

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teoritis

1. Teknologi Penangkapan CO₂

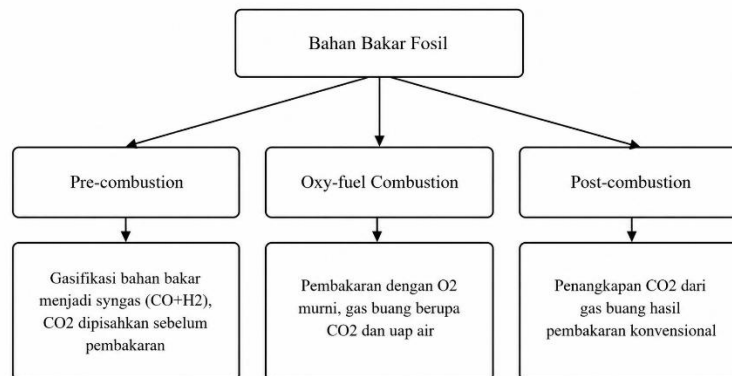
a. Latar Belakang dan Urgensi Penangkapan CO₂

Konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer terus meningkat, dan teknologi penangkapan CO₂ (*carbon capture*) menjadi salah satu pendekatan utama dalam mitigasi perubahan iklim. Gür (2022) mencatat bahwa emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil menyumbang 68% dari total emisi gas rumah kaca global pada tahun 2018, sebuah angka yang berimplikasi langsung pada laju kenaikan suhu global dan gangguan keseimbangan ekosistem.

Lackner *et al.* (2012) menyatakan bahwa pengembangan teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (*carbon capture and storage/CCS*) diperlukan untuk mencapai target pengurangan emisi global, mengingat ketergantungan industri terhadap bahan bakar fosil masih tinggi. Goren *et al.* (2023) menambahkan bahwa lonjakan konsentrasi CO₂ atmosfer sejak revolusi industri telah mempercepat pemanasan global. Penangkapan CO₂ pada sumber emisi besar, seperti pembangkit listrik dan pabrik industri, karena itu menjadi salah satu solusi jangka pendek hingga menengah yang paling banyak dikembangkan saat ini.

b. Klasifikasi Teknologi Penangkapan CO₂

Teknologi penangkapan CO₂ secara umum dibagi menjadi tiga pendekatan utama, yaitu *pre-combustion*, *oxy-fuel combustion*, dan *post-combustion* (Hekmatmehr et al., 2024). Ketiga pendekatan tersebut berbeda dalam prinsip kerja, efisiensi, dan tingkat kesiapan teknologinya, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Klasifikasi Teknologi Penangkapan CO₂

1) *Pre-combustion*. Pada pendekatan ini, bahan bakar fosil terlebih dahulu diubah menjadi gas sintesis (*syngas*) melalui gasifikasi atau reformasi, menghasilkan campuran CO dan H₂. Karbon monoksida kemudian dikonversi menjadi CO₂ melalui reaksi *water-gas shift*, dan CO₂ dipisahkan sebelum proses pembakaran berlangsung. Gür (2022) menyatakan bahwa metode ini menghasilkan CO₂ pada konsentrasi dan tekanan tinggi sehingga pemisahannya lebih efisien, tetapi membutuhkan infrastruktur khusus dan kurang sesuai untuk diterapkan pada sistem yang sudah berjalan (*retrofit*).

2) *Oxy-fuel Combustion*. Pendekatan ini menggunakan oksigen murni, bukan udara, sebagai media pembakaran, sehingga gas buang yang dihasilkan sebagian besar terdiri atas CO₂ dan uap air. CO₂ dapat dimurnikan dengan mudah setelah uap air dikondensasikan. Wilberforce *et al.* (2019) menjelaskan bahwa metode ini menghasilkan CO₂ dengan kemurnian tinggi, meskipun kebutuhan energi tambahan untuk memproduksi oksigen murni menjadi kendala utama penerapannya secara luas.

3) *Post-combustion*. Metode ini menangkap CO₂ dari gas buang hasil pembakaran konvensional dan merupakan pendekatan yang paling banyak diadopsi industri karena kompatibel dengan sistem pembakaran yang sudah ada (Goren et al., 2023). Efisiensinya

relatif lebih rendah dibandingkan dua pendekatan lain, tetapi kemudahan retrofit menjadikannya pilihan yang lebih praktis.

Perbandingan ketiga pendekatan tersebut disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Teknologi Penangkapan CO₂

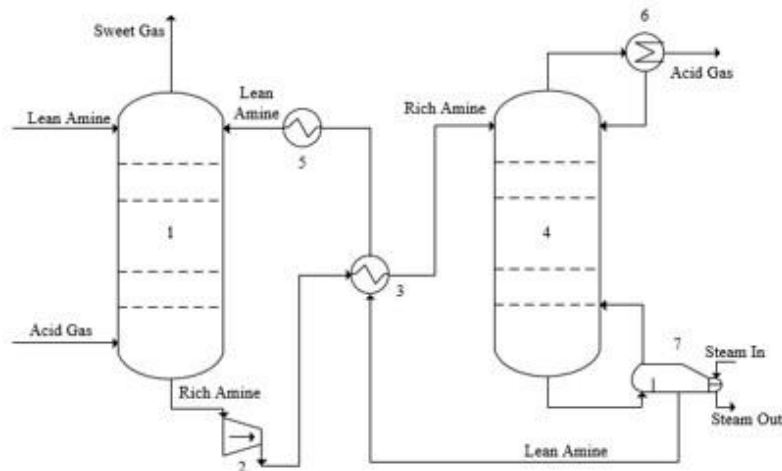
Teknologi Penangkapan	Keunggulan	Keterbatasan
<i>Pre-combustion</i>	Efisiensi tinggi, CO ₂ pada tekanan tinggi	Kompleksitas tinggi, tidak cocok untuk retrofit
<i>Oxy-fuel combustion</i>	Kemurnian CO ₂ tinggi	Konsumsi energi tinggi untuk produksi O ₂
<i>Post-combustion</i>	Mudah diintegrasikan ke sistem eksisting	Efisiensi lebih rendah, konsumsi energi regenerasi pelarut tinggi

c. Fokus pada Teknologi *Post-combustion* dengan *Absorpsi* Kimia

Pendekatan *post-combustion* berbasis *absorpsi* kimia (*chemical absorption*) menjadi yang paling banyak diterapkan pada skala industri karena mudah diskalakan dan sesuai untuk retrofit pada pembangkit listrik maupun pabrik proses. Penelitian ini berfokus pada penggunaan pelarut amina, khususnya *Monoethanolamine* (MEA) dan *diethanolamine* (DEA), serta pengembangan sistem *absorpsi-stripping* yang efisien secara termodinamika.

2. Teori *Absorpsi* dan *Desorpsi* Gas

Penangkapan karbon pada skala industri umumnya memanfaatkan mekanisme *absorpsi* dan *desorpsi* gas dalam kolom *absorber* dan *stripper*, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.2. Pemahaman terhadap dasar ilmiah kedua proses ini penting, terutama dalam konteks penggunaan pelarut dietanolamina (DEA) yang dikombinasikan dengan promotor glisin untuk meningkatkan efisiensi penyerapan CO₂. Bagian ini membahas prinsip-prinsip teoretis yang mendasari fenomena tersebut.



Gambar 2.2 Skema Proses *Absorpsi-Desorpsi* pada Kolom *Absorber-Stripper*

a. Mekanisme *Absorpsi* Kimia dan Fisika

Absorpsi gas dalam cairan berlangsung melalui dua mekanisme, yaitu *absorpsi* fisika dan *absorpsi* kimia. Menurut Knopf dan Ammann (2021), *absorpsi* fisika melibatkan interaksi non-kovalen, seperti gaya van der Waals, antara molekul gas dan pelarut tanpa disertai perubahan kimia. Sebaliknya, *absorpsi* kimia terjadi ketika molekul gas bereaksi secara kimia dengan pelarut dan membentuk senyawa baru yang terikat secara kovalen (Glasscock & Rochelle, 1989).

Pada sistem penangkapan CO₂ berbasis amina seperti DEA, *absorpsi* kimia menjadi mekanisme dominan karena adanya reaksi *reversibel* antara CO₂ dan gugus amino dalam pelarut (Astarita & Savage, 1992). Reaksi ini meningkatkan kapasitas penyerapan sekaligus memungkinkan pelarut diregenerasi melalui proses *desorpsi* di kolom *stripper*.

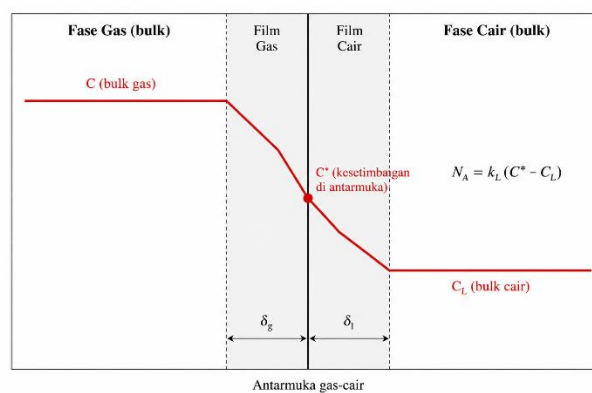
b. Teori Film Ganda (*Two-Film Theory*)

Teori film ganda menjelaskan transfer massa pada antarmuka gas-cair sebagai proses difusi melalui dua lapisan film tipis yang terbentuk pada masing-masing fase, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3. Glasscock dan Rochelle (1989) menyatakan bahwa resistansi terhadap perpindahan massa dapat berasal dari film gas maupun film

cair, bergantung pada sifat fisikokimia sistem. Laju fluks difusi NA dinyatakan dengan persamaan:

$$NA = k_L (C^* - C_L)$$

dengan k_L adalah koefisien transfer massa cairan, C^* konsentrasi kesetimbangan, dan C_L konsentrasi aktual pelarut. Persamaan ini penting dalam simulasi unit *absorber* karena menentukan efisiensi penyerapan pada tiap tray atau packing.



Gambar 2.3 Ilustrasi Teori Film Ganda pada Antarmuka Gas-Cair

c. Teori Kesetimbangan Gas-Cair

Kesetimbangan gas-cair tercapai ketika laju *absorpsi* gas ke dalam cairan sama dengan laju *desorpsinya*. Astarita dan Savage (1992) menjelaskan bahwa kesetimbangan ini bersifat dinamis dan bergantung pada tekanan parsial gas, suhu sistem, serta sifat kimia pelarut. Knopf dan Ammann (2021) menambahkan bahwa pendekatan termodinamika klasik maupun statistik dapat digunakan untuk memprediksi perilaku sistem multifase ini, termasuk memperkirakan tekanan parsial kesetimbangan dan konstanta kesetimbangan (K_{eq}). Kedua parameter tersebut menjadi input penting dalam merancang dan mengoptimasi unit *absorber* dan *stripper*.

d. Hukum Henry dan Solubilitas CO₂

Solubilitas CO₂ dalam pelarut cair mengikuti hukum Henry, yang menyatakan bahwa konsentrasi gas terlarut dalam cairan (C) sebanding dengan tekanan parsial gas di atasnya (P):

$$C = H \cdot P$$

dengan H adalah konstanta Henry. Glasscock dan Rochelle (1989) menekankan bahwa nilai konstanta Henry berubah terhadap suhu dan memengaruhi % removal CO₂ secara signifikan. Pada sistem DEA-glisin, konstanta Henry berbeda dari pelarut tunggal karena adanya interaksi tambahan dari promotor.

e. Teori Regenerasi (*Desorpsi*) Pelarut

Desorpsi atau regenerasi pelarut adalah proses pelepasan CO₂ dari larutan yang telah jenuh. Knopf dan Ammann (2021) menjelaskan bahwa proses ini dapat dipahami melalui konsep energi bebas *desorpsi* dan kinetika reaksi balik dari *absorpsi*. Proses ini umumnya berlangsung pada tekanan lebih rendah dan suhu lebih tinggi di kolom *stripper*, sehingga reaksi reversibel antara CO₂ dan DEA bergeser ke arah pelepasan gas. Xu *et al.* (2021) menyatakan bahwa efisiensi *desorpsi* sangat dipengaruhi oleh komposisi pelarut, terutama keberadaan promotor seperti glisin yang menurunkan energi aktivasi reaksi *desorpsi*.

f. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Laju *Absorpsi* dan *Desorpsi*

Laju *absorpsi* dan *desorpsi* gas dipengaruhi oleh kondisi operasi maupun karakteristik sistem. He *et al.* (2023) menyebutkan bahwa tekanan, suhu, ukuran partikel, dan jenis pelarut berperan penting dalam menentukan laju *desorpsi*. Yang *et al.* (2019)

menunjukkan bahwa peningkatan suhu mempercepat laju reaksi *desorpsi*, tetapi dapat menurunkan kapasitas pelarut akibat berkurangnya solubilitas gas.

Knopf dan Ammann (2021) menekankan pentingnya memilih model adsorbat dan pelarut yang tepat dalam simulasi, karena parameter ini memengaruhi hasil perhitungan laju transfer massa dan desain proses secara keseluruhan. Pada sistem DEA berpromotor glisin, efek sinergis kedua komponen perlu diperhitungkan untuk memperoleh desain proses yang optimal.

3. Pelarut Kimia untuk Penangkapan CO₂

Penangkapan CO₂ dengan pelarut kimia merupakan metode dominan pada proses *post-combustion* karena efisiensi dan kematangan teknologinya. Amina, terutama dalam bentuk larutan berair, adalah pelarut kimia yang paling umum digunakan pada skenario industri.

a. Amina Primer, Sekunder, dan Tersier

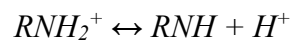
Amina diklasifikasikan menjadi primer, sekunder, dan tersier berdasarkan jumlah gugus alkil yang terikat pada atom *nitrogen*. *Monoethanolamine* (MEA) tergolong amina primer, *diethanolamine* (DEA) amina sekunder, dan *methyldiethanolamine* (MDEA) amina tersier; ketiganya adalah pelarut yang paling umum digunakan untuk menangkap CO₂. He *et al.* (2023) dan Du *et al.* (2024) menunjukkan bahwa ketiga jenis amina ini memiliki reaktivitas berbeda terhadap CO₂: amina primer dan sekunder cenderung membentuk karbamat, sedangkan amina tersier lebih efisien membentuk *bikarbonat*. Han *et al.* (2024) menemukan bahwa pencampuran ketiga jenis amina dapat meningkatkan kapasitas penangkapan sekaligus menurunkan energi regenerasi melalui efek sinergis.

b. Sifat Kimia dan Termodinamika *Diethanolamine* (DEA)

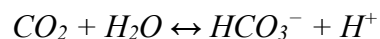
DEA adalah amina sekunder dengan kestabilan kimia yang baik, kelarutan tinggi dalam air, dan kemampuan membentuk ikatan *hidrogen* yang memfasilitasi penangkapan CO₂. Kopac dan Demirel (2024) menekankan bahwa DEA memiliki sifat termodinamika yang mendukung, terutama pada kondisi operasi *absorber-stripper*. Das *et al.* (2022) melaporkan bahwa kombinasi DEA dengan aktivator seperti piperazine (PZ) meningkatkan laju reaksi dan kapasitas penyerapan CO₂ secara signifikan. Anwer *et al.* (2024) menambahkan bahwa keberadaan air dalam pelarut DEA menurunkan viskositas larutan, meningkatkan difusivitas gas, dan mengurangi panas *absorpsi*.

c. Reaksi DEA dengan CO₂: Pembentukan Karbamat dan *Bikarbonat*

DEA bereaksi dengan CO₂ membentuk senyawa karbamat dan *bikarbonat*. Reaksi karbamat terjadi melalui mekanisme:



sedangkan bikarbonat terbentuk ketika CO₂ bereaksi dengan air:



Das *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pembentukan karbamat lebih dominan pada DEA, meskipun pada kondisi tertentu, seperti kelebihan air atau suhu tinggi, reaksi dapat bergeser ke arah pembentukan bikarbonat. Han *et al.* (2024) menambahkan bahwa pencampuran DEA dengan amina lain meningkatkan efisiensi reaksi dan kapasitas siklik CO₂.

d. Kelebihan dan Kekurangan DEA dalam Aplikasi Industri

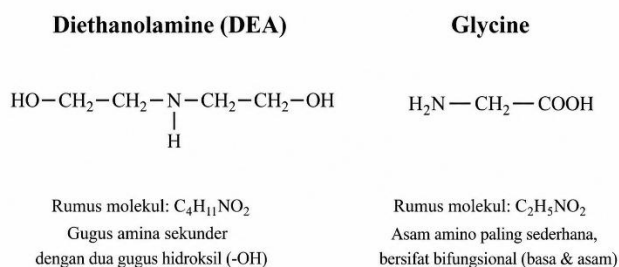
DEA menawarkan kestabilan kimia, kompatibilitas tinggi dalam sistem pelarut campuran, dan efisiensi penyerapan CO₂ yang baik saat dikombinasikan dengan aktivator

seperti PZ (Laribi et al., 2019). Kelemahan utamanya terletak pada tingginya energi regenerasi dan kebutuhan pendinginan (Das et al., 2022). MEA umumnya lebih cepat dalam penyerapan awal, tetapi DEA lebih unggul dari sisi stabilitas termal dan potensi efisiensi ekonomi jangka panjang (Hasan et al., 2020).

4. Glisin sebagai Promotor *Absorpsi*

a. Struktur Kimia dan Karakteristik Glisin

Glisin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) adalah asam amino paling sederhana, dengan gugus amino ($-\text{NH}_2$) dan karboksilat ($-\text{COOH}$) seperti terlihat pada Gambar 2.4. Struktur ini menjadikan glisin molekul bifungsional yang dapat bertindak sebagai basa maupun asam, serta membentuk *zwitterion* dalam larutan. Pudjiastuti *et al.* (2015) menyatakan bahwa karakter ini memberi glisin reaktivitas tinggi terhadap molekul gas seperti CO_2 . Zhang *et al.* (2022) menyebutkan bahwa anion glisin dapat berikatan dengan CO_2 melalui mekanisme yang menyerupai reaksi amina primer, membentuk senyawa karbamat sementara. Glisin juga memiliki kestabilan termal yang baik dan tahan terhadap degradasi pada suhu tinggi (Y et al., 2022), sehingga menjadi kandidat promotor yang sesuai untuk sistem *absorpsi* CO_2 yang beroperasi dalam jangka panjang.



Gambar 2.4 Struktur Sederhana *Diethanolamine* (DEA) dan Glisin

b. Peran Glisin sebagai Promotor *Absorpsi*

Dalam sistem *absorpsi* berbasis amina, promotor digunakan untuk mempercepat kinetika reaksi antara pelarut dan CO₂. Glisin berperan mempercepat pembentukan karbamat, terutama pada sistem amina tersier atau sekunder yang laju reaksinya rendah. Y *et al.* (2022) menunjukkan bahwa penambahan glisin pada larutan MDEA dan DEA meningkatkan efisiensi penyerapan melalui peningkatan konstanta laju reaksi.

Smith *et al.* (2015) melaporkan bahwa pada sistem karbonat, penambahan glisin sebagai promotor dapat meningkatkan pemulihan CO₂ hingga enam kali lipat. Thee *et al.* (2014) menunjukkan hal serupa, yakni promotor asam amino seperti glisin mempercepat kinetika *absorpsi* CO₂ dalam sistem pelarut karbonat tanpa menurunkan kapasitas larutan secara signifikan.

c. Efek Glisin terhadap Kinetika dan % removal CO₂ dalam Sistem DEA

Ketika digunakan bersama DEA, glisin menunjukkan efek sinergis terhadap laju dan kapasitas *absorpsi* CO₂. Pudjiastuti *et al.* (2015) menemukan bahwa kombinasi ini meningkatkan konstanta laju reaksi secara signifikan dibandingkan DEA murni. Y *et al.* (2022) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi glisin dalam larutan DEA meningkatkan laju *absorpsi*, khususnya pada suhu menengah hingga tinggi. Atlaskina *et al.* (2023) menunjukkan bahwa integrasi glisin ke dalam sistem pelarut amina berbasis MDEA dan pelarut ionik meningkatkan kapasitas sorpsi serta efisiensi kinetika, sehingga menarik untuk diterapkan pada skala industri.

5. Teori dan Pendekatan Pemodelan Proses *Absorber-Stripper*

Bagian ini membahas prinsip dasar dan pendekatan pemodelan untuk sistem *Absorber-Stripper* dalam penangkapan CO₂, mencakup tujuan pemodelan, tipe model, formulasi matematis, serta parameter penting dalam simulasi.

a. Tujuan Pemodelan Proses

Im *et al.* (2020) menyatakan bahwa pemodelan proses *Absorber-Stripper* bertujuan untuk memahami, mengoptimalkan, dan memprediksi perilaku sistem penangkapan CO₂. Montañés *et al.* (2017) menambahkan bahwa pemodelan penting untuk validasi desain, analisis performa, dan pengembangan strategi kontrol pada skala industri. Lawal *et al.* (2009) menekankan bahwa model juga diperlukan untuk analisis sensitivitas terhadap perubahan kondisi operasi dan gangguan proses, yang bermanfaat dalam pengambilan keputusan berbasis data.

b. Model Proses: *Steady-State vs Dynamic Modeling*

Salah satu keputusan awal dalam pemodelan adalah memilih antara model keadaan tunak (*steady-state*) atau model dinamik. Model *steady-state* digunakan untuk analisis kondisi operasi tetap dan optimasi energi (Montañés *et al.*, 2017), sedangkan model dinamik digunakan untuk mempelajari respons sistem terhadap perubahan beban dan gangguan proses. Montañés *et al.* (2017) menekankan pentingnya validasi model dinamik menggunakan data transien untuk menjamin akurasi prediksi terhadap kondisi lapangan. Kvamsdal *et al.* (2009) menegaskan bahwa model dinamik relevan untuk mengkaji operabilitas sistem pada pembangkit listrik dengan beban yang bervariasi.

c. Neraca Massa dan Energi

Pemodelan kolom *absorber* dan *stripper* didasarkan pada neraca massa dan energi untuk setiap komponen dan fase dalam sistem (Lawal et al., 2009). Model *rate-based* memperhitungkan fenomena transfer massa dan panas secara rinci, termasuk reaksi kimia dan efek non-ideal termodinamika (Ziaii et al., 2009). Lee et al. (2019) menjelaskan bahwa persamaan-persamaan ini diimplementasikan dalam perangkat lunak simulasi untuk memprediksi profil suhu, konsentrasi, dan laju alir fluida di sepanjang kolom.

d. Pendekatan *Rate-based* vs *Equilibrium-Based*

Pemilihan pendekatan model menentukan akurasi simulasi. Lawal et al. (2009) menyatakan bahwa pendekatan *rate-based* memberikan prediksi lebih rinci terhadap laju transfer massa dan distribusi suhu dibandingkan model *equilibrium-based*. Abu-Zahra et al. (2012) menambahkan bahwa meskipun kedua pendekatan dapat digunakan untuk memodelkan sistem CO₂, *rate-based* lebih sesuai untuk menangkap dinamika mikro seperti distribusi konsentrasi. Lee et al. (2019) mencatat bahwa model *equilibrium-based* lebih menghemat waktu komputasi dengan koreksi efisiensi tahap, meskipun akurasinya lebih rendah. Perbandingan kedua pendekatan tersebut dirangkum pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan *Model Rate-based* vs *Equilibrium-based*

Aspek	<i>Rate-based Modeling</i>	<i>Equilibrium-based Modeling</i>
Kompleksitas	Tinggi	Rendah
Akurasi	Tinggi (mikro & makro)	Sedang (makro)
Waktu Komputasi	Lebih lama	Relatif cepat
Aplikasi	Desain rinci & optimasi	Skala awal / pra-desain
Parameter Kritis	Koefisien transfer massa, data difusivitas	Efisiensi tray, data kesetimbangan

Pada sistem pelarut campuran seperti DEA-glisin, pendekatan *rate-based* menjadi lebih relevan karena mampu menangkap efek kinetika kompleks akibat interaksi antara amina dan asam amino dalam larutan.

e. Korelasi Empiris dan Parameter Transportasi

Ziaii *et al.* (2009) menjelaskan bahwa parameter transportasi, seperti koefisien transfer massa dan difusivitas, berperan penting dalam model *rate-based* karena memengaruhi prediksi laju *absorpsi* dan *desorpsi* CO₂. Zhang dan Guo (2013) menambahkan bahwa parameter tersebut umumnya diperkirakan melalui korelasi empiris berdasarkan data eksperimen dan karakteristik kolom. Validasi parameter transportasi terhadap data pilot plant, seperti disarankan Lee *et al.* (2019), penting untuk menjaga keandalan model pada aplikasi industri.

f. Asumsi dalam Pemodelan Sistem *Absorpsi* CO₂

Lawal *et al.* (2009) menyebutkan bahwa pemodelan sistem *absorpsi* CO₂ umumnya mengasumsikan kondisi operasi isothermal atau adiabatik, kesetimbangan fase lokal, dan distribusi aliran seragam di dalam kolom. Ziaii *et al.* (2009) menambahkan asumsi lain berupa pengabaian gradien tekanan serta non-idealitas pelarut pada konsentrasi rendah. Abu-Zahra *et al.* (2012) menekankan pentingnya memilih asumsi yang tepat agar akurasi model tetap seimbang dengan efisiensi komputasi, terutama pada simulasi skala industri.

6. Simulasi Proses CO₂ Removal Skala Industri

a. Platform Simulasi

Pemilihan platform simulasi yang tepat penting untuk menyeimbangkan akurasi prediksi dan efisiensi komputasi dalam pengembangan sistem penangkapan CO₂ skala industri. Aspen HYSYS® merupakan salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan untuk mensimulasikan proses kimia dan termodinamika, termasuk penangkapan CO₂ menggunakan pelarut amina (Shirmohammadi *et al.*, 2020). Perangkat

lunak ini memungkinkan pemodelan detail termodinamika dan kinetika reaksi, serta penggabungan unit operasi *Absorber-Stripper* dalam konfigurasi kontinu.

MATLAB juga digunakan untuk membangun model kinetika berbasis neraca massa-energi yang dapat dikombinasikan dengan data *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis reaktor multifase (Kim et al., 2020). DWSIM dan gPROMS menawarkan pendekatan *rate-based* dengan fleksibilitas lebih besar dalam memodelkan reaksi kompleks dan kontrol dinamis (Asgharian et al., 2023). Pemilihan platform bergantung pada tujuan simulasi, tingkat detail model, dan ketersediaan data termodinamika serta kinetika sistem yang digunakan. Perbandingan keempat platform tersebut disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan Software Simulasi Matematis

Platform	Keunggulan	Kekurangan
Aspen HYSYS	Akurat untuk sistem amina; GUI intuitif	Terbatas untuk simulasi dinamik yang kompleks
MATLAB + CFD	Fleksibel untuk pemodelan khusus	Perlu pemrograman manual
gPROMS	Baik untuk model <i>rate-based</i> dan kontrol lanjutan	Kompleks dan mahal
DWSIM	Open-source; cocok untuk edukasi	Kurang dukungan komersial dan data properti terbatas

b. Parameter Desain Kolom *Absorber* dan *Stripper*

Desain kolom *absorber* dan *stripper* pada skala industri perlu disesuaikan untuk mencapai efisiensi penangkapan CO₂ yang optimal dengan konsumsi energi minimal. Gbadago *et al.* (2020) menunjukkan bahwa konfigurasi multi-bed dengan distributor cairan antar-lapisan memberikan distribusi gas-cair yang lebih seragam dan memperbaiki efisiensi penyerapan.

Desideri dan Paolucci (1999) menegaskan bahwa tekanan operasi, suhu kolom, laju alir pelarut, dan komposisi amina merupakan parameter kritis yang menentukan performa

kolom. Ihda dan Nisa (2014) menemukan bahwa peningkatan tekanan dan laju alir *absorbent* meningkatkan efisiensi penangkapan CO₂, tetapi perlu diimbangi dengan kontrol suhu dan laju steam di unit *stripper* agar regenerasi pelarut tetap optimal.

c. Validasi Model terhadap Data Eksperimen atau Industri

Validasi model simulasi merupakan tahap penting untuk menjamin keandalan prediksi performa sistem CO₂ removal. Kim *et al.* (2020) menyatakan bahwa validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data *steady-state* dari pabrik skala pilot atau industri, dengan deviasi kurang dari 7%. Validasi juga dapat dilakukan pada berbagai parameter, seperti efisiensi penangkapan, profil suhu, dan konsumsi energi.

Shirmohammadi *et al.* (2020) memvalidasi model HYSYS® terhadap data industri petrokimia dan menemukan kesesuaian yang tinggi, sedangkan Ihda dan Nisa (2014) menunjukkan bahwa model matematis untuk proses *Benfield* menghasilkan prediksi yang mendekati kondisi nyata dengan deviasi hanya 1,44%. Validasi semacam ini penting, terutama untuk sistem kompleks seperti DEA-glisin yang memerlukan ketelitian tinggi dalam parameterisasi kinetika dan termodinamika.

B. Kajian Empiris

Bagian ini merangkum hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan penggunaan DEA dan glisin dalam sistem penangkapan CO₂, sekaligus menjadi dasar untuk mengidentifikasi celah penelitian yang direspons oleh penelitian ini.

1. Studi Terdahulu Penggunaan DEA pada Kolom *Absorber-Stripper*

Sejumlah penelitian terdahulu mengenai penggunaan diethanolamine (DEA) pada kolom *Absorber-Stripper* untuk penangkapan CO₂ dirangkum pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Studi Terdahulu Penggunaan DEA di Kolom *Absorber-Stripper*

Peneliti	Metode	Hasil Utama	Kelebihan	Keterbatasan
Kopac & Demirel (2024)	Simulasi <i>rate-based</i> dan evaluasi kinetika-termokimia sistem DEA	DEA efektif menangkap CO ₂ dengan perhitungan kinetika yang akurat	Validasi model termodinamika & kinetika	Studi terbatas pada simulasi, perlu verifikasi eksperimental
Laribi <i>et al.</i> (2019)	<i>Absorpsi</i> -regenerasi CO ₂ dari gas buang industri semen menggunakan DEA+PZ	DEA+PZ menurunkan energi regenerasi dan biaya operasi	Efektif untuk flue gas CO ₂ tinggi	Kinerja tergantung kondisi flue gas
Das <i>et al.</i> (2022)	Formulasi DEA yang diaktivasi piperazine (PZ)	Laju <i>absorpsi</i> dan <i>desorpsi</i> meningkat signifikan	Peningkatan efisiensi penangkapan CO ₂	Kompleksitas sistem pelarut campuran

2. Studi Terdahulu Penggunaan Glisin sebagai Promotor *Absorpsi*

Beberapa studi empiris juga telah mengevaluasi peran glisin dalam sistem *absorpsi* CO₂, baik secara eksperimental maupun simulasi. Ringkasan studi-studi tersebut ditampilkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Studi Terdahulu Penggunaan Glisin sebagai Promotor

No	Penulis (Tahun)	Sistem yang Digunakan	Temuan Utama
1	Pudjiastuti <i>et al.</i> (2015)	DEA + Glisin	Glisin meningkatkan konstanta laju reaksi CO ₂ dan efisiensi <i>absorpsi</i>
2	Y <i>et al.</i> (2022)	DEA & MDEA + Glisin	Kombinasi glisin meningkatkan laju <i>absorpsi</i> CO ₂ signifikan pada suhu tinggi
3	Smith <i>et al.</i> (2015)	K ₂ CO ₃ + Glisin (pilot plant)	Efisiensi pemulihan CO ₂ meningkat hingga 6 kali, dengan peningkatan tekanan kolom
4	Thee <i>et al.</i> (2014)	K ₂ CO ₃ + Glisin, sarcosine, proline	Glisin meningkatkan laju reaksi hingga 22 kali, tanpa menurunkan kapasitas pelarut
5	Atlaskina <i>et al.</i> (2023)	MDEA + Ionic Liquid + Glisin	Peningkatan kapasitas sorpsi dan laju reaksi CO ₂ dibandingkan pelarut tunggal

3. Studi Simulasi DEA Murni dalam Penangkapan CO₂

Pelarut amina seperti DEA telah lama digunakan dalam teknologi penangkapan CO₂ pasca-pembakaran dan merupakan salah satu pendekatan dengan tingkat kesiapan teknologi tertinggi (Goren *et al.*, 2023). Kematangan teknologi ini membuat DEA murni banyak diterapkan di sektor industri, seperti pembangkit listrik dan petrokimia (Chao *et al.*, 2020). Sejumlah studi menunjukkan keterbatasan performa DEA, terutama laju

absorpsi dan *desorpsi* yang rendah, kebutuhan energi regenerasi yang tinggi, serta masalah korosivitas dan kehilangan pelarut akibat penguapan (Aghaie *et al.*, 2018). Kondisi ini mendorong kebutuhan pengembangan formulasi pelarut alternatif atau campuran yang mampu mengatasi keterbatasan termodinamika dan operasional DEA tunggal.

4. Studi Campuran DEA-Glisin dan Efektivitasnya

Sebagai respons terhadap keterbatasan DEA murni, penelitian bergeser ke arah pengembangan pelarut campuran, salah satunya kombinasi DEA dengan asam amino seperti glisin. Goren *et al.* (2023) dan Kamkeng *et al.* (2021) menunjukkan bahwa penambahan glisin sebagai promotor dapat meningkatkan kapasitas dan laju penyerapan CO₂ secara signifikan. Keunggulan sistem campuran ini terletak pada kestabilan kimia glisin dan kemampuannya mempercepat reaksi pembentukan karbamat. Sebagian besar kajian mengenai pelarut DEA-glisin, meski demikian, masih terbatas pada skala laboratorium atau pilot. Aghaie *et al.* (2018) menekankan perlunya pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi termodinamika dalam sistem campuran serta implikasinya terhadap efisiensi dan konsumsi energi secara keseluruhan.

5. Tantangan Penerapan Skala Industri pada Unit *Absorber-Stripper*

Penerapan teknologi penangkapan CO₂ berbasis pelarut pada skala industri menghadapi berbagai tantangan teknis dan ekonomi. Gür (2022) mencatat bahwa variasi komposisi emisi CO₂, kebutuhan energi yang besar, serta kompleksitas pengoperasian unit *Absorber-Stripper* menjadi hambatan utama dalam implementasinya. Faktor eksternal seperti biaya modal tinggi, isu keselamatan operasional, dan pertimbangan lingkungan turut menambah kompleksitas tersebut (Baskaran *et al.*, 2024).

Goren *et al.* (2023) menyatakan bahwa hingga saat ini belum banyak pelarut campuran yang terbukti andal pada kondisi operasi fluktuatif dan tekanan tinggi yang umum dijumpai di industri. Kondisi ini menunjukkan perlunya riset lanjutan yang tidak hanya berfokus pada performa pelarut, tetapi juga pada optimasi desain proses dan pemodelan sistem yang representatif terhadap kondisi industri.

6. Identifikasi Celah Penelitian (Research Gap)

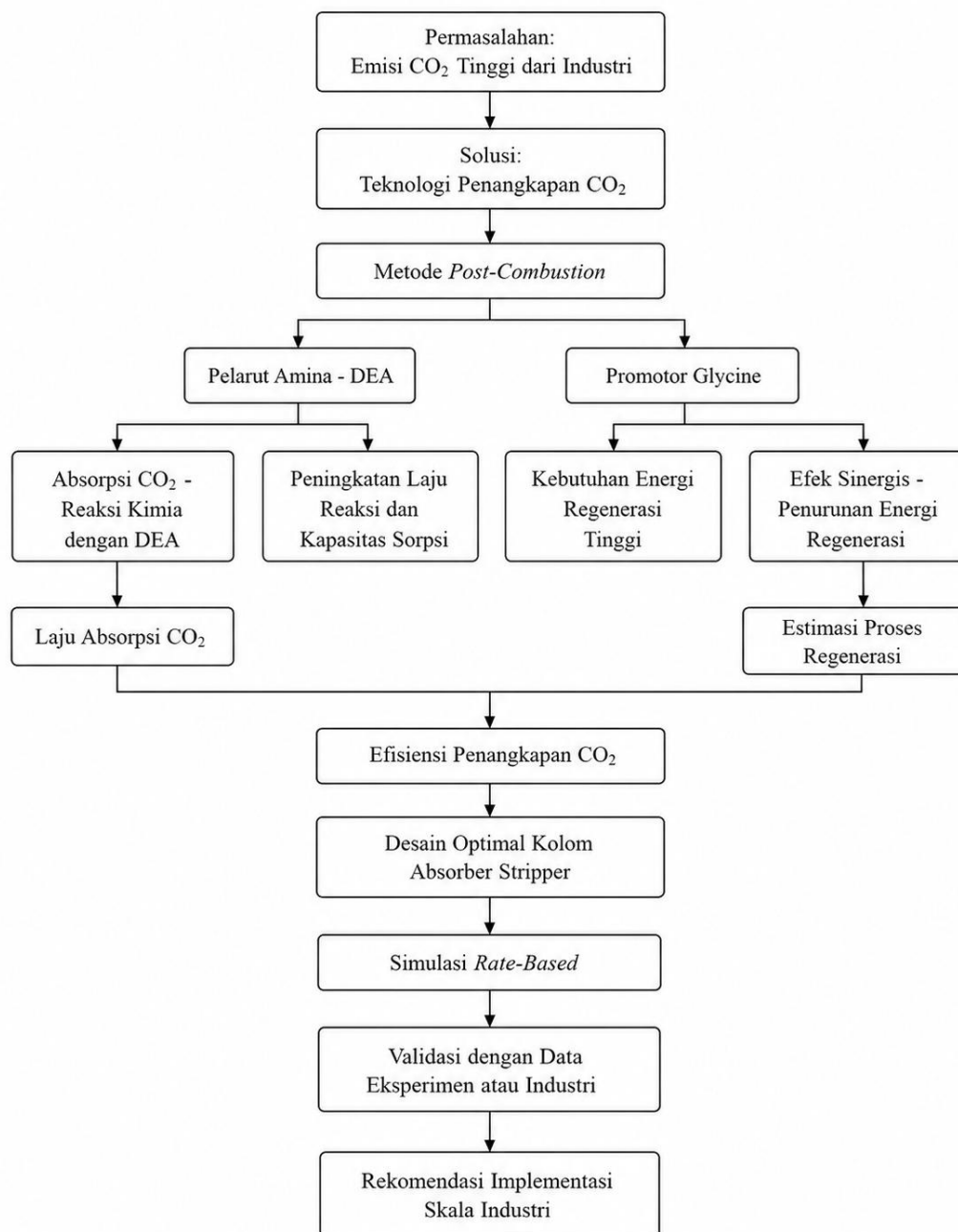
Berdasarkan kajian di atas, terdapat beberapa celah penelitian yang relevan untuk direspons pada penelitian ini. Pertama, meskipun pelarut campuran DEA-glisin menunjukkan potensi tinggi dalam meningkatkan performa penangkapan CO₂, belum ada studi komprehensif yang memvalidasi sistem ini pada skala industri melalui simulasi dan optimasi desain berbasis data. Kedua, Aghaie *et al.* (2018) dan Kamkeng *et al.* (2021) menekankan perlunya integrasi antara data eksperimen, model kinetika, dan analisis energi-ekonomi dalam satu platform pemodelan. Ketiga, pemanfaatan perangkat lunak simulasi industri seperti Aspen HYSYS® untuk memvalidasi kinerja sistem DEA-glisin secara dinamis dalam konfigurasi unit *Absorber-Stripper* masih terbatas.

Penelitian ini diarahkan untuk menjawab celah tersebut melalui pengembangan dan validasi model simulasi proses penangkapan CO₂ menggunakan pelarut DEA-glisin dengan pendekatan *rate-based* modeling, pemanfaatan data properti reaktif terkini, serta evaluasi performa sistem terhadap skenario operasi yang relevan dengan kondisi industri di Indonesia.

C. Kerangka Berpikir Penelitian

Kerangka berpikir penelitian ini disusun berdasarkan landasan teoretis mengenai teknologi penangkapan CO₂ menggunakan pelarut kimia berbasis *diethanolamine* (DEA)

yang dipromosikan dengan glisin. Studi terdahulu menunjukkan bahwa penambahan glisin sebagai promotor dapat meningkatkan laju reaksi dan kapasitas *absorpsi* CO₂ dalam sistem pelarut DEA, yang pada akhirnya berdampak pada efisiensi penangkapan dan kebutuhan energi regenerasi pelarut. Hubungan sebab-akibat antarvariabel tersebut digambarkan dalam skema kerangka berpikir pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kerangka Berpikir Penelitian

D. Arah Penelitian

Mengacu pada kerangka berpikir tersebut, penelitian ini tidak dirancang untuk menguji hipotesis statistik, melainkan untuk mengembangkan dan memvalidasi model simulasi proses penangkapan CO₂ dengan pelarut DEA-glisin. Hasil akhir yang ingin dicapai adalah diperolehnya model simulasi *rate-based* yang mampu memprediksi kinerja unit *absorber-stripper*, mencakup efisiensi penangkapan CO₂, kebutuhan energi regenerasi, dan profil operasi kolom, dengan tingkat akurasi yang dapat dipertanggungjawabkan terhadap data acuan yang tersedia.