

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah Indonesia berkomitmen meningkatkan penggunaan energi terbarukan, termasuk biogas, guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan dampak lingkungan. Hal ini tercermin dalam Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, serta Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 yang menekankan percepatan pengembangan energi terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi dikembangkan di sektor peternakan adalah biogas yang berasal dari limbah kotoran ternak.

Namun demikian, ketersediaan bahan baku biogas sangat dipengaruhi oleh kondisi populasi ternak nasional. Data Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa populasi kambing di Indonesia mengalami peningkatan dari 15.438.852 ekor pada tahun 2024 menjadi 15.824.305 ekor pada tahun 2025. Peningkatan populasi ini berdampak pada bertambahnya volume kotoran kambing yang dihasilkan, yang apabila tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan permasalahan lingkungan seperti bau dan pencemaran. Oleh karena itu, peningkatan jumlah limbah kotoran kambing perlu diimbangi dengan upaya pemanfaatan yang optimal, salah satunya melalui pengolahan menjadi biogas, sehingga limbah yang dihasilkan tidak hanya terkelola dengan baik tetapi juga bernilai guna sebagai sumber energi terbarukan.

Oleh karena itu, peningkatan jumlah limbah kotoran kambing perlu diimbangi dengan upaya pemanfaatan yang optimal melalui pengolahan menjadi biogas. Namun demikian, pemanfaatan biogas tidak hanya bergantung pada ketersediaan bahan baku, tetapi juga pada kualitas biogas yang dihasilkan. Salah satu tantangan dalam pemanfaatan biogas adalah tingginya kandungan karbon dioksida (CO_2), yang dapat menurunkan nilai kalor biogas dan efisiensi pembakarannya (Gantina & Farhani, 2021). Karbon dioksida (CO_2) merupakan komponen terbesar kedua dalam biogas setelah metana (CH_4), dengan konsentrasi sekitar 25–45% (Abdurrachman dkk., 2013). Kandungan CO_2 yang tinggi dapat mengurangi nilai

kalor biogas, sehingga diperlukan proses pemurnian untuk meningkatkan kualitas dan efisiensinya (Anwar dkk., 2023).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan CO₂ dari biogas, salah satunya adalah menggunakan material adsorben. Arang sekam padi memiliki potensi besar sebagai adsorben karena strukturnya yang berpori dan memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga mampu menyerap berbagai zat pencemar dari lingkungan sekitarnya (Hartanto dkk., 2023). Aktivasi kimia menggunakan larutan H₃PO₄ (asam fosfat) dapat meningkatkan karakteristik fisik dan kimia arang sekam padi, seperti memperbesar luas permukaan dan menambahkan gugus fungsional aktif yang mendukung proses adsorpsi gas (Dwityaningsih dkk., 2023). Selain itu, karbon aktif dari sekam padi memiliki daya serap terhadap iodin sebesar 1200-1250 mg/g, yang membuktikan efektivitasnya dalam menyerap gas pengotor seperti CO₂ (Pangesti dkk., 2022). Berdasarkan potensi tersebut, diperlukan tahapan aktivasi dan penerapan material agar dapat bekerja secara optimal dalam sistem produksi biogas.

Proses aktivasi dilakukan dengan merendam arang sekam padi ke dalam larutan H₃PO₄ selama waktu tertentu, kemudian dicuci hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan sisa larutan aktivator, dan selanjutnya dikeringkan sebelum digunakan. Arang yang telah teraktivasi kemudian dicampurkan ke dalam bahan biogas seperti kotoran kambing. Dalam proses fermentasi anaerob, arang sekam yang sudah diaktivasi ini akan bekerja sebagai media adsorben yang menyerap CO₂ langsung dari dalam biodigester, sehingga kandungan CO₂ dalam biogas yang dihasilkan dapat berkurang.

Namun, kajian spesifik mengenai penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H₃PO₄ langsung ke dalam bahan biogas dari kotoran untuk menurunkan kandungan CO₂ masih belum ada. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kualitas biogas setelah penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H₃PO₄ berdasarkan kandungan gas (sebagai indikator penurunan CO₂), warna nyala api dan lama waktu penyalaan serta menentukan dosis optimal arang sekam padi teraktivasi H₃PO₄ untuk memperoleh reduksi CO₂ yang maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H_3PO_4 terhadap kualitas biogas yang dihasilkan berdasarkan parameter kandungan CH_4 dan CO_2 , warna nyala api, serta lama waktu penyalaan.
2. Bagaimana efektivitas penurunan kandungan CO_2 pada biogas menggunakan arang sekam padi yang diaktivasi dengan berbagai konsentrasi H_3PO_4 dan konsentrasi manakah yang paling optimal.
3. Bagaimana pengaruh penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H_3PO_4 terhadap volume dan laju produksi biogas.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H_3PO_4 terhadap kualitas biogas yang dihasilkan berdasarkan parameter kandungan CH_4 dan CO_2 , warna nyala api, serta lama waktu penyalaan.
2. Menganalisis efektivitas penurunan CO_2 pada biogas serta menentukan konsentrasi H_3PO_4 yang optimal dalam aktivasi arang sekam padi.
3. Menganalisis pengaruh penambahan arang sekam padi hasil aktivasi H_3PO_4 terhadap volume dan laju produksi biogas.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak, baik secara akademis maupun praktis, sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh penambahan arang sekam padi teraktivasi H_3PO_4 terhadap kualitas biogas berdasarkan kandungan CH_4 dan CO_2 .

2. Memberikan alternatif pemanfaatan arang sekam padi sebagai adsorben untuk menurunkan kandungan CO_2 pada biogas.
3. Mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis limbah lokal yang berkelanjutan.

1.5 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan ruang lingkup penelitian agar sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya menggunakan bahan baku kotoran kambing sebagai substrat dalam proses produksi biogas.
2. Aditif yang digunakan untuk mereduksi kandungan CO_2 adalah arang sekam padi yang telah diaktivasi menggunakan larutan H_3PO_4 dengan bahan baku berupa sekam padi.
3. Pengujian kualitas biogas difokuskan pada kandungan CH_4 dan CO_2 , warna nyala api, lama waktu penyalaan, volume biogas, dan laju produksi biogas.
4. Massa arang sekam padi yang ditambahkan pada setiap perlakuan dibuat tetap, sedangkan variasi perlakuan dilakukan pada konsentrasi H_3PO_4 sebagai aktivator.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biogas

Biogas adalah gas yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik bahan organik oleh mikroorganisme, yang berlangsung dalam kondisi tanpa oksigen. Biogas dapat dihasilkan dari berbagai sumber seperti air limbah rumah tangga, limbah peternakan, sampah organik, limbah industri makanan, serta buangan lainnya (Rhohman dkk., 2021). Terdapat beberapa komposisi yang terdapat didalam biogas, menurut Koonaphapdeelert et al. (2020) komposisi biogas seperti yang terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Komposisi Umum Pada Biogas

Komposisi Biogas	Tingkat Konsentrasi
Metana (CH_4)	50-80 % dari volume
Karbon Dioksida (CO_2)	20-50 % dari volume
Ammonia (NH_3)	0-300 ppm
Hidrogen Sulfida (H_2S)	50-5000 ppm
Nitrogen (N_2)	1-4% dari volume
Oksigen (O_2)	<1% dari volume
Air (H_2O)	Saturated 2-5% dari massa

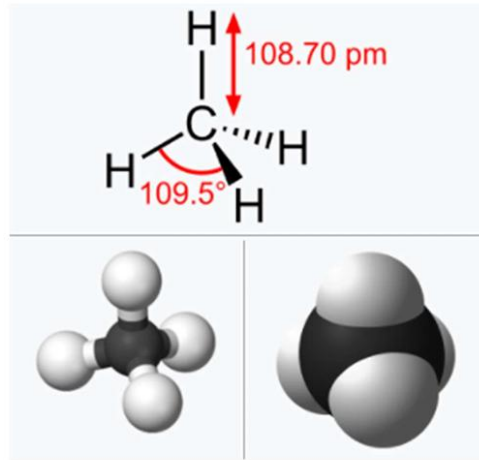
Komposisi ini menunjukkan bahwa biogas mengandung komponen-komponen yang dapat dimanfaatkan secara langsung maupun setelah pemurnian, sehingga penggunaannya tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga memberikan dampak positif bagi lingkungan. "Sistem produksi biogas mempunyai beberapa keuntungan, yaitu: mengurangi efek rumah kaca, mengurangi polusi bau, sebagai pupuk, produksi daya dan panas" (Rhohman dkk., 2021) Salah satu bentuk pemanfaatan biogas sebagai sumber energi dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut, yang menunjukkan nyala api dari gas hasil produksi biogas.



Gambar 2. 1 Nyala Api Hasil Pembakaran Biogas

2.2 Gas Metana (CH_4)

Biogas dihasilkan melalui penguraian bahan organik oleh bakteri dalam kondisi anaerob, menghasilkan gas metana (CH_4) sebagai komponen utama. Menurut Sinaga dkk. (2022), proses fermentasi anaerob pada limbah organik ini tidak hanya menghasilkan metana yang dapat dikelola, tetapi juga menjadikannya sumber energi potensial. Peran metana sebagai komponen dominan dalam biogas menentukan nilai energinya, sekaligus mendorong pemanfaatannya sebagai bahan bakar alternatif. Hal ini sejalan dengan penelitian Fitri dan Hamdi (2024), yang menyoroti potensi besar biogas sebagai energi terbarukan berkelanjutan. Sehingga keberadaan metana tidak hanya menjadi penanda komposisi biogas, tetapi juga menjadi kunci dalam pemanfaatan praktisnya. Struktur molekul metana (CH_4) dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Struktur Molekul Metana (CH₄)
Sumber: (Dudás, 2021)

Proses pembentukan metana (metanogenesis) melibatkan interaksi kompleks mikroba anaerob, di mana kelangsungan produksi CH₄ sangat bergantung pada kondisi lingkungan. (Finn et al., 2023) mengidentifikasi bahwa konsentrasi amonia (TAN > 1.7 g/L) dapat menghambat metanogenesis, tetapi komunitas mikroba yang teradaptasi seperti *Methanoculleus* dan *Methanosarcina* mampu bertahan melalui mekanisme toleransi yang tersebar di berbagai filum. Di sisi lain, strategi peningkatan produksi metana melalui injeksi hidrogen (H₂) telah dibuktikan oleh Zhang *et al.* (2020). Pada rasio stoikiometri H₂:CO₂ 4:1, konversi CO₂ menjadi CH₄ melalui jalur hidrogenotrofik dapat mencapai efisiensi 95%, meskipun memerlukan optimasi transfer massa dan kontrol pH untuk mencegah inhibisi.

Sebagai komponen utama biogas yang dihasilkan melalui proses anaerobik, metana (CH₄) memiliki karakteristik fisika-kimia yang menentukan kualitas dan aplikasi praktisnya. Menurut penelitian (Farahdiba dkk., 2024), sifat-sifat metana ini tidak hanya mempengaruhi nilai energi biogas tetapi juga teknologi pengolahannya. Berikut penjelasan rincinya:

1. Sifat Fisik Metana

- Memiliki berat molekul relatif ringan sebesar 16,04 g/mol.
- Densitas gas $7,2 \times 10^{-4}$ g/mL pada kondisi standar (1 atm, 0°C).

- Nilai kalor tinggi mencapai 13.279 kkal/kg, menjadikannya sumber energy efisien.
- Diameter molekul 3,8 Å (Ångström) yang lebih besar dibanding CO₂ (3,3 Å).

2. Sifat Kimia Metana

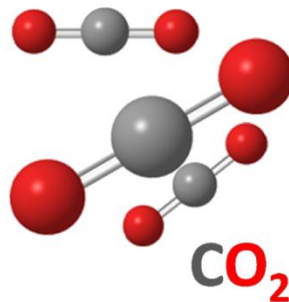
- Mengalami pembakaran sempurna: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.
- Bersifat nonpolar dengan stabilitas kimia yang baik pada suhu ruang.
- Mudah terbakar ketika bercampur udara dalam rasio 5-15% volume.
- Memiliki afinitas rendah terhadap air sehingga mudah dipisahkan.

Karakteristik unik metana ini menjadikannya komponen biogas yang sangat berharga. Ukuran molekulnya yang relatif besar (3,8 Å) memungkinkan pemurnian selektif menggunakan membran (Farahdiba dkk., 2024), sementara nilai kalornya yang tinggi mendukung aplikasi sebagai bahan bakar terbarukan yang efisien. Sifat kimianya yang stabil namun mudah terbakar membuatnya ideal untuk konversi energi, meskipun memerlukan penanganan khusus dalam penyimpanan dan distribusi. Lebih lanjut, sifat-sifat ini saling melengkapi dengan mekanisme adaptasi mikroba terhadap inhibisi amonia (Finn et al., 2023) dan strategi peningkatan produksi melalui injeksi H₂ (Zhang et al., 2020), sehingga metana tidak hanya menjadi penanda komposisi biogas, tetapi juga penentu utama kelayakan teknis dan ekonomi dalam pengembangan sistem energi terbarukan.

2.3 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas yang dihasilkan oleh makhluk hidup yaitu manusia, hewan, dan tumbuhan melalui proses respirasi (Kurniawan dkk., 2023). Dalam konsentrasi yang tinggi, gas ini dapat mengakibatkan gangguan kesehatan seperti meningkatnya detak jantung, rasa tertekan di dada, dan susah bernapas (Kurniawan et al., 2023). Gas CO₂ dalam biogas terbentuk sebagai hasil samping dari penguraian senyawa organik oleh mikroorganisme selama proses fermentasi anaerobik, khususnya pada tahap asetogenesis dan metanogenesis (Muanah dkk., 2024). Kandungan CO₂ dalam biogas umumnya berkisar antara 25–45% (Ahmad dkk., 2022), tergantung pada jenis substrat, kondisi fermentasi,

dan efisiensi degradasi biologi. Struktur molekul CO₂ dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut untuk memberikan gambaran visual mengenai bentuk dasar dari senyawa ini.



Gambar 2. 3 Struktur Molekul Karbon Dioksida (CO₂)
Sumber: (Müller & Leitner, 2015)

CO₂ memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kualitas biogas. Menurut (Indriani dkk., 2019) Kandungan CO₂ dalam biogas menyebabkan turunnya nilai kalori biogas. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar CO₂ dalam biogas, semakin rendah nilai energinya. Selain itu, keberadaan CO₂ juga berdampak pada proses pembakaran biogas. Unsur CO₂ juga dapat mengganggu dalam proses pembakaran (Majedi et dkk., 2022). Dengan demikian, CO₂ tidak hanya mengurangi kualitas energi biogas tetapi juga efisiensinya dalam aplikasi pembakaran (Majedi dkk., 2022). Upaya untuk mengurangi kadar CO₂ dalam biogas menjadi penting untuk meningkatkan nilai kalor dan mengoptimalkan pembakaran biogas sebagai sumber energi.

Penurunan CO₂ dari biogas dapat dilakukan melalui berbagai metode. Salah satu metode yang umum digunakan adalah absorpsi. Menurut Daiyan dkk. (2020) absorpsi merupakan teknik pemurnian biogas yang melibatkan pemisahan gas tertentu dari campuran gas dengan mentransfer massa ke dalam cairan yang memiliki selektivitas pelarut yang berbeda terhadap gas yang akan dipisahkan. Dalam hal ini, absorpsi dapat berupa absorpsi kimia maupun fisika. Metode lain yang relevan adalah adsorpsi. Menurut Sidabutar dkk. (2023) bahwa adsorpsi menggunakan bahan berpori dapat menangkap CO₂ karena proses ini membutuhkan konsumsi energi yang relatif rendah untuk regenerasi adsorben.

Selain absorpsi dan adsorpsi, terdapat metode-metode lain yang dapat diaplikasikan dalam penghilangan CO₂ dari biogas. Metode-metode tersebut meliputi *pressure swing adsorption (PSA)*, pemisahan kriogenik, pemisahan menggunakan membran, serta fiksasi CO₂ secara biologi dan kimia. Hardianto dan Hermawan. (2019) juga melakukan penelitian menggunakan larutan-larutan seperti KOH, NaOH, dan TEA yang memiliki sifat mengikat CO₂, sehingga efektif dalam menurunkan kadar CO₂ dalam biogas. Pemilihan metode yang tepat bergantung pada berbagai faktor, termasuk efisiensi yang diinginkan, biaya operasional, dan karakteristik spesifik dari biogas yang akan diolah.

Untuk menilai efektivitas penurunan CO₂ setelah proses adsorpsi, digunakan perhitungan berdasarkan selisih kadar CO₂ sebelum dan sesudah perlakuan. Persamaan yang digunakan adalah:

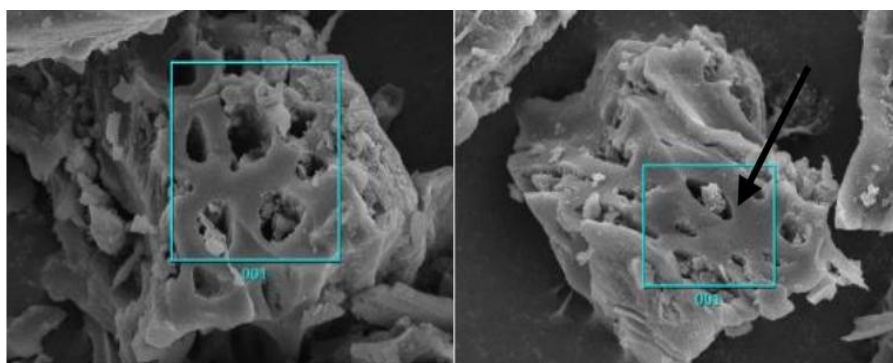
$$\text{Penurunan CO}_2 (\%) = \frac{\text{CO}_2 \text{ Awal} - \text{CO}_2 \text{ Setelah Perlakuan}}{\text{CO}_2 \text{ Awal}} \times 100 \dots\dots\dots 2.1$$

CO₂ Awal merupakan kadar karbon dioksida dalam biogas tanpa penambahan arang aktif, dan CO₂ Setelah Perlakuan adalah kadar CO₂ setelah fermentasi dengan penambahan arang sekam padi yang telah diaktivasi H₃PO₄. Pendekatan ini diadaptasi dari (Pangesti dkk., 2022), dan relevan untuk digunakan dalam sistem pencampuran adsorben ke substrat biogas, guna mengevaluasi kinerja adsorpsi secara kuantitatif.

2.4 Arang Sekam Padi sebagai Adsorben

Penggunaan arang sekam padi sebagai adsorben telah banyak dikembangkan untuk mengurangi kandungan karbon dioksida (CO₂) dalam biogas. Hal ini disebabkan oleh karakteristik arang sekam padi yang memiliki luas permukaan yang besar dan struktur pori-pori mikro hingga makro yang berlimpah, sehingga mampu menjerap molekul-molekul gas seperti H₂S secara efisien. Arang sekam padi yang diaktivasi diketahui menunjukkan peningkatan luas permukaan dan volume pori total dibandingkan biochar mentah, terutama setelah perlakuan kimiawi yang mengaktifkan lebih banyak pori di permukaan biochar (Basri dkk.,

2023). Selain itu, komposisi kimia alami dari sekam padi, terutama kandungan silikanya yang tinggi, turut berkontribusi dalam memperkuat kemampuan adsorpsinya, menjadikannya sebagai salah satu material adsorben yang ekonomis dan ramah lingkungan dalam sistem pemurnian biogas. Struktur mikroskopis arang sekam padi hasil aktivasi yang menunjukkan keberadaan pori-pori dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2. 4 Arang Sekam Padi Hasil Aktivasi dan Kalsinasi pada Suhu 900°C
Sumber: (Solihudin dkk., 2015)

Arang sekam padi yang diaktivasi juga dapat meningkatkan efisiensi pemurnian biogas dengan menyerap gas pengotor seperti CO_2 dan H_2S , sehingga meningkatkan persentase metana dalam biogas (Basri dkk., 2023). Aktivasi arang sekam padi menggunakan suhu yang lebih tinggi atau bahan kimia seperti $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terbukti dapat meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori-pori, yang berperan penting dalam meningkatkan daya adsorpsi terhadap gas pencemar dalam biogas (Basri dkk., 2023). Selain itu, penggunaan arang sekam padi yang diaktivasi dengan H_3PO_4 telah diuji dalam penelitian lain dan terbukti efektif dalam menyerap gas CO_2 dalam biogas (Pangesti dkk., 2022).

2.5 Aktivasi Arang Sekam Padi dengan H_3PO_4

Aktivasi arang sekam padi dengan H_3PO_4 adalah metode yang digunakan untuk menghasilkan karbon aktif dengan karakteristik yang ditingkatkan (Dwityaningsih dkk., 2023). Proses ini melibatkan perlakuan karbon dengan H_3PO_4 selama periode waktu tertentu, seringkali disertai proses homogenisasi untuk memastikan pencampuran yang baik. Menurut Dwityaningsih dkk. (2023)

aktivasi ini bertujuan untuk pembukaan pori-pori baru dan pengembangan pori-pori yang sudah ada pada karbon, sehingga terjadi peningkatan luas permukaan atau porositas.

Penggunaan H_3PO_4 sebagai aktivator memiliki beberapa keunggulan. Yaitu lebih ramah lingkungan, memerlukan energi yang lebih rendah dalam proses aktivasi, dan lebih ekonomis dibandingkan aktivator lainnya (Riyanto dkk., 2021). Selain itu, menurut Pangesti dkk. (2022) karbon aktif yang dihasilkan dari aktivasi H_3PO_4 efektif dalam menyerap CO_2 , yang relevan dalam aplikasi seperti pemurnian biogas.

Aktivasi merupakan proses krusial dalam pembuatan arang aktif karena bertujuan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Ganing (2022) menyatakan bahwa arang aktif merupakan senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan melakukan proses karbonasi dan aktivasi. Proses aktivasi ini melibatkan penggunaan aktivator, seperti NaOH atau H_3PO_4 , yang berperan dalam membentuk dan mengembangkan pori-pori pada arang, sehingga memperluas permukaan dan meningkatkan kapasitas adsorpsi.

Variasi konsentrasi aktivator dapat menghasilkan arang aktif dengan kapasitas adsorpsi yang berbeda. Dwityaningsih dkk. (2023) juga menyatakan bahwa variasi konsentrasi H_3PO_4 mempengaruhi kapasitas adsorpsi karbon aktif dari sekam padi, dengan konsentrasi 8M memberikan kapasitas adsorpsi tertinggi untuk CO_2 .

2.6 Mekanisme Adsorpsi CO_2 Arang Sekam Padi Aktivasi H_3PO_4

Proses adsorpsi CO_2 pada arang melibatkan dua mekanisme utama yaitu fisika dan kimia. Secara fisika, CO_2 terikat melalui gaya van der Waals, di mana molekul CO_2 yang non-polar berinteraksi dengan permukaan berpori arang yang kaya akan area spesifik tinggi, seperti pada arang tempurung kelapa atau arang kayu jati, yang memiliki struktur berlapis dan rongga mikropori (Samlawi & Sajali, 2021). Secara kimia, CO_2 dapat teradsorpsi melalui proses kimiawi, yaitu ketika terjadi pembentukan ikatan kovalen atau ionik antara molekul CO_2 dengan

gugus fungsional tertentu yang terdapat pada permukaan arang (Samlawi & Sajali, 2021).

Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh densitas arang, di mana arang dengan densitas tinggi (contoh: arang Amerika, $0,817 \text{ gr/cm}^3$) menunjukkan kemampuan adsorpsi lebih besar karena pori-pori yang lebih berkembang dan stabilitas struktur yang mendukung retensi CO_2 (Samlawi & Sajali, 2021). Kombinasi kedua mekanisme ini menjadikan arang sebagai media pemurnian biogas yang efisien untuk mengurangi kadar CO_2 .

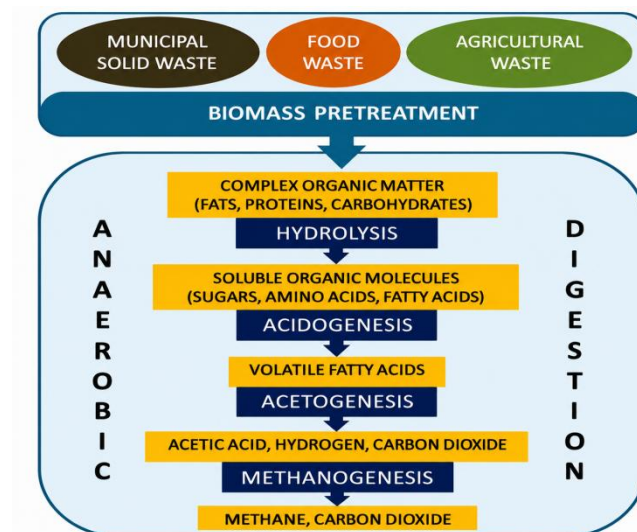
Selain sifat intrinsik arang, efisiensi proses adsorpsi CO_2 juga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi yang kompleks dan saling terkait. Dalam adsorpsi gas, suhu dan tekanan merupakan dua faktor utama. Suhu mempengaruhi energi kinetik molekul gas serta kekuatan interaksinya dengan permukaan adsorben (Nurisman dkk., 2018), sedangkan tekanan berpengaruh terhadap konsentrasi gas yang tersedia untuk diadsorpsi (Mutiar & Mindaryani, 2019). Waktu kontak antara gas dan permukaan adsorben juga menentukan durasi interaksi yang terjadi, di mana waktu yang lebih lama memungkinkan terjadinya akumulasi molekul CO_2 yang lebih besar pada permukaan arang (Ramadhan dkk., 2024). Selain itu, karakteristik fisik arang seperti luas permukaan dan distribusi pori memainkan peran penting, karena semakin luas permukaan arang, semakin banyak pula situs aktif yang tersedia untuk menjerap CO_2 (Dwityaningsih dkk., 2023).

Dalam aplikasi karbon aktif dari sekam padi, konsentrasi aktivator seperti H_3PO_4 terbukti sangat mempengaruhi sifat fisikokimia adsorben. Konsentrasi yang tepat dapat menghasilkan arang dengan struktur pori dan luas permukaan yang optimal, sehingga meningkatkan daya serap terhadap gas CO_2 (Dwityaningsih dkk., 2023). Oleh karena itu, optimasi parameter seperti suhu, tekanan, waktu kontak, serta karakteristik adsorben termasuk luas permukaan dan dosis aktivator merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi. Optimalisasi ini tidak hanya meningkatkan kinerja sistem pemurnian gas, tetapi juga menjadikan arang sekam padi hasil aktivasi H_3PO_4 sebagai solusi yang ekonomis dan berkelanjutan untuk penerapan pemurnian biogas.

2.7 Prinsip Kerja Biodigester dalam Menghasilkan Biogas

Biodigester merupakan reaktor anaerobik yang berfungsi sebagai tempat dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi tanpa oksigen. Dalam sistem ini, bahan organik seperti kotoran ternak dan limbah pertanian difermentasi oleh bakteri anaerob untuk menghasilkan gas metana yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif (Fattah & Kahfi, 2017).

Dalam proses produksi biogas, biodigester menjadi tempat utama di mana bahan organik seperti limbah ternak dan limbah pertanian mengalami fermentasi tanpa oksigen, proses ini berlangsung dalam 4 tahap, yaitu hidrolisis, asidogenesis, asetogenesis, dan metanogenesis. Tahapan-tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 2.5 yang menggambarkan alur proses pencernaan anaerobik dari bahan organik menjadi biogas.



Gambar 2. 5 Skema Tahapan Proses Anaerobic Digestion
Sumber: (Kasinath et al., 2021)

Setelah proses fermentasi dimulai, mikroorganisme akan mengalami fase adaptasi sebelum berkembang biak dan menguraikan bahan organik secara efektif (Rezeki dkk., 2021). Selanjutnya, proses asidogenesis menyebabkan terbentuknya asam lemak volatil seperti asam asetat, propionat, dan butirat, yang kemudian diubah menjadi metana dan karbon dioksida dalam tahap asetogenesis dan

metanogenesis (Rezeki dkk., 2021). Keberhasilan tahap ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan, di mana kinerja bakteri metanogen dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti pH, suhu, kandungan nutrisi, dan waktu retensi (Rajagukguk, 2020).

Kandungan metana dalam biogas sangat dipengaruhi oleh bahan baku dan kondisi fermentasi. Berdasarkan penelitian Cahyono dan Ratni, (2023), kombinasi bahan baku berupa limbah sayur dan kotoran sapi dengan rasio 70:30 menghasilkan biogas dengan kandungan metana mencapai 93,78%, serta mampu menghasilkan nyala api biru selama 102,35 detik. Hal ini menunjukkan bahwa rasio C/N yang optimal dapat meningkatkan efisiensi produksi gas metana.

Selain bahan baku, jenis biodigester juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas dan kuantitas biogas. Penelitian oleh Shitophyta dkk. (2022) membandingkan efisiensi antara biodigester tipe kontinyu dan batch. Hasilnya menunjukkan bahwa biodigester kontinyu menghasilkan total volume biogas sebesar 17.520 mL dengan kandungan CH₄ sebesar 51,37%, sedangkan biodigester batch menghasilkan volume biogas sebesar 66.484 mL dengan kandungan CH₄ sebesar 31,37%. Meskipun volume gas dari biodigester batch lebih besar, hanya biodigester kontinyu yang mampu menghasilkan nyala api biru, menandakan pentingnya konsentrasi metana dalam menentukan kualitas energi biogas yang dihasilkan.

Jenis biodigester dan sistem operasional yang diterapkan seperti sirkulasi internal dan pemeliharaan suhu turut menentukan efisiensi proses fermentasi. Biodigester sistem sirkulasi yang dirancang oleh Oktria dkk. (2024) menunjukkan bahwa pengadukan dan distribusi panas yang merata dapat meningkatkan produksi gas dan menjaga kestabilan lingkungan mikroba. Dengan demikian, prinsip kerja biodigester sangat dipengaruhi oleh komposisi bahan baku, rasio C/N, jenis dan kapasitas digester, serta kondisi fermentasi. Pemahaman mengenai faktor-faktor ini penting untuk meningkatkan efisiensi konversi limbah menjadi energi dan menjadikan biogas sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.8 Rasio C/N dalam Produksi Biogas

Rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) merupakan salah satu parameter penting dalam proses produksi biogas karena berpengaruh langsung terhadap aktivitas dan pertumbuhan mikroorganisme anaerob (Nabila dan Hendriyanto, 2021). Karbon berfungsi sebagai sumber energi utama bagi mikroorganisme, sedangkan nitrogen diperlukan untuk sintesis protein dan pembentukan sel (Aditya dan Jelita, 2025). Keseimbangan antara kedua unsur ini sangat menentukan keberhasilan proses fermentasi anaerob dalam menghasilkan biogas.

Nilai rasio C/N yang terlalu tinggi menunjukkan bahwa kandungan karbon dalam substrat lebih dominan dibandingkan nitrogen, sehingga mikroorganisme akan kekurangan nitrogen untuk pertumbuhannya. Kondisi ini dapat menyebabkan proses dekomposisi berlangsung lebih lambat dan produksi biogas menjadi kurang optimal. Sebaliknya, rasio C/N yang terlalu rendah mengindikasikan kelebihan nitrogen, yang berpotensi menghasilkan akumulasi amonia (NH_3). Konsentrasi amonia yang tinggi dapat bersifat toksik bagi mikroorganisme metanogen dan menghambat proses pembentukan gas metana (CH_4).

Secara umum, rasio C/N optimum untuk proses produksi biogas berada pada kisaran 20–30 (Abinata R dkk., 2025). Pada rentang ini, keseimbangan nutrisi bagi mikroorganisme anaerob dapat tercapai sehingga proses fermentasi berlangsung secara stabil dan efisien (Aditya dan Jelita, 2025). Oleh karena itu, pengaturan komposisi bahan baku menjadi hal yang penting untuk memperoleh rasio C/N yang sesuai.

Dalam praktiknya, bahan organik yang digunakan sebagai substrat biogas memiliki karakteristik rasio C/N yang berbeda-beda. Kotoran hewan, seperti kotoran kambing, umumnya memiliki karakteristik rasio C/N tersendiri, sedangkan bahan tambahan berbasis biomassa pertanian tinggi karbon seperti sekam padi dapat mempengaruhi keseimbangan rasio tersebut tergantung pada komposisinya (Aditya dan Jelita, 2025). Oleh karena itu, pencampuran beberapa jenis bahan sering dilakukan untuk mendapatkan rasio C/N yang mendekati kondisi optimum (Nabila dan Hendriyanto, 2021).

Selain berpengaruh terhadap kuantitas biogas yang dihasilkan, rasio C/N juga secara tidak langsung mempengaruhi kualitas biogas. Kondisi fermentasi yang optimal akan mendukung aktivitas mikroorganisme metanogen dalam menghasilkan gas metana secara maksimal, sehingga kandungan gas lain seperti karbon dioksida (CO_2) dapat diminimalkan. Dengan demikian, pengendalian rasio C/N menjadi salah satu factor penting dalam mendukung peningkatan kualitas biogas (Nabila dan Hendriyanto, 2021).

Dalam penelitian ini, rasio C/N digunakan sebagai parameter awal untuk memastikan bahwa kondisi substrat berada dalam rentang optimal sebelum proses fermentasi berlangsung. Hal ini penting agar pengaruh perlakuan utama, yaitu penambahan arang sekam padi teraktivasi, dapat diamati secara lebih objektif tanpa dipengaruhi oleh ketidakseimbangan nutrisi substrat.

2.9 Penelitian Terdahulu

Untuk mendukung terlaksananya penelitian ini, kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu perlu dilakukan untuk mengetahui keterkaitan dengan topik, metode, maupun bahan yang digunakan. Penelitian-penelitian terdahulu ini memberikan gambaran mengenai efektivitas berbagai jenis adsorben, terutama yang berbasis biomassa seperti sekam padi, dalam menurunkan kandungan karbon dioksida (CO_2) pada biogas. Selain itu, sejumlah penelitian juga menelusuri pengaruh proses aktivasi kimia, termasuk penggunaan asam fosfat (H_3PO_4), terhadap karakteristik dan kinerja karbon aktif dalam aplikasi adsorpsi.

Tabel berikut merangkum beberapa penelitian yang relevan, baik secara langsung terhadap penyerapan CO_2 dari biogas menggunakan arang sekam padi, maupun secara tidak langsung sebagai referensi pembandingan metode aktivasi dan efektivitas berbagai jenis adsorben lainnya. Setiap penelitian dijelaskan berdasarkan metode dan hasil utama yang diperoleh.

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil
Efektivitas Karbon Aktif dari Sekam Padi dengan Aktivator H_3PO_4 sebagai Media Filter Penjerapan CO_2 dari Biogas. (Pangesti et al., 2022)	Penelitian eksperimen dengan pembuatan karbon aktif sekam padi melalui karbonisasi $300^\circ C$ dan aktivasi H_3PO_4 5% dan 10%. Karbon aktif ukuran 30 dan 100 mesh diaplikasikan sebagai media filter pemurnian biogas, kemudian diuji karakteristiknya berdasarkan SNI 06-3730-1995 serta efektivitas penjerapan CO_2 .	Karbon aktif dari sekam padi hasil aktivasi menunjukkan kadar udara rendah (1–2%), kadar abu tinggi (30–43%), dan daya serap iodin yang sangat tinggi mencapai 1250 mg/g. Aplikasi karbon aktif tersebut dalam sistem penyaringan biogas berhasil menurunkan kadar CO_2 secara signifikan, dengan efektivitas penurunan terbaik yang diperoleh pada ukuran partikel 100 mesh dan konsentrasi H_3PO_4 10%, menunjukkan bahwa aktivasi kimia menggunakan H_3PO_4 secara langsung meningkatkan kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap CO_2 dalam biogas.
Pengaruh Konsentrasi H_3PO_4 terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Sekam Padi (Dwityaningsih dkk., 2023)	Penelitian eksperimen dengan variasi konsentrasi H_3PO_4 4M, 6M, dan 8M pada karbon aktif sekam padi. Karbon aktif dikarakterisasi berdasarkan SNI 06-3730-1995 melalui pengujian kadar air, kadar abu, daya serap iodin, daya adsorpsi metilen biru, dan FTIR.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktivasi dengan konsentrasi H_3PO_4 8M memiliki kinerja terbaik dengan daya serap 22,42 mg/g dan efisiensi adsorpsi sebesar 89,68%. Karakteristik morfologi pori juga menunjukkan bahwa konsentrasi 8M menghasilkan struktur karbon dengan luas permukaan yang lebih besar dan aktif, sehingga dapat meningkatkan kapasitas penjerapan gas.

Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil
Pengurangan Kandungan CO ₂ dan H ₂ S dalam Biogas Menggunakan Karbon Aktif Sekam Padi (Basri dkk., 2023)	Penelitian eksperimen pemurnian biogas menggunakan karbon aktif sekam padi yang diaktivasi pada suhu 200°C, 400°C, dan 600°C. Karbon aktif digunakan sebagai adsorben biogas dan dianalisis menggunakan Biogas Analyzer, SEM-EDX, FTIR, dan PSA.	Arang sekam padi yang diaktivasi pada suhu 600°C menunjukkan kemampuan terbaik dalam menyerap gas pengotor, dengan penurunan kadar CO ₂ dari 30% menjadi 9,8% dan peningkatan kadar CH ₄ dari 60% menjadi 90,2%. Selain itu, kandungan H ₂ S juga menurun secara signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa karbon aktif dari sekam padi memiliki efektivitas tinggi dalam meningkatkan mutu biogas ketika diproses dengan suhu aktivasi tinggi.