

Available online at: <http://reactor.poltekadipdg.ac.id/>**REACTOR****Journal of Research on Chemistry and Engineering**

| ISSN Online 2746-0401 |



Absorpsi CO₂ Pada *Wetted Wall Column* dengan Variasi Laju Alir NaOH dan Konsentrasi *Methyldiethanolamine*

Elida Purba, Rio Riski Simbolon

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. S. Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Rajabasa, Bandar Lampung, 35145, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: May 05, 2023

Revised: May 29, 2023

Available online: June 05, 2023

KEYWORDS

CO₂ Output, Flow Rate, Methyldiethanolamine, Purification, Wetted Wall Column

CORRESPONDENCE

Name: Elida Purba

E-mail: Elida.purba@eng.unila.ac.id

ABSTRACT

This research describes the biogas purification process by reducing CO₂ content using NaOH solution as an absorbent and methyldiethanolamine (MDEA) as a promoter in *Wetted Wall Column* (WWC). The purpose of this study was to determine the effect of MDEA concentration and flow rate of NaOH + MDEA solution on CO₂ absorption. The column is made of acrylic material with a diameter of 4.5 cm, height 50 cm, equipped with a tube with a diameter of 1.27 cm, height 45 cm. The tube is in the center of the column. The flow rate of absorbent solution for each run was varied as 150, 200, 250 and 300 ml/min and the concentration of MDEA for each run was 4% wt and 6% wt in 1 M NaOH. The biogas flow rate was 6 L/min, which was fed from the bottom of the column. The samples were analyzed by Gas Chromatography 2014 AT (SHIMADZU Corp 08128). The results showed that at 6% NaOH + MDEA solution, the solution flow rate of 150 mL/min was the best. Under these conditions, the output CO₂ content is 13.306% and the output CH₄ content is 81.737%. The results of the output CO₂ content did not reach the 90% target because the biogas was contaminated by gas from the environment and the lack of control over the condition of the equipment during the absorption process.

PENDAHULUAN

Pengurangan ketergantungan pada bahan bakar minyak, menjadi salah satu prioritas pemerintah, dan khususnya menindaklanjuti Peraturan Presiden RI Nomor 5 tahun 2006 tentang pengurangan ketergantungan masyarakat terhadap bahan bakar minyak. Inti dari Perpres ini adalah tentang energi nasional untuk mengembangkan sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak [1]. Hal tersebut mendorong peneliti untuk mengoptimalkan penggunaan sumber energi alternatif seperti biogas, yang dapat dihasilkan dari berbagai bahan dan limbah organik. Pemanfaatan limbah organik memberi manfaat ganda yaitu penyedia energi terbarukan, serta ramah lingkungan [2].

Kandungan biogas paling tinggi adalah metana (CH₄) 55-70% dan karbon dioksida (CO₂) 30-45%. Sedangkan karbon monoksida (CO) 0-0,3%, hidrogen sulfida (H₂S) <0,1%, dan sejumlah kecil uap air [3]. Nilai kalor biogas

1 m³ setara 4,7 kWh energi listrik [4]. sehingga sangat cocok menggantikan peran minyak tanah, LPG dan bahan bakar fosil lainnya. Akan tetapi kandungan CH₄ sangat mempengaruhi nilai kalor biogas. Semakin tinggi kandungan CH₄, nilai kalor biogas juga semakin tinggi. Untuk itu perlu mengurangi kandungan zat lain dalam biogas. CO₂ harus dikurangi secara signifikan mencapai maksimum 15%, agar penggunaannya dalam genset atau mesin pembakaran menjadi optimal. Gas CO₂ bersifat mengurangi nilai panas, mengganggu proses pembakaran, dan bersifat korosif [5]. Agar kandungan CH₄ pada biogas meningkat, maka perlu melewati proses pemurnian CO₂. Absorpsi, adsorpsi, kriogenik, *water scrubbing*, pemisahan membran, dan penyerapan kimia merupakan pemisahan yang dapat dilakukan [6][7]. Absorpsi kimia menjadi favorit dalam aplikasi karena lebih ekonomis, dengan menggunakan bahan kimia antara lain amoniak (NH₃), etanolamin (C₂H₇NO), natrium hidroksida (NaOH), natrium karbonat (Na₂CO₃), serta kalium hidroksida (KOH). Untuk membantu laju

penyerapan gas CO₂ digunakan promotor seperti golongan amina. Berdasarkan struktur kimianya, terdiri dari amina primer, sekunder dan tersier. Promotor yang dapat digunakan diantaranya seperti *monoethanolamine* (MEA), *diethanolamine* (DEA), *methyldiethanolamine* (MDEA), *triethanolamine* (TEA) [8]. MDEA adalah amina tersier yang memiliki keunggulan seperti tekanan uap yang rendah, degradasi termal yang tinggi, serta memiliki panas yang relatif rendah dari reaksi dengan hidrogen sulfida dan karbon dioksida dibandingkan dengan golongan amina lain [9].

Wetted Wall Column digunakan dalam proses absorpsi kimia ini. Dimana *tube* vertikal dengan aliran liquid dari atas akan membentuk lapisan *film* dan terjadi perpindahan massa antar fase. CO₂ berkontak dan bereaksi dengan liquid sedangkan CH₄ tidak. Penelitian sebelumnya [10] digunakan NaOH 0,2 N pada absorber tipe *packing* pada gas hasil fermentasi kotoran sapi dimana jumlah CO₂ terserap maksimum sebesar 58,11% dan CH₄ *output* menjadi semakin besar dengan berkurangnya laju alir NaOH sebesar 74,13%. Penelitian lain [11] tentang hidrodinamik dan perpindahan massa CO₂/NaOH dalam spray tower pada aliran gas aksial dan tangential untuk menyerap gas CO₂. Hasil penelitian menunjukkan dalam aliran gas aksial, K_{ga} bervariasi dari $1,24 \times 10^{-3}$ hingga $4,75 \times 10^{-3}$ kmol/m³, sedangkan dalam aliran tangensial $1,77 \times 10^{-3}$ dan $6,49 \times 10^{-3}$ kmol/m³. Tingkat penyerapan CO₂ meningkat dengan menerapkan aliran tangensial pada aliran gas yaitu sekitar 31- 49%. Penelitian lainnya [9] tentang penggunaan *piperazine*, *glycine*, dan *arginine* dalam larutan MDEA-TEA pada *Wet Wall Wolumn* pada campuran gas CO₂ dan N₂. Pada suhu 303,15 K, didapatkan nilai laju absorpsi CO₂ tanpa katalis sekitar $1,67 \times 10^{-8}$ kmol/det, namun ketika ditambahkan 1% *piperazine* menjadi 5×10^{-8} kmol/det dan $8,3 \times 10^{-8}$ kmol/det pada 2% *piperazine*. Penelitian terdahulu [12], menggunakan larutan MDEA 20% dan 35,5% serta laju alir gas 1, 1,5, 1,8 l/min. Laju alir cairan 0,15 l/min dan laju alir gas 1 l/min dapat menurunkan CO₂ dari konsentrasi 40 menjadi 17%.

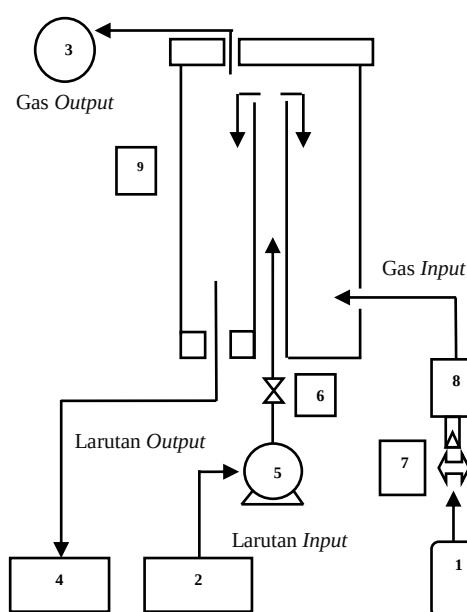
Dari penelitian yang telah dilakukan dengan metode yang berbeda, disimpulkan bahwa hasil yang didapat belum maksimal untuk mengurangi kadar CO₂. Namun karakteristik penggunaan promotor berbasis amina dalam larutan NaOH menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* masih belum pernah dilakukan. NaOH digunakan karena relatif murah serta MDEA yang lebih memiliki keunggulan dibandingkan amina lainnya. Penelitian ini menggunakan *Wetted Wall Column* untuk menentukan laju alir optimum NaOH-MDEA terhadap penyerapan CO₂ agar kandungan CH₄ yang dihasilkan

dapat berada diatas 90% serta menentukan konsentrasi promotor MDEA terbaik.

METODOLOGI

Alat dan Bahan Penelitian

Kolom absorpsi dengan diameter 4,5 cm, tinggi kolom 50 cm, sedangkan *tube* diameter 1,27 cm, tinggi *tube* 42 cm, aerator, sample bag, *flowmeter* gas, bag biogas, *beaker glass*, spatula, serta pompa. Sedangkan bahan yang digunakan adalah NaOH padat, *methyldiethanolamine* (MDEA), *aquadest* serta biogas kotoran sapi dari Desa Kediri, Kecamatan Gadingrejo, Kabupaten Pringsewu, Lampung. Rangkaian alat yang digunakan dibuat dengan sketsa seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Absorpsi CO₂

Keterangan:

1. Bag biogas *input*
2. Tangki larutan NaOH *input*
3. Sample bag biogas *output*
4. Tangki larutan NaOH *output*
5. Pompa
6. Gate valve
7. Aerator
8. Flowmeter gas
9. *Wetted Wall Column*

Pembuatan Larutan Absorben

Pembuatan larutan absorben dilakukan dengan menimbang massa NaOH 1 M padat sebanyak 40 gram dan *aquadest* sebanyak 1 liter. Kemudian NaOH dicampurkan ke dalam *aquadest* hingga homogen dan tunggu hingga campuran tersebut dingin. Kemudian ditambahkan promotor MDEA dengan variasi yaitu 4% wt dan 6% wt, lalu diaduk hingga larutan homogen dan tunggu hingga campuran dingin.

Proses Absorpsi

Rangkaian alat diset seperti pada Gambar 1. Biogas awal dianalisis kandungannya terlebih dahulu. Selanjutnya, larutan absorben yang telah disiapkan seperti NaOH dialirkan kedalam kolom absorpsi yang telah dirangkai dengan laju alir larutan dengan variasi 150, 200, 250, 300 ml/menit. Laju alir larutan dikendalikan konstan sesuai variasi yang sudah ditetapkan. Kemudian biogas diumpankan ke dalam absorber dengan laju alir gas sebesar 6 liter/menit selama 5 menit. Selama waktu proses absorpsi tersebut gas berkontak dengan lapisan *film* larutan pada *tube* kolom absorpsi. Lalu biogas ditangkap menggunakan *sample bag output* untuk dianalisis dengan *Gas Chromatography* (GC) 2014 – AT (SHIMADZU Corp 08128). Proses absorpsi diinvestigasi sama seperti prosedur penelitian menggunakan NaOH + MDEA 4% dan NaOH + MDEA 6%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Biogas Awal

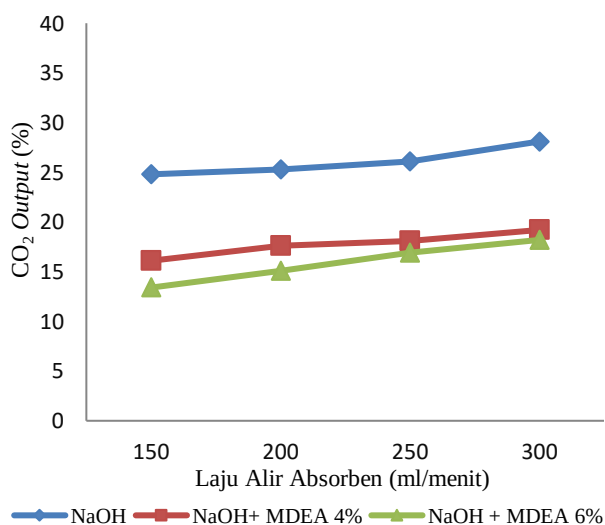
Komposisi biogas awal dianalisis dengan *Gas Chromatography* 2014 – AT (SHIMADZU Corp 08128). Dari hasil tersebut perlu dilakukan pemurnian biogas untuk mengurangi zat pengotor pada biogas.

Tabel 1. Komposisi Biogas Awal

Komponen	Komposisi (%)
Metana (CH ₄)	51
Karbondioksida (CO ₂)	32
Nitrogen (N ₂)	17

Persentase Kandungan CO₂ Output

Pengaruh laju alir larutan absorben dan konsentrasi MDEA terhadap kandungan CO₂ output ditampilkan pada Gambar 2.

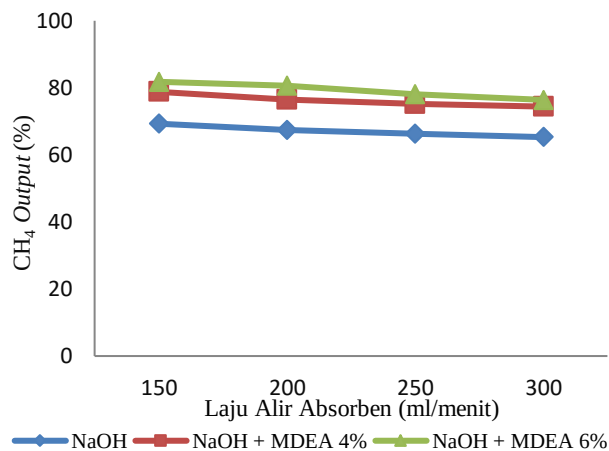


Gambar 2. Persentase CO₂ Output

Dari Gambar 2 terlihat bahwa semakin kecil laju alir larutan absorben maka semakin sedikit CO₂ output yang dihasilkan, sedangkan semakin kecil konsentrasi MDEA yang ditambahkan ke dalam larutan NaOH, maka akan semakin banyak CO₂ output yang dihasilkan. Hasil terbaik dihasilkan pada laju alir absorben 150ml/menit, sedangkan konsentrasi MDEA terbaik pada penambahan MDEA 6%. Hal ini disebabkan oleh laju alir absorben yang semakin kecil mengakibatkan waktu kontak dengan CO₂ semakin lama dan menyebabkan perpindahan massa yang terjadi semakin banyak, sedangkan dengan penambahan promotor MDEA yang berperan sebagai activator mampu membantu reaksi antara absorben dengan gas CO₂. Hal ini juga didukung penelitian sebelumnya [13] dimana pada laju alir NaOH terkecil 1L/menit menyerap CO₂ sebanyak 58,622% dan 28,685% pada laju alir NaOH 3 L/menit. Hal ini terjadi karena pada laju alir larutan NaOH yang besar, waktu kontak antara NaOH dengan CO₂ untuk jumlah molekul yang sama akan semakin kecil. Waktu kontak yang singkat ini menyebabkan transfer massa yang terjadi lebih sedikit dan jumlah CO₂ yang terserap juga lebih sedikit. Sedangkan dalam penelitian yang dilakukan sebelumnya [12] diperoleh nilai kandungan CO₂ setelah pemurnian yaitu yang semula CO₂ awal 40 % menjadi 17 % pada konsentrasi MDEA 35,31 %. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar konsentrasi promotor MDEA maka nilai laju reaksi akan semakin besar dan penyerapan CO₂ semakin besar dan sebaliknya untuk konsentrasi promotor MDEA yang lebih kecil maka nilai laju reaksi menjadi semakin kecil dan penyerapan CO₂ semakin kecil.

Persentase Kandungan CH₄ Output

Pengaruh laju alir larutan absorben dan konsentrasi MDEA terhadap kandungan CH₄ output ditampilkan pada Gambar 3.



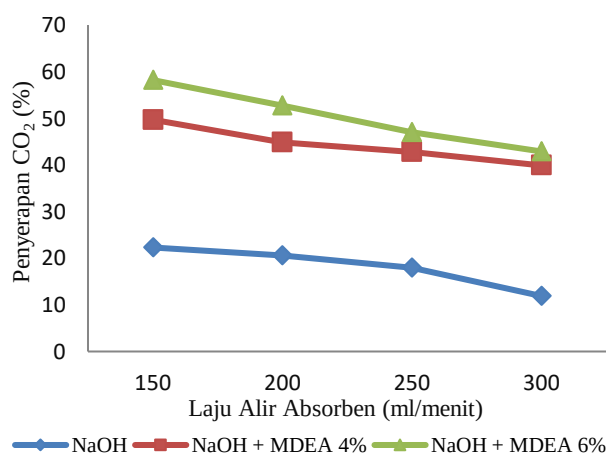
Gambar 3. Persentase CH₄ Output

Dari Gambar 3 terlihat bahwa persentase CH₄ output menurun dengan peningkatan laju alir absorben,

sedangkan persentase CH_4 output meningkat dengan semakin besar konsentrasi MDEA yang ditambahkan ke dalam larutan absorben. Berdasarkan dari Gambar 3 tersebut dapat dilihat bahwa secara keseluruhan kandungan CH_4 output yang memiliki nilai tertinggi yaitu pada absorben $\text{NaOH} + \text{MDEA}$ 6% dan laju alir absorben 150 ml/menit yaitu 81,8%. Hal ini dikarenakan peningkatan konsentrasi MDEA yang ditambahkan ke dalam larutan absorben mampu membantu laju reaksi penyerapan gas pengotor, serta laju alir absorben yang kecil menyebabkan transfer massa yang terjadi semakin besar dan menghasilkan kandungan gas pengotor CO_2 yang semakin kecil seperti yang terdapat pada Gambar 2. Sehingga dengan menurunnya kandungan gas pengotor CO_2 tersebut, kandungan CH_4 output dalam biogas semakin meningkat. Seperti penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [14] dan [12] dimana hal tersebut dikarenakan laju alir larutan yang kecil yang mempengaruhi lama waktu kontak yang terjadi antara larutan absorben dengan CO_2 , serta peran MDEA sebagai aktivator reaksi antara larutan absorben dengan kandungan gas pengotor yang terdapat pada biogas.

Pengaruh Laju Alir Absorben dan Konsentrasi MDEA terhadap Penyerapan CO_2

Pengaruh laju alir absorben dan konsentrasi MDEA terhadap penyerapan CO_2 ditampilkan pada Gambar 4.



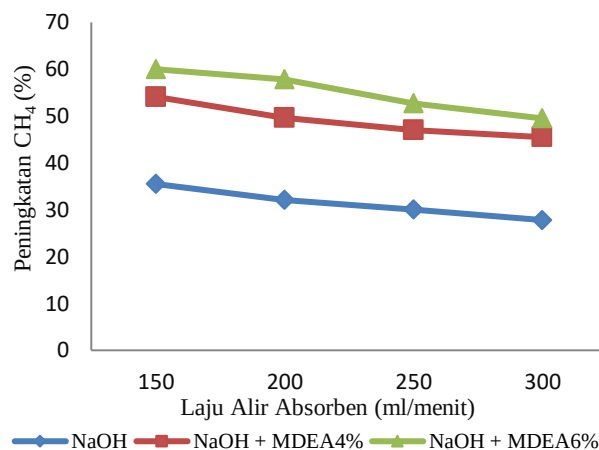
Gambar 4. Persentase Penyerapan CO_2

Gambar 4 menunjukkan bahwa penyerapan CO_2 terus mengalami peningkatan dengan semakin kecil laju alir larutan absorben, sedangkan penyerapan CO_2 mengalami penurunan dengan semakin kecil konsentrasi MDEA yang ditambahkan ke dalam absorben. Hasil terbaik yang dihasilkan yaitu 58,2% pada larutan absorben $\text{NaOH} + \text{MDEA}$ 6% dengan laju alir larutan 150 ml/menit. Hal ini terjadi karena waktu kontak yang lama akibat laju alir absorben yang kecil menyebabkan perpindahan massa CO_2 ke absorben semakin besar dan menghasilkan penyerapan CO_2 yang semakin besar juga. Semakin besar penyerapan CO_2 yang dihasilkan, maka CO_2 output akan

semakin kecil seperti pada Gambar 2. Dengan semakin kecil kandungan CO_2 output, maka CH_4 output dalam biogas akan meningkat seperti pada Gambar 3. Hasil yang diperoleh sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [10], [15] dan [12].

Pengaruh Laju Alir Absorben dan Konsentrasi MDEA terhadap Peningkatan Kadar CH_4

Pengaruh laju alir absorben dan konsentrasi MDEA terhadap peningkatan CH_4 ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Persentase Peningkatan CH_4

Gambar 5 menunjukkan hubungan laju alir absorben dan konsentrasi MDEA terhadap peningkatan CH_4 pada biogas. Dari grafik tersebut diketahui bahwa persentase peningkatan kadar CH_4 dalam biogas cenderung menurun dengan semakin besar laju alir absorben, sedangkan cenderung meningkat dengan kenaikan konsentrasi MDEA yang ditambahkan ke dalam larutan absorben. Peningkatan persentase kadar CH_4 ini dikarenakan banyaknya gas pengotor seperti CO_2 dalam biogas yang kadarnya mengalami penurunan bukan karena CH_4 ikut bereaksi dengan absorben. Seperti pada Gambar 2, terlihat bahwa kandungan CO_2 output dalam biogas semakin sedikit dengan pengaruh laju alir absorben dan konsentrasi MDEA. Hal ini yang menyebabkan peningkatan persentase kadar CH_4 dalam biogas semakin besar. Namun pada penelitian ini, tidak hanya penurunan kadar CO_2 dalam biogas yang mempengaruhi peningkatan kadar CH_4 . Penurunan kadar gas lain seperti nitrogen (N_2) juga berpengaruh. Dimana kadar N_2 pada biogas awal yaitu 16,718 %. Pada saat proses absorpsi, kadar N_2 berkurang hingga kadar N_2 terkecil pada biogas sebesar 4,80%. Berdasarkan dari Gambar 5 tersebut dapat dilihat bahwa secara keseluruhan kadar CH_4 yang diperoleh pada penelitian ini variatif, dengan nilai peningkatan kemurnian terbaik yaitu sebesar 59,961 % pada laju alir 150 mL/min $\text{NaOH} + \text{MDEA}$ 6%. Kadar CH_4 ini dapat ditingkatkan lagi dengan menjaga agar kandungan biogas input tidak terkontaminasi oleh udara

yang berasal dari lingkungan sekitar karena *human error* pada saat proses absorpsi.

Koefisien Transfer Massa Liquid

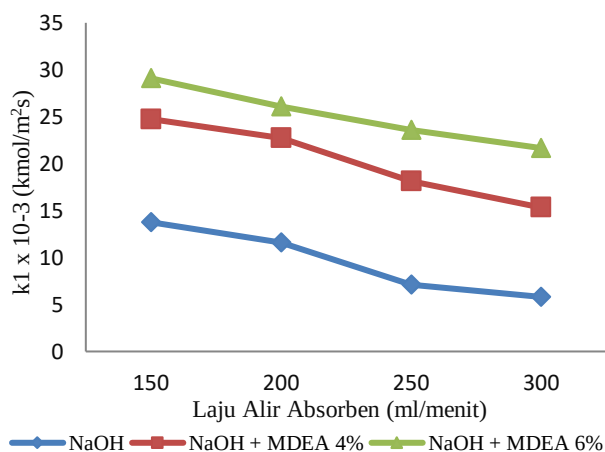
Perbedaan laju alir yang divariasikan mempengaruhi kecepatan pada permukaan *film* yang mengakibatkan

perbedaan waktu kontak pada permukaan film (τ) akan berbeda. Pada penelitian ini didapatkan jarak penetrasi antar dimensi seperti pada Tabel 2 dan koefisien transfer massa liquid pada Gambar 6.

Tabel 2. Jarak Penetrasi Antar Dimensi

Absorb	Laju Alir (ml/mnt)	Bilangan Reynold	Tebal Film (m)	Kecepatan Permukaan (m/s)	Waktu Kontak (s)	η
NaOH	150	1969,863	0,0058	1,2542	0,3587	$1,7119 \times 10^{-5}$
	200	2623,857	0,0062	1,5149	0,2970	$1,2282 \times 10^{-5}$
	250	3277,851	0,0069	1,7513	0,2569	$8,7091 \times 10^{-6}$
	300	3939,720	0,0073	2,1159	0,2126	$6,3832 \times 10^{-6}$
NaOH + MDEA 4%	150	1220,372	0,0057	0,6147	0,7320	$3,5922 \times 10^{-5}$
	200	1625,535	0,0063	0,8465	0,5316	$2,1498 \times 10^{-5}$
	250	2030,698	0,0068	1,0742	0,4189	$1,4452 \times 10^{-5}$
	300	2440,741	0,0072	1,2398	0,3629	$1,1169 \times 10^{-5}$
NaOH + MDEA 6%	150	870,345	0,0057	0,3547	1,2686	$6,2914 \times 10^{-5}$
	200	1159,298	0,0063	0,5286	0,8513	$3,4758 \times 10^{-5}$
	250	1448,253	0,0068	0,6329	0,7110	$2,5042 \times 10^{-5}$
	300	1740,687	0,0072	0,8471	0,5312	$1,6578 \times 10^{-6}$

Tabel 2 menunjukkan pengaruh laju alir absorben terhadap jarak penetrasi antar absorben dengan gas, dimana ketebalan *film* pada absorben merupakan faktor terpenting pada absorpsi di *Wetted Wall Wolumn* (WWC). Semakin tinggi laju alir absorben, ketebalan film akan semakin besar dan mengakibatkan jarak kontak antara molekul absorben didekat dinding dengan biogas semakin besar, sehingga frekuensi tumbukan antara molekul absorben dan CO₂ semakin kecil dan kontak fase antara gas dengan cairan semakin menurun. Akibatnya, jumlah perpindahan massa dari gas menuju fase cair juga semakin kecil. Gambar 6 menunjukkan hubungan laju alir absorben dengan koefisien transfer massa liquid (k_l).



Gambar 6. Koefisien transfer massa liquid

Dari Gambar 6 tersebut bahwa nilai k_l mengalami penurunan seiring dengan penambahan laju alir absorben dan menunjukkan hasil terbaik pada laju alir NaOH + MDEA 6% 150 ml/menit yaitu $29,089 \times 10^{-3}$ kmol/m².s. Hal ini dikarenakan pada laju alir 150 ml/menit memiliki ketebalan film yang tipis dan waktu kontak yang lebih lama dibandingkan laju alir yang lainnya. Sehingga mengakibatkan kontak antar absorben dan biogas lebih baik dan merata. Hasil yang diperoleh ini didukung oleh penelitian sebelumnya [14], penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi laju alir biogas dan variasi laju alir absorben terhadap pemurnian biogas. Hasil yang didapat pada penelitian tersebut menunjukkan pada laju alir terkecil yaitu 150 ml/menit memiliki nilai koefisien transfer massa liquid (k_l) terbaik yaitu $34,763 \times 10^{-4}$ kmol/m².s. Berdasarkan hasil yang didapat, pada laju alir 150 ml/menit memiliki ketebalan film yang tipis dan waktu kontak yang lebih lama dibandingkan dengan laju alir lainnya. Sehingga mengakibatkan kontak antar absorben dengan biogas lebih baik dan merata. Semakin besar laju alir absorben, maka ketebalan film akan semakin besar, hal ini akan berpengaruh terhadap waktu kontak biogas dengan absorben yang lebih lama.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin kecil laju alir absorben maka semakin tinggi penyerapan CO₂. Laju alir optimum absorben NaOH-MDEA sebesar 150 ml/menit. Sedangkan semakin tinggi

konsentrasi MDEA pada larutan absorben, maka semakin tinggi penyerapan CO₂. Konsentrasi MDEA terbaik pada penyerapan CO₂ yaitu dengan penambahan MDEA 6% ke dalam larutan absorben. Pada penelitian ini dihasilkan persentase penyerapan CO₂ terbaik sebesar 58,158%, dan CH₄ output terbaik sebesar 81,8%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Republik Indonesia. Undang Undang No 5 Tahun 2006 Tentang Energi Nasional”.
- [2] M. Dienullah, H. Sakke Tira, and Y. Allo Padang, “Pemurnian Biogas dengan Sistem Berlapis menggunakan Fe₂O₃, Zeolit Sintetik dan Zeolit Alam,” *POROS*, vol. 15, pp. 1–8, May 2017, doi: <https://doi.org/10.24912/poros.v15i1.1249>.
- [3] M. Das Ghatak and P. Mahanta, “Biogas Purification using Chemical Absorption,” *Int J Eng Technol*, vol. 8, no. 3, pp. 1–6, 2016.
- [4] M. C. Santoso, I. A. D. Giriantari, and W. G. Ariastina, “Studi Pemamfaatan Kotoran Ternak untuk Pembangkit Listrik Tenaga Biogas di Bali,” *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 4, pp. 1–8, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2019.v06.i04.p9>.
- [5] T. Mulya Gantina and D. Farhani, “Penurunan CO₂ Biogas dengan Metoda Adsorpsi Menggunakan Zeolit Alam,” *Jurnal Teknik Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 1–4, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.35313/energi.v10i1.2328>.
- [6] B. Susilo, S. Rosalia Dewi, G. Djoyowasito, and N. Simanjuntak, “Rancang Bangun Sistem Pemurnian Biogas Menggunakan Metode Biofiksasi-Adsorpsi oleh Mikroalga *Chlorella Vulgaris* dan Karbon Aktif,” *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 5, no. 1, pp. 27–34, 2017.
- [7] Y. Zhao, G. Guo, S. Sun, C. Hu, and J. Liu, “Co-pelletization of microalgae and fungi for efficient nutrient purification and biogas upgrading,” *Bioresour Technol*, vol. 289, p. 121656, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.BIORTECH.2019.121656](https://doi.org/10.1016/j.BIORTECH.2019.121656).
- [8] E. Ningsih, A. Sato, M. Alfian Nafiuddin, and W. Setyo Putranto, “Total Volumetric Mass Transfer Coefficient at CO₂ Gas Absorption using K₂CO₃ by MSG,” *Konversi*, vol. 7, no. 1, pp. 6–9, 2018.
- [9] Donsius and A. Fuadi, “Final Project TK141581 Study of CO₂ Absorption in MDEA – TEA Solution with PZ Catalyst,” Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [10] S. Ardhiyany, “Proses Absorpsi Gas CO₂ dalam Biogas Menggunakan Alat Absorber Tipe Packing dengan Analisa Pengaruh Laju Alir Absorben NaOH,” *Jurnal Teknik Patra Akademika*, vol. 09, no. 02, pp. 55–64, Dec. 2018, doi: <https://doi.org/10.52506/jtpa.v9i02.78>.
- [11] K. H. Javed, T. Mahmud, and E. Purba, “The CO₂ capture performance of a high-intensity vortex spray scrubber,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 162, no. 2, pp. 448–456, Aug. 2010, doi: [10.1016/j.cej.2010.03.038](https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.038).
- [12] S. S. Ningrum, A. Mindaryani, M. Hidayat, and S. Wahyu, “Pemodelan Matematis Dan Penyelesaian Numeris Pada Absorpsi CO₂ Dalam Biogas Menggunakan Kolom Bahan Isian Dengan Larutan Methyldiethanolamine (MDEA),” *J Teknol*, vol. 7, no. 1, pp. 26–39, Nov. 2019, doi: [10.31479/JTEK.V7I1.41](https://doi.org/10.31479/JTEK.V7I1.41).
- [13] R. Robiah *et al.*, “Kajian Pengaruh Laju Alir NaOH dan Waktu Kontak Absorpsi Gas CO₂ Menggunakan Alat Absorber Tipe Sieve Tray,” *Jurnal Distilasi*, vol. 6, no. 2, pp. 27–35, Oct. 2021, doi: [10.32502/JD.V6I2.4136](https://doi.org/10.32502/JD.V6I2.4136).
- [14] I. M. Isya and E. Purba, “Absorpsi Gas Karbondioksida Dalam Biogas Dengan Variasi Laju Alir Biogas dan Laju Alir Absorben,” *Jurnal Teknologi dan Inovasi Industri (JTII)*, vol. 4, no. 1, May 2023, doi: [10.23960/JTII.V4I1.58](https://doi.org/10.23960/JTII.V4I1.58).
- [15] F. I. Dinul, H. Nurdin, D. Rahmadiawan, Nasruddin, I. A. Laghari, and T. Elshaarani, “Comparison of NaOH and Na₂CO₃ as absorbents for CO₂ absorption in carbon capture and storage technology,” *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, vol. 2, no. 1, pp. 28–34, 2023, doi: <https://doi.org/10.58712/jerel.v2i1.23>.