

## Penangkapan Karbon Dioksida Berbasis Gliserol Sebagai Solusi Berkelanjutan Untuk Mitigasi Karbon: Review

Nuryoto<sup>1\*</sup>, Ekasari<sup>1</sup>, Sri Agustina<sup>1</sup>, dan Astrilia Damayanti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa  
Jl. Jenderal Sudirman Km. 3, Cilegon - Banten 42435

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

\*Email: [nuryoto@untirta.ac.id](mailto:nuryoto@untirta.ac.id)

### Abstrak

Teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> terus berkembang seiring komitmen global terhadap pengurangan emisi. Gliserol, sebagai produk samping industri biodiesel yang melimpah, berpotensi menjadi absorben alternatif yang ekonomis, biodegradable, dan bertekanan uap rendah. Review ini bertujuan untuk menganalisis kinerja penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis gliserol dengan mengevaluasi pengaruh suhu, tekanan, laju alir gas, dan konsentrasi larutan terhadap performa proses serta mengidentifikasi research gap untuk pengembangan lebih lanjut. Secara umum, peningkatan parameter operasi meningkatkan konstanta transfer massa dan efisiensi penangkapan CO<sub>2</sub> hingga batas optimum tertentu, setelah itu performa menurun. Penambahan pelarut seperti air dan monoetanolamin (MEA) ke dalam gliserol terbukti meningkatkan efisiensi penangkapan dari 27,31% menjadi 64,33%, tetapi berpotensi menghasilkan produk samping. Ke depan diperlukan studi eksperimental skala laboratorium lebih lanjut, misalnya menggunakan reaktor gelembung untuk meningkatkan kontak gas-cair, agar dihasilkan proses yang optimal dan mampu meningkatkan perolehan produk gliserol karbonat yang maksimal.

**Kata kunci:** CO<sub>2</sub>, MEA, Reaksi, Gliserol karbonat, Pemanasan global

### Abstract

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) capture technology continues to advance in line with global commitments to emission reduction. Glycerol, an abundant by-product of the biodiesel industry, has potential as an alternative absorbent due to its low cost, biodegradability, and low vapor pressure. This review aims to analyze the performance of glycerol-based CO<sub>2</sub> capture by evaluating the effects of temperature, pressure, gas flow rate, and solution concentration on process efficiency, as well as identifying research gaps for further development. In general, increasing operating parameters enhances the mass transfer coefficient and CO<sub>2</sub> capture efficiency up to an optimum limit, beyond which performance declines. The addition of solvents such as water and monoethanolamine (MEA) to glycerol has been shown to improve capture efficiency from 27.31% to 64.33%, although it may lead to the formation of by-products. Future work requires further laboratory-scale experimental studies, such as the use of bubble column reactors to enhance gas-liquid contact, in order to achieve optimal process conditions and maximize glycerol carbonate yield.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>, MEA, reaction, glycerol carbonate, global warming

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) di atmosfer merupakan salah satu penyebab utama perubahan iklim global (Islam, 2025; Nzabarinda dkk., 2025). Untuk mencegah peningkatan suhu global di bawah 1,5°C sesuai dengan Perjanjian Paris, maka diperlukan pengurangan emisi secara signifikan melalui strategi dekarbonisasi yang mencakup peningkatan efisiensi energi (Apeaninga dkk., 2024), transisi energi bersih (Lau & Tsai, 2023), serta implementasi teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (*Carbon Capture and Storage (CCS)*)

atau penangkapan dan pemanfaatan karbon (*Carbon Capture and Utilization (CCU)*) (Nunes, 2023; Oyewole dkk., 2023).

Menurut *International Energy Agency (IEA)* memperkirakan bahwa kontribusi *carbon capture* perlu mencapai sekitar 1,2 gigaton CO<sub>2</sub> per tahun pada tahun 2030 untuk memenuhi target *net-zero* emisi pada 2050 (Dong, 2025; Lorm & Limmeechokchai, 2025). Oleh karena itu, pengembangan media penangkap CO<sub>2</sub> yang efisien, murah, dan ramah lingkungan menjadi aspek krusial dalam strategi mitigasi emisi karbon jangka panjang. Teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> yang

telah digunakan saat ini adalah sistem absorpsi berbasis larutan amina, khususnya *monoethanolamine* (MEA) (Ma dkk., 2025; Wang dkk., 2025).

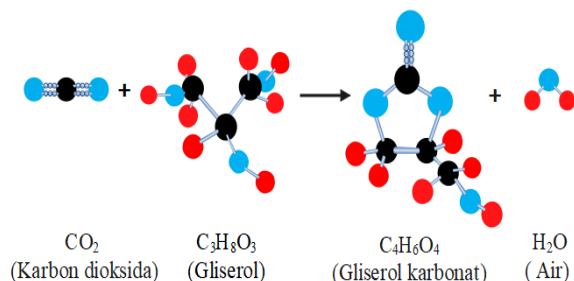
MEA mampu menyerap CO<sub>2</sub> secara kimiawi melalui pembentukan karbamat, namun memiliki sejumlah keterbatasan, yaitu pertama, proses regenerasi MEA membutuhkan energi panas yang cukup tinggi (sekitar 3,5–4,0 GJ/ton CO<sub>2</sub>), yang secara langsung mengurangi efisiensi keseluruhan proses (Hu dkk., 2024). Kedua, sifat korosif dari MEA (Wang dkk., 2024) menyebabkan masalah pada peralatan yang notabene berbahan logam dan menambah biaya perawatan. Selain itu, amina rentan mengalami degradasi termal dan oksidatif yang akan menghasilkan produk samping toksik seperti nitrosamin (Spietz dkk., 2017; Geng dkk., 2023) dan menyebabkan penurunan performa absorben dalam jangka panjang.

Gliserol dapat menjadi absorben alternatif yang lebih berkelanjutan, karena gliserol mempunyai sifat yang non-toksik, *biodegradable*, memiliki tekanan uap rendah, serta berasal dari produk samping industri biodiesel yang melimpah dan bernilai tambah rendah. Karakteristik ini menjadikan gliserol berpotensi mengurangi dampak lingkungan dan jejak karbon proses penangkapan CO<sub>2</sub> dibandingkan pelarut amina konvensional (Çapoğlu dkk., 2025; Azhagapillai dkk., 2023). Selain itu, stabilitas termal dan sifat fisikokimia yang dimiliki gliserol akan membuka peluang pengembangan sistem absorpsi dengan kebutuhan energi regenerasi yang lebih rendah dan risiko korosi yang minimal (Çapoğlu dkk., 2025).

Oleh karena itu, pengembangan teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis gliserol tidak hanya berkontribusi pada peningkatan efisiensi proses, tetapi juga mendukung strategi mitigasi perubahan iklim melalui pendekatan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Gliserol (1,2,3-propanetriol) merupakan senyawa organik dengan tiga gugus hidroksil yang secara alami bersifat polar, higroskopis, dan tidak mudah menguap (Díaz-Álvarez & Cadierno, 2023). Gliserol umumnya tersedia sebagai produk samping (*by-product*) dari proses transesterifikasi pada produksi biodiesel, sehingga menjadikan gliserol bahan yang murah, melimpah, dan mendukung prinsip ekonomi sirkular (Husna

dkk., 2024). Secara kimia, struktur gliserol memungkinkan secara fisis dan kimiawi berinteraksi dengan molekul CO<sub>2</sub>. Secara teoritis kelarutan CO<sub>2</sub> dalam gliserol cukup tinggi (Usman dkk., 2023), mencapai 0,196 g CO<sub>2</sub>/gram gliserol pada 313,2 K dan 1,0 atm (Li & Li, 2023), jauh lebih besar dibandingkan pelarut amina, sehingga layak untuk digunakan sebagai teknologi alternatif dalam CO<sub>2</sub> capture.

Tetapi penggunaan gliserol sebagai absorben mempunyai tantangan, yaitu gliserol mempunyai viskositas yang relatif tinggi yaitu sekitar 1,42 Pa·s pada 25°C (Moghaddam dkk., 20217). Kondisi ini dapat menjadi hambatan pada laju perpindahan massa gas CO<sub>2</sub> ke dalam cairan gliserol. Oleh karena itu, modifikasi atau penggabungan gliserol dengan material lain dan pengintegrasian faktor-faktor yang berpengaruh pada CO<sub>2</sub> capture dapat meningkatkan keberhasilan penerapan gliserol sebagai absorben pada CO<sub>2</sub> capture. Secara konseptual CO<sub>2</sub> capture menggunakan media gliserol akan melibatkan proses reaksi kimia seperti yang tersaji pada Gambar 1. Proses reaksi akan terjadi selama keduanya yaitu CO<sub>2</sub> dan gliserol saling bertemu dan berinteraksi satu sama lain.



**Gambar 1. Konsep reaksi CO<sub>2</sub> capture menggunakan gliserol**

Tahapan difusi-reaksi yang terjadi antara gas CO<sub>2</sub> – gliserol dapat ilustrasi seperti pada Gambar 2 (Nuryoto dkk., 2025). Tahapan tersebut akan terjadi ketika gas CO<sub>2</sub> telah terabsorpsi terlebih dulu ke dalam cairan gliserol. Menurut Levenspiel (1999), tahapan yang terjadi pada proses CO<sub>2</sub> capture yang melibatkan CO<sub>2</sub> – cairan gliserol dapat dideskripsikan sebagai berikut :

Tahap 1. Difusi gas CO<sub>2</sub> mendifusi ke interface gas-cair

$$N_{\text{CO}_2}^{\text{gas}} = k_g (P_{\text{CO}_2} - P_{\text{CO}_2}^{\text{interface}}) \quad (1)$$

Tahap 2. Terjadi kesetimbangan gas-cair di Interface gas CO<sub>2</sub> – cairan gliserol (solubilisasi)

$$P_{CO_2}^{interface} = H_{CO_2-G} C_{CO_2}^{interface} \quad (2)$$

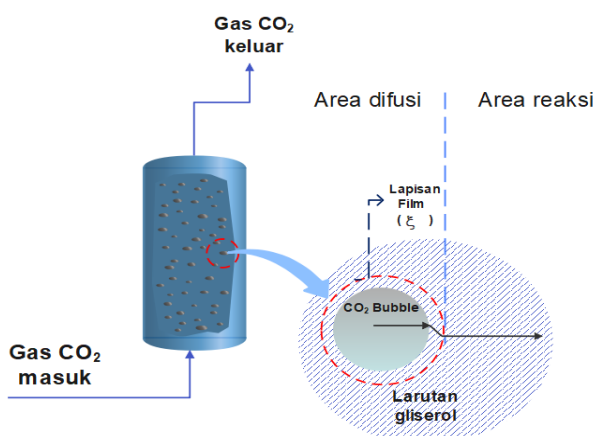
Tahap 3. Difusi CO<sub>2</sub> ke dalam cairan gliserol (*Bulk Liquid Diffusion*)

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = -D_{CO_2}^{Liquid} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial^2 \xi} \quad (3)$$

Tahap 4. Reaksi Kimia CO<sub>2</sub> dengan gliserol

$$\frac{dC_{CO_2}}{dt} = -k_1 C_{CO_2} C_{C_2H_5O_2} \quad (4)$$

Dengan,  $N_{CO_2}^{gas}$  : laju perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari bulk gas ke antarmuka gas-cair (mol/m<sup>2</sup>·s),  $k_g$  : koefisien perpindahan massa di fase gas (mol/m<sup>2</sup>·s·Pa),  $P_{CO_2}$  dan  $P_{CO_2}^{interface}$  tekanan parsial CO<sub>2</sub> di *bulk* gas dan tekanan parsial CO<sub>2</sub> di antarmuka gas-cair (Pa),  $H_{CO_2-G}$  : konstanta Henry untuk CO<sub>2</sub> dalam gliserol (Pa·m<sup>3</sup>/mol),  $C_{CO_2}^{interface}$  : konsentrasi CO<sub>2</sub> terlarut di antarmuka (mol/m<sup>3</sup>),  $\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t}$  : laju difusi atau laju reaksi (mol/m<sup>3</sup> s),  $D_{CO_2}^{Liquid}$  : koefisien difusi CO<sub>2</sub> dalam gliserol (m<sup>2</sup>/s),  $\xi$  : jarak lapisan interface ke dalam fasa cair, t = waktu (s),  $k_1$  : kontanta kecepatan laju reaksi,  $C_{C_2H_5O_2}$  = konsentrasi gliserol (mol/m<sup>3</sup>).



Gambar 2. Ilustrasi tahapan pada CO<sub>2</sub> capture menggunakan absorben larutan gliserol (Nuryoto dkk., 2025)

Tahapan-tahapan yang ada pada proses CO<sub>2</sub> capture, sangat dipengaruhi oleh laju alir

gas CO<sub>2</sub>, tekanan sistem, suhu sistem, dan konsentrasi gliserol. Penelitian ini merupakan kajian literatur yang bertujuan untuk menganalisis kinerja penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis gliserol dengan mengevaluasi pengaruh suhu, tekanan, laju alir gas, dan konsentrasi larutan terhadap performa proses serta mengidentifikasi *research gap* untuk pengembangan lebih lanjut. Harapannya dengan dilakukan kajian ini akan mendapatkan informasi dan pemahaman fenomena yang lebih komprehensif, sehingga dapat dijadikan pijakan untuk pengembangan lebih lanjut ke baik dalam skala laboarorium atau bahkan skala pilot untuk mendapatkan kondisi operasi yang efektif, efisien, dan ekonomis ke depannya.

## 2. METODE PENELITIAN

Kajian literatur ini dilakukan secara sistematis dengan mengumpulkan, mengevaluasi, dan menganalisis berbagai penelitian terdahulu terkait teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> dengan menggunakan gliserol sebagai basis absorben dilakukan pada rentang cukup lebar yaitu 15 tahun terakhir. Pendekatan yang dilakukan melibatkan beberapa langkah utama:

### 2.1. Identifikasi Literatur

Melalui database ilmiah yang ada, yang berfokus pada CO<sub>2</sub> capture menggunakan absorben berbasis gliserol (sebagai contoh *ScienceDirect*, *SpringerLink*, dan *Google Scholar*). Proses pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti “CO<sub>2</sub> capture”, “glycerol-based absorbent”, dan “carbon absorption”, dengan rentang 15 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan mengetahui *state of the art* dari absorben gliserol.

### 2.2. Seleksi Literatur

Sumber yang dipilih berupa artikel ilmiah dan atau paten yang relevan dengan topik dan fokus kajian, khususnya yang membahas proses penangkapan CO<sub>2</sub> berbasis gliserol. Kriteria inklusi meliputi: (i) studi eksperimental dan atau pemodelan yang melaporkan data kuantitatif kapasitas serapan CO<sub>2</sub> khususnya dengan absorben gliserol dan (ii) penelitian yang mengevaluasi pengaruh parameter operasi. Artikel yang tidak menyediakan data yang memadai atau tidak relevan secara langsung dengan sistem berbasis gliserol dieliminasi.

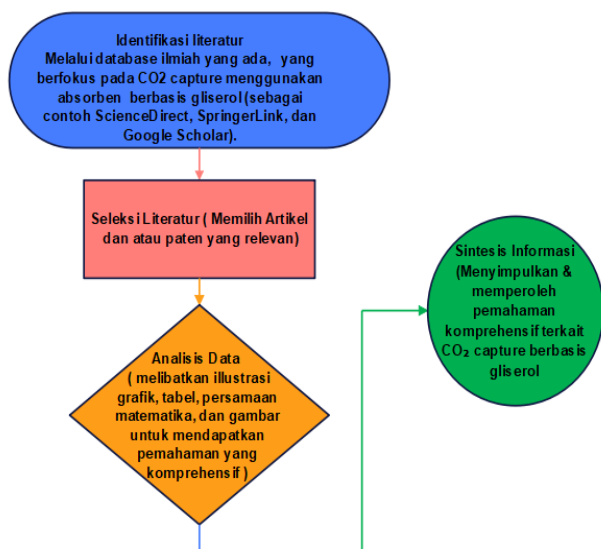
### 2.3. Analisis data

Literatur yang telah diseleksi, selanjutnya dikategorikan berdasarkan faktor-faktor utama yang mempengaruhi efektivitas penangkapan CO<sub>2</sub>, seperti laju alir gas CO<sub>2</sub>, konsentrasi gliserol, tekanan sistem, dan suhu sistem. Pembahasan dilakukan dengan melibatkan ilustrasi grafik, tabel dari data-data literatur, persamaan matematika, dan gambar agar mudah dipahami dan untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif.

### 2.4. Sintesis Informasi

Data yang telah dilakukan analisis, kemudian disimpulkan guna memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai fenomena yang terjadi selama proses CO<sub>2</sub> capture berbasis gliserol. Selain itu, dilakukan perbandingan tren kinerja antar penelitian untuk mengidentifikasi pola umum, inkonsistensi data, serta potensi *research gap* yang masih terbuka dalam pengembangan absorben berbasis gliserol.

*Flowchart* langkah-langkah dari metode kajian dapat diilustrasikan seperti Gambar 3.



Gambar 3. *Flowchart* metode kajian

## 3. PEMBAHASAN

### 3.1. Pengaruh Suhu Sistem

Secara teoritis, suhu sistem memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap proses penangkapan CO<sub>2</sub>. Peningkatan suhu sistem menyebabkan viskositas gliserol akan mengalami penurunan (El Glili & Driouich, 2024; Galimzyanov dkk., 2025). Viskositas yang rendah akan meningkatkan transfer massa CO<sub>2</sub> ke dalam larutan gliserol melalui

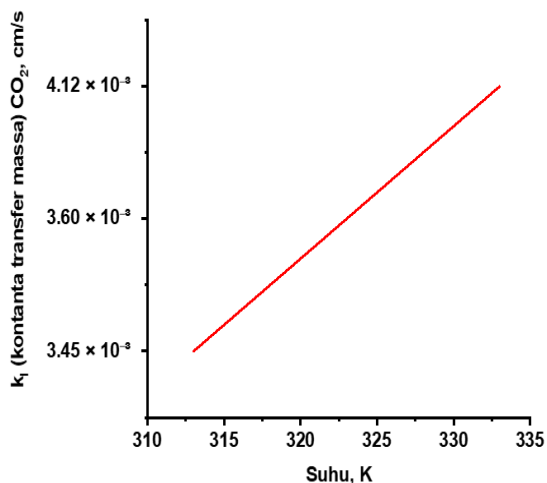
peningkatan konstanta transfer massa (KGav) (Valeh-e-Sheyda & Nafchi, 2022).

Secara konseptual, sebenarnya penurunan viskositas pada absorben meningkatkan difusivitas CO<sub>2</sub> sesuai hukum Stokes-Einstein, yang menyatakan  $D \propto 1/\eta$  (di mana D adalah koefisien difusi dan  $\eta$  adalah viskositas). Hal ini mengurangi hambatan perpindahan massa di lapisan film cair, sehingga fluks CO<sub>2</sub> ke antarmuka reaksi bertambah signifikan (Coin dkk., 2025). Peningkatan nilai D akan berpengaruh langsung terhadap konstanta transfer massa (KGav) itu sendiri. Terbukti dari hasil observasi yang dilakukan oleh Babamohammadi dkk., 2021 yang mana peningkatan suhu yang dilakukan berdampak pada peningkatan konstanta transfer massa CO<sub>2</sub> ke dalam larutan gliserol (lihat Gambar 4).

Selain itu, secara kinetika kimia, peningkatan suhu juga akan meningkatkan konstanta laju reaksi (k) sesuai persamaan Arrhenius, sehingga laju reaksi yang terjadi antara CO<sub>2</sub> dan gliserol akan meningkat pula (lihat Persamaan 4). Peningkatan suhu juga akan berimbas pada peningkatan energi kinetik molekul zat yang terlibat reaksi, sehingga akan memperbesar peluang tumbukan efektif antara CO<sub>2</sub> dan gugus hidroksil gliserol (Lestari, 2017), dan pembentukan gliserol karbonat akan mengalami peningkatan.

Fenomena yang terjadi pada Gambar 4 juga didukung oleh hasil penelitian yang dilakukan Gao dkk. (2023), yang mana terlihat bahwa ketika suhu sistem dinaikkan dari 130 menjadi 300°C, konversi gliserol yang dihasilkan cenderung mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya suhu sistem.

Namun karena gliserol yang digunakan di campur dengan zat lain, maka produk yang dihasilkan bukan hanya gliserol karbonat. *Yield* gliserol karbonat tertinggi dihasilkan pada penelitian Gao dkk. (2023) diperoleh pada suhu 170 °C yaitu dengan *yield* gliserol karbonat sekitar 6%. Tetapi perlu diperhatikan juga bahwa peningkatan suhu yang terlalu besar pada titik tertentu akan memicu penurunan kapasitas absorpsi gas CO<sub>2</sub> oleh absorben (Aguilar, 2020).

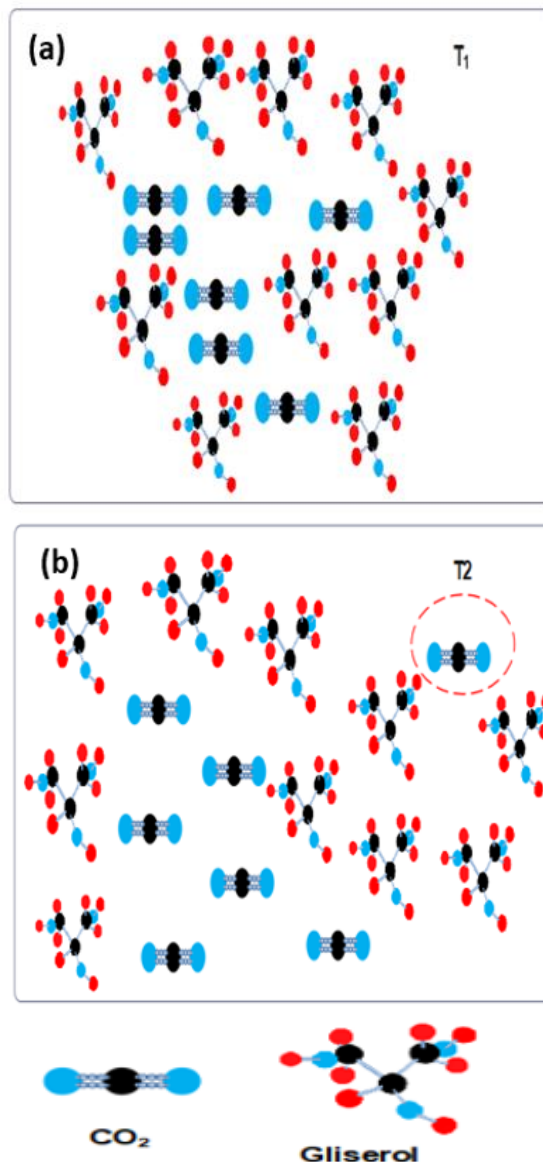


**Gambar 4. Ilustrasi pengaruh suhu terhadap konstanta kecepatan transfer masa  $\text{CO}_2$  ke dalam arutan gliserol**

Fenomena penurunan kapasitas absorpsi gas  $\text{CO}_2$  oleh absorben gliserol dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 5. Secara molekular, ketika suhu sistem dinaikan dari  $T_1$  menjadi  $T_2$  (lihat Gambar 5.a dan Gambar 5b), maka kerapatan molekul gliserol akan mengalami penurunan seiring peningkatan suhu sistem. Ketika kerapatan molekul mengalami penurunan, maka memungkinkan gas  $\text{CO}_2$  yang telah terserap oleh cairan akan terlepas kembali ke lingkungan (lihat Gambar 5.b yang diberi lingkaran warna merah). Selain itu juga peningkatan jarak antar molekul juga memicu terjadinya penurunan gaya interaksi fisik seperti gaya dipol–kuadrupol antara  $\text{CO}_2$  dan gugus  $-\text{OH}$  gliserol, sehingga stabilitas kompleks terlarut menjadi lebih lemah (Shi dkk., 2019).

Jika dikaitkan dengan konsep setimbangan antara fase dan kelarutan gliserol- $\text{CO}_2$  yaitu konsep hukum Henry, fenomena ini cukup logis. Ketika terjadi peningkatan suhu absorpsi maka akan menyebabkan peningkatan konstanta Henry (H) (SI dkk., 2013). Jika mengacu pada Persamaan 2, ketika nilai konstanta Henry mengalami peningkatan (lihat Persamaan 5 (mengacu pada SI dkk., 2013), maka gas

$\text{CO}_2$  yang terlarut ( $C_{\text{CO}_2}^{\text{interface}}$ ) akan mengalami penurunan. Kondisi ini menyebabkan menurunnya kelarutan gas  $\text{CO}_2$  ke dalam pelarut, sehingga *driving force* difusi-reaksi akan berkurang.



**Gambar 5 . Ilutstrasi pengaruh suhu terhadap kerapan molekul gliserol dan pengaruhnya terhadap penyerapan gas  $\text{CO}_2$**

Jadi berdasarkan data pada Gambar 4 dan hasil observasi Gao dkk. (2023), maka faktor suhu cukup berpengaruh terhadap keberhasilan  $\text{CO}_2$  capture menggunakan larutan gliserol. Peningkatan suhu absorpsi memang cukup sensitif terhadap proses  $\text{CO}_2$  capture, karena pada satu sisi akan meningkatkan laju reaksi diisi antara  $\text{CO}_2$ -gliserol, tetapi pada sisi yang lain dapat menyebabkan penurunan kelarutan. Padahal syarat gas  $\text{CO}_2$  dapat bereaksi dengan gliserol adalah gas  $\text{CO}_2$  terlarut terlebih dahulu, selanjutnya baru berinteraksi untuk bereaksi. Oleh karena itu, pengendalian suhu menjadi

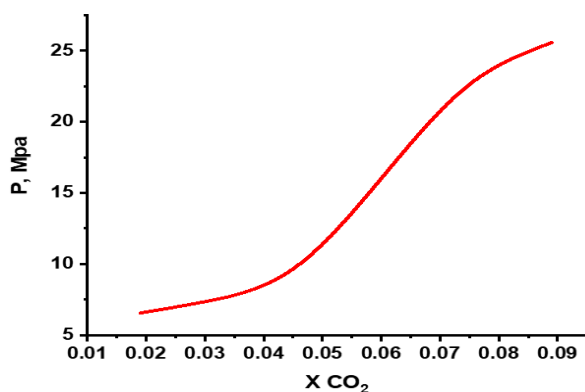
parameter kunci dalam desain proses, karena menentukan keseimbangan antara fenomena kelarutan–difusi–reaksi, serta berimplikasi langsung terhadap efisiensi energi dan stabilitas sistem pada skala industri. Jadi penentuan suhu sistem yang tepat perlu dilakukan agar proses kelarutan–difusi–reaksi dapat berjalan optimal.

$$H = AT^2 + BT + C \tag{5}$$

Dengan, H konstanta Henry’s (bar), A, B, dan C = Kontanta pada solven, dan T = suhu (°C).

### 3.2. Pengaruh Tekanan Sistem

Jika mengacu pada Persamaan (2) yaitu prinsip Hukum Henry, peningkatan tekanan sistem pada CO<sub>2</sub> capture akan meningkatkan solubilitas CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2}^{interface}$ ) dalam gliserol, sehingga meningkatkan efektivitas CO<sub>2</sub> capture yang terjadi (Gui dkk., 2011; Babamohammadi dkk., 2018). Secara matematis hubungan ini bersifat linier, yang mana peningkatan tekanan parsial, maka konsentrasi CO<sub>2</sub> terlarut juga akan semakin besar ( $C = P/H$ ). Dengan meningkatnya tekanan parsial CO<sub>2</sub>, *driving force* perpindahan massa antara fase gas dan cair semakin besar sehingga fluks absorpsi meningkat secara signifikan (Nunes dkk., 2013). Terbukti dari hasil observasi CO<sub>2</sub> capture menggunakan absorben gliserol yang dilakukan pada rentang 6,55 – 25,58 Mpa, yang mana seiring peningkatan tekanan sistem (lihat Gambar 6), fraksi CO<sub>2</sub> yang terabsorpsi pada larutan gliserol terjadi peningkatan (Nunes dkk., 2013).



Gambar 6. Ilustrasi pengaruh tekanan terhadap CO<sub>2</sub> (Nunes dkk., 2013)

Pada Gambar 6 juga terlihat bahwa proses CO<sub>2</sub> capture dilakukan dengan tekanan yang cukup besar yaitu 6,55 – 25,58 Mpa atau 65,5 – 255,8 bar. Hal ini dilakukan karena gliserol masuk kategori fluida yang mempunyai viskositas yang cukup tinggi yaitu 1,412 mPa.s pada 20 °C (Sigma Aldrich, 2018). Tindakan ini sebenarnya dilakukan agar gas CO<sub>2</sub> dapat mendifusi ke dalam gliserol tersebut. Tekanan tinggi tidak hanya meningkatkan kelarutan, tetapi juga meningkatkan densitas fase gas sehingga jarak antar molekul CO<sub>2</sub> menjadi lebih rapat dan frekuensi tumbukan dengan permukaan cair meningkat, yang pada akhirnya memperbesar peluang terjadinya difusi-reaksi (Nunes dkk., 2013).

Jika mengacu pada Gambar 6, fraksi gas CO<sub>2</sub> yang terlarut masih dibawah 10%, padahal tekanan sistem tinggi yaitu 25,5 Mpa. Fenomena ini terjadi karena viskositas yang dimiliki gliserol cukup tinggi, sehingga menyebabkan CO<sub>2</sub> mengalami hambatan pada proses difusi dari interface gas-cair menuju ke cairan gliserol. Kejadian ini dapat dijelaskan dengan konsep pada Persamaan 6 yaitu Persamaan Wilke – Chang (Bird dkk., 2006) dan Persamaan 1-3. Koefisien difusivitas (D<sub>AB</sub>) yang tersaji Persamaan 6 berbanding terbalik dengan viskositas. Jadi ketika viskositas cairan sangat tinggi seperti gliserol, maka nilai D<sub>AB</sub> akan sangat kecil (lihat Persamaan 6).

Ketika nilai D<sub>AB</sub> kecil maka secara otomatis difusi dan laju reaksi yang terjadi juga akan kecil juga (lihat Persamaan 3 dan 4). Efeknya pada konversi gliserol dan produk gliserol karbonat yang dihasilkan menjadi lebih kecil pula. Jadi agar CO<sub>2</sub> dapat terlarut dengan baik ke dalam senyawa gliserol, maka gliserol yang digunakan harus dalam kondisi encer.

Terbukti dari hasil observasi yang dilakukan oleh Shamirid dkk. (2016), yang mana gliserol yang dicampur dengan monoethanolamine (MEA) (campura MEA + 20% gliserol) walaupun dilakukan pada tekanan yang rendah yaitu 500 - 1500 kPa menghasilkan penyerapan CO<sub>2</sub> yang cukup tinggi yaitu 0,66 mol CO<sub>2</sub> /mol MEA untuk 500 Kpa dan 0,77 mol CO<sub>2</sub> /mol MEA pada 1500 kPa. Informasi ini menunjukkan bahwa selain tekanan, modifikasi sifat fisik pelarut (misalnya penurunan viskositas melalui

pencampuran) dapat menjadi strategi yang lebih *energetically favorable* dibandingkan hanya meningkatkan tekanan operasi secara ekstrem (Nunes dkk., 2013). Dari perspektif rekayasa proses, operasi pada tekanan sangat tinggi akan meningkatkan kebutuhan energi untuk kompresi dan biaya peralatan bertekanan juga tinggi, sehingga perlu dilakukan observasi lebih lanjut, agar diperoleh kondisi operasi yang ekonomis.

$$D_{AB} = \frac{7.4 \times 10^{-8} (\phi_B M_B)^{0.5} T}{\mu_B V_A^{0.6}} \tag{6}$$

Dengan,  $D_{AB}$  = koefisien difusi solut A (CO<sub>2</sub>) dalam pelarut B (Gliserol), (cm<sup>2</sup>/s);  $\phi_B$  = faktor asosiasi pelarut;  $M_B$  = massa molekul pelarut B, (g/mol); T = suhu mutlak (K);  $\mu_B$  = viskositas pelarut B (cP = centipoise);  $V_A$  = volume molar zat terlarut A pada titik didih normal, (cm<sup>3</sup>/mol)

### 3.3. Pengaruh Konsentrasi Gliserol

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa terdapat korelasi konsentrasi gliserol terhadap viskositas larutan dan tekanan operasional sistem. Semakin tinggi konsentrasi gliserol, maka viskositas cairan yang dimiliki akan semakin tinggi pula (lihat Tabel 1). Mengacu pada Persamaan 6, viskositas berbanding terbalik dengan koefisien difusivitas molekular. Jadi semakin tinggi viskositas, maka hambatan difusi molekul CO<sub>2</sub> ke dalam larutan akan semakin tinggi pula. Imbasnya koefisien difusivitas akan mengalami penurunan (lihat Tabel 1), dan laju difusi dan proses reaksi yang terjadi antara gliserol-CO<sub>2</sub> akan semakin turun.

Secara struktur molekular gliserol memiliki gugus – OH yang 3 kali lebih banyak dibanding air, sehingga secara teoritis kelarutan CO<sub>2</sub> di dalam gliserol akan relatif lebih baik dibanding air. Tetapi proses transportasi gas ke dalam fase cair bisa terhambat karena difusivitas rendah yang disebabkan oleh viskositas yang tinggi yang dimiliki oleh gliserol.

Penelitian membuktikan bahwa ketika CO<sub>2</sub> capture dilakukan menggunakan konsentrasi gliserol 10% CO<sub>2</sub> yang terabsorpsi kurang lebih sebesar 27,31% (Mirzaei dkk., 2016), dan ketika ditambahkan *solvent* lain yaitu menggunakan 10% MEA (

notabene akan menurunkan viskositas gliserol) CO<sub>2</sub> capture mengalami peningkatan yaitu dari 27,31% menjadi 64,33% (lihat Gambar 8).

**Tabel 1. Data pengaruh konsentrasi gliserol terhadap viskositas dan konstanta transfer massa CO<sub>2</sub> (Chiang dkk., 2017)**

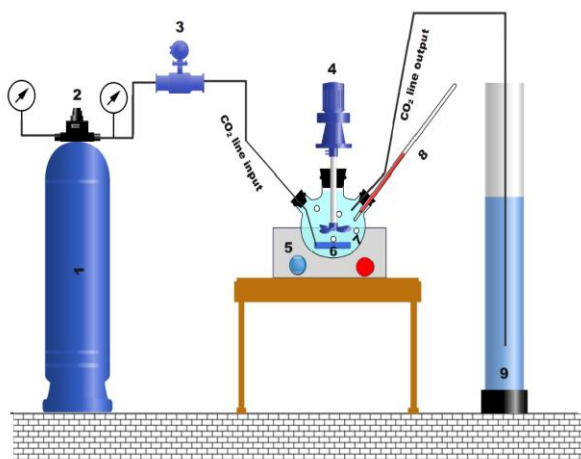
Konsentrasi Gliserol, %	Viskositas, cp	Koefisien difusivitas, m <sup>2</sup> /s × 10 <sup>-9</sup>
0	0,890	1,846
5	1,015	1,674
7	1,071	1,609
10	1,164	1,513
13	1,270	1,418
26	1,932	1,040

Jadi di sini peran MEA mempunyai peran ganda yaitu menurunkan viskositas larutan sekaligus sebagai promotor pada proses CO<sub>2</sub> capture. Tantangan ke depan sebenarnya adalah bagaimana agar performa tetap baik tetapi dilakukan tanpa menggunakan campuran MEA. Tantangan tersebut harus dicari jalan keluarnya. Langkah ini perlu dilakukan karena jika masih menggunakan MEA proses operasinya tinggi sehingga sistem proses yang dihasilkan menjadi tidak ekonomis.

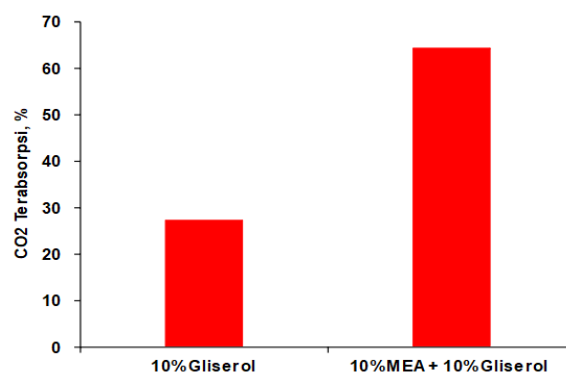
Efek negatif lain dengan penggunaan MEA sebagai absorbent lebih ke dalam konsep CCS, bukan CCU. Sementara proses akan berdaya guna jika proses tersebut ekonomis dan menguntungkan. Selain mampu mereduksi CO<sub>2</sub> di lingkungan, tetapi memungkinkan CO<sub>2</sub> dapat menjadi produk yang lebih bermanfaat. Ketika dilakukan menggunakan absorbent gliserol tanpa MEA maka akan menjadi produk gliserol karbonat yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan polimer, surfaktan atau emulsifier (De Caro dkk., 2019).

Opsi untuk meningkatkan CO<sub>2</sub> capture agar lebih efektif dimungkinkan dilakukan menggunakan reaktor bubble seperti yang tersaji pada Gambar 7. Penggunaan reaktor *bubble* akan berpotensi meningkatkan penjerapn CO<sub>2</sub> lebih baik. Hal ini terjadi karena akan memaksimalkan proses difusi-reaksi yang terjadi anatara gas CO<sub>2</sub> dan gliserol, seperti yang telah dilakukan Nuryoto dkk. (2025). Pada reaktor *bubble* yang

digunakan dilengkapi pengaduk dan jumlah lubang distributor tertentu yang mampu memaksimalkan absorpsi-difusi-reaksi yang terjadi. Ilustrasi skematik reaktor bubble untuk CO<sub>2</sub> capture yang dilakukan oleh Nuryoto dkk., 2025 tersaji pada Gambar 7.



**Gambar 7. Ilustrasi reaktor bubble pada CO<sub>2</sub> capture Nuryoto dkk., 2025) dengan : (1) tabung gas CO<sub>2</sub>, (2) regulator gas, (3) Flow meter, (4) overhead magnetic stirrer, (5) heating mantle, (6) gas distributor (3 lubang), dan (7) labu leher tiga, (8) Thermometer, dan (9) tangki air**



**Gambar 8. Ilustrasi pengaruh mixing pelarut-glisserol terhadap performa CO<sub>2</sub> absorpsi (mengacu pada Mirzaei dkk., 2016)**

Dengan dilakukan seperti Gambar 7, maka waktu tinggal dan proses difusi-reaksi antara CO<sub>2</sub> dan Gliserol akan lebih maksimal. Selain itu gas CO<sub>2</sub> tidak langsung keluar dari sistem karena tertahan sehingga kelarutannya akan lebih baik. Terbukti dengan cara tersebut CO<sub>2</sub> capture menggunakan larutan KOH mampu menghasilkan produk K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang cukup tinggi yaitu sebesar 54,94 gram (Nuryoto dkk., 2025). Untuk melihat efektifitas kinerja absorben gliserol lebih lanjut dibandingkan dengan absorben lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2. Komparasi absorben gliserol dan absorben yang lain**

Aspek	Gliserol (termasuk hybrid dengan MEA)	MEA (monoethanolamine)	Ionic Liquids (ILs)
CO <sub>2</sub> Solubility / Uptake	Gliserol murni menunjukkan solubilitas CO <sub>2</sub> lebih tinggi dibanding air; sistem hybrid gliserol-MEA meningkatkan kapasitas dibanding pelarut tunggal (Nunes dkk., 2013)	Reaktivitas tinggi dan kapasitas penyerapan baik (Manafpour dkk., 2024)	kapasitas penyerapan sangat tinggi (mis. sistem berbasis amina hingga ~11–12 mol/kg) (Liu dkk., 2021)
Viskositas dan Transfer Massa	Viskositas tinggi membatasi difusi CO <sub>2</sub> ; dapat dikurangi dengan temperatur, pencampuran, atau aditif (Nunes dkk., 2013).	Viskositas lebih rendah, transfer massa relatif cepat (Manafpour dkk., 2024).	Umumnya sangat viskos, hambatan difusi signifikan (Ramdani dkk., 2012).
Stabilitas dan Korosi	Non-korosif, biodegradable, stabil secara kimia (Nunes dkk., 2013).	Korosif dan rentan degradasi termal/oksidatif (Manafpour dkk., 2024)..	Stabil termal/kimia, tetapi sintesis kompleks (Ramdani dkk., 2012).
Aspek Lingkungan dan Praktikalitas	Produk samping biodiesel, non-toxic, biodegradable, tersedia luas (Nunes dkk., 2013).	Isu korosi, degradasi, dan volatilitas (Manafpour dkk., 2024).	Mahal dan kompleks untuk skala besar (Manafpour dkk., 2024).



Pada Tabel 2 terlihat bahwa absorben *Monoethanolamine* (MEA) terjadi proses absorpsi dan reaksi yang cepat, viskositas yang rendah. Sedangkan *Ionic liquids* (ILs) menunjukkan kapasitas serapan CO<sub>2</sub> dan stabilitas kimia yang lebih unggul. Tetapi gliserol juga mempunyai keunggulan tersendiri yaitu tidak mudah menguap, tidak korosif dan ramah terhadap lingkungan (*biodegradable*). Kelemahan gliserol adalah daya absorpsi yang rendah terhadap CO<sub>2</sub> tanpa ditambahkan zat lain yang disebabkan karena viskositasnya cukup tinggi yang mempengaruhi proses difusi-reaksi.

Berdasarkan Tabel 2, maka *Research gap* utamanya terletak pada belum adanya kerangka evaluasi holistik yang mengaitkan sifat reologi pelarut, hambatan transfer massa, kebutuhan energi regenerasi, serta aspek keberlanjutan dalam satu analisis komprehensif. Pada dasarnya gliserol menunjukkan potensi sebagai pelarut ramah lingkungan untuk penangkapan CO<sub>2</sub>, tetapi dalam implementasi praktisnya masih menghadapi sejumlah kendala teknis dan ekonomis. Selain viskositas, ada hal lain yaitu kebutuhan pemurnian gliserol dari produk samping biodiesel, dan diperlukan pelarut agar proses menjadi efektif.

Oleh karena itu, riset lanjutan perlu dilakukan, bagaimana memformulasikan gliserol-pelarut dan kondisi operasi yang tepat, sehingga proses difusi—reaksi terjadi secara optimal. Selain itu, pendekatan *techno-economic analysis* (TEA) dan *life cycle assessment* (LCA) menjadi penting untuk memastikan bahwa sistem CO<sub>2</sub> capture berbasis gliserol tidak hanya unggul secara lingkungan tetapi juga layak secara industri. Dengan pendekatan terintegrasi tersebut, pengembangan teknologi ini dapat bergerak dari tahap konseptual menuju aplikasi skala nyata secara berkelanjutan.

### 3.4. Pengaruh Laju Aliran Gas CO<sub>2</sub>

Laju alir gas CO<sub>2</sub> yang lebih tinggi dapat berpotensi meningkatkan jumlah CO<sub>2</sub> yang terabsorpsi oleh larutan gliserol, selama belum mencapai titik maksimal yang menyebabkan interaksi keduanya (gas CO<sub>2</sub> dan cairan masih) tidak terganggu. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan persamaan gas secara umum (lihat Persamaan 7) (Smith dkk., 2006).

$$PV_{CO_2} = z n_{CO_2} R T \tag{7}$$

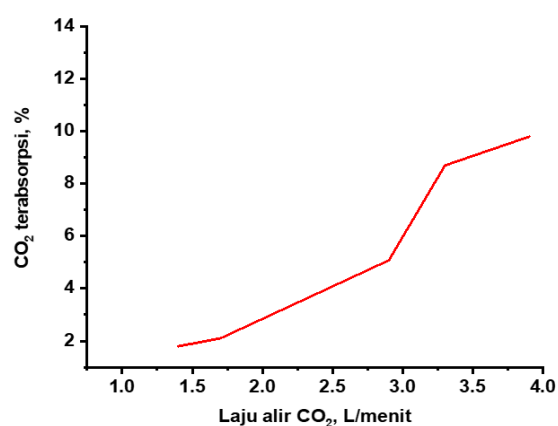
dengan,  $z$  = faktor kompresibilitas CO<sub>2</sub> (dimensionless),  $n_{CO_2}$  = mol CO<sub>2</sub> (mol),  $T$  =

suhu (K),  $P$  = tekanan (Pa),  $V_{CO_2}$  = volume CO<sub>2</sub> (m<sup>3</sup>),  $R$  = konstanta gas universal (Pa·m<sup>3</sup>/mol·K).

Mengacu pada Persamaan (7) ketika laju gas CO<sub>2</sub> di tingkatkan maka secara tidak langsung  $V_{CO_2}$  akan mengalami peningkatan. Kondisi ini secara proporsional akan meningkatkan jumlah

mol CO<sub>2</sub> ( $n_{CO_2}$ ) yang masuk ke dalam sistem dan berinteraksi dengan gliserol, efeknya akan terjadi peningkatan fraksi mol CO<sub>2</sub> yang

terabsorpsi ( $x_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{gliserol} + n_{air} + n_{CO_2}}$ ). Konsep ini didukung oleh hasil observasi yang dilakukan oleh Mirzaei dkk., 2020 yang tersaji pada Gambar 9.

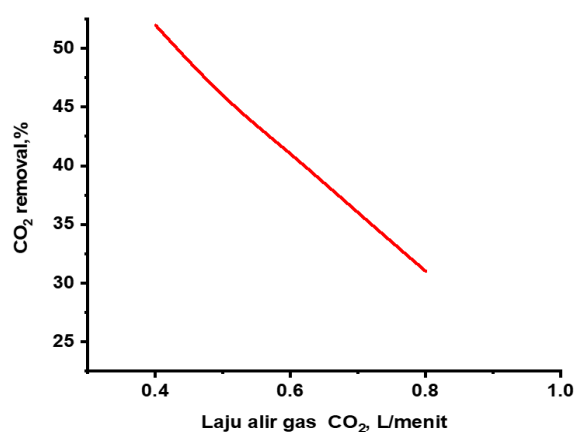


**Gambar 9. Ilustrasi pengaruh laju alir CO<sub>2</sub> terhadap performa CO<sub>2</sub> capture pada larutan gliserol + MEA ( mengacu pada Mirzaei dkk., 2020)**

Pada Gambar 9 terlihat bahwa ketika laju alir gas CO<sub>2</sub> ditingkatkan dari 1,4 l/menit menjadi 3,9 L/menit dengan absorben larutan gliserol + MEA, CO<sub>2</sub> yang terabsorpsi mengalami peningkatan dari 1,9 menjadi 9,8%. Tetapi ketika absorben yang digunakan tanpa ditambahkan gliserol hanya MEA saja , dengan laju alir gas CO<sub>2</sub> yang lebih rendah justru efisiensi penyerapan gas CO<sub>2</sub> mengalami penurunan (lihat Gambar 10). Ternyata keberadaan gliserol didalam larutan mempunyai peran yang cukup baik dalam meningkatkan performa CO<sub>2</sub> capture.

Dengan ditambahkan gliserol ke dalam larutan akan meningkatkan viskositas dan berat jenis meningkat, yang akan meningkatkan kerapatan molekular absorben, sehingga daya perangkap terhadap gas CO<sub>2</sub> mengalami peningkatan. Artinya untuk absorben dengan

adanya gliserol di dalam larutan akan berdampak positif yaitu mampu menjerap CO<sub>2</sub> dengan lajur alir yang cukup tinggi terbukti dari komparasi Gambar 8 dan Gambar 9. Namun laju alir gas CO<sub>2</sub> yang mengalir ke dalam sistem absorpsi tetap ada titik optimalnya. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan yang seimbang antara laju alir gas dan larutan untuk mencapai absorpsi CO<sub>2</sub> yang optimal. Pada CO<sub>2</sub> capture yang menggunakan kolom yang di dalam ada *packing*, selain menurunkan waktu kontak, dampak negatif lainnya dari laju alir gas CO<sub>2</sub> terlalu tinggi adalah dapat menyebabkan pembanjiran pada kolom. Kondisi ini pada akhirnya akan menurunkan interaksi antara gas CO<sub>2</sub> dan absorbent sehingga akan menurunkan CO<sub>2</sub> capture yang terjadi.



**Gambar 10. Ilustrasi pengaruh laju alir CO<sub>2</sub> terhadap performa CO<sub>2</sub> capture menggunakan absorbent berupa larutan MEA (mengacu pada Gargari dkk., 2020)**

#### 4. KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa parameter operasi seperti suhu, tekanan, laju alir gas CO<sub>2</sub>, dan konsentrasi larutan gliserol mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap kinerja penangkapan CO<sub>2</sub>. Kenaikan suhu mampu mempercepat proses difusi gas ke dalam larutan, sehingga laju penyerapan meningkat. Pada kondisi tertentu terutama saat gliserol dikombinasikan dengan pelarut amina seperti monoetanolamin (MEA), reaksi samping dapat terjadi dan menghasilkan senyawa selain gliserol karbonat.

Tekanan yang lebih tinggi, aliran gas yang lebih besar, dan konsentrasi gliserol yang

lebih pekat terbukti meningkatkan konstanta transfer massa CO<sub>2</sub>, yang secara langsung berdampak pada peningkatan performa penyerapan. Tetapi setiap variabel tersebut memiliki titik optimal, karena kondisi yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan efisiensi penyerapan CO<sub>2</sub>.

Secara keseluruhan, gliserol dapat digunakan sebagai absorbent ramah lingkungan dengan kinerja yang cukup baik pada CO<sub>2</sub> capture, terutama jika dikombinasikan dengan pelarut tambahan seperti air atau MEA. Pencampuran larutan gliserol dengan senyawa MEA mampu meningkatkan efisiensi penyerapan CO<sub>2</sub> secara signifikan, yaitu dari 27,31% menjadi 64,33%.

Hal ini membuktikan bahwa modifikasi komposisi larutan memberikan potensi besar dalam peningkatan performa sistem. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan uji coba eksperimental skala laboratorium menggunakan konfigurasi berupa reaktor gelembung (*bubble reactor*), yang dapat meningkatkan intensitas kontak antara fase gas dan cair. Harapannya reaksi pembentukan gliserol karbonat dapat berlangsung lebih optimal, sehingga proses CO<sub>2</sub> capture diharapkan akan lebih maksimal, dan produk gliserol karbonat yang dihasilkan akan lebih optimal.

Dari sisi implementasi praktis, pengembangan teknologi ini perlu difokuskan pada optimasi desain kolom absorpsi atau reaktor terintensifikasi untuk mengatasi hambatan difusi akibat viskositas tinggi, pengendalian sifat fisik larutan melalui formulasi *co-solvent*, serta integrasi sistem dengan unit pasca-pembakaran pada industri intensif karbon seperti pembangkit listrik, semen, dan petrokimia.

Selain itu, pemanfaatan gliserol sebagai produk samping biodiesel membuka peluang penerapan dalam kerangka *circular economy*, sehingga diperlukan kajian lanjutan berbasis *techno-economic analysis* (TEA) dan *life*

cycle assessment (LCA) guna memastikan kelayakan teknis, ekonomi, dan keberlanjutan jangka panjang.

Secara keseluruhan, gliserol memiliki potensi sebagai absorbent ramah lingkungan untuk CO<sub>2</sub> capture, namun optimalisasinya memerlukan pendekatan terintegrasi yang mencakup aspek kinetika, transfer massa, rekayasa proses, dan evaluasi industri secara komprehensif.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar M. J. (2020). Aqueous Solutions of Glycerol and Urine for CO<sub>2</sub> Capture. *JSM Environ Sci Ecol* 8(1): 1066.
- Apeaninga, R., Kamboj, P., & Hejazi, M. (2024). *Key Drivers of Decarbonizing Hard- to-Abate Energy- System Sectors by Midcentury*. <https://doi.org/10.30573/ks--2024-dp59>
- Azhagapillai, P., Reddy, K. S. K., Guerrero Pena, G. D., Bojesomo, R. S., Raj, A., Anjum, D. H., & Ali, M. I. (2023). Synthesis of mesoporous carbon adsorbents using biowaste crude glycerol as a carbon source via a hard template method for efficient CO<sub>2</sub> capture. *ACS omega*, 8(24), 21664-21676.
- Babamohammadi, S., Shamiri, A., Borhani, T. N. G., Shafeeyan, M. S., Aroua, M. K., & Yusoff, R. (2018). Solubility of CO<sub>2</sub> in aqueous solutions of glycerol and monoethanolamine. *Journal of Molecular Liquids*, 249, 40-52.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). *Transport phenomena* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Çapoğlu, İ. K., Öztan, H., Uysal, D., & Doğan, Ö. M. (2025). Investigation of carbon dioxide absorption with glycerol and glycerol+ sodium hydroxide hybrid solutions using stirred cell reactor. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(5), 101685.
- Chiang, C. Y., Lee, D. W., & Liu, H. S. (2017). Carbon dioxide capture by sodium hydroxide-glycerol aqueous solution in a rotating packed bed. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72, 29-36.
- Coin, Z., Dangwal, S., Irwin, M. H., Knight, T., Bhave, R., Rother, G., & Islam, S. Z. (2025). Effect of Viscosity of a Deep Eutectic Solvent on CO<sub>2</sub> Capture Performance in an Energy-Efficient Membrane Contactor-Based Process. *ACS omega*, 10(4), 3407-3417.
- De Caro, P., Bandres, M., Urrutigoity, M., Cecutti, C., & Thiebaud-Roux, S. (2019). Recent progress in synthesis of glycerol carbonate and evaluation of its plasticizing properties. *Frontiers in Chemistry*, 7, 308.
- Díaz-Álvarez, A. E. & Cadierno, V. (2013). Glycerol: A promising Green Solvent and Reducing Agent for Metal-Catalyzed Transfer Hydrogenation Reactions and Nanoparticles Formation. *Applied Sciences*, 3(1), 55–69.
- Dong, S. T. (2025). Carbon Capture, Utilization, and Storage Technologies Needed to Decarbonize the Economy. In *The Palgrave Handbook of Cybersecurity, Technologies and Energy Transitions* (pp. 1-25). Cham: Springer Nature Switzerland.
- El Glili, I., & Driouich, M. (2024). The effect of nonlinear thermal radiation on EMHD Casson nanofluid over a stretchable Riga plate with temperature-dependent viscosity and chemical reaction. *Physical Chemistry Research*, Vol. 12 No.1, 157-173.
- Galimzyanov, B. N., Doronina, M. A., & Mokshin, A. V. (2025). Unified scaling model for viscosity of crude oil over extended temperature range. *Fuel*, 379, 133018.
- Gao, Z., Xiang, M., He, M., Zhou, W., Chen, J., Lu, J., & Su, Y. (2023). Transformation of CO<sub>2</sub> with glycerol to glycerol carbonate over ETS-10 zeolite-based catalyst. *Molecules*, Vol. 28, no. 5, 2272.
- Gargari, S. F., Mirfendereski, S. M., & Jahangiri, A. (2020). Numerical Investigation on the Effect of Flow Parameters in CO<sub>2</sub> Capturing Using Aqueous MEA Absorbent in HFMC Systems.
- Geng, Y., Yao, J., Ji, J., Chen, F.-F., Xiao, J., Hu, X., & Ma, L. (2023). N-nitrosamines in processed meats: Exposure, formation and mitigation strategies. *Journal of Agriculture and Food Research*, 13, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100645>
- Gui, X., Tang, Z. G., & Fei, W. Y. (2011). Solubility determination of CO<sub>2</sub> in

- physical solvents under high pressure. *Huaxue Gongcheng/Chemical Engineering (China)*, 39, 55-58.  
<https://doi.org/10.3390/APP3010055>
- Hu, Y., Wang, Q., Hu, D., Zhang, Y., Furqan, M., & Lu, S. (2024). Experimental study on CO<sub>2</sub> capture by MEA/n-butanol/H<sub>2</sub>O phase change absorbent. *RSC advances*, Vo. 14, No.5, 3146–3157.  
<https://doi.org/10.1039/d3ra07193f>
- Husna, M. H. N., Tabak, Y., & Yıldız, M. (2024). Glycerol as a Feedstock for Chemical Synthesis. *ChemBioEng Reviews*.  
<https://doi.org/10.1002/cben.202400010>
- Islam, F. S. (2025). Clean coal technology: the solution to global warming by reducing the emission of carbon dioxide and methane. *American Journal of Smart Technology and Solutions*, Vol. 4, No. 1), 8-15.
- Lau, H. C., & Tsai, S. C. (2023). Global Decarbonization: Current Status and What It Will Take to Achieve Net Zero by 2050. *Energies*.  
<https://doi.org/10.3390/en16237800>
- Lestari, P. P. (2017). Penyerapan Gas CO<sub>2</sub> Menggunakan Gliserol Dalam Kolom Gelembung Untuk Pemurnian Biogas (Doctoral Dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Levenspiel O. (1999). *Chemical Engineering Reaction*. 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons
- Li, D., & Li, C. (2023). Efficient and Reversible Capture of CO<sub>2</sub> in CO<sub>2</sub>-Binding Organic Liquids Formed by 1,1,3,3-Tetramethylguanidine and Glycerol Derivatives. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(14), 5335–5344.  
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05109>
- Liu, Y., Dai, Z., Zhang, Z., Zeng, S., Li, F., Zhang, X., & Ji, X (2021). Ionic liquids/deep eutectic solvents for CO<sub>2</sub> capture: reviewing and evaluating, *Green Energy & Environment* 6, 314–328.
- Lorm, R., & Limmeechokchai, B. (2025). Decarbonizing Building and Transport Sectors in Thailand towards Net Zero Emissions 2050. vol. 22, no. 2, 271491-271491.
- Ma, L., Ding, Y., Zhu, X., Wang, H., Cheng, M., & Liao, Q. (2025). Monoethanolamine (MEA) and N, N-dimethylformamide (DMF) with fast absorption rate as nonaqueous absorbent for CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 117377.
- Manafpour, A. A., Feyzi, F., & Rezaee, M. (2024). An environmentally friendly deep eutectic solvent for CO<sub>2</sub> capture. *Scientific Reports*, 14(1), 19744.
- Mirzaei, S., Shamiri, A., & Aroua, M. K. (2016). Simulation of Aqueous Blend of Monoethanolamine and Glycerol for Carbon Dioxide Capture from Flue Gas. *Energy & Fuels*, vol. 30, no.11, 9540–9553.  
<https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.6B01230>
- Mirzaei, S., Shamiri, A., & Aroua, M. K. (2020). CO<sub>2</sub> Absorption/Desorption in Aqueous Single and Novel Hybrid Solvents of Glycerol and Monoethanolamine in a Pilot-Scale Packed Bed Column.
- Moghaddam, M. B., Goharshadi, E. K., & Moosavi, F. (2017). Glycerol revisited molecular dynamic simulations of structural, dynamical, and thermodynamic properties. *Journal of The Iranian Chemical Society*, vol.14, no. 1, 1–7.  
<https://doi.org/10.1007/S13738-016-0952-5>
- Morales Cepeda, A. B., Villalobos Neri, E. E., Macclesh del Pino Pérez, L. A., & Gonzalez Pedraza, E. J. (2024). Glycerol Carbonate as an Emulsifier for Light Crude Oil: Synthesis, Characterization, and Stability Analysis. *Molecules*, 29(20), 4937.  
<https://doi.org/10.3390/molecules29204937>
- Nunes, A. V., Carrera, G. V., Najdanovic-Visak, V., & da Ponte, M. N. (2013). Solubility of CO<sub>2</sub> in glycerol at high pressures. *Fluid Phase Equilibria*, 358, 105-107.
- Nunes, L. J. R. (2023). The Rising Threat of Atmospheric CO<sub>2</sub>: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. Vol, 10, no. 4, 66.  
<https://doi.org/10.3390/environments10040066>
- Nuryoto, N., Alfarizi, M. H., Surya Kelana, M. A., & Bagaskara, R. N. T. (2025). Alternative technology towards clean and

- sustainable industry: Conversion of carbon dioxide gas into potassium carbonate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol.19, no. 4, 183-197. <https://doi.org/10.12913/22998624/200561>
- Nzabarinda, V., Bao, A., Tie, L., Uwamahoro, S., Kayiranga, A., Ochege, F. U., & Bao, J. (2025). Expanding forest carbon sinks to mitigate climate change in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114849.
- Oyewole, K. A., Okedere, O. B., Rabi, K. O., Alawode, K. O., & Oyelami, S. (2023). Carbon dioxide emission, mitigation and storage technologies pathways. *Sustainable Environment*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2023.2188760>
- Ramdin, M., de Loos, T. W., & Vlucht, T. J. (2012). State-of-the-art of CO<sub>2</sub> capture with ionic liquids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(24), 8149-8177.
- Shamiri, A., Shafeeyan, M. S., Tee, H. C., Leo, C. Y., Aroua, M. K., & Aghamohammadi, N. (2016). Absorption of CO<sub>2</sub> into aqueous mixtures of glycerol and monoethanolamine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 605-613.
- Shi, W., Thompson, R. L., Macala, M. K., Resnik, K., Steckel, J. A., Siefert, N. S., Valeh-e-Sheyda, P., & Nafchi, N. F. (2022). Carbon Dioxide Capture by the Green Aqueous Sodium Hydroxide-Glycerol Solution in a Gas-Liquid Microchannel Contactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108666. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108666>
- Wang, L., Ma, C., Dai, Q., Li, K., & Jiang, K. (2025). Molecular structure-derived stability mechanism for sustainable & Hopkinson, D. P. (2019). Molecular simulations of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> solubility, CO<sub>2</sub> diffusivity, and solvent viscosity at 298 K for 27 commercially available physical solvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 64(9), 3682-3692.
- SI, M., Okonkwo, P. C., & Waziri, S. M. (2013). Improvement of carbon dioxide absorption technology using conductor-like screening model for real solvents (COSMO-RS) method. *Journal of Environmental Chemistry*, vol. 5, no. 4, 96-105.
- Sigma Aldrich (2018). Safety Data Sheet: Glycerol. Sigma-Aldrich Corporation Product Safety – Americas Region 1-800-521-8956. Di akses : 27 September 2025. Link akses: <https://bpb-us-e2.wpmucdn.com/sites.utdallas.edu/dist/5/1304/files/2023/04/glycerol-MSDS.pdf>
- Spietz, T., Dobras, S., Więclaw-Solny, L., & Krótki, A. (2017). Nitrosamines and nitramines in Carbon Capture plants. *Environmental Protection and Natural Resources*, vol. 28, no. 4, 43–50. <https://doi.org/10.1515/OSZN-2017-0027>
- Usman, M., Rehman, A., Saleem, F., Abbas, A., Eze, V. C., & Harvey, A. (2023). Synthesis of cyclic carbonates from CO<sub>2</sub> cycloaddition to bio-based epoxides and glycerol: an overview of recent development. *RSC advances*, vol.13, no. 33, 22717-22743.
- amine-based CO<sub>2</sub> capture. *Chemical Engineering Science*, 21760.
- Wang, Y., Fang, M., Gao, J., Li, C., Huang, Y., Yang, L., & Wang, T. (2024). Corrosion performance of A3 carbon steel in 30wt.% MEA and AMP-MEA blends for post-combustion carbon capture: Effect and mechanism of corrosion inhibitors. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 136, 104186.