

OPTIMISASI PEMURNIAN HIDROGEN MENGGUNAKAN SISTEM *TEMPERATURE SWING ADSORPTION* (TSA) DENGAN MEMVARIASIKAN SUHU DAN TEKANANAN

OPTIMIZATION OF HYDROGEN PURIFICATION USING A TEMPERATURE SWING ADSORPTION SYSTEM (TSA) METHOD BY VARYING TEMPERATURE AND PRESSURE

Hairul Huda*, Nisa Paizah, Maria Erika Rosalia Joka, Nurhaliza, Ahmad Moh. Nur

Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Mulawarman University
Jl. Sambaliung No. 9, Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

*email : hairulhuda@ft.unmul.ac.id

(Received: 2024 8, 30; Reviewed: 2025 12, 5; Accepted: 2025 12, 27)

Abstrak

Proses industri memerlukan hidrogen dengan tingkat kemurnian lebih dari 99% agar dapat digunakan pada berbagai aplikasi lanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kemurnian hidrogen dengan mengeksplorasi efektivitas metode *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dan *Temperature Swing Adsorption* (TSA), serta mengidentifikasi pengaruh variasi suhu dan tekanan terhadap kemurnian hidrogen. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen Adsorption dengan sistem dua bed dan dua lapisan adsorben berupa karbon aktif dan zeolit. Proses TSA dipilih karena kemampuannya mencapai kemurnian yang sangat tinggi, meskipun memiliki konsumsi energi dan kebutuhan adsorben yang lebih besar dibandingkan PSA. Hasil optimasi pemisahan campuran gas ($H_2/CO_2/CH_4/CO/N_2 = 0,564/0,031/0,266/0,084/0,055$) pada temperatur 298,15 K menunjukkan bahwa sistem TSA dua bed mampu menghasilkan hidrogen dengan kemurnian hingga 99,99%. Komposisi pengotor yang diperoleh masing-masing adalah CO_2 sebesar 0,043%, CH_4 sebesar 0,0085%, CO sebesar 0,043%, dan N_2 sebesar 0,02%. Meskipun TSA memiliki siklus operasi yang panjang dan biaya investasi awal yang tinggi, metode ini menjadi alternatif yang efektif ketika kemurnian hidrogen tinggi tidak dapat dicapai menggunakan PSA.

Kata Kunci : hidrogen, PSA, TSA, aspen adsorpsi

Abstract

Industrial processes require hydrogen with a purity level exceeding 99% to ensure its suitability for downstream applications. This study aims to enhance hydrogen purity by investigating the effectiveness of *Pressure Swing Adsorption* (PSA) and *Temperature Swing Adsorption* (TSA) methods, as well as identifying the influence of temperature and pressure variations on hydrogen purification performance. Process simulations were conducted using Aspen Adsorption software with a dual-bed, dual-layer configuration employing activated carbon and zeolite as adsorbents. TSA was selected due to its capability to achieve ultra-high hydrogen purity, despite its higher energy consumption and larger adsorbent requirements compared to PSA. The optimized separation of a gas mixture ($H_2/CO_2/CH_4/CO/N_2 = 0.564/0.031/0.266/0.084/0.055$) at a temperature of 298.15 K demonstrated that the two-bed TSA system achieved hydrogen purity up to 99.99%.

The resulting impurity concentrations were 0.043% CO₂, 0.0085% CH₄, 0.043% CO, and 0.02% N₂. Although TSA involves longer operational cycles and higher initial investment costs, it is considered an effective alternative when high hydrogen purity cannot be achieved through PSA systems.

Keywords: hydrogen, PSA, TSA, aspen adsorption

1. PENDAHULUAN

Hidrogen (H₂) merupakan salah satu pembawa energi paling prospektif karena memiliki karakteristik bersih, bebas karbon, dan ramah lingkungan, yang berperan penting dalam bahan bakar alternatif sumber energi berbasis fosil. Konsep penggunaan hidrogen sebagai pembawa energi sudah ada sejak lebih dari dua abad yang lalu, namun semakin ditekankan setelah krisis energi global pada tahun 1970an dan kemajuan teknologi pada tahun 1980an. Topik hidrogen sebagai energi potensial perekonomian masa depan telah menjadi tema penelitian di bidang ini selama beberapa waktu.

Kemurnian hidrogen dihasilkan sebagai sistem sel bahan bakar sebagai sumber energi dan konsentrasi berbagai pengotor seperti nitrogen (N₂), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), dan hidrokarbon (HCs) dalam H₂ harus memenuhi nilai kemurnian 99,999% yang ditentukan oleh Organisasi Internasional untuk Standardisasi (ISO), (Du *et al.*, 2021). Adapun metode atau teknik pemurnian H₂ dapat dicantumkan sebagai berikut: metode adsorpsi termasuk adsorpsi suhu (TSA) atau ayunan tekanan (PSA), pemisahan kriogenik, pemisahan membran menggunakan logam, polimer, karbon, atau bahan organik lainnya, pemisahan hidrida logam, dan pemurnian katalitik. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode adsorpsi suhu (TSA) mengacu pada adsorpsi selektif pengotor dalam aliran gas menggunakan adsorben pada kondisi suhu atau tekanan yang berfluktuasi. Metode pemisahan ini dapat diklasifikasikan sebagai teknologi pemurnian H₂ secara fisik, dan bahan yang dihilangkan tidak terbatas pada pengotor tunggal seperti O₂, air, CO, CO₂, dan N₂. Penelitian ini menggunakan komposisi umpan (H₂/CO₂/CH₄/CO/N₂ = 0.564/ 0.031/ 0.266 / 0.084/ 0.055) yang dilakukan dengan metode TSA satu kolom dengan adsorben karbon aktif (Xiao *et al.*, 2021).

Ada beberapa jenis proses adsorpsi yang digunakan dalam industri kimia seperti TSA, PSA, dan VPSA. Metode yang paling banyak digunakan untuk pemurnian hidrogen adalah metode PSA dan VPSA, hal ini dikarenakan baik dari proses maupun dari segi biaya, metode ini memiliki banyak keuntungan. Perbedaan utama antara kedua jenis proses ini adalah dari segi tekanan yang digunakan. Jika pemurnian dengan metode PSA menggunakan tekanan tinggi sedangkan VPSA menggunakan tekanan vakum atau berada di bawah tekanan atmosfer. Selain itu dari penelitian yang telah dilakukan (Xiao *et al.*, 2021), diperoleh hasil bahwa kemurnian hidrogen dengan metode VPSA memiliki kemurnian yang lebih tinggi dibandingkan metode PSA.

Penelitian ini metode yang digunakan adalah metode adsorpsi suhu (TSA) mengacu pada adsorpsi selektif pengotor dalam aliran gas menggunakan adsorben pada kondisi suhu atau tekanan yang berfluktuasi. Metode pemisahan ini dapat diklasifikasikan sebagai teknologi pemurnian H₂ secara fisik, dan bahan yang dihilangkan tidak terbatas pada pengotor tunggal seperti O₂, air, CO, CO₂, dan N₂. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kemurnian tinggi hidrogen dengan metode TSA serta menentukan kondisi operasi optimum untuk regenerasi adsorben maksimum menggunakan perangkat Aspen Adsorpsi V11.

Hidrogen, sebagai bentuk molekul paling sederhana, memiliki kandungan energi terendah per satuan volume. Hidrogen adalah unsur yang paling ringan dan sederhana. Hidrogen terdiri dari satu elektron dan satu proton, gas tidak berwarna, tidak berbau, dan mudah terbakar. Atom hidrogen beratnya adalah 1.00794 satuan massa atom dibulatkan menjadi 1.008. Hidrogen tidak beracun dan jauh lebih ringan dari udara. Hidrogen sebagai bahan bakar, seperti bahan bakar lainnya, mempunyai tingkat bahaya tertentu sehingga perlu diperhatikan dalam penyimpanan hidrogen yang aman dan praktik penanganan untuk memastikan penggunaan yang aman (Reynolds *et al.*, 2024).

Kemurnian hidrogen yang digunakan untuk sel bahan bakar sesuai standar ISO dan SAE harus mencapai 99.99%. Proses yang biasa digunakan untuk proses pemurnian hidrogen yaitu adsorpsi. Adsorpsi adalah proses pemisahan yang bekerja pada tingkat molekuler. Memanfaatkan perbedaan ukuran molekul, ukuran pori dibuat sedemikian rupa sehingga molekul yang lebih besar dari molekul target tidak dapat masuk. Proses adsorpsi, komponen gas atau cairan dihilangkan dan diserap oleh adsorben padat (Geankoplis, 2003).

Adsorpsi adalah proses eksotermik berbasis permukaan yang menyebabkan perpindahan molekul dari fluida ke permukaan padat adsorben. Zat yang teradsorpsi pada adsorben disebut adsorbat (Georgiadis *et al.*, 2020). Adsorpsi merupakan proses akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben yang disebabkan oleh gaya tarik antar molekul atau suatu akibat dari medan gaya pada permukaan padatan (adsorben) yang menarik molekul-molekul gas, uap atau cairan. Definisi lain adsorpsi sebagai fenomena yang terjadi pada permukaan (Takarani *et al.*, 2019).

Adsorben berfungsi untuk menyerap hidrogen pada satu tahap siklus, kemudian diregenerasi pada tahap berikutnya dengan mengubah kondisi tekanan atau suhu sehingga hidrogen dapat diambil kembali. Metode ini umumnya digunakan dalam industri untuk memurnikan hidrogen atau untuk mendapatkan hidrogen dalam jumlah yang lebih tinggi dalam aplikasi tertentu. Adsorben yang digunakan untuk pemurnian hidrogen adalah karbon aktif, zeolit 5A, dan Cu (I) AC (Yáñez *et al.*, 2020).

PSA adalah teknologi yang dapat digunakan sebagai pemisah dan pembersih gas serta termasuk menangkap CO₂ dan N₂. dalam merancang PSA meliputi pemilihan adsorben, ukuran partikel, ukuran lapisan, konfigurasi lapisan, volume pembersihan, pemerataan tekanan dan adsorpsi ayunan vakum, demikian mempengaruhi kinerja perpindahan panas dan massa pada adsorpsi PSA mengandung tumpukan adsorben yang berfungsi menyerap CO₂ yang terkandung dalam biogas mentah dan PSA akan digunakan dalam 2 kolom yang beroperasi secara bergantian sehingga memungkinkan pemrosesan yang kontinu (Satria *et al.*, 2022).

VPSA merupakan suatu proses pemisahan gas yang digunakan untuk mengisolasi dan memurnikan komponen gas tertentu dari campuran gas. Metode ini adalah variasi dari proses PSA yang digunakan untuk pemisahan gas dengan menerapkan perubahan tekanan. Langkah adsorpsi dalam VPSA dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi daripada tekanan atmosfer sedangkan langkah desorpsi dilakukan pada tekanan vakum (Farmahini *et al.*, 2021).

TSA merupakan proses intensif energi karena membutuhkan panas untuk meregenerasi unggun adsorben. Teknologi seperti TEPsa (*Thermally Enhanced Pressure Swing Absorption*) dan TPSA (*Temperature Pressure Swing Absorption*) dikembangkan untuk pra-pemurnian TEPsa adalah proses PSA dan TPSA adalah proses TSA. TSA adalah metode pemisahan gas. Ada dua faktor penting untuk meningkatkan efisiensi proses yaitu percepatan kinetika ayunan temperatur dan pengurangan gradien termal sepanjang penampang reaktor. Untuk mencapai kedua kondisi ini, perlu untuk mengatasi Keterbatasan Perpindahan Panas intrinsik yang terkait dengan pembangkitan *packed bed* baik untuk kondisi statis maupun dalam kondisi aliran (Verougstraete *et al.*, 2020).

TSA adalah metode yang digunakan dalam pemurnian *hydrogen* dengan tujuan memisahkan hidrogen dari kontaminan senyawa lainnya. Proses ini melibatkan adsorpsi kontaminan dalam adsorben zeolit atau karbon aktif pada suhu yang di simulasikan dengan adanya efisiensi energi panas untuk mengubah suhu yang sering kali lebih efisien dibandingkan metode pemurnian lain seperti PSA. TSA membantu memastikan bahwa hidrogen yang diproduksi memiliki kualitas tinggi, yang penting untuk aplikasi di industri (Kheimi & Salamah, 2023).

2. METODOLOGI

Metodologi penelitian yaitu proses pengambilan keputusan untuk mendapatkan desain optimasi sistem TSA pada pemurnian dan *recovery* hidrogen. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan

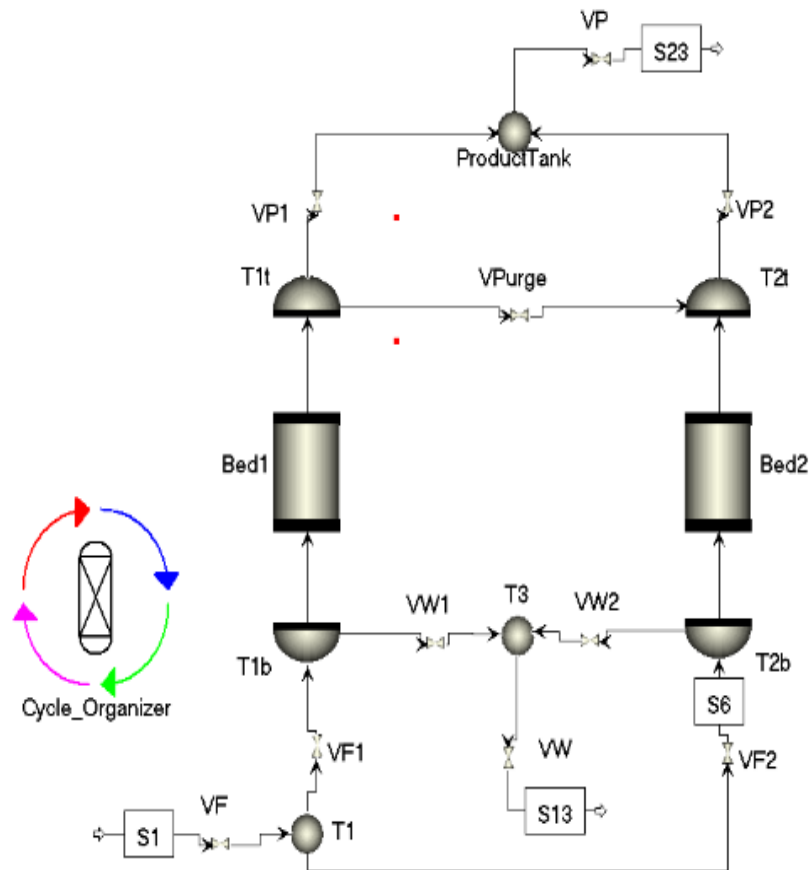
rancangan sistem TSA yang dilihat berdasarkan kemampuan adsorben dalam menyerap impuritis pada proses pemurnian hidrogen. Merancang sistem TSA juga memperhatikan aspek kondisi operasi dalam penghematan energi untuk menghasilkan produk hidrogen dengan kemurnian tinggi.

Tabel 1. *Input Typical Data*

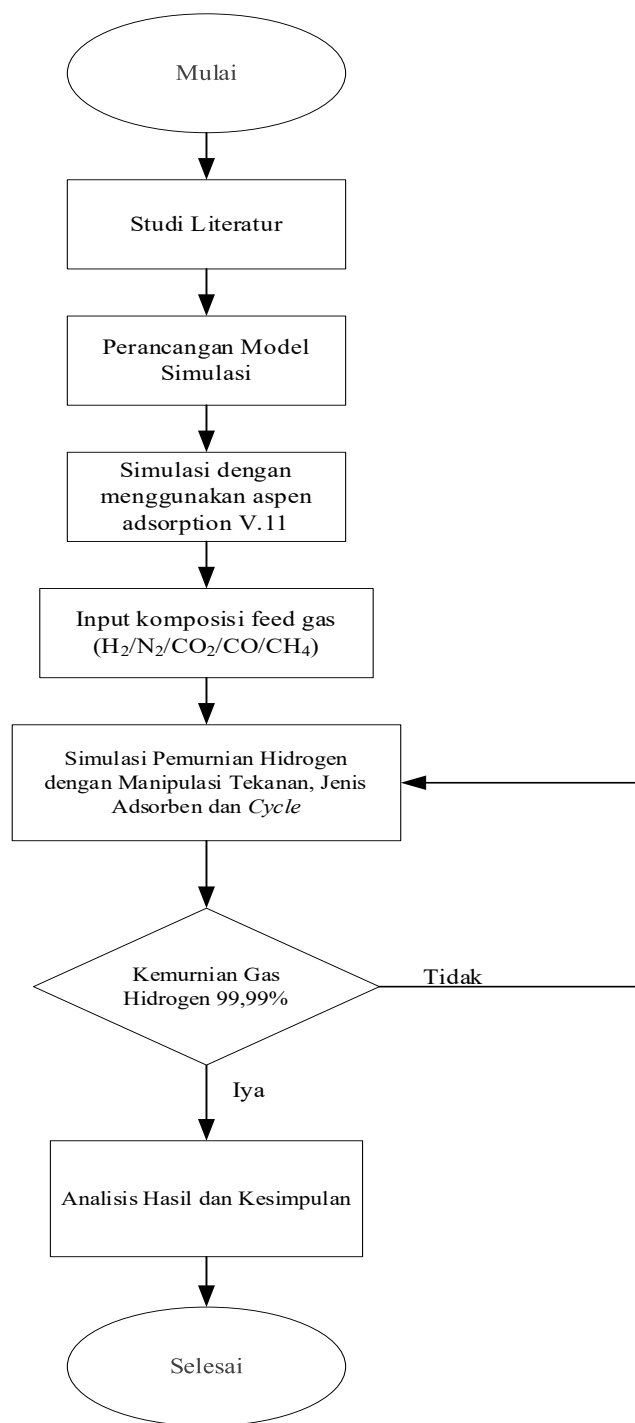
Komponen		Komposisi	
H ₂		0.564	
CO ₂		0.031	
CH ₄		0.266	
CO		0.084	
N ₂		0.055	
Total		1	
Spesifikasi	Nilai	Unit	
Internal bed radius, R _m	0.021	m	
Bed length, L	1.2	m	
Bed porosity, ϵ_b	0.433	m ³ (void)/m ³ (bed)	
Spesifikasi	Karbon Aktif	Zeolite	Unit
Particle Radius, R _p	0.00115	0.00157	m
Intra-particle voidage, ϵ_p	0.433	0.357	m
Adsorbent density, ρ_s	850	1160	kg/m ³
Komponen		Nilai (1/s)	
H ₂		0.7	
CO ₂		0.0355	
CH ₄		0.195	
CO		0.15	
N ₂		0.261	

Variabel yang diperhatikan dalam optimasi pemurnian hidrogen dengan menggunakan metode VPSA yaitu sebagai berikut, tekanan, temperatur, jenis adsorben dan *step cycle*. Tekanan pada proses adsorpsi dapat mempengaruhi kapasitas adsorpsi dan kecepatan reaksi pada material adsorben sehingga perlu adanya variasi tekanan pada proses adsorpsi, berikut variasi tekanan yang digunakan yaitu, 0,1 dan 0,01 bar. Proses adsorpsi juga dicoba dengan memvariasikan temperatur 298,15 dan 303,15 K untuk mengetahui apakah temperatur ikut mempengaruhi proses adsorpsi. Pemilihan jenis adsorben yang tepat dapat mempengaruhi kapasitas dan selektivitas adsorpsi terhadap senyawa tertentu, serta mempengaruhi stabilitas material adsorben dalam jangka panjang. Jenis adsorben yang biasa digunakan dalam proses adsorpsi ialah zeolit dan karbon aktif. *Step cycle* yang digunakan dalam simulasi dapat mempengaruhi hasil simulasi dan optimasi proses pemurnian hidrogen sehingga perlu divariasikan berikut beberapa kali *cycle* yang kami coba yaitu, 1,5,7,9,10,11,12,15,20, dan 25.

Beberapa asumsi yang digunakan dalam Aspen adsorpsi sebagai berikut, sifat termodinamika gas dihitung menggunakan persamaan keadaan Peng-Robinson, isotherm kesetimbangan untuk setiap lapisan adsorben dijelaskan menggunakan model *Langmuir* yang dipengaruhi oleh tekanan parsial, model laju kinetik pada film padat dijelaskan oleh persamaan *linear driving force* (LDF) dengan koefisien perpindahan massa konstan, tekanan dalam kolom dijelaskan menggunakan Persamaan Ergun, dan keseimbangan material digambarkan sebagai konveksi dengan difusi konstan.



Gambar 1. Proses Pemurnian Hidrogen



Gambar 2. Kerangka Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh Tekanan terhadap Kemurnian Hidrogen

Tabel 2 menyatakan bahwa temperatur optimal untuk mendapatkan kemurnian hidrogen yang tinggi adalah 298,15. Penelitian (Guo *et al.*, 2010), menyatakan bahwa suhu yang lebih rendah memberikan kandungan hidrogen yang lebih tinggi. Tabel di atas menunjukkan kondisi saat tekanan 0,1 bar dan 1 bar dengan temperatur 298,15 K dan 318,15 K diperoleh hasil kemurnian hidrogen tertinggi pada temperatur 298,15 K yaitu 0,999431. Kinerja pemisahan dapat mengurangi suhu (Vermaak *et al.*, 2021). Hal ini berkaitan dengan peningkatan efisiensi adsorpsi gas, karena gas cenderung lebih mudah diadsorpsi pada suhu rendah.

Tabel 2. Variasi tekanan terhadap kemurnian hidrogen menggunakan adsorben karbon aktif

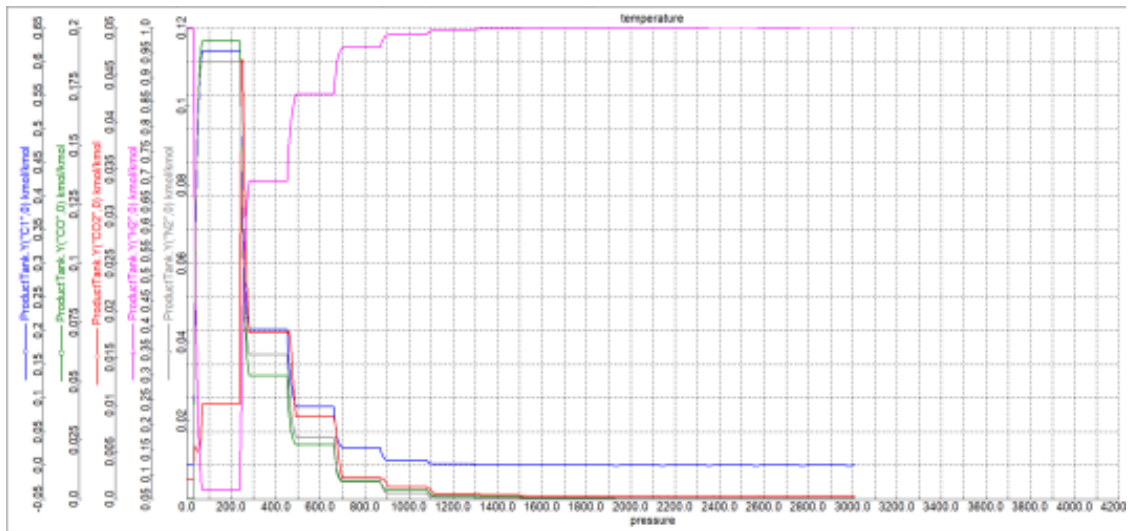
P (bar)	T (K)	Kemurnian				
		H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄
0.1	298.15	0,999431	4,29229e-004	4,291124e--004	1,98419e-004	-8,445541e-005
	318.15	0,998859	5,71464E-004	4,80421e-004	1,72066e-004	-8,28598e-005
1	298.15	0,997782	4,29229e-004	4,21124e-004	8,50795e-005	-8,44541e-005
	318.15	,0878263	0,202251	0,0597504	0,0890413	0,561132

2. Pengaruh Temperatur terhadap Kemurnian Hidrogen

Tabel 3. menyatakan bahwa semakin rendah temperatur semakin tinggi kemurnian hidrogen. Kemurnian hidrogen tertinggi diperoleh pada temperatur 298,15 K yaitu 0,999431. Untuk menguji adsorpsi pada temperatur tinggi digunakan simulasi temperatur dengan kemurnian hidrogen yang diperoleh turun yaitu 0,998859, 0,99906, 0,999431, 0,999211. tekanan rendah memungkinkan adsorben untuk lebih mendeteksi dalam menyerap molekul-molekul yang tidak diinginkan, sehingga meningkatkan kemurnian hidrogen yang dihasilkan.

Tabel 3. Variasi temperatur terhadap kemurnian hidrogen menggunakan adsorben karbon aktif

Temperatur (K)	Pressure (Bar)	Kemurnian				
		CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	N ₂
318.15	0,1	5,71464E-004	4,80421e-004	0,998859	-8,28598e-005	1,72066e-004
308.15		4,29229e-004	4,21124e-004	0,99906	-8,44541e-004	1,98419e-004
298.15		4,29229e-004	4,291124e--004	0,999431	-8,445541e-005	1,98419e-004
278.15		1,562271e-004	4,70816e-004	0,999211	-8,26375e-005	2,43899e-004



Gambar 3. Grafik TSA terhadap kemurnian Hidrogen

3. Pengaruh Adsorben terhadap Kemurnian Hidrogen

Gambar 4 menunjukkan kemurnian hidrogen menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit di peroleh sebesar 0,999431. Kemurnian hidrogen menggunakan suhu dan tekanan yang dihasilkan dengan kombinasi adsorben 2 bed, *Activated Carbon* dan zeolit sebagai adsorben. Karbon bisa digunakan untuk memisahkan hidrogen dari nitrogen untuk memproduksi kemurnian hidrogen dari gas sintesis sedangkan Zeolit biasa digunakan untuk menyerap yang tinggi terhadap oksigen. Selain itu, karena tekanan parsial oksigen yang lebih rendah, maka nitrogen akan terserap lebih banyak dan udara kaya oksigen akan dikeluarkan pada *outlet* untuk diolah. Dalam penelitian ini menggunakan simulasi 2 bed dalam pemurnian hidrogen serta memakai dua layer untuk mempercepat kemurnian yang *steady* 99,99 %.

1. Hasil kemurnian menggunakan dua adsorben

Tabel 4. Pengaruh adsorben terhadap karbon aktif dan zeolit terhadap kemurnian hidrogen

Karbon aktif dan zeolite						
P (bar)	T (K)	Kemurnian				
		H ₂	CO	CO ₂	N ₂	CH ₄
0.1	298.15	0,999431	4,29229e-004	4,291124e--004	1,98419e-004	-8,445541e-005
1		0,997782	54,29229e-004	4,21124e-004	8,50795e-005	-8,44541e--005

2. Hasil kemurnian menggunakan adsorben karbon aktif

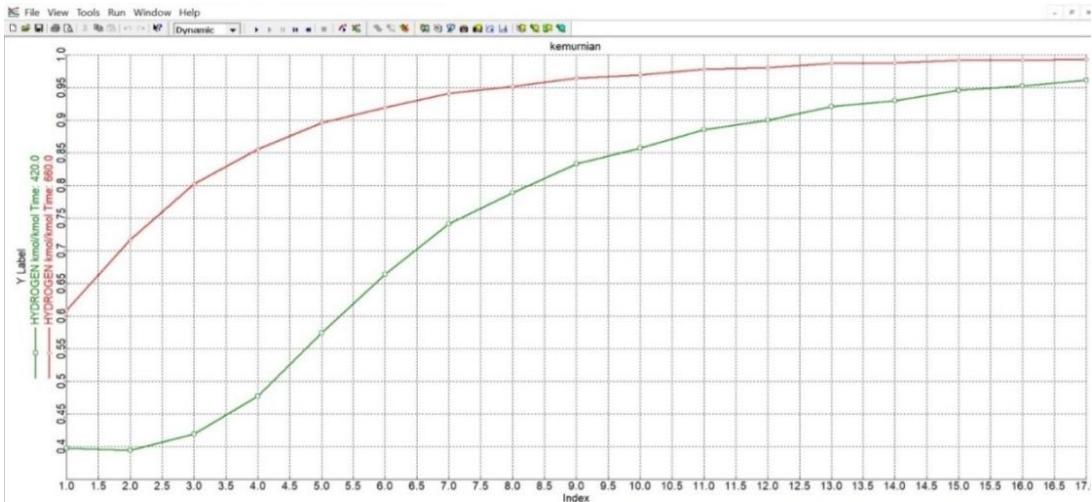
Tabel 5. Pengaruh adsorben karbon aktif

Pressure	Kemurnian Hydrogen
3	0,9962%
5	0,9980%
7	0,9977%

3. Hasil kemurnian menggunakan adsorben zeolit

Tabel 6. Pengaruh adsorben zeolit

Pressure	Kemurnian Hydrogen
3	0,9955%
5	0,9977%
7	0,9980%



Gambar 4. Grafik kemurnian hidrogen menggunakan dua bed

4. Pengaruh Cycle terhadap Kemurnian Hydrogen

Menurut penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) terdiri dari *Feed Pressurization* (FP), *Adsorption* (AD), *Depressurizing Pressure Equalization* (DPE), *Depressurization* (DP), *Purge* (P), dan *Pressurizing Pressure Equalization* (PPE). Hasil percobaan kemurnian hidrogen yang mencapai 99,9431% dengan sistem batch dengan 6 siklus menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit. Disimpulkan bahwa kemurnian H₂ tertinggi dengan 6 *step cycle*.

Tabel 7. Pengaruh *cycle* terhadap kemurnian hidrogen dengan adsorben karbon aktif

	Step					
	I	II	III	IV	V	VI
Bed 1	FP	AD	DPE	DP	PG	PPE
	DP	PG	PP?E	FP	AD	DPE
Bed 2						
Waktu (s)	30	40	140	30	40	140

4. KESIMPULAN

Pemurnian hidrogen dengan metode TSA berdasarkan simulasi menggunakan aspen adsorpsi diperoleh bahwa karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih besar dibandingkan zeolit saat memurnikan hidrogen dari gas multi komponen (H₂/CO₂/CH₄/CO/N₂ = 0,564/ 0,031/ 0,266 / 0,084/ 0,055) sehingga kemurnian hidrogen yang diperoleh dengan adsorben zeolit lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben karbon aktif yaitu 99,998% dan 99,997%. Hasil optimasi untuk pemurnian hidrogen dengan proses TSA satu kolom diperoleh kondisi operasi pada tekanan 0,01 bar dan 0,001 bar pada temperatur 298,15 K dan 303,15 K diperoleh hasil kemurnian hidrogen tertinggi pada temperatur 298,15 K dengan tekanan 0,01 bar dan 0,001 bar yaitu 9,998. Hal ini berkaitan dengan peningkatan efisiensi adsorpsi gas, karena gas cenderung lebih mudah diadsorpsi pada suhu rendah. Adsorben karbon aktif dan zeolit mencapai kondisi optimum dengan kemurnian hidrogen yang tinggi pada saat 6 *step cycle*.

DAFTAR PUSTAKA

- Farmahini, A.H., Krishnamurthy, S., Friedrich, D., Brandani, S. and Sarkisov, L. (2020) *Performance-based screening of porous materials for carbon capture*. *Chemical Reviews*, 121, pp. 10666–10741.
- Geankoplis, C.J. (2003) *Transport processes and separation process principles*. 4th edn. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Georgiadis, A., Charisiou, N. and Goula, M. (2020) *Removal of hydrogen sulfide from various industrial gases: A review of the most promising adsorbing materials*. *Catalysts*, 10(5), p. 521. Available at: <https://doi.org/10.3390/catal10050521>.
- Guo, L., Cao, C. and Lu, Y. (2010) *Supercritical water gasification of biomass and organic wastes*.
- Kheimi, M., S.K.S. (2023) *Simulation of temperature swing adsorption process to purify hydrogen for fuel cell uses by SAPO-34 as adsorbent*. *Science of the Total Environment*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523017216> (Accessed: 30 August 2024).
- Reynolds, J., Ali, D. and Amadhe, F. (2024) *The state of the art in hydrogen storage*. *Green Energy and Technology*. Available at: <https://doi.org/10.5772/geet.20240074>.
- Satria, D., Kurniawan, T. and Salman, N.J. (2022) *The effect of variation of zeolite as adsorbent medium and adsorption pressure toward the quality of oxygen produced from pressure swing adsorption (PSA)*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), pp. 119–127. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2022.013.01.13>.
- Takarani, P., Novita, S.F. and Fathoni, R. (2019) Pengaruh massa dan waktu adsorben selulosa dari kulit jagung terhadap konsentrasi penyerapan. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi V*, 2(1), pp. 117–121. Available at: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/SEMNASSTEK/article/view/2816>.
- Du, Z., Liu, C., Zhai, J., Guo, X., Xiong, Y., Su, W. and He, G. (2021) *A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles*. *Catalysts*, 11(3), p. 393. Available at: <https://doi.org/10.3390/catal11030393>.
- Vermaak, L., Neomagus, H.W.J.P. and Bessarabov, D.G. (2021) *Hydrogen separation and purification from various gas mixtures by means of electrochemical membrane technology in the temperature range 100–160 °C*. *Membranes*, 11(4). Available at: <https://doi.org/10.3390/membranes11040282>.
- Verougstraete, B., Martín-Calvo, A., Van der Perre, S., Baron, G.V., Finsy, V. and Denayer, J.F. (2020) *A new honeycomb carbon monolith for CO₂ capture by rapid temperature swing adsorption using steam regeneration*. *Chemical Engineering Journal*, 383, p. 123075.
- Xiao, J. *et al.* (2021) *Hydrogen purification performance optimization of vacuum pressure swing adsorption on different activated carbons*. *Energies*, 14(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/en14092450>.
- Yáñez, M., Relvas, F., Ortiz, A., Gorri, D., Mendes, A. and Ortiz, I. (2020) *PSA purification of waste hydrogen from ammonia plants to fuel cell grade*. *Separation and Purification Technology*, 240, p. 116334. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116334>.