



# Implemenstasi Pemodelan Matematika, Simulasi dan Metode Optimasi untuk Peningkatkan Biogas dengan Penekanan pada Proses Berbasis Adsorpsi

\*Firman Benadetha<sup>1</sup>, Christin Pangaribuan<sup>2</sup>, Indra Fernando<sup>3</sup>

<sup>\*1</sup>, Teknik Mesin, Universitas Indoneia, Jakarta, Indonesia

<sup>2,3</sup> Teknik Mesin, Universitas Sebelas Maret, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received Mei 10, 2024

Revised Jun 25, 2024

Accepted Jun 30, 2024

### Keywords:

Biogas upgrading

Adsorption

Separation

Mathematical

Modeling

Process simulation

Optimization

## ABSTRACT

The high thermal conductivity and wear resistance of CVD diamond provide potential for the machining of Ti-6Al-4V. By predicting thermomechanical loads, simulations can provide information about the usability of these cutting materials. However, the occurring shear chip formation with the cutting process leads to unsteady contact conditions. Therefore, a computationally intensive long-term transient simulation is necessary for precise prediction of tool temperatures. In this respect, a user-subroutine has been developed, allowing a high-resolution long-term simulation with acceptable computing time. By experimental investigations and validation of simulated results, a modelling of temperature distribution within the cutting tool is possible, providing valuable information regarding the contact temperatures.

*This is an open access article under the CC BY-NC license.*



### Corresponding Author:

Firman Benadetha,

Teknik Mesin,

Universitas Indonesia,

Indonesia,

Email: [Firman22@gmail.com](mailto:Firman22@gmail.com)

## PENDAHULUAN

Biogas terutama disebut sebagai gas yang dihasilkan dari beragam bahan berbasis organik. Sementara termomekanis adalah metode umum untuk gasifikasi langsung atau pirolisis biomassa, fermentasi dan pencernaan anaerobik adalah proses yang biasa digunakan untuk konversi limbah biomassa menjadi biogas. Kotoran, lumpur (misalnya, swage, aktivasi yang diperkaya dengan nitrifikasi), residu kota, biodegradable dan bahan baku pertanian, atau campuran yang diformulasikan darinya adalah beberapa contoh yang menonjol dari limbah khas yang digunakan sebagai umpan untuk proses tersebut [1]. Pentingnya biogas karena adanya metana (CH<sub>4</sub>) sebagai sumber energi alternatif. CH<sub>4</sub> yang diekstraksi dari biogas mentah, sering disebut sebagai biometana, menunjukkan beberapa aspek dan hasil tertentu.

Kontribusi limbah terhadap pemanasan global melalui dekomposisi alami menjadi emisi gas berbahaya sangat besar [1]. Hal ini lebih buruk mengingat dampak negatif CH<sub>4</sub> setidaknya 80 kali lipat dari karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam jangka waktu 20 tahun [2]. Oleh karena itu, eksploitasi nilai-nilai yang diwariskan dalam limbah melalui konversi menjadi biogas dan kemudian ekstraksi biometana darinya merupakan peluang manfaat ganda dalam hal memanen energi dan pada saat yang sama menyelamatkan planet ini dengan minimalisasi limbah

Pada dasarnya komposisi biogas mentah sangat bervariasi tergantung pada jenis dan sumber limbah serta sifat dan jumlah bahan tambahan seperti pupuk kandang yang ditambahkan untuk penyesuaian formulasi. Namun demikian, hampir selalu  $CH_4$  dan  $CO_2$  merupakan komponen utama dari biogas. Kotoran yang tersisa dapat meliputi: hidrogen sulfida ( $H_2S$ ), nitrogen ( $N_2$ ), karbon monoksida ( $CO$ ), oksigen ( $O_2$ ), amonia ( $NH_3$ ), hidrogen ( $H_2$ ) dan uap air ( $H_2O$ ) [4]. Sementara persyaratan penting untuk kualitas biometana yang ditingkatkan didasarkan pada penghilangan pengotor utama seperti gas asam, telah ditemukan bahwa pengotor lainnya juga dapat dihilangkan sebagian selama proses berlangsung. Pada dasarnya, teknologi yang sudah mapan untuk aplikasi pemisahan gas umum juga dapat diterapkan untuk peningkatan biogas; meskipun tingkat efisiensi dan kinerja dapat bervariasi [5]. Pemilihan proses terbaik dan konfigurasi terperinci diatur oleh faktor-faktor yang menonjol terutama spesifikasi umpan biogas mentah dan produk biometana, aplikasi yang diinginkan, ekonomi proyek dan efisiensi energi, di samping yang lain [6]. Dalam hal ini, optimalisasi proses, dan efisiensi dalam peningkatan biogas dilakukan dengan penerapan metode Pressure swing adsorpsi (PSA) dan vacuum pressure swing adsorpsi (VPSA) skala [7].

## METODOLOGI PENELITIAN

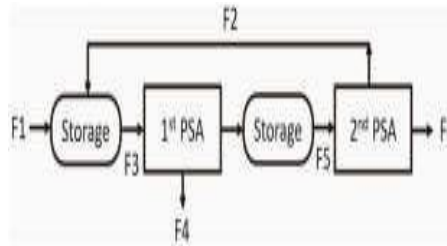
Pemodelan dan simulasi matematika dapat digunakan secara efektif untuk investigasi dan optimalisasi pengaruh parameter operasional pada kinerja proses [8]. Berdasarkan survei berbagai laporan, pemodelan matematika dan simulasi proses adsorpsi untuk peningkatan biogas banyak digunakan untuk mendapatkan wawasan tentang faktor-faktor dasar yang berperan dalam proses seperti jumlah kolom/bed, jumlah dan durasi langkah siklus, daur ulang aliran serta konfigurasi keseluruhan. Kerangka pemodelan umum untuk pemodelan pemisahan gas dalam unit PSA multi-bed. Dalam kerangka yang diusulkan, Pemulihan hidrogen digunakan untuk validasi model dan prediksi model mendekati hasil eksperimen. Selain itu, kerangka ini mampu untuk analisis pengaruh parameter operasional pada spesifikasi produk serta untuk menilai keekonomian proses. PSA beroperasi dalam mode siklik yang terdiri dari banyak kolom dan oleh karena itu dinamika proses dapat berbeda dari satu langkah siklus ke langkah lainnya. Untuk menggambarkan proses adsorpsi non-isotermal, Bitzer [9] memodelkan setiap unggun tetap sebagai sistem parameter terdistribusi nonlinier dan kemudian menggunakan umpan maju nonlinier dan skema umpan balik linier untuk mengontrol parameter proses seperti kemurnian produk.

Pemodelan dan simulasi PSA untuk peningkatan biogas sejauh ini berkaitan dengan desain, analisis, prediksi kinerja, dan optimalisasi proses dengan mencakup topik-topik berikut:

- a. Kemurnian produk, pemulihan dan kerugian
- b. Kualitas aliran produk sampingan/limbah
- c. Efisiensi dan produktivitas keseluruhan dan unit
- d. Ekuilibrium versus selektivitas kinetik
- e. (Spesifik) konsumsi energi
- f. Nomor, jenis dan urutan kolom, langkah dan siklus
- g. Konfigurasi tunggal versus multi-tahap/langkah
- h. Pertimbangan aliran daur ulang dan pembersihan
- i. Analisis sensitivitas dengan mempertimbangkan variabel proses dan kriteria kinerja
- j. Peran dan pentingnya jenis adsorben, karakteristik dan kriteria pemilihan
- k. Pengaruh parameter operasional; seperti komposisi gas umpan dan pengotor, waktu umpan, ukuran dan pemuatan adsorben, rasio pembersihan terhadap umpan (P/F), tekanan dan riwayat adsorpsi dan desorpsi, panjang zona transfer massa (MTZ), dll.

Berikut skema konfigurasi proses yang diusulkan dan kondisi operasional yang sesuai dan hasil kinerja untuk peningkatan biogas dalam unit PSA menggunakan zeolit 5 A.





Gambar 1. Skema konfigurasi proses yang diusulkan

Aspek kunci dari penyelidikan ini dibahas dalam beberapa bagian berikut.

Tabel 2 . Spesifikasi berbagai proses PSA dan data terkait yang digunakan untuk pemodelan dan simulasi peningkatan biogas.

Spesifikasi Proses		Pemodelan dan Simulasi Data	
Parameter	Keterangan	Parameter	Eksresi Matematika
Pasangan Gas	CO <sub>2</sub> / CH <sub>4</sub>	Neraca massa dalam fase gas	
Mekanisme Adsorpsi	Pemisahan kesetimbangan	Neraca massa total	$\frac{1}{\frac{D_1 + c_1 D_2}{D_1 + c_1} + \frac{D_2 + c_2 D_1}{D_2 + c_2}}$
Adsorben	Zeolit 13x	Neraca energi un tuk fase padat dan gas	$\frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} = \frac{D_1 D_2 (c_1 + c_2)}{D_1 + c_1 D_2} - \frac{D_2 (c_1 + c_2)}{D_2 + c_2 D_1} - (1 - \frac{D_1}{D_2}) (c_1 - c_2)$
Jumlah Kolom	4 kolom dalam 2 unit PSA	Persamaan LDF un tuk laju adsorpsi	$\frac{dQ}{dt} = K_a (C - Q) X_a = \frac{150 Q}{c_1^2} - \frac{175(1 - c_1) Q}{c_1^2}$
Tipe Isoterm	Langmuir multi-komponen	Isoterm adsorpsi Langmuir	
Jenis Siklus : Kebiasaan Langkah Siklus : 6 Langkah Produk Kriteria kinerja : kemurnian CH <sub>4</sub> , kemurnian CO <sub>2</sub> ; pemulihan CH <sub>4</sub> , Konsumsi energi		Jumlah Kolom: Kolom tunggal Tipe Isoterm: Langmuir-Freundlich multi-komponen Jenis Siklus: Skarstrom klasik Langkah Siklus: 4 Langkah Kriteria kinerja: Kemurnian CO <sub>2</sub> dan CH <sub>4</sub> , Produktifitas	

## HASIL PENELITIAN

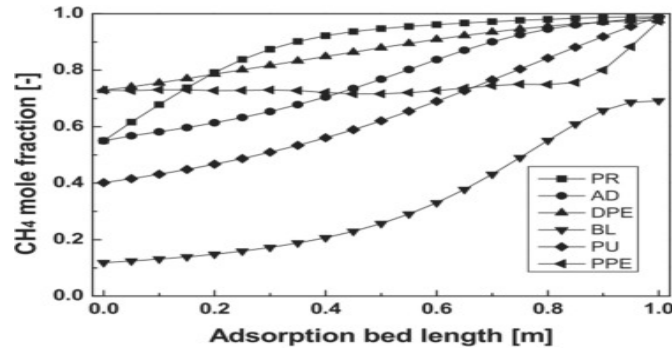
VPSA adalah proses yang terdiri dari fitur menguntungkan PSA dan VSA, yaitu tekanan adsorpsi tinggi serta blowdown yang dibantu vakum. Kombinasi dari manfaat ini mengarah pada peningkatan kemurnian produk meskipun dengan mengorbankan pemulihan produk yang berkurang. Dibandingkan dengan PSA, VPSA menikmati fitur yang menarik terutama efisiensi regenerasi adsorben yang lebih tinggi dan hasil produk yang tinggi [11]. Penerapan vakum pada langkah regenerasi bermanfaat untuk mencapai kemurnian produk yang lebih tinggi. Keuntungan lain dari proses VPSA adalah bahwa blower dengan modal dan perawatan yang lebih sedikit digunakan dengan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan dengan kompresor di unit PSA. Oleh karena itu, karena pengoperasian pada tekanan rendah, biaya yang terkait dengan peralatan proses juga lebih kecil daripada PSA.

Meskipun sejumlah besar studi penelitian eksperimental tentang penggunaan VPSA untuk peningkatan biogas, sedikit perhatian diberikan pada pemodelan matematika dan aspek simulasi. Di antara tantangan yang ada dari VPSA untuk peningkatan biogas adalah profil dispersif CO<sub>2</sub> dalam kolom yang menghasilkan pendudukan fraksional dari situs adsorpsi di dalam lapisan. Ada juga beberapa peluang menarik seperti melakukan blowdown dengan tekanan kecil. Tabel 3 memberikan rincian dari berbagai pemodelan matematika dan studi simulasi yang dilakukan sejauh ini dengan menggunakan VPSA untuk peningkatan biogas.

Persamaan model utama disajikan pada Tabel 2. Parameter kinetik dan porositas (0,3) diperoleh melalui penyesuaian data eksperimen. Konstanta LDF yang diperoleh adalah 0,0005 dan 0,03 s<sup>-1</sup>



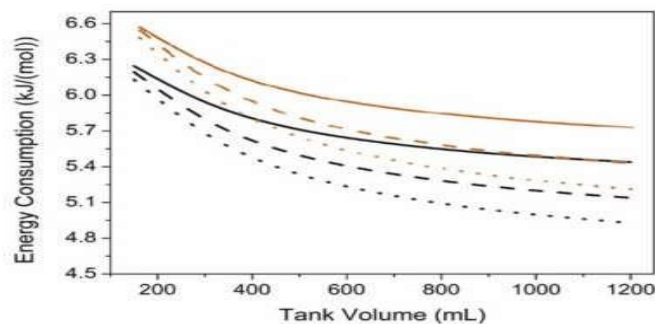
untuk CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>, masing-masing. Secara keseluruhan, kesepakatan yang sangat baik ditemukan antara prediksi yang diberikan oleh model dan nilai eksperimen. Juga, hasil analisis sensitivitas menunjukkan selektivitas optimum 1,9. Kinerja proses dianalisis dalam model dengan variasi tekanan adsorpsi dan desorpsi serta rasio P/F. Tercatat bahwa peningkatan tekanan adsorpsi menghasilkan peningkatan kemurnian meskipun pemulihan menurun karena peningkatan kerugian pada langkah pembersihan. Kemurnian produk juga meningkat dengan meningkatnya rasio P/F dengan mengorbankan pemulihan. Seperti digambarkan pada Gambar 10, peningkatan panjang bed adsorpsi dapat membantu meningkatkan fraksi mol CH<sub>4</sub> di outlet kolom. Keuntungan penting adalah memungkinkan untuk mengevaluasi kemurnian untuk setiap langkah individu secara terpisah.



Gambar 2. Variasi fraksi mol CH<sub>4</sub>

Dengan berfokus pada peningkatan biogas skala kecil, beberapa siklus proses yang disederhanakan, cocok dan terjangkau dikembangkan oleh Canevesi et al. berdasarkan unit PSA yang terdiri dari dua dan tiga kolom yang diisi dengan adsorben CMS [10]. Pengaruh berbagai konfigurasi diselidiki untuk menetapkan tren perubahan antara input dan indeks kinerja. Komposisi umpan adalah CO<sub>2</sub> / CH<sub>4</sub> (40/60%) dan tekanan diayun antara 5 dan 0,1 bar masing-masing pada langkah adsorpsi dan blowdown. Satu set persamaan matematika (Tabel 2) digunakan untuk menggambarkan seluruh unit PSA termasuk semua kolom, tangki dan katup untuk membuat analisis prediktif dan validasi terhadap data eksperimen. Tangki pemerataan dianggap memungkinkan operasi berkelanjutan; meskipun terbukti tidak berpengaruh pada kinerja proses. Hasil menunjukkan

bahwa kemurnian CH<sub>4</sub>, perolehan kembali, produktivitas dan konsumsi energi semuanya dipengaruhi oleh perubahan waktu pemberian pakan. Tren perubahan konsumsi energi ditunjukkan pada Gambar 11, menunjukkan bahwa konsumsi energi pada dasarnya lebih sedikit untuk waktu umpan yang lebih lama (yaitu, 15 menit) dibandingkan dengan waktu umpan pendek (yaitu, 13 menit) karena lebih banyak gas yang dihasilkan per siklus. Konsumsi energi terus menurun seiring bertambahnya volume tangki. Efeknya lebih terlihat pada rentang volume tangki yang lebih kecil. Selain itu, saat penggunaan langkah pembersihan mengubah kemurnian produk, konsumsi energi meningkat tanpa adanya langkah pembersihan. Secara keseluruhan, konfigurasi dua dan tiga kolom dipastikan dapat menerima CH<sub>4</sub> dengan kemurnian tinggi; meskipun dalam kasus tiga kolom, pemulihan yang lebih baik dan lebih sedikit kehilangan CH<sub>4</sub> dapat dicapai.

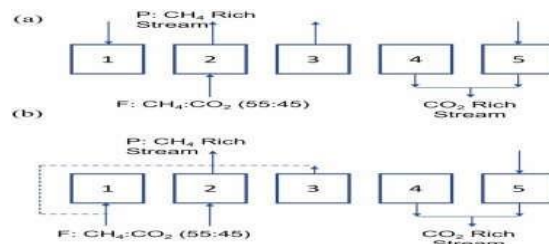


Gambar 3. Pengaruh volume tangki pemerataan yang berbeda dan laju aliran pembersihan yang



berbeda pada konsumsi energi untuk waktu umpan 15 menit (hitam) dan 13 menit (oranye)

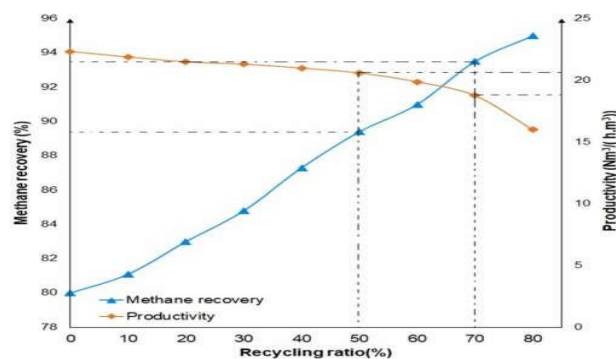
Kinetika adsorpsi diekspresikan oleh pendekatan bi-LDF yang melibatkan resistensi makro dan mikropori untuk difusi dalam pelet dan kristal, masing-masing, untuk mengurangi waktu komputasi. Konstanta untuk difusi mikropori diperoleh dengan mempertimbangkan resistensi mikropori dan penghalang permukaan pada mulut pori. Namun, difusi dalam makropori dihitung berdasarkan jumlah molekul dan kondisi Knudsen (Tabel 3). Umpan biogas adalah  $\text{CH}_4$  aliran yang mengandung 45%  $\text{CO}_2$  sebagai pengotor pada laju aliran  $1000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Suhu dan tekanan proses referensi masing-masing adalah 298 K dan 1 atm. Kinerja keseluruhan dinilai berdasarkan kemurnian produk, pemulihan, dan produktivitas proses.



Gambar 4 . Skema siklus VPSA yang digunakan untuk upgrading biogas menggunakan (a) CMS 3 K (b) zeolit 13X

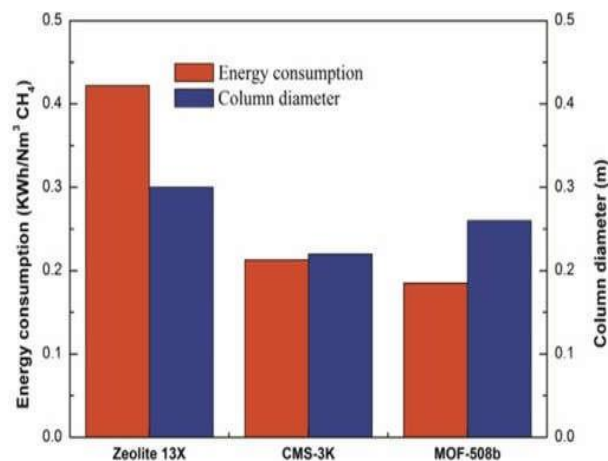
Meskipun ditemukan bahwa kedua adsorben memenuhi tujuan target kemurnian  $\text{CH}_4$  98% untuk aliran produk, CMS 3 K menawarkan pemulihan hampir 20% lebih banyak daripada pasangannya. Juga, produktivitas CMS 3 K secara signifikan lebih tinggi daripada zeolit 13X, melalui konsumsi energinya hampir 34% lebih sedikit ( $0,27$  versus  $0,41 \text{ kW} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ CH}_4$ ). Temuan penting lainnya adalah penambahan langkah depresurisasi menengah terbukti sangat efektif dalam meningkatkan  $\text{CH}_4$  pemulihan tanpa banyak kehilangan kemurnian. Pengaruh kondisi operasi juga diselidiki dalam kasus CMS 3 K. Pemulihan dibatasi hingga 60% meskipun menunjukkan kemurnian tinggi dalam siklus referensi Skarstrom. Kinerja pemisahan meningkat pada tekanan yang lebih tinggi dan menawarkan kemurnian hingga 98% dan pemulihan lebih besar dari 80%. Sebaliknya, mengingat zeolit 13X, pemulihan produk tidak dapat melebihi 50% untuk kemurnian lebih dari 98%.

VPSA yang diusulkan terdiri dari lima kolom yang melibatkan langkah daur ulang dan pemerataan dan targetnya adalah untuk mencapai kemurnian  $\text{CH}_4$  melebihi 97%. Simulasi mengungkapkan bahwa konfigurasi yang diusulkan efektif dalam meningkatkan kinerja proses. Juga, penggunaan aliran daur ulang untuk menginjeksikan kembali sebagian pembersihan di dasar kolom dapat meminimalkan hilangnya  $\text{CH}_4$  pada langkah pembersihan. Pengaruh variasi rasio daur ulang terhadap pemulihan dan produktivitas  $\text{CH}_4$  ditunjukkan pada Gambar 15 yang menunjukkan hampir 2% peningkatan pemulihan sebagai konsekuensi dari setiap peningkatan 10% rasio daur ulang. Namun, ini bertepatan dengan penurunan produktivitas unit secara bertahap. Dengan demikian, kondisi optimum menggunakan rasio daur ulang 60% yang menghasilkan pemulihan 91,5% dengan konsumsi energi spesifik  $0,35 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \text{ CH}_4$ .



Gambar 5 .Kecenderungan Pemulihan dan CH4 untuk rasio daur berbeda

Simulasi proses dinamis dan pemodelan matematis dilakukan pada konsumsi energi proses VPSA pada berbagai skenario untuk peningkatan biogas [11]. Studi ini komprehensif karena dimasukkannya berbagai jenis adsorben seperti MOF-508b dan zeolit 13X sebagai adsorben kesetimbangan dan CMS 3 K sebagai adsorben kinetik. Menurut Gambar. 16 , proses VPSA yang diusulkan terdiri dari dua kolom dan enam langkah dalam siklus dengan dua langkah pemerataan. Persamaan matematika yang digunakan dalam model disajikan pada Tabel 3. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi peran dan kontribusi parameter operasi seperti tekanan adsorpsi dan desorpsi serta rasio P/F untuk optimalisasi konsumsi energi dan kemurnian produk. Hal ini juga memberikan wawasan tentang efisiensi dan keekonomian proses karena targetnya adalah kemurnian biometana sebesar 98% dan rasio pemulihan produk sebesar 85%. Simulasi mengungkapkan bahwa untuk mencapai pemulihan dan kemurnian yang ditargetkan, tekanan adsorpsi bergantung pada jenis adsorben dan dengan demikian bervariasi antara 6 dan 8 bar. Peningkatan tekanan adsorpsi menghasilkan CH<sub>4</sub>max dengan mengorbankan rasio pemulihan produk. Juga, beroperasi pada tekanan yang lebih tinggi menyebabkan penurunan rasio pemulihan yang lebih jauh. Di sisi lain, tekanan desorpsi proses yang diinginkan adalah 0,3 bar untuk zeolit 13X dan MOF-508b berbeda dengan 0,15 bar untuk CMS 3 K. Juga dicatat bahwa rasio pemulihan menurun pada tekanan desorpsi rendah. Nilai rasio P/F terbaik untuk memberikan kombinasi pemulihan dan kemurnian yang optimal adalah masing-masing 0,3, 0,15 dan 0,1 untuk zeolit 13X, CMS 3 K dan MOF-508b. Juga ditunjukkan bahwa peningkatan panjang kolom mengurangi fluktuasi kemurnian produk di outlet kolom. Menurut Gambar. 17, konsumsi energi spesifik minimum milik kolom PSA yang diisi dengan MOF-508b diikuti oleh CMS 3K dan zeolit 13X, masing - masing. Mempertimbangkan panjang kolom tetap 135 cm, diameter kolom terkecil untuk memberikan kinerja target milik CMS 3 K diikuti oleh MOF-508b dan terakhir oleh zeolit 13X.



Gambar 6 . Peran dan kontribusi jenis adsorben terhadap ukuran diameter kolom dan konsumsi energi spesifik proses VPSA

## KESIMPULAN

Munculnya alat dan teknik yang lebih kuat telah memberikan peluang lebih besar untuk pemodelan dan simulasi proses adsorpsi. Di sisi lain, permintaan untuk peningkatan biogas berkembang pesat dan kebutuhan untuk merancang dan mengembangkan proses yang lebih efisien semakin meningkat. Penulis menyimpulkan bahwa, pada proses PSA rentang performa pada CH<sub>4</sub> Kemurnian (96–99%) dan CH<sub>4</sub> Pemulihan(84–99,4%) dengan Konsumsi energi 0,12 kW.mol<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub> 1250 kJ.kg<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub>. Pada proses VPSA rentang performa pada CH<sub>4</sub> Kemurnian (50–99%) dan CH<sub>4</sub> Pemulihan(75–95,5%) dengan Konsumsi energi 0,27–0,41 kW.mol<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub>. Di antara proses berbasis adsorpsi, pemodelan dan simulasi matematis untuk peningkatan biogas paling banyak diterapkan untuk PSA. Hal ini telah memberikan kontribusi yang cukup besar untuk kemajuan



desain proses dan rating, konfigurasi, efisiensi dan ekonomi. pemeriksaan telah dilakukan pada sejumlah adsorben seperti zeolit, CMS dan MOFs dan masih ada lebih banyak ruang untuk perluasan lebih lanjut ke kandidat berpotensi tinggi lainnya. penggunaan VPSA untuk peningkatan biogas, kecilnya difusivitas CO<sub>2</sub> dalam adsorben yang menghasilkan profil konsentrasi dispersif. Masalah lain yang perlu diperhatikan adalah kebutuhan akan tekanan yang sangat rendah pada langkah-langkah peniupan dan konsumsi energinya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung penelitian ini.

## References

- [1] K. Oibileke, N. Nwokolo, G. Makaka, P. Mukumba, H. Onyeaka, Anaerobic digestion: technology for biogas production as a source of renewable energy – a review, *Energy Environ.* 32 (2020) 191–225, <https://doi.org/10.1177/0958305x20923117>.
- [2] K.S. Knaebel, H.E. Reinhold, Landfill gas: from rubbish to resource, *Adsorption* 9 (2019) 87–94, <https://doi.org/10.1023/A:1023871415711>.
- [3] M. Poeschl, S. Ward, P. Owende, Environmental impacts of biogas deployment-part II: Life Cycle Assessment of multiple production and utilization pathways, *J. Clean. Prod.* 24 (2022) 184–201, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.030>
- [4] M. Poeschl, S. Ward, P. Owende, Environmental impacts of biogas deployment - part I: Life Cycle Inventory for evaluation of production process emissions to air, *J. Clean. Prod.* 24 (2022) 168–183, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.039>
- [5] J. Kuo, J. Dow, Biogas production from anaerobic digestion of food waste and relevant air quality implications, *J. Air Waste Manag. Assoc.* 67 (2017)1000–1011, <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1316326>.
- [6] E. Santos-Clotas, A. Cabrera-Codony, A. Castillo, M.J. Martín, M. Poch, H. Monclús, Environmental decision support system for biogas upgrading to feasible fuel, *Energies* 12 (2019), <https://doi.org/10.3390/en12081546>.
- [7] Y. Xiao, B.T. Low, S.S. Hosseini, T.S. Chung, D.R. Paul, The strategies of molecular architecture and modification of polyimide-based membranes for CO<sub>2</sub> removal from natural gas-a review, *Prog. Polym. Sci.* 34 (2019) 561–580, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.004>.
- [8] S. Rasi, J. Lantela, J. Rintala, Trace compounds affecting biogas energy utilisation-a review, *Energy Convers. Manag.* 52 (2011) 3369–3375, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.005>.
- [9] D. Papurello, A. Boschetti, S. Silvestri, I. Khomenko, F. Biasioli, Real-time monitoring of removal of trace compounds with PTR-MS: biochar experimental investigation, *Renew. Energy* 125 (2018) 344–355, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.122>.
- [10] K.F. Chin, C. Wan, Y. Li, C.P. Alaimo, P.G. Green, T.M. Young, M.J. Kleeman, Statistical analysis of trace contaminants measured in biogas, *Sci. Total Environ.* 729 (2020), 138702, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138702>.
- [11] D. Papurello, L. Tomasi, S. Silvestri, Proton transfer reaction mass spectrometry for the gas cleaning using commercial and waste-derived materials: focus on the siloxane removal for SOFC applications, *Int. J. Mass Spectrom.* 430 (2018) 69–79, <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2018.05.002>.

