsorpsi memiliki keunggulan seperti proses yang mudah dioperasikan, tidak memerlukan bahan kimia berbahaya, serta dapat digunakan kembali melalui proses regenerasi [6]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode adsorpsi menggunakan material seperti zeolit dan karbon aktif mampu menurunkan kadar  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  secara signifikan sehingga meningkatkan kualitas biogas [7].

Karbon aktif dan biochar yang berasal dari biomassa merupakan salah satu jenis adsorben yang banyak digunakan karena memiliki luas permukaan yang besar, porositas tinggi, serta sifat kimia yang mendukung proses adsorpsi gas [8]. Salah satu bahan biomassa yang berpotensi digunakan sebagai adsorben adalah sekam padi. Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia dan seringkali belum dimanfaatkan secara optimal. Melalui proses pirolisis, sekam padi dapat diubah menjadi arang sekam padi yang memiliki struktur pori dan luas permukaan yang cukup baik untuk aplikasi adsorpsi.

Pemanfaatan arang sekam padi sebagai adsorben dalam pemurnian biogas memiliki beberapa keunggulan, antara lain biaya produksi yang rendah, ketersediaan bahan baku yang melimpah, serta sifat ramah lingkungan. Selain itu, penggunaan limbah pertanian sebagai bahan adsorben juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular, di mana limbah dimanfaatkan kembali menjadi produk yang bernilai tambah [1]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa material berbasis biomassa memiliki potensi yang besar dalam menyerap gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ , sehingga dapat meningkatkan kualitas biogas secara signifikan [8].

Beberapa studi telah mengkaji penggunaan adsorben dalam pemurnian biogas, seperti penggunaan zeolit alam dan karbon aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter seperti ukuran partikel adsorben, laju alir gas, serta waktu kontak sangat mempengaruhi efisiensi proses adsorpsi [9]. Selain itu, variasi kondisi operasi juga berperan penting dalam menentukan kinerja adsorben dalam menyerap gas pengotor. Penelitian lain juga

menunjukkan bahwa metode absorpsi dapat digunakan untuk mengurangi kadar CO<sub>2</sub> dalam biogas, namun metode ini cenderung memerlukan penggunaan cairan kimia yang berpotensi menimbulkan limbah sekunder [10].

Dalam konteks yang lebih luas, teknologi pemurnian gas juga banyak dikembangkan untuk aplikasi lain seperti pengolahan limbah cair dan penangkapan gas CO<sub>2</sub> dari emisi industri. Berbagai pendekatan fisik, kimia, dan biologis telah digunakan untuk menghilangkan kontaminan dari media gas maupun cair, menunjukkan bahwa teknologi adsorpsi merupakan salah satu metode yang fleksibel dan dapat diaplikasikan secara luas [11]. Selain itu, upaya penangkapan CO<sub>2</sub> juga menjadi perhatian global dalam rangka mitigasi perubahan iklim, di mana berbagai teknologi seperti penggunaan mikroalga telah dikembangkan untuk menyerap CO<sub>2</sub> secara biologis [12].

Meskipun berbagai penelitian terkait pemurnian biogas telah banyak dilakukan, kajian mengenai penggunaan arang sekam padi sebagai adsorben masih relatif terbatas, terutama dalam konteks pemurnian biogas dari kotoran sapi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi efektivitas arang sekam padi dalam menyerap gas pengotor serta meningkatkan kandungan metana dalam biogas. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pemurnian biogas yang sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi skala kecil dan menengah.

Selain itu, penelitian ini juga penting untuk mendukung pemanfaatan limbah pertanian secara optimal serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah tersebut. Dengan memanfaatkan sekam padi sebagai adsorben, diharapkan dapat tercipta suatu sistem yang tidak hanya menghasilkan energi terbarukan, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan dan efisiensi sumber daya. Di sisi lain, peningkatan kualitas biogas melalui proses pemurnian akan meningkatkan nilai ekonomis dan daya saing biogas sebagai sumber energi alternatif.

## 2. METODOLOGI

### 2.1. *Bahan dan Alat*

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kotoran sapi segar sebagai substrat pembentuk biogas, sekam padi sebagai bahan baku adsorben, serta larutan kalium hidroksida (KOH) sebagai agen aktivasi kimia. Air digunakan sebagai media pencampur untuk mendukung proses fermentasi anaerob.

Peralatan yang digunakan terdiri atas digester biogas tipe batch berbahan plastik berkapasitas 50 liter, reaktor karbonisasi untuk proses pirolisis sekam padi, oven pengering, serta kolom adsorpsi berbahan pipa PVC dengan diameter 5 cm dan tinggi 50 cm. Selain itu, digunakan gas analyzer untuk mengukur komposisi gas, khususnya metana (CH<sub>4</sub>) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Peralatan pendukung lainnya meliputi termometer, timbangan digital, dan stopwatch untuk menjaga konsistensi kondisi operasi selama penelitian.

### 2.2. *Prosedur Penelitian*

#### 2.2.1. *Produksi Biogas*

Produksi biogas dilakukan melalui proses fermentasi anaerob menggunakan kotoran sapi segar yang dicampur dengan air dengan perbandingan 1:1 (berat/volume). Campuran tersebut dimasukkan ke dalam digester tipe batch dan ditutup rapat untuk menciptakan kondisi tanpa oksigen. Proses fermentasi berlangsung selama 25 hari pada suhu lingkungan ( $\pm 30^\circ\text{C}$ ).

#### 2.2.2. *Pembuatan Adsorben Arang Sekam Padi*

Sekam padi dibersihkan dan dikeringkan untuk menghilangkan kadar air, kemudian dikarbonisasi menggunakan reaktor pirolisis pada suhu 500°C selama 2 jam dalam kondisi terbatas oksigen. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan arang dengan kandungan karbon tinggi. Selanjutnya, arang sekam diaktivasi secara kimia menggunakan larutan KOH 1 M dengan perbandingan massa 1:3 (arang : larutan), kemudian didiamkan selama 24 jam. Setelah itu, sampel dicuci hingga pH netral dan dikeringkan pada suhu 110°C selama 3 jam.

#### 2.2.3. *Proses Pemurnian Biogas*

Biogas yang dihasilkan dari digester dialirkan ke dalam kolom adsorpsi yang telah diisi dengan arang

sekam padi. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Massa adsorben: 100 g, 200 g, dan 300 g
- Waktu kontak: 5, 10, dan 15 menit

Aliran gas dijaga konstan menggunakan katup pengatur aliran. Setelah melewati kolom adsorpsi, gas dianalisis untuk mengetahui perubahan komposisi CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>.

### 2.2.4. Analisis Komposisi Gas

Komposisi biogas dianalisis menggunakan gas analyzer untuk mengukur kandungan CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> sebelum dan sesudah proses pemurnian. Data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi peningkatan kualitas biogas setelah proses adsorpsi.

### 2.3. Parameter dan Analisis Data

Efisiensi adsorpsi CO<sub>2</sub> dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

di mana:  $\eta$  = efisiensi adsorpsi (%),  $C_{in}$  = konsentrasi CO<sub>2</sub> sebelum adsorpsi (%),  $C_{out}$  = konsentrasi CO<sub>2</sub> setelah adsorpsi (%). Persamaan ini banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja adsorben dalam proses pemurnian gas [3], [7].

Peningkatan kadar metana dihitung menggunakan:

$$\Delta CH_4 = CH_{4,out} - CH_{4,in} \quad (2)$$

di mana:  $\Delta CH_4$  = peningkatan kadar metana (%),

$CH_{4,out}$  = kadar metana setelah adsorpsi (%)

$CH_{4,in}$  = kadar metana sebelum adsorpsi (%).

Kapasitas adsorpsi adsorben terhadap CO<sub>2</sub> dihitung dengan persamaan:

$$q = \frac{m_{CO_2}}{m} \quad (3)$$

$$m_{CO_2} = V_{CO_2} \times \rho \quad (4)$$

$$V_{CO_2} = (C_{in} - C_{out}) \times V \quad (5)$$

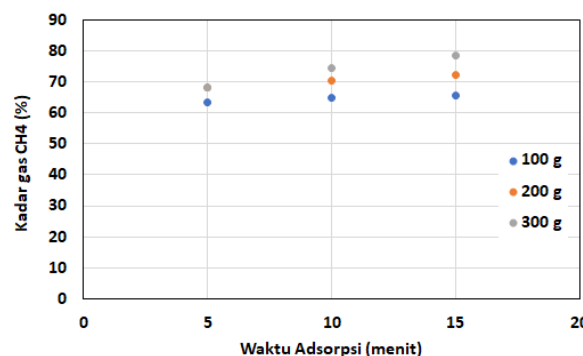
di mana:  $q$  = kapasitas adsorpsi (mg/g),  $V$  = volume gas (L),  $m$  = massa adsorben (g), pada kondisi standar  $\rho_{CO_2}$  adalah 1980 mg/L. Persamaan ini digunakan untuk mengetahui kemampuan maksimum adsorben dalam menyerap gas [8], [11].

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan arang sekam padi memberikan

pengaruh signifikan terhadap peningkatan kualitas biogas, yang ditunjukkan melalui perubahan kadar CH<sub>4</sub>, penurunan CO<sub>2</sub>, efisiensi adsorpsi, serta peningkatan relatif metana. Secara umum, seluruh grafik menunjukkan tren yang konsisten, yaitu peningkatan performa pemurnian seiring bertambahnya waktu adsorpsi dan massa adsorben.

Gambar 1 memperlihatkan bahwa kandungan metana meningkat secara bertahap dengan bertambahnya waktu adsorpsi pada semua variasi massa adsorben. Pada massa 100 g, peningkatan relatif kecil, sedangkan pada 200 g dan 300 g peningkatan lebih signifikan, dengan nilai maksimum dicapai pada massa 300 g dan waktu 15 menit. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben memperbesar luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk adsorpsi CO<sub>2</sub>, sehingga fraksi CH<sub>4</sub> meningkat secara relatif dalam campuran gas. Hal ini sejalan dengan teori bahwa kapasitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh luas permukaan spesifik dan struktur pori adsorben [3], [8]. Pada kondisi optimum (300 g, 15 menit), kadar CH<sub>4</sub> meningkat dari 58,2% menjadi 78,6% atau mengalami peningkatan sebesar 20,4%.



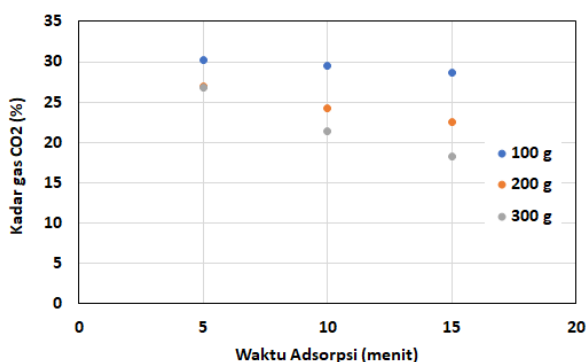
Gambar 1. Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi Dengan Kadar Gas CH<sub>4</sub>

Sebaliknya, grafik kadar CO<sub>2</sub> (Gambar 2) menunjukkan tren penurunan yang konsisten seiring dengan bertambahnya waktu adsorpsi dan massa adsorben. Pada massa adsorben 100 g, penurunan kadar CO<sub>2</sub> relatif terbatas, sedangkan pada massa 300 g terjadi penurunan yang lebih signifikan hingga mencapai nilai terendah pada waktu 15 menit. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah adsorben memberikan lebih banyak situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi, sehingga kemampuan penyisihan CO<sub>2</sub> menjadi lebih tinggi.

Fenomena ini mengindikasikan bahwa CO<sub>2</sub> merupakan komponen yang lebih dominan teradsorpsi dalam sistem dibandingkan CH<sub>4</sub>. Hal tersebut

disebabkan oleh sifat molekul CO<sub>2</sub> yang memiliki momen kuadrupol lebih besar, sehingga interaksinya dengan permukaan karbon menjadi lebih kuat dibandingkan gas non-polar seperti CH<sub>4</sub>. Selain itu, struktur pori mikro pada adsorben berbasis karbon memungkinkan molekul CO<sub>2</sub> yang berukuran relatif kecil untuk berdifusi lebih cepat dan terperangkap di dalam pori adsorben [8], [11].

Penurunan kadar CO<sub>2</sub> yang semakin signifikan dengan bertambahnya waktu adsorpsi juga menunjukkan bahwa proses difusi gas ke dalam pori adsorben berlangsung secara bertahap hingga mendekati kondisi kesetimbangan. Pada tahap awal, adsorpsi terjadi secara cepat pada permukaan eksternal, kemudian diikuti oleh difusi intra-partikel ke dalam struktur pori yang lebih dalam. Pola ini umum terjadi pada proses adsorpsi gas menggunakan material berpori dan menunjukkan bahwa waktu kontak merupakan parameter penting dalam menentukan efisiensi pemurnian biogas [3]. Kadar CO<sub>2</sub> turun dari 34,5% menjadi 18,2% sehingga terjadi penurunan sebesar 47,25%.



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi Dengan Kadar Gas CO<sub>2</sub>

Hasil pada Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan hubungan yang saling berkaitan antara peningkatan kadar CH<sub>4</sub> dan penurunan kadar CO<sub>2</sub> selama proses adsorpsi. Pada kondisi awal, biogas memiliki kandungan CH<sub>4</sub> sebesar 58,2% dan CO<sub>2</sub> sebesar 34,5%. Setelah pemurnian menggunakan arang sekam padi dengan massa adsorben 300 g dan waktu kontak 15 menit, kadar CH<sub>4</sub> meningkat menjadi 78,6% sedangkan CO<sub>2</sub> menurun menjadi 18,2%.

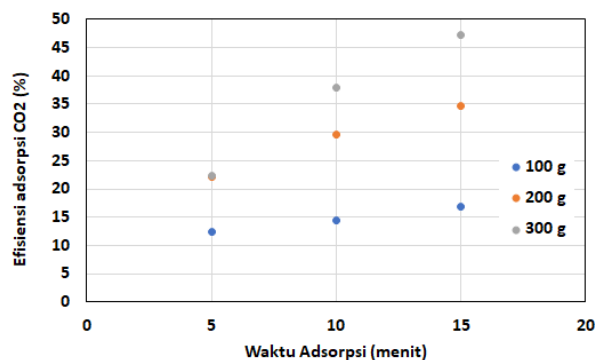
Penurunan kadar CO<sub>2</sub> sebesar 47,25% berkontribusi langsung terhadap peningkatan kadar CH<sub>4</sub> sebesar 20,4% dibanding kondisi awal. Hasil ini menunjukkan bahwa adsorben bekerja secara selektif terhadap CO<sub>2</sub> sehingga fraksi metana meningkat secara relatif dalam campuran biogas.

Tabel 1.

Data Hasil Pemurnian Biogas

Massa Adsorben (g)	Waktu (menit)	CO <sub>2</sub> (%)	Efisiensi Penurunan CO <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	Peningkatan CH <sub>4</sub> (%)
Awal	0	34,5	-	58,2	-
100	5	30,2	12,46	63,5	5,3
100	10	29,5	14,49	64,8	6,6
100	15	28,7	16,81	65,4	7,2
200	5	26,9	22,03	68,0	9,8
200	10	24,3	29,57	70,5	12,3
200	15	22,5	34,78	72,1	13,9
300	5	26,8	22,32	68,2	10,0
300	10	21,4	37,97	74,5	16,3
300	15	18,2	47,25	78,6	20,4

Tabel 1 menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara penurunan kadar CO<sub>2</sub> dan peningkatan kadar CH<sub>4</sub>. Semakin tinggi efisiensi adsorpsi CO<sub>2</sub> yang dicapai oleh arang sekam padi, semakin tinggi pula konsentrasi CH<sub>4</sub> yang diperoleh. Pada kondisi optimum, efisiensi penurunan CO<sub>2</sub> mencapai 47,25%, yang diikuti oleh peningkatan kadar CH<sub>4</sub> sebesar 20,4%. Hubungan ini menunjukkan bahwa mekanisme utama peningkatan kualitas biogas berasal dari proses penyisihan CO<sub>2</sub> secara selektif oleh adsorben.

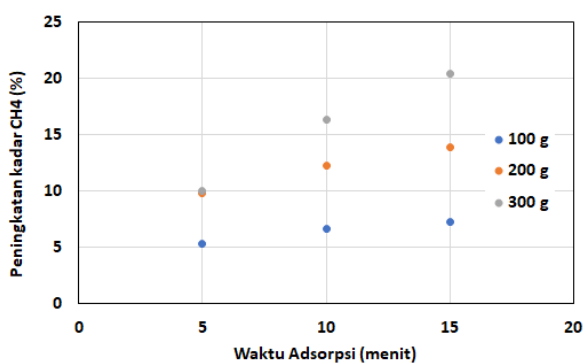


Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi Dengan Efisiensi Adsorpsi CO<sub>2</sub>

Grafik efisiensi adsorpsi CO<sub>2</sub> (Gambar 3) menunjukkan peningkatan yang hampir linier terhadap waktu pada setiap massa adsorben, dengan nilai tertinggi pada massa 300 g. Hal ini menunjukkan bahwa waktu kontak memainkan peran penting dalam meningkatkan difusi molekul gas ke dalam struktur pori adsorben hingga mendekati kondisi kesetimbangan. Pada tahap awal adsorpsi, proses didominasi oleh difusi eksternal (*film diffusion*),

sedangkan pada waktu yang lebih lama, difusi intra-partikel menjadi mekanisme dominan [3], [8]. Dengan meningkatnya waktu, semakin banyak molekul  $\text{CO}_2$  yang dapat mencapai situs aktif di dalam pori, sehingga efisiensi adsorpsi meningkat. Efisiensi adsorpsi meningkat dari sekitar 12,46% pada massa 100 g dan waktu kontak 5 menit menjadi 47,25% pada massa 300 g dan waktu kontak 15 menit, atau meningkat hampir tiga kali lipat.

Grafik peningkatan kadar  $\text{CH}_4$  (Gambar 4) menunjukkan hubungan yang sangat erat dengan penurunan  $\text{CO}_2$ . Peningkatan  $\text{CH}_4$  bukan disebabkan oleh bertambahnya jumlah metana secara absolut, melainkan akibat berkurangnya fraksi  $\text{CO}_2$  dalam campuran gas. Dengan kata lain, proses adsorpsi bersifat selektif terhadap  $\text{CO}_2$ , sehingga meningkatkan konsentrasi relatif  $\text{CH}_4$ . Hal ini sesuai dengan prinsip pemurnian biogas berbasis adsorpsi, di mana peningkatan kualitas gas dicapai melalui penghilangan komponen pengotor [7].



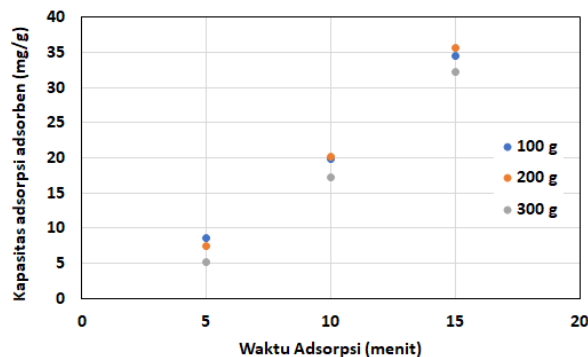
**Gambar 4.** Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi Dengan Peningkatan Kadar  $\text{CH}_4$

Jika dianalisis secara simultan, terlihat adanya interaksi antara massa adsorben dan waktu kontak. Pada massa kecil (100 g), peningkatan waktu tidak memberikan dampak signifikan karena jumlah situs aktif terbatas. Sebaliknya, pada massa besar (300 g), peningkatan waktu memberikan pengaruh yang sangat signifikan karena masih tersedia banyak pori yang dapat dimanfaatkan (Gambar 4). Hal ini menunjukkan bahwa sistem adsorpsi dipengaruhi oleh kombinasi antara faktor kinetika (waktu kontak) dan kapasitas (massa adsorben). Fenomena ini umum terjadi pada sistem adsorpsi gas-padatan dan sering dijelaskan melalui konsep zona transfer massa (mass transfer zone) dalam kolom adsorpsi.

Secara keseluruhan, hasil grafik menunjukkan bahwa kondisi optimum dicapai pada massa adsorben 300 g dan waktu adsorpsi 15 menit, yang memberikan

kadar  $\text{CH}_4$  tertinggi (Gambar 1), kadar  $\text{CO}_2$  terendah (Gambar 2), efisiensi adsorpsi maksimum (Gambar 3), serta peningkatan metana paling signifikan (Gambar 4). Hal ini menunjukkan bahwa arang sekam padi memiliki potensi yang baik sebagai adsorben dalam pemurnian biogas, terutama karena kombinasi struktur mikropori dan luas permukaan yang mendukung proses adsorpsi gas. Selain itu, hasil ini juga menunjukkan bahwa parameter operasi harus dioptimalkan secara simultan untuk mencapai kinerja sistem yang maksimal.

Secara umum, kapasitas adsorpsi menunjukkan tren meningkat dengan bertambahnya waktu kontak pada setiap variasi massa adsorben (Gambar 5). Pada massa 100 g, nilai  $q$  meningkat dari 8,51 mg/g menjadi 34,85 mg/g ketika waktu kontak meningkat dari 5 menit menjadi 15 menit. Tren serupa juga terjadi pada massa 200 g dan 300 g. Hal ini menunjukkan bahwa waktu kontak memiliki pengaruh signifikan terhadap proses adsorpsi, karena memberikan kesempatan lebih besar bagi molekul  $\text{CO}_2$  untuk berdifusi ke dalam pori adsorben hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Fenomena ini sesuai dengan teori kinetika adsorpsi, di mana proses difusi intra-partikel menjadi tahap pengendali pada waktu kontak yang lebih lama.



**Gambar 5.** Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi Dengan Kapasitas Adsorpsi Adsorben

Namun demikian, jika ditinjau dari pengaruh massa adsorben, terlihat bahwa peningkatan massa tidak selalu diikuti dengan peningkatan nilai  $q$ . Sebagai contoh, pada waktu kontak 15 menit, kapasitas adsorpsi tertinggi justru diperoleh pada massa 200 g (35,64 mg/g), sedangkan pada massa 300 g nilai  $q$  sedikit menurun menjadi 32,27 mg/g. Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun jumlah total  $\text{CO}_2$  yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya massa adsorben, efisiensi pemanfaatan adsorben per satuan massa justru menurun (Gambar 5).

Secara keseluruhan, analisis kapasitas adsorpsi menunjukkan bahwa waktu kontak merupakan faktor dominan dalam meningkatkan nilai  $q$ , sedangkan massa adsorben lebih berpengaruh terhadap total jumlah gas yang teradsorpsi. Kombinasi antara kedua parameter ini harus dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara kapasitas adsorpsi dan efisiensi penggunaan adsorben. Dalam penelitian ini, kondisi terbaik secara kapasitas diperoleh pada massa 200 g dan waktu kontak 15 menit, sedangkan kondisi terbaik secara pemurnian total diperoleh pada massa 300 g dan waktu 15 menit.

#### 4. SIMPULAN

Arang sekam padi terbukti efektif digunakan sebagai adsorben untuk pemurnian biogas dari kotoran sapi. Peningkatan massa adsorben dan waktu kontak meningkatkan kemampuan adsorpsi  $\text{CO}_2$  sehingga kualitas biogas menjadi lebih baik. Hubungan yang kuat antara penurunan  $\text{CO}_2$  dan peningkatan  $\text{CH}_4$  menunjukkan bahwa arang sekam padi bekerja secara selektif dalam menyerap gas pengotor. Kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 300 g dan waktu kontak 15 menit dengan kandungan  $\text{CH}_4$  sebesar 78,6%, kandungan  $\text{CO}_2$  sebesar 18,2%, serta efisiensi adsorpsi  $\text{CO}_2$  sebesar 47,25%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah sekam padi berpotensi menjadi adsorben murah dan ramah lingkungan untuk aplikasi pemurnian biogas skala kecil hingga menengah.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Awasthi, M. K., Sarsaiya, S., Patel, A., Juneja, A., Singh, R. P., Yan, B., Awasthi, S. K., Jain, A., Liu, T., & Duan, Y. (2020). Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>
- [2] Chew, K. R., Leong, H. Y., Khoo, K. S., Vo, D.-V. N., Anjum, H., Chang, C.-K., & Show, P. L. (2021). Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01220-z>.
- [3] Sarker, S., & Lamb, J. (2021). Biogas upgrading technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111439. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111439>
- [4] Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for biogas upgrading to biomethane: A review. *Bioengineering*, 6(4), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
- [5] Abou Rjeily, M., Gennequin, C., Pron, H., Abi-Aad, E., & Randrianalisoa, J. H. (2021). Pyrolysis-catalytic upgrading of bio-oil and pyrolysis-catalytic steam reforming of biogas: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1–48. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01190-2>
- [6] Irvan, I., Trisakti, B., Maulina, S., Sidabutar, R., Irian, I., & Takriff, M. S. (2018). Sistem adsorpsi-desorpsi untuk pelepasan  $\text{CO}_2$  pada biogas menggunakan adsorben berbasis zeolit alam. *Jurnal Sains dan Teknologi Rekayasa*, 13(10).
- [7] Fourqoniah, F., Kalsum, L., & Yulianti, S. (2023). Biogas purification by adsorption method using activated carbon and zeolite adsorbents. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 7(2), 153–159. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v7i2.77835>.
- [8] Gale, M., Nguyen, T., Moreno, M., & Gilliard-Abdulaziz, K. L. (2021). Physicochemical properties of biochar and activated carbon from biomass residue: Influence of process conditions on adsorbent properties. *ACS Omega*, 6, 10224–10233. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00530>.
- [9] Sidabutar, R., Trisakti, B., & Irvan, I. (2023). Pengaruh laju alir biogas dan ukuran partikel pembentuk pelet terhadap penyisihan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dalam biogas dengan proses adsorpsi-desorpsi menggunakan adsorben berbasis zeolit alam untuk peningkatan kualitas biogas. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 12, 31–38. <https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.10134>.
- [10] Isya, I. M., & Elida, P. (2023). Adsorpsi gas karbondioksida dalam biogas dengan variasi laju alir biogas dan laju alir adsorben. *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri*, 4, 1–5.

- [11] Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., & Chia, W. Y. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>.
- [12] Alami, A. H., Alasad, S., Ali, M., & Alshamsi, M. (2021). Investigating algae for CO<sub>2</sub> capture and accumulation and simultaneous production of biomass for biodiesel production. *Science of the Total Environment*, 759, 143529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143529>.