

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Penelitian

Perubahan iklim merupakan tantangan serius bagi masyarakat global (Filonchyk et al., 2024). Dampak dari perubahan iklim mencakup cuaca ekstrem, peningkatan permukaan air laut, tekanan terhadap ekosistem, ancaman bagi sektor pertanian, badai, masalah kesehatan, migrasi, serta kerugian ekonomi yang semakin meningkat (Filonchyk et al., 2024; Yoro & Daramola, 2020). Salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap perubahan iklim adalah pemanasan global yang dipicu oleh efek rumah kaca. Efek rumah kaca disebabkan oleh keberadaan gas-gas rumah kaca (GRK) yang dapat menyerap dan memancarkan radiasi inframerah termal (Islam et al., 2023). Diantara GRK, CO<sub>2</sub> yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil merupakan gas paling dominan (Letcher, 2021; Nunes, 2023; Shah et al., 2024).

Pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil menjadi penting untuk mengurangi dampak emisi gas rumah kaca (R. Liu et al., 2021). Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai teknologi telah dikembangkan untuk pemisahan CO<sub>2</sub> dari hasil pembakaran bahan bakar fosil. Di antara semua teknologi pemisahan CO<sub>2</sub> yang ada, teknologi *carbon capture and separation* (CCS) memiliki potensi yang sangat besar. Teknologi CCS ini dikategorikan menjadi tiga jenis: pra-pembakaran, pasca-pembakaran, dan penangkapan pembakaran oxy-fuel (Yadav & Mondal, 2022). Lebih matang secara teknologi dan memiliki potensi terbesar dalam pengurangan emisi CO<sub>2</sub> (Gkotsis et al., 2023). Beberapa metode CCS pasca-pembakaran yang tersedia meliputi distilasi kriogenik, adsorpsi, absorpsi, dan pemisahan membran (P. Singh et al., 2022). Di antara metode-metode tersebut, pemisahan membran memiliki potensi terbesar karena biayanya yang lebih rendah, efisiensinya yang tinggi, serta kemudahannya dalam pengoperasian (Juber et al., 2021).

Membran adalah penghalang semipermeabel yang memiliki peran serupa dengan filter, yaitu hanya memungkinkan komponen tertentu untuk melewati (Juber et al., 2021). Berdasarkan materialnya, membran dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu polimer dan anorganik (Karki et al., 2024). Membran anorganik memiliki keunggulan dalam sifat fisikokimia yang unggul, stabilitas yang lebih baik, serta ketahanan terhadap tekanan termal yang tinggi (Barooah et al., 2024) dan tekanan termal yang tinggi (Russo et al., 2021). Namun, penerapan membran anorganik dalam skala besar terbatas karena sifatnya yang rapuh, risiko mudah pecah, dan biaya material yang tinggi (Barooah et al., 2024). Di sisi lain, membran polimer memiliki metode fabrikasi yang lebih sederhana dan biaya yang lebih rendah (Juber et al., 2021). Meskipun memiliki kelebihan, membran polimer menghadapi keterbatasan yang dikenal sebagai batas atas Robeson antara permeabilitas dan selektivitas, yang membatasi penerapannya karena adanya *trade-off* antara kedua karakteristik ini (Imtiaz et al., 2022; Robeson, 2008; Shah Buddin & Ahmad, 2021; Tanvidkar et al., 2022; Winarta et al., 2020).

Untuk mengatasi kelemahan yang terkait dengan membran anorganik dan polimer, *Mixed Matrix Membrane* (MMM) hadir sebagai solusi dengan menggabungkan kelebihan dari kedua jenis membran tersebut (Imtiaz et al., 2022; Shah Buddin & Ahmad, 2021; Tanvidkar et al., 2022). Dalam aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> menggunakan MMM, beberapa jenis polimer yang sering digunakan meliputi PGMA-co-POEM (N. U. Kim et al., 2019), IL-CS (Fernández-Barquín et al., 2017), dan PEI (Jiao et al., 2021). Di antara berbagai material anorganik, Metal Organik Framework (MOF) mendapatkan perhatian luas karena strukturnya yang bervariasi, sifat kristalinnya, porositas yang tinggi, serta *pore size* yang dapat disesuaikan (Shah Buddin & Ahmad, 2021; Tanvidkar et al., 2022). Beberapa jenis MOF yang sering digunakan sebagai pengisi dalam MMM pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> antara lain MIL-53 (Al) (Sasikumar & Arthanareeswaran, 2022), NUS-8 (Fan et al., 2021), dan ZIF-7-NH<sub>2</sub> (Y. Wang et al., 2020).

Namun, sintesis dan evaluasi MMM dengan kombinasi polimer dan MOF yang berbeda memerlukan waktu yang lama dan biaya yang tinggi dalam eksperimen (Alizamir et al., 2023). Untuk mengatasi masalah ini, teknologi *Artificial*

*Intelligence* (AI) mulai diterapkan. Model berbasis AI mampu mempelajari pola dan hubungan kompleks dari berbagai variabel dalam dataset yang besar, sehingga dapat meningkatkan akurasi prediksi dan memungkinkan optimasi sistem membran yang lebih efisien (Alizamir et al., 2023; Niu et al., 2022) serta hemat biaya (Anik et al., 2022; Gulbalkan et al., 2024; Hussin et al., 2023; Oh et al., 2022). Salah satu cabang AI adalah *Machine Learning* (ML). ML merujuk pada jenis program komputer yang dapat "belajar" sendiri tanpa keterlibatan manusia selama proses pembelajaran (Salehi et al., 2022). Terdapat banyak algoritma ML seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), *Fuzzy Logic* (FL), dan *Random Forest* (RF). Di antara semua algoritma tersebut, ANN adalah alat yang sangat kuat untuk pemetaan dan prediksi nonlinier, serta mampu menangkap hubungan kompleks antara variabel input dan output (Abuwatfa et al., 2023).

Model prediktif ANN telah diaplikasikan pada bidang pemisahan gas menggunakan membran. Oliveira et al. (2020) mengembangkan tiga set model empiris berbasis ANN untuk memodelkan perilaku dinamis dari proses *Vacuum Pressure Swing Adsorption* (VPSA) dengan tujuan menyesuaikan rasio H<sub>2</sub>/CO dari campuran syngas. Subraveti et al. (2019) menggunakan ANN yang dikombinasikan dengan algoritma multi-objektif genetik untuk mengurangi waktu komputasi optimasi pada pemisahan CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> menggunakan adsorpsi tekanan berayun. Vo et al. (2020) mengembangkan model proses terintegrasi yang efisien untuk pemulihan hidrogen dan penangkapan CO<sub>2</sub> dari pabrik hidrogen, serta membandingkan kinerja biaya dan akurasi prediksi ANN dengan hasil eksperimen. Hasilnya menunjukkan bahwa prediksi ANN mendekati hasil eksperimen dengan tingkat akurasi yang tinggi. Abdollahi & Ranjbar (2023) juga memodelkan kemampuan pemisahan CO<sub>2</sub> menggunakan membran poly(4-methyl-1-pentane) yang dimodifikasi dengan berbagai nanopartikel menggunakan ANN.

Berdasarkan hal-hal tersebut, peneliti menggunakan *Machine Learning* (ML) dengan algoritma ANN untuk mempelajari pengaruh komposisi dan karakteristik membran terhadap performa MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>. Selanjutnya

model yang telah dibuat digunakan untuk menentukan komposisi dan karakteristik membran yang optimal untuk sintesis MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>.

## 1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana memprediksi performa *Mixed Matrix Membrane* (MMM) menggunakan algoritma *Artificial Neural Network* (ANN) untuk optimasi komposisi membran yang mampu memisahkan gas CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> secara efektif?
2. Bagaimana pengaruh komposisi dan karakteristik membran terhadap performa MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>?
3. Bagaimana komposisi dan karakteristik membran yang optimal untuk sintesis MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana memprediksi performa *Mixed Matrix Membrane* (MMM) menggunakan algoritma *Artificial Neural Network* (ANN) untuk optimasi komposisi membran yang mampu memisahkan gas CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> secara efektif?
2. Mempelajari pengaruh komposisi dan karakteristik membran terhadap performa MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>.
3. Menentukan komposisi dan karakteristik membran yang optimal untuk sintesis MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> menggunakan model *Machine Learning*.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Memberikan pengetahuan tentang komposisi dan karakteristik membran terhadap performa MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>.

2. Memberikan saran komposisi dan karakteristik membran yang optimal untuk sintesis MMM pada aplikasi pemisahan CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>.

### 1.5 Struktur Organisasi Skripsi

Skripsi ini tersusun dari lima bab yaitu Bab I mengenai pendahuluan, Bab II dengan tinjauan pustaka, Bab III mengenai metode penelitian, Bab IV mengenai hasil dan pembahasan temuan penelitian, dan Bab V yang berisi kesimpulan dan saran. Bab I memaparkan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta struktur organisasi skripsi. Bab II berisi dasar teori yang mendasari serta memperkuat hasil yang diperoleh dalam temuan penelitian. Bab III berisi metode penelitian, alat dan bahan, serta prosedur penelitian. Bab IV memaparkan hasil serta pembahasan dari temuan penelitian. Bab V berisi simpulan, tanggapan terhadap masalah yang dibahas dalam penelitian, serta saran untuk penelitian lebih lanjut. Daftar pustaka yang berisi jurnal akademik serta buku-buku yang mendasari penelitian dicantumkan pada bagian akhir skripsi. Pada akhir skripsi, terdapat Lampiran yang berisi data serta temuan lain yang ditemukan selama proses penelitian berlangsung.