

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer terus meningkat, sebagian besar akibat kegiatan industri dan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, dan menjadi salah satu pendorong utama perubahan iklim global. Gas buang (*flue gas*) dari proses pembakaran ini mengandung sekitar 10-15% CO₂ bersama nitrogen, uap air, dan oksigen (Cottrell et al., 2009), sehingga menjadi kontributor emisi yang signifikan. Emisi tersebut tidak hanya memperburuk pemanasan global, tetapi juga memicu korosi peralatan, menurunkan nilai kalor gas, dan mencemari lingkungan (Pudjiastuti et al., 2015).

Untuk mengatasi masalah ini, teknologi penangkapan karbon berbasis *absorpsi* kimia menggunakan pelarut amina banyak dikembangkan untuk menangkap CO₂ dari aliran gas. Borhani et al. (2015) mencatat beberapa jenis pelarut amina yang umum digunakan, antara lain *monoethanolamine* (MEA), *methyldiethanolamine* (MDEA), *diglycolamine* (DGA), *diisopropanolamine* (DIPA), dan *diethanolamine* (DEA), masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan. MEA memiliki laju reaksi tinggi tetapi mudah terdegradasi secara termal dan kimiawi. MDEA lebih stabil dan hemat energi saat regenerasi, tetapi lambat menyerap CO₂. DGA dan DIPA menunjukkan performa tinggi namun harganya lebih mahal dan ketersediaannya terbatas. DEA relatif stabil, reaktivitasnya memadai, biayanya rendah, dan ketersediaannya tinggi (Laribi et al., 2019). Dengan kapasitas penyerapan sekitar 0,4-0,5 mol CO₂/mol pelarut dan

konsumsi energi regenerasi yang moderat, DEA dianggap sebagai kompromi terbaik untuk aplikasi skala industri (Naji & Abd, 2019).

Meski demikian, DEA masih lambat dalam menyerap CO_2 , sehingga sejumlah penelitian menambahkan zat aditif atau promotor untuk mempercepat laju penyerapannya (Davoodi et al., 2023). Borhani et al. (2015) membandingkan beberapa promotor, yaitu MEA, DGA, DIPA, dan MDEA, dalam sistem DEA yang dikombinasikan dengan larutan K_2CO_3 melalui simulasi berbasis laju (*rate-based simulation*), dan mendapati MEA memberi performa terbaik, diikuti DGA dan DIPA yang juga efektif meski lebih mahal, sementara MDEA tidak memberi peningkatan berarti. Pada sistem serupa untuk biogas, Nurkhamidah et al. (2017) mendapati bahwa menaikkan konsentrasi DEA dari 1% ke 5% berat pada kolom isian K_2CO_3 -DEA secara konsisten menaikkan efisiensi penghilangan CO_2 , dengan efisiensi tertinggi 54,53% pada konsentrasi 5%, yang mengindikasikan DEA cukup efektif sebagai promotor karbonat meski efisiensinya masih terbatas. Pada sistem membran serat berongga, kecepatan alir cairan, panjang serat, dan konsentrasi DEA sama-sama menentukan efisiensi dan produktivitas *absorpsi* (Delgado et al., 2009). Hu et al. (2013) menambahkan bahwa efisiensi maksimum tercapai pada konsentrasi DEA 40% berat, meski viskositas larutan yang naik pada konsentrasi tinggi dapat menurunkan koefisien perpindahan massa jika alat kontaknya tidak dirancang untuk mengimbangi hal tersebut.

Pendekatan lain adalah mencampur DEA dengan promotor lain. Piperazine (PZ) terbukti menaikkan laju penyerapan dan kapasitas loading CO_2 hingga 29% dibanding DEA tunggal (Kazemi et al., 2021), mendukung

pendekatan *blended amine* untuk mengatasi keterbatasan efisiensi dan regenerasi DEA. Pada konfigurasi lain, Kartohardjono et al. (2010) mendapati bahwa DEA dalam membran kontak mikro menaikkan fluks CO₂ hingga jutaan kali dibanding pelarut air biasa, menunjukkan potensi besar teknologi membran untuk pengolahan gas CO₂. Karimi dan Valeh-E-Sheyda (2023) mengembangkan pelarut hijau dari campuran DEA (35% berat) dan L-arginin (ARG) sebagai promotor organik, dan mendapati penambahan ARG hingga 12% berat menaikkan efisiensi penyerapan CO₂ hingga 92,93% menggunakan mikro-kontaktor.

Glisin, sebagai asam amino primer yang ramah lingkungan dan tahan suhu tinggi, juga berpotensi sebagai promotor DEA. Pudjiastuti et al. (2015) menunjukkan bahwa glisin menaikkan laju reaksi penyerapan CO₂ secara signifikan tanpa menghasilkan produk degradasi berbahaya. Meski begitu, kombinasi DEA-glisin pada skala industri belum banyak dikaji, dan celah inilah yang mendasari penelitian ini.

Dalam teknologi penangkapan karbon (*carbon capture*), pemilihan kolom kontak gas-cair menentukan efisiensi proses, stabilitas operasi, dan konsumsi energi. Tiga jenis kolom yang umum digunakan adalah *packed column*, *tray column*, dan *hollow fibre membrane*, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan. *Packed column* mengandalkan media pengisi untuk memperluas kontak gas-cair, struktur packing modern seperti Mellapak Plus 452Y terbukti meningkatkan transfer massa CO₂ karena area antarmukanya yang besar (Zhao et al., 2011), dan tekanan jatuhnya relatif rendah sehingga cocok untuk aliran gas besar. Namun distribusi cairan pada kolom berdiameter besar cenderung tidak

merata, menurunkan efisiensi perpindahan massa, dan kolom ini rentan tersumbat oleh fouling dari partikel padat atau cairan kental yang menaikkan tekanan jatuh. Kapasitas hidroliknya pun terbatas dan performanya sangat bergantung pada distribusi cairan yang presisi.

Tray column, sebaliknya, dirancang untuk laju alir gas besar dengan stabilitas operasional tinggi, dan banyak dipakai pada aplikasi industri skala besar seperti *absorpsi* CO₂ dari *flue gas* pembangkit listrik karena mampu menangani variasi beban gas tanpa kehilangan efisiensi berarti (Salem & Reyhani, 2015). Kolom ini juga memudahkan kontrol proses, khususnya pengaturan distribusi cairan dan gas di tiap *tray*, dan pada beberapa kasus menunjukkan selektivitas lebih tinggi untuk reaksi kimia lambat atau pelarut spesifik seperti DEA (Pacheco & Rochelle, 1998). Kekurangannya, *tray column* menghasilkan pressure drop dan konsumsi energi yang lebih tinggi dibanding *packed column*, rentan terhadap foaming dan entrainment pada sistem multikomponen, serta membutuhkan biaya instalasi dan pemeliharaan yang lebih besar karena desainnya lebih kompleks.

Hollow fibre membrane menawarkan area antarmuka gas-cair yang besar dalam volume kecil, sehingga ideal untuk aplikasi skala kecil hingga menengah (deMontigny et al., 2003). Kelemahan utamanya adalah fouling oleh zat organik, partikel, atau mikroorganisme yang menurunkan performa dan memperpendek umur membran; sebagian besar jenis membran juga tidak dapat diregenerasi sehingga biaya penggantianannya tinggi. Membran juga lebih sensitif terhadap feed yang tidak bersih dibanding *packed column* atau *tray*, dan tekanan operasinya terbatas sehingga kurang cocok untuk kondisi ekstrem.

Berdasarkan perbandingan tersebut, *tray column* dinilai paling sesuai untuk *absorpsi* CO₂ dari *flue gas* menggunakan pelarut DEA-glisin, karena pelarut ini memerlukan waktu tinggal (*residence time*) dan kontak fasa yang stabil, sekaligus kontrol operasional yang dibutuhkan pada sistem berskala industri (Moioli & Pellegrini, 2019).

Tantangan utama sistem penangkapan CO₂ di industri adalah konsumsi energi yang tinggi pada tahap regenerasi pelarut serta potensi degradasi pelarut yang merusak peralatan dan menaikkan biaya operasional. Pemodelan dan simulasi proses, misalnya menggunakan MATLAB, memungkinkan pengujian kondisi operasi dan sensitivitas terhadap suhu, tekanan, dan laju alir sebelum diterapkan di lapangan (Otaraku & Esemuze, 2015). Penelitian ini menggunakan pendekatan *rate-based model* untuk merepresentasikan perpindahan massa dan reaksi simultan dalam sistem gas-cair, pendekatan yang belum pernah diterapkan pada sistem DEA-glisin skala industri.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini mengkaji pemodelan dan simulasi sistem CO₂ *removal* skala industri menggunakan pelarut DEA berpromotor glisin, melalui model matematis untuk memprediksi dan mengoptimalkan proses tersebut.

B. Batasan Masalah

Model yang digunakan adalah model berbasis tingkat dengan beberapa asumsi:

1. Proses *reactive absorpsi* CO₂ diasumsikan berlangsung dalam kondisi tunak (*steady state*), tanpa mempertimbangkan perubahan terhadap waktu.

2. Kolom *desorber* diasumsikan berada dalam kondisi adiabatik, sehingga tidak terjadi pertukaran panas antara sistem dan lingkungan sekitar.
3. Luas permukaan antarmuka antara gas dan cairan dianggap sama untuk proses perpindahan massa dan panas.
4. Reaksi kimia antara CO₂ dan DEA dianggap sebagai reaksi cepat (*fast reaction*) dan mengikuti orde semu satu (*pseudo first-order reaction*).
5. Hambatan perpindahan panas dalam fase cair lebih kecil dibandingkan dengan hambatan pada fase gas, sehingga resistansi termal di fase cair dapat diabaikan.
6. Suhu permukaan antarmuka diasumsikan sama dengan suhu fase *bulk*, baik untuk fase cair maupun gas.
7. Fase cair dan fase gas berada dalam kondisi pencampuran ideal (*ideal mixing*), kecuali aliran gas yang diasumsikan mengikuti pola *plug flow*.
8. Produk reaksi antara CO₂ dan DEA bersifat non-volatil, sehingga tidak ikut terbawa dalam fase gas selama proses *desorpsi*.
9. Cairan dalam tray diasumsikan teraduk sempurna sebagai akibat dari pembentukan gelembung gas selama proses berlangsung.
10. Gas asam yang terdapat dalam larutan amina kaya (*rich amine*) hanya berupa CO₂, tanpa mengandung senyawa lain seperti H₂S.
11. Software yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan MATLAB R2023a.

C. Rumusan Masalah

1. Bagaimana model matematika pada proses *Absorpsi – Desorpsi* CO₂ dengan larutan DEA berpromor Glisin unit CO₂ *removal* skala industri?

2. Bagaimana hasil validasi model matematika software MATLAB dengan hasil industri?
3. Bagaimana pengaruh parameter proses seperti suhu, tekanan, laju alir, konsentrasi larutan DEA dan promotor Glisin terhadap % *Removal* CO₂ pada kolom *absorber* dan *desorber*?

D. Tujuan Penelitian

1. Menyusun model matematika pada proses absorpsi – desorpsi CO₂ *removal* dengan larutan DEA (Diethanolamina) bepromotor Glisin di dalam bubble cap *tray column* menggunakan software MATLAB. Mengestimasi kinerja unit CO₂ *removal* yang dinyatakan dengan % *removal* CO₂ dalam *absorber* dan komposisi gas yang keluar dari *absorber* dan stripper.
2. Melakukan validasi model matematis dengan membandingkan hasil prediksi dengan menggunakan data industry.
3. Mempelajari pengaruh beberapa parameter pada proses seperti laju alir dan suhu lean solution, tekanan kolom *absorber*, dan konsentrasi promotor Glisin terhadap efisiensi kolom *absorber* dan *desorber* pada % *removal* CO₂.

E. Kegunaan Penelitian

1. Kegunaan Teoritis (Akademis)

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik kimia, khususnya dalam pemodelan dan simulasi proses penyerapan dan *desorpsi* gas asam (CO₂) menggunakan pelarut amina. Hasil penelitian ini memperkaya literatur akademik terkait:

- a. Pemahaman mekanisme reaksi antara CO₂ dan larutan DEA berpromotor glisin dalam kondisi operasi industri.
- b. Pengembangan model matematis dan simulasi proses *desorpsi* CO₂ dalam kolom adiabatik dengan pendekatan reaksi orde semu satu.
- c. Validasi pendekatan pemodelan berbasis asumsi kinetika reaksi cepat dan perpindahan massa-panas secara simultan dalam sistem gas-cair.
- d. Penyediaan dasar teoritis bagi pengembangan model prediktif yang dapat diterapkan dalam desain dan optimasi unit *absorpsi-desorpsi* di masa depan.

2. Kegunaan Praktis (Terapan)

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh berbagai pihak yang terlibat dalam pengembangan dan pengoperasian sistem penyerapan CO₂ di industri, antara lain:

- a. Industri minyak, gas, dan petrokimia dapat menggunakan hasil penelitian ini untuk mengoptimalkan proses pemisahan CO₂ guna menekan emisi gas rumah kaca dan memenuhi standar lingkungan yang berlaku.
- b. Engineer proses dan perancang sistem dapat menjadikan model simulasi sebagai alat bantu dalam desain, modifikasi, serta optimasi unit *absorber* dan *desorber* sebelum diterapkan di lapangan.
- c. Lembaga pendidikan dan penelitian dapat menggunakan hasil penelitian ini sebagai referensi dalam pengajaran, studi lanjut, serta pengembangan teknologi pemisahan gas yang efisien dan berkelanjutan.