



## SIMULASI ALIRAN FLUIDA PADA PROSES PENYERAPAN CO<sub>2</sub> DENGAN ADSORBENT BATU APUNG METODE CFD

Mutia Reza<sup>1,\*</sup>, Muhammad Bagus Saputra Ramadhan<sup>1</sup>, Novi Sylvia<sup>2</sup>,  
Yunardi<sup>3</sup>

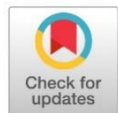
<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, 76127, Indonesia.

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe,  
24351, Indonesia.

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, 23111,  
Indonesia.

Korespondensi: HP: 081350459767, e-mail: [mutia.reza@lecturer.itk.ac.id](mailto:mutia.reza@lecturer.itk.ac.id)

Received: 10 November 2024; Revised: 18 November 2024; Accepted: 25 November  
2024; Available online: 30 November 2024; Published regularly: November 2024



### Abstrak

Emisi gas alam yang dihasilkan industri minyak dan gas, menyebabkan pemanasan global. CO<sub>2</sub> yang terkandung dalam reservoir gas alam dapat menurunkan kualitas gas dan menyebabkan masalah teknis, seperti korosi dan penyumbatan pada pipa. Proses adsorpsi menggunakan batu apung sebagai adsorben dipelajari untuk mengoptimalkan penyerapan CO<sub>2</sub> dengan metode CFD. Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh laju alir terhadap tinggi kolom adsorpsi menggunakan computational fluid dynamics (CFD) dengan perangkat lunak Ansys 2022 R1. Studi dimodelkan seperti kolom adsorpsi sederhana berbentuk silinder dengan isian packing batu apung sebagai adsorben. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui persen penyerapan terhadap variasi tinggi unggun yaitu 10 cm, 12 cm, 14 cm. Hasil menunjukkan bahwa pada tinggi unggun 14 cm menunjukkan persen penyerapan tertinggi disebabkan karena kontak antar CO<sub>2</sub> dengan adsorben lebih lama sehingga luas permukaan lebih besar pada temperatur yang sama.

**Kata kunci:** Adsorpsi, batu apung, adsorben, CFD, persen penyerapan

<https://doi.org/10.29103/jtku.v13i2.19556>

### 1. Pendahuluan

Pembakaran bahan bakar fosil, seperti gas alam, batu bara, dan minyak, telah menjadi sumber utama emisi gas rumah kaca yang berkontribusi signifikan terhadap perubahan iklim dan pemanasan global. Emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dari bahan bakar fosil tidak hanya meningkatkan suhu global, tetapi juga memicu



masalah lingkungan lain seperti hujan asam dan pengasaman laut, yang berdampak negatif pada ekosistem dan kesehatan manusia (Perera, dkk., 2019; Zhang, dkk., 2020; Eldesouki, dkk., 2022). Pada tahun 2024, diperkirakan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer akan meningkat hingga empat kali lipat dari tingkat pra-industri, yang menyebabkan peningkatan suhu global hingga 3,7°C pada 2090-an (Organization, 2015). Tantangan besar ini menuntut solusi yang dapat menekan emisi gas rumah kaca secara efektif di berbagai sektor.

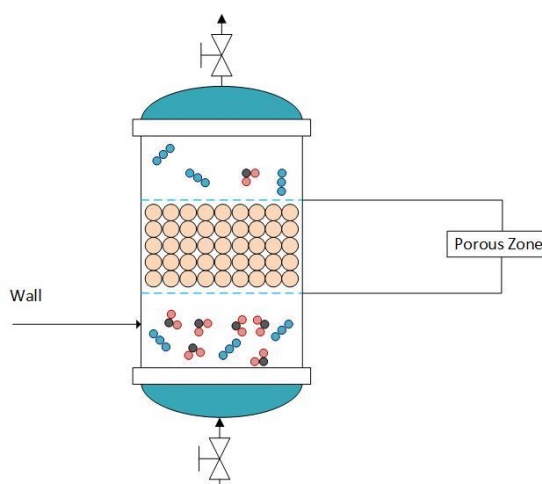
Gas alam (NG) dianggap sebagai bahan bakar fosil yang paling bersih dibandingkan batu bara dan minyak, namun tetap berperan dalam peningkatan emisi CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> yang terkandung dalam reservoir gas alam dapat menurunkan kualitas gas dan menyebabkan masalah teknis, seperti korosi dan penyumbatan pada pipa (Faramawy, dkk., 2016; JJ Carroll, 2016). Salah satu metode yang menjanjikan untuk menangani masalah ini adalah proses adsorpsi, di mana gas CO<sub>2</sub> diserap oleh material padatan yang disebut sebagai adsorben. Teknologi ini sangat bergantung pada pengembangan material adsorben yang memiliki kapasitas penyerapan tinggi dan stabilitas kimia yang baik, serta dapat dioptimalkan melalui desain proses yang tepat (Mokhatab dkk., 2016; Ma Y, dkk., 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan mensimulasikan aliran fluida dalam sistem adsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan batu apung sebagai adsorben. Dengan menggunakan metode CFD, penelitian ini akan mengkaji pengaruh variasi laju alir dan tinggi bed terhadap efisiensi penyerapan CO<sub>2</sub>. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengoptimalkan proses penyerapan CO<sub>2</sub>, mengembangkan material adsorben ramah lingkungan, serta berkontribusi pada inovasi teknologi penangkapan karbon. Adsorben yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu apung karena karakteristiknya yang cenderung menangkap CO<sub>2</sub>.

## **2. Bahan dan Metode**

### **2.1 Model Geometri**

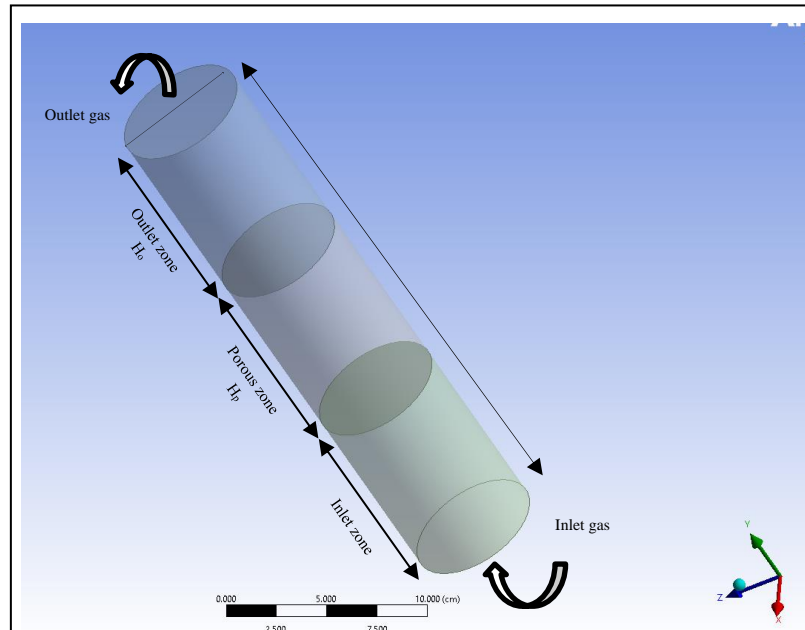
Model geometri 3-D untuk simulasi dalam penelitian ini dibuat dengan menggunakan pemodelan desain melalui aplikasi ANSYS Fluent. Model ini digunakan untuk merepresentasikan kolom *packed-bed* dengan tujuan menganalisis perilaku dinamis dari proses adsorpsi. Dimensi dan geometri kolom terlihat pada Tabel 1 dan Gambar 2 dengan diameter 64 mm, tinggi 300 mm dan diameter partikel 0.88  $\mu\text{m}$ . Ilustrasi kolom adsorpsi terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Ilustrasi Kolom Adsorpsi

**Tabel 1.** Dimensi Kolom Adsorpsi

Dimensi	Ukuran (mm)
Diameter Kolom, D	64
Tinggi Kolom, H	300
Tinggi area poros, $h_p$	100
Tinggi area pemasukan, $h_i$	100
Tinggi area keluaran, $h_o$	100



## 2.2 Model Matematika

Dinamika proses dari kolom adsorpsi dapat dimodelkan dan diinterpretasikan menggunakan model CFD yang terintegrasi. Untuk merumuskan model adsorpsi umum yang sesuai dengan mekanisme adsorpsi, dapat dibuat asumsi-asumsi berikut:

- Perpindahan panas dapat diabaikan (konstan).
- Porositas dianggap sama dan konstan.
- Persamaan yang digunakan dalam kolom adsorpsi adalah persamaan kontinuitas.
- Koefisien perpindahan massa disetarakan dengan resistansi film fluida eksternal dan difusi melalui makropori.

(Chen Q, dkk., 2019)

### 2.2.1 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas dapat dinotasikan seperti Persamaan 1:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

(Nouh, dkk., 2010)

Dimana,

$$S_m = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \rho_p \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad (2)$$

$\partial q_i / \partial t$  didefinisikan sebagai laju spesies adsorpsi/desorpsi

### 2.2.2 Model Aliran Turbulen k- $\omega$

Dalam simulasi aliran fluida k- $\omega$  adalah model aliran turbulen yang umum yang digunakan untuk memperkirakan Persamaan Reynolds-Navier Stokes (Wilcox D. C., 2008). Kelebihan model ini dari model k- $\omega$  adalah lebih stabil, terutama pada versi Reynold number rendahnya, yang cenderung menghasilkan solusi konvergen lebih efisien. Adapun persamaan turbulen k- $\omega$  seperti berikut:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \text{ dengan } P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha \omega}{k} \rho P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

### 2.2.3 Persamaan Momentum

Keseimbangan momentum dalam studi ini merujuk pada persamaan momentum umum untuk media berpori menggunakan persamaan Hukum Darcy, di mana  $\vec{v}$  adalah vektor kecepatan ( $\text{ms}^{-1}$ ),  $\rho$  adalah densitas gas,  $P$  adalah tekanan operasi (Pa),  $\tau$  adalah tensor tegangan ( $\text{Nm}^{-2}$ ),  $\vec{g}$  adalah vektor percepatan gravitasi, dan  $S$  adalah sumber momentum dalam media berpori dalam satuan ( $\text{Nm}^{-3}$ ) (Zulkifli, M. Z. A., 2021)

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + S \quad (5)$$

Pengurangan momentum berkontribusi terhadap gradien tekanan pada sel berpori. Hal ini menghasilkan penurunan tekanan yang sebanding dengan kecepatan fluida di dalam sel. Pada media berpori homogen,  $S_i$  dapat dituliskan sebagai:

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} \mu_i + C_2 \left( \frac{1}{2} \rho u_i |u_i| \right) \quad (5)$$

(Mirzaie, M, dkk.,2020):

Dimana,

$$C_2 = \frac{1.75 (1 - \varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150 (1 - \varepsilon)^3} \quad (7)$$

$C_2$  merupakan resistansi inersia sedangkan  $\alpha$  adalah resistansi viskositas, yang dihitung dengan Persamaan 6 dan 7. Persentase penyerapan sapat ditentukan menggunakan Persamaan 8:

$$\% \text{ removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \quad (8)$$

(Sylvia, dkk., 2024)

Pada persamaan (8)  $C_0$  dan  $C_e$  masing-masing merujuk pada konsentrasi sebelum dan sesudah proses.

#### 2.2.4 Kondisi Batas

Model yang diterapkan dalam penelitian ini untuk mensimulasikan adsorpsi  $\text{CO}_2$  dalam kolom adsorpsi. Selama proses adsorpsi, campuran gas mengalir melalui kolom yang berisi media berpori, dan  $\text{CO}_2$  terikat pada adsorben (Norani A, dkk., 2019). Adsorben yang digunakan dalam studi ini adalah batu apung. Komposisi campuran gas yang masuk terdiri dari  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , dan  $\text{C}_2\text{H}_4$  dengan beberapa variasi tinggi unggun seperti yang terlihat di Tabel 2. Fraksi massa dari  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  berturut-turut ialah 50%, 30%, 20%. Sistem beroperasi pada tekanan 1,2 atm dan temperatur 318 K. Spesifikasi detail dari variabel laju alir serta tinggi unggun dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

**Tabel 2.** Pengaturan kondisi batas proses penyerapan

Kondisi Operasi	Nilai
Laju alir masuk	25 cm <sup>3</sup> /min
Tinggi unggun	10 cm, 12 cm, 14 cm
Komposisi gas masuk	50% CO <sub>2</sub> ; 30% CH <sub>4</sub> ; 20% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Tinggi kolom	30 cm
Porositas	0.56
Diameter partikel	0.88 μm
Turbulen intensity	5%
Hydraulic diameter	0.064 m
Suhu	318 K

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1 Validasi Kecenderungan Penyerapan Terhadap CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

Analisa neraca massa dilakukan untuk mengetahui seberapa banyak CO<sub>2</sub> yang terserap jika dibandingkan dengan komponen lainnya. Terlihat pada Tabel 3 fraksi CO<sub>2</sub> paling tinggi jika dibandingkan dengan komponen lainnya yakni sebesar 92%. Hal ini menunjukkan bahwa adsorben batu apung memiliki karakteristik untuk cenderung menyerap CO<sub>2</sub> karena karakteristik nya seperti struktur pori yang tinggi dan permukaan yang luas.

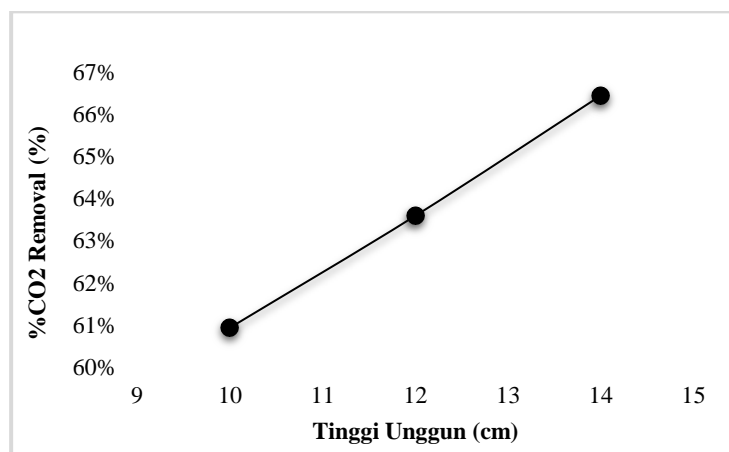
**Tabel 3.** Neraca Massa Penyerapan  
Neraca Massa Adsorber

	Input		Output			
	Gross gas		Porous		Lean gas	
	x	m (kg/s)	x	m (kg/s)	x	m (kg/s)
CH <sub>4</sub>	0.20	1.34E-08	0.03	9.06E-11	0.19	1.33E-08
CO <sub>2</sub>	0.50	3.59E-08	0.92	3.03E-09	0.48	3.28E-08
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.30	2.28E-08	0.05	1.71E-10	0.33	2.26E-08
Total	1.00	7.21E-08	1.00	3.30E-09	1	6.88E-08

#### 3.2 Pengaruh Tinggi Bed Terhadap Persen Penyerapan CO<sub>2</sub>

Hasil simulasi dan interpretasi data dapat dilihat pada Gambar 3 bahwa tinggi unggun akan meningkatkan persen penyerapan CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan dan jumlah situs aktif yang lebih besar seiring dengan tinggi unggun. Luas permukaan yang lebih besar memungkinkan lebih banyak interaksi

antara gas CO<sub>2</sub> dan material adsorben, sehingga meningkatkan potensi penyerapan. Selain itu, unggun yang lebih tinggi memungkinkan distribusi partikel adsorben yang lebih besar, sehingga memaksimalkan kontak antara fase gas dan padat sepanjang kolom adsorpsi yang akan mempengaruhi laju aliran yang melambat (Sylvia, dkk., 2024). Unggun yang lebih tinggi memiliki jumlah partikel adsorben yang lebih banyak, sehingga memungkinkan kontak yang lebih intensif antara fase padat dan gas CO<sub>2</sub> ketika gas tersebut mengalir melalui kolom. Hasil studi menunjukkan pada laju aliran 25 cm<sup>3</sup>/min didapatkan nilai persen penyerapan tertinggi pada tinggi unggun 14 cm sebanyak 66%, sedangkan yang terendah berada pada tinggi unggun 10 cm sebanyak 61%.



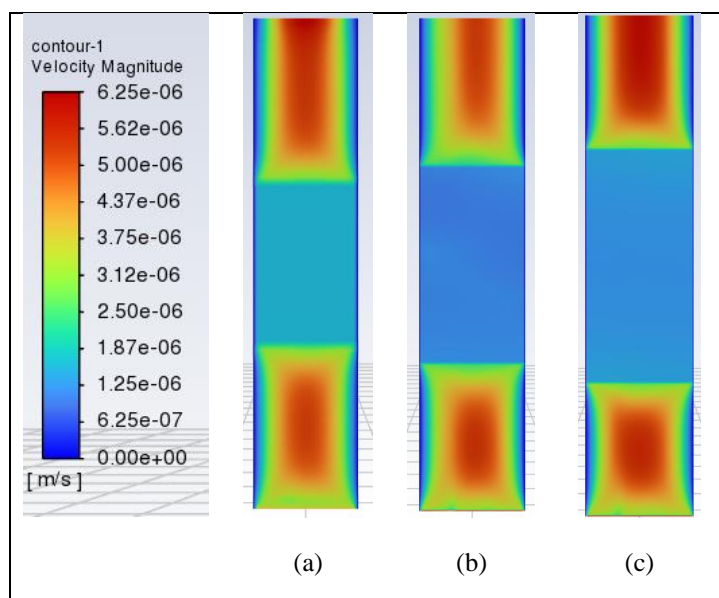
**Gambar 3.** Pengaruh Tinggi Unggun Terhadap Persentase Penyerapan CO<sub>2</sub>

### 3.3 Kontur Kecepatan Aliran CO<sub>2</sub>

Ketinggian unggun adalah salah satu hal yang berpengaruh terhadap persentase absorpsi. Berdasarkan teori, semakin besar tinggi unggun maka tingkat penyerapan akan meningkat. Hal ini dikarenakan jumlah adsorben yang semakin bertambah sehingga telah terisi penuh mengakibatkan semakin banyak kontak antara gas dan adsorben yang terjadi. Kontur kecepatan aliran pada Gambar 4 memperlihatkan adanya perbedaan warna yang menggambarkan ukuran kecepatan aliran di kolom adsorpsi. Warna merah mengidentifikasi bahwa semakin tinggi kecepatannya. Hasil menunjukkan semakin tinggi unggun akan



menurunkan kecepatan aliran, yang didampingi oleh peningkatan resistansi aliran untuk lebih menyerap CO<sub>2</sub> dan tertahan di permukaan adsorben (Sylvia, dkk., 2019).



**Gambar 4.** Kontur Kecepatan Aliran (a) Tinggi Unggun 10 cm, (b) Tinggi Unggun 12cm, (c) Tinggi Unggun 14cm

#### 4. Simpulan dan Saran

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik batu apung cenderung menyerap CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan dengan gas lainnya melalui validasi dengan analisa neraca massa. Persen penyerapan tertinggi dihasilkan pada tinggi unggun 14 cm dan terendah 10 cm sebanyak 61 % dan 66%. Kontur aliran menunjukkan jika semakin merah gradasi warnanya maka kecepatan semakin tinggi, pada sisi tengah media berpori aliran cenderung melambat karena melewati rongga pori-pori batuan.

#### 5. Daftar Pustaka

1. Amna, R., Ali. K, Alhassan, S. M (2023), Computational fluid dynamics analysis of mercury adsorption by inverse-vulcanized porous sulfur copolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (Vol. 62, No. 31), 12277-12290.

2. Carroll, J.J (2010), Acid gas injection and carbon dioxide sequestration. *John Wiley & Sons*.
3. Chen, Q., Rosner. F, Rao. A, dkk (2019), Simulation of elevated temperature solid sorbent CO<sub>2</sub> capture for pre-combustion applications using computational fluid dynamics. *Appl energy* 237: 314-325.
4. Eldesouki, M., Abo-Shanab Z.L, El-Shafie M, Abo-Riya M, ElKholy, S.A. (2022), Fabrication and evaluation of novel sulfur/ epoxy resin composites. *PolymBull*.
5. Faramawy, S., Zaki. T, Sakr. A.E (2016), Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54.
6. Mirzaie, M., Talebizadeh. A.R, Hashemipour. H (2020), CFD simulation of benzene adsorption on pistachio activated carbon porous media. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 14.
7. Mokhatab, S., Poe. W.A, Mak. J.Y (2018), Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices. *Gulf professional publishing*.
8. Norani, A.A., Ahmad. A, Oladokun. O, Adrian. L.I, Kavetha. A (2019), CFD study on the effects of different temperatures and feed velocities for CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> adsorption using 5A molecular sieve. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 90, p. 02006). EDP Sciences.
9. Nouh,S., Lau. K.K, Shariff. A.M (2010), Modeling and simulation of fixed bed adsorption column using integrated CFD approach. *J Appl Sci* 24: 3229-3235.
10. Organization, World Health (2015), Climate and health country profiles 2015: a global Overview.
11. Perera, F (2018), Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: solutions exist. *Int J Environ Res*
12. Sylvia, N., Mutia. R, Dewi. R, dkk (2019), A computational fluid dynamic comparative study on CO<sub>2</sub> adsorption performance using activated carbon and zeolite in a fixed bed reactor. *IOP ConfSer Mater Sci Eng* 536: 012042.

13. Sylvia, N., Tarigan. A.S, Dewi. R, Yunardi. Y, Bindar. Y, Reza. M (2024), A simulation study of CO<sub>2</sub> gas adsorption with bottom ash adsorbent from palm oil mill waste using computational fluid dynamic (CFD). *AIMS Environmental Science*, (Vol. 11, No. 3), 444-456.
14. Wilcox. D.C (2008), Formulation of the kw turbulence model revisited. *AIAA journal*, (Vol. 46, No. 11), 2823-2838.
15. Zhang. Y., Ran. Z, Jin. B, Zhang. Y, Zhou. C, Sher. F (2019), Simulation of particle mixing and separation in multi-component fluidized bed using Eulerian- Eulerian method: a review. *Int J Chem Reactor Eng* 17:20190064.
16. Zulkifli, M.Z.A., Mukhtar. A, Fadli. M.F.M, Bahari. A.M.S, Matsumoto. A, Misran. H (2021), CFD Simulation of CO<sub>2</sub> and Methane Adsorption at Various Temperature for MOF-5 using Dual-site and Single-site Langmuir Model. *CFD Letters*, (Vol. 13, No. 10), 1-10.