

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Karbon dioksida (CO_2) dan metana (CH_4) merupakan gas rumah kaca utama penyebab pemanasan global, di mana emisi CO_2 terutama dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil (Jawaharraj dkk, 2020). Oleh karena itu, penyerapan dan penyimpanan karbon dioksida (CO_2) dapat mengurangi emisi CO_2 ke atmosfer, sekaligus memungkinkan CO_2 tersimpan dimanfaatkan untuk berbagai keperluan (Parinyakit dan Worathanakul, 2021). Peningkatan kemurnian CH_4 yang dihasilkan dari gas alam, fermentasi bahan organik, melalui penghilangan gas pengotor seperti CO_2 , O_2 , N_2 , H_2S , dan H_2O merupakan hal yang penting. CH_4 penting bagi berbagai industri seperti pengolahan pangan, kilang minyak, dan juga digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan produk seperti kain, dan pupuk (Qin dan Wang, 2018). Pemisahan dan peningkatan kemurnian CO_2 serta CH_4 dapat dilakukan secara efektif menggunakan metode *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dan *Temperature Swing Adsorption* (TSA).

Pemisahan gas CO_2 dan CH_4 dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti distilasi, ekstraksi, pemisahan membran, dan adsorpsi (Yousef dkk, 2018). Industri kimia terus mengembangkan proses inovatif yang lebih berkelanjutan dengan penggunaan energi dan material yang lebih efisien, karena proses pemisahan menyumbang sekitar 40 - 60% dari total biaya operasional industri (Parinyakit dan Worathanakul, 2021). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode pemisahan yang lebih hemat energi dan biaya, salah satunya melalui teknologi adsorpsi gas menggunakan adsorben yang efektif. Proses adsorpsi campuran CO_2 dan CH_4 dalam sistem vial tertutup dengan adsorben berpori dengan luas permukaan besar perlu diperhatikan untuk mencapai pemisahan gas yang optimal. Karakteristik adsorben memengaruhi aplikasinya dan dipengaruhi oleh metode preparasi material, sedangkan adsorben yang umum digunakan untuk pemurnian CO_2/CH_4 meliputi karbon aktif, alumina, silika gel, dan zeolit (Liang

dkk, 2021). Penelitian ini memilih zeolit sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang cukup tinggi.

Zeolit merupakan material aluminosilikat kristalin bermikropori yang tersusun dari unit tetrahedral silika (SiO_4) dan alumina (AlO_4) yang saling terhubung membentuk kerangka tiga dimensi berongga dengan sistem pori yang teratur. Di antara berbagai jenis zeolit, zeolit A-4 merupakan zeolit sintetis tipe LTA yang banyak dikaji untuk pemisahan CO_2/CH_4 karena memiliki apertur pori sebesar 4 \AA yang mendekati diameter kinetik CH_4 sebesar $3,80 \text{ \AA}$, sementara CO_2 dengan diameter kinetik $3,30 \text{ \AA}$ dapat berdifusi secara bebas ke dalam pori material tersebut (Boer dkk, 2023). Ukuran pori zeolit berperan penting dalam mekanisme adsorpsi melalui dua mekanisme yang bekerja bersamaan. Pertama, CO_2 yang memiliki diameter kinetik lebih kecil mampu berdifusi lebih cepat melalui pori sempit zeolit dibandingkan CH_4 yang berukuran lebih besar, sehingga memungkinkan pemisahan berbasis perbedaan ukuran molekul atau *molecular sieving*. Kedua, pada tekanan dan temperatur yang sama, kapasitas adsorpsi CO_2 umumnya lebih tinggi karena CO_2 memiliki momen kuadrupol, polarisabilitas, dan temperatur kritis yang lebih besar dibandingkan CH_4 , sehingga interaksinya dengan permukaan zeolit jauh lebih kuat (Parinyakit dan Worathanakul, 2021). Kombinasi kedua mekanisme ini menjadikan zeolit sebagai material yang memiliki selektivitas tinggi terhadap CO_2 dalam proses pemisahan campuran gas. Selain itu, zeolit lebih sesuai untuk aplikasi pemisahan CO_2 karena interaksi yang kuat antara CO_2 dan permukaan zeolit memungkinkan pencapaian kapasitas adsorpsi optimum tanpa memerlukan tekanan operasi tinggi (Boer dkk, 2023).

Meskipun zeolit menunjukkan potensi pemisahan CO_2/CH_4 yang baik, zeolit konvensional masih memiliki keterbatasan dalam aplikasi praktis. Pada zeolit berpori sangat kecil yang mengandalkan mekanisme *molecular sieving*, ukuran pori yang sempit membuat difusivitas CO_2 menjadi sangat rendah sehingga proses penyerapan berlangsung lambat dan kurang sesuai untuk operasi skala industri (Boer dkk, 2023). Selain itu, keberadaan uap air dalam sistem gas nyata seperti biogas menurunkan kapasitas adsorpsi CO_2 akibat afinitas zeolit yang lebih tinggi terhadap molekul air dibandingkan CO_2 (Zagho dkk, 2021). Keterbatasan ini

mendorong pengembangan berbagai metode modifikasi zeolit untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂ dan selektivitas CO₂/CH₄.

Low Pressure Cold Plasma (LPCP) merupakan teknik modifikasi permukaan yang memanfaatkan spesies reaktif dalam gas terionisasi, termasuk ion berenergi tinggi, elektron, dan radikal bebas, untuk mengubah sifat fisikokimia permukaan material secara efektif (Thibodeaux dkk, 2021). Selama perlakuan plasma, spesies reaktif berinteraksi dengan permukaan material melalui transfer energi sehingga mengubah komposisi permukaan dan membentuk gugus fungsi baru. Perlakuan plasma dilaporkan mampu meningkatkan luas permukaan spesifik serta volume pori melalui mekanisme pengikisan fisik (Ejtemaei dkk, 2022). Hal ini didukung oleh Hanna dan Fisher (2020) yang menyatakan bahwa plasma non termal dapat melakukan pengikisan pada substrat berpori melalui proses tanpa larutan pada suhu rendah, sehingga perubahan struktural dapat dicapai tanpa risiko kerusakan kerangka material. Peningkatan luas permukaan tersebut dapat mendorong peningkatan kapasitas adsorpsi adsorben terhadap polutan (Satyam dan Patra, 2024). Lebih lanjut, Wijaya dkk, (2025) menyatakan bahwa biochar yang diberikan perlakuan *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) dengan daya 15 watt menyerap kontaminan boron sampai 13% lebih banyak daripada yang tidak diberi perlakuan. Selain itu dibandingkan metode aktivasi kimia konvensional yang mampu menghasilkan luas permukaan dan porositas lebih tinggi namun memerlukan biaya besar dan menghasilkan limbah kimia yang berpotensi menimbulkan pencemaran sekunder, modifikasi plasma menawarkan waktu proses lebih singkat, skalabilitas lebih baik, dan minim dampak lingkungan sehingga dinilai sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan dan praktis (Senadheera dkk, 2025). Namun, secara ilmiah pengaruh perlakuan *Low Pressure Cold Plasma* terhadap karakteristik adsorpsi zeolit A-4 masih belum dipahami secara komprehensif, khususnya terkait hubungan antara variasi waktu paparan plasma dengan adsorpsi CO₂, CH₄, dan selektivitas CO₂/CH₄.

Karakteristik fisik zeolit, seperti luas permukaan spesifik, volume pori, dan diameter pori, diketahui berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi serta difusi gas CO₂ dan CH₄ pada proses pemisahan gas. Oleh karena itu, modifikasi permukaan

zeolit menjadi salah satu pendekatan yang penting untuk meningkatkan performa adsorben. Kajian mengenai pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) terhadap adsorpsi CO₂ dan CH₄ serta selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄ pada zeolit A-4 masih relatif terbatas. Padahal, perlakuan plasma berpotensi meningkatkan luas permukaan, struktur pori, dan situs aktif adsorben yang berperan dalam peningkatan selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄. Selain itu, durasi perlakuan plasma menjadi parameter penting karena paparan plasma yang terlalu singkat mungkin belum mampu menghasilkan modifikasi permukaan yang optimal, sedangkan paparan yang terlalu lama berpotensi menyebabkan perubahan struktur permukaan secara berlebihan yang dapat menurunkan efektivitas adsorpsi. Beberapa penelitian melaporkan bahwa paparan plasma berkepanjangan dapat mengurangi situs aktif adsorben akibat oksidasi berlebih serta mengubah efisiensi interaksi permukaan material terhadap adsorbat. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi waktu paparan LPCP terhadap kapasitas adsorpsi CO₂ dan CH₄ serta selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄ pada zeolit A-4 sebagai upaya pengembangan adsorben yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk aplikasi pemisahan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan latar belakang yang ada, berikut merupakan rumusan masalah dari penelitian ini :

1. Bagaimana pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap adsorpsi CO₂ pada Zeolit A-4 termodifikasi?
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap adsorpsi CH₄ pada Zeolit A-4 termodifikasi?
3. Bagaimana pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄ pada Zeolit A-4 termodifikasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk sebagai berikut :

1. Menentukan pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap adsorpsi CO₂ pada Zeolit A-4 termodifikasi.
2. Menentukan pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap adsorpsi CH₄ pada Zeolit A-4 termodifikasi
3. Menentukan pengaruh variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* (10, 15, dan 20 menit) terhadap selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄ pada Zeolit A-4 termodifikasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan pengetahuan mengenai pengaruh modifikasi zeolit dengan Low Pressure Cold Plasma (LPCP) terhadap adsorpsi dan selektivitas CO₂/CH₄ serta menjadi referensi pengembangan adsorben berbasis zeolit.
2. Manfaat Praktis. Hasil penelitian memberikan informasi mengenai waktu optimum paparan Low Pressure Cold Plasma (LPCP) pada Zeolit A-4 untuk meningkatkan selektivitas pemisahan CO₂/CH₄ dengan metode modifikasi yang lebih ramah lingkungan.
3. Manfaat bagi Sektor Energi Terbarukan. Peningkatan selektivitas zeolit dalam pemisahan CO₂/CH₄ mendukung pengembangan teknologi pemisahan gas yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk pengurangan emisi CO₂ dan transisi energi bersih.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan tidak meluas, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Adsorben yang digunakan adalah Zeolit A-4 sintetis komersial yang dimodifikasi menggunakan instrumen *Low Pressure Cold Plasma* Sakigake YHS-R (Japan).
2. Variasi waktu paparan *Low Pressure Cold Plasma* yang digunakan adalah 10, 15, dan 20 menit. Variabel lain dalam proses plasma seperti dijaga konstan (15 watt).
3. Data yang dianalisis meliputi adsorpsi CO₂, adsorpsi CH₄, dan selektivitas adsorpsi CO₂/CH₄. Karakterisasi fisik dan kimia permukaan adsorben tidak termasuk dalam lingkup penelitian ini.