

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Aktivitas industri dan konsumsi energi berbasis bahan bakar fosil secara global telah mendorong peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) yang signifikan. Berdasarkan data EDGAR (2024), total emisi GRK global mencapai 53,2 Gt CO₂eq pada tahun 2024, meningkat 1,3% dibandingkan tahun sebelumnya. Dua kontributor utama pemanasan global adalah Karbon Dioksida (CO₂) yang menyumbang 74,5% dari total emisi global, serta Metana (CH₄) yang berkontribusi sebesar 17,9% (EDGAR, 2024). Peningkatan konsentrasi GRK tersebut telah menyebabkan kenaikan suhu rata-rata permukaan bumi sekitar 1 derajat Celsius sejak era pra-industri, dengan laju peningkatan lebih dari 0,2 °C per dekade (NASA, 2024). Kondisi ini mendorong urgensi transisi energi dari ketergantungan pada bahan bakar fosil menuju sumber energi terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah biogas.

Biogas merupakan produk terproses melalui penguraian bahan organik secara anaerobik yang dihasilkan gas campuran. Gas tersebut didominasi oleh metana (CH₄) dengan proporsi antara 50 hingga 70%, disertai karbon dioksida (CO₂) berkisar 30–40%, serta sejumlah kecil gas pengotor seperti hidrogen sulfida (H₂S) dan uap air (Mignogna et al., 2023). Sebagai sumber energi terbarukan, nilai kalor biogas sangat ditentukan oleh kemurnian kadar metana di dalamnya. Keberadaan CO₂ yang tinggi dalam biogas mentah secara langsung menurunkan nilai kalor dan mengganggu efisiensi pembakaran, sementara kandungan hidrogen sulfida (H₂S) dalam biogas mentah berpotensi merusak material logam pada peralatan dan sistem perpipaan, sehingga proses pemurnian menjadi langkah yang tidak dapat diabaikan sebelum pemanfaatan biogas secara langsung (Widhiyanuriyawan et al., 2015). Dengan demikian, tantangan terbesar dalam pemanfaatan biogas secara optimal adalah bagaimana memisahkan CO₂ dari CH₄ secara efisien, sehingga diperoleh biometan dengan kemurnian dan nilai kalor yang cukup tinggi.

Ragam teknologi telah dikembangkan untuk pemurnian biogas, antara lain *water scrubbing*, *chemical scrubbing* menggunakan larutan amina, *membrane separation*, serta adsorpsi menggunakan adsorben padat. Di antara metode-metode tersebut, di antara berbagai pendekatan pemurnian biogas, metode adsorpsi berbasis *Pressure*

Swing Adsorption (PSA) menonjol sebagai pilihan yang lebih efisien karena kebutuhan energinya yang minimal, kemudahan dalam pengoperasian, serta tidak menghasilkan produk samping berupa limbah cair yang berbahaya bagi lingkungan dan tidak menghasilkan limbah cair berbahaya (Paz et al., 2024);(Karimi et al., 2023). Salah satu adsorben padat yang banyak digunakan dalam aplikasi PSA untuk pemisahan CO_2/CH_4 adalah zeolit A-4, yang dikenal karena kestabilan strukturalnya, kinetika adsorpsi yang cepat, dan kemampuan regenerabilitas yang baik (Tsiotsias et al., 2023). Namun, Zeolit A-4 komersial dalam kondisi aslinya masih memiliki keterbatasan. Salah satu kekurangannya adalah pori-porinya seringkali tertutup oleh kation-kation logam bawaan seperti Na^+ , K^+ , dan Ca^{2+} serta sisa material pengotor sintesis, yang mengurangi luas permukaan aktif dan selektivitas adsorpsinya terhadap CO_2 .

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, modifikasi struktur zeolit melalui aktivasi kimia menggunakan asam klorida (HCl) menjadi solusi yang menjanjikan. Ketika zeolit direndam dalam larutan HCl, dua proses kimia berlangsung secara bersamaan. Pertama, ion H^+ dalam larutan menggantikan kation logam yang menempati rongga zeolit, yakni proses yang dikenal sebagai dekationisasi. Peristiwa ini memberikan pengaruh pada situs aktif sehingga menjadi lebih mudah diakses. Kedua, atom aluminium (Al^{3+}) terlepas dari kerangka kristal melalui proses dealuminasi, yang berdampak pada peningkatan rasio Si/Al sekaligus memperbesar volume mikropori zeolit (Akbelen & Özbay, 2022a);(Adriano et al., 2022). Kedua proses ini secara sinergis memperbesar luas permukaan spesifik dan kapasitas adsorpsi zeolit. Lebih jauh, peningkatan mikroporositas hasil aktivasi HCl secara tidak langsung akan meningkatkan nilai selektivitas zeolit terhadap CO_2 , mengingat molekul CO_2 memiliki momen kuadrupol dan polarizabilitas yang lebih besar sehingga berinteraksi lebih kuat dengan situs polar pada permukaan zeolit dibandingkan dengan molekul CH_4 yang bersifat nonpolar (Boer et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kuantitatif pengaruh variasi konsentrasi HCl (0,5 M dan 1 M) terhadap kapasitas dan selektivitas adsorpsi Zeolit A-4 dalam memisahkan campuran gas CO_2 dan CH_2 . Kajian sistematis mengenai optimalisasi konsentrasi HCl spesifik pada Zeolit A-4 sintesis komersial untuk aplikasi pemurnian biogas masih sangat terbatas dalam literatur yang ada, sehingga

penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang konkret sekaligus menjadi dasar pengembangan teknologi pemurnian biogas skala industri. Atas dasar pertimbangan tersebut, penelitian ini mengambil judul: “Peningkatan Selektivitas Adsorpsi CO₂/CH₄ pada Zeolit A-4 Teraktivasi HCl.”

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, berikut merupakan rumusan masalah dari penelitian ini:

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi HCl terhadap kapasitas adsorpsi Zeolit A-4 dalam memisahkan gas CO₂?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi HCl terhadap kapasitas adsorpsi Zeolit A-4 dalam memisahkan gas CH₄?
3. Berapa konsentrasi HCl yang paling optimal untuk mencapai selektivitas adsorpsi CO₂ dan CH₄ tertinggi pada Zeolit A-4?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan, berikut merupakan tujuan dari penelitian ini:

1. Menganalisis pengaruh konsentrasi HCl terhadap kapasitas adsorpsi Zeolit A-4 dalam memisahkan gas CO₂.
2. Menganalisis pengaruh konsentrasi HCl terhadap kapasitas adsorpsi Zeolit A-4 dalam memisahkan gas CH₄.
3. Menganalisis pengaruh konsentrasi HCl yang paling optimal untuk mencapai selektivitas tertinggi CO₂ dan CH₄ pada Zeolit A-4.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian tentu memiliki manfaat yang ingin dicapai, di antaranya adalah sebagai berikut ini:

1. Mendukung upaya mitigasi perubahan iklim dan lingkungan.
2. Meningkatkan kapasitas adsorpsi dan kemampuan selektivitas Zeolit A-4 dalam menyerap campuran gas CO₂ dan CH₄, sehingga dapat terwujudnya sistem kerja biogas yang optimal.
3. Dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pemurnian gas skala industri.

1.5. Batasan Masalah

Demi tercapainya tujuan yang diharapkan secara optimal dan terarah, berikut merupakan batasan masalah dari penelitian ini:

1. Penelitian ini menggunakan adsorben Zeolit A-4 komersial yang diaktivasi menggunakan HCl.
2. Penelitian ini menggunakan parameter uji variasi konsentrasi 0,5 M dan 1 M.
3. Analisis data dalam penelitian hanya mencakup performa adsorpsi, yakni kapasitas dan selektivitas CO₂ dan CH₄ tanpa melakukan karakterisasi fisik serta kimia material.

