



REVIEW: EFFECT OF MATERIAL CHARACTERISTICS, AND PROCESS CONDITIONS IN REDUCING GASEOUS POLLUTANTS USING FLY ASH (FA)-BASED ADSORBENT

Budi Setya Wardhana¹⁾, Farrah Fadhillah Hanum^{1)*}, Zahrul Mufrodi¹⁾ dan Siti Jamilatun¹⁾

¹⁾Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan,
Jl. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, D.I. Yogyakarta, 55191, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05 Aug 2024,

Revised 03 Sep 2024,

Accepted 08 Oct 2024,

Available online 30 Oct 2024,

Keywords:

- ✓ Adsorbent,
- ✓ Adsorption,
- ✓ CO₂,
- ✓ Fly Ash,
- ✓ SO_x

*corresponding author:

farrah.hanum@che.uad.ac.id

Phone: +6285602704861

[https://doi.org/10.31938/jsn.v](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i3.749)

[14i3.749](https://doi.org/10.31938/jsn.v14i3.749)

ABSTRACT

The intensive use of fossil fuels has led to a significant increase in air pollution, which negatively affects human health and the environment. Fly ash (FA), a byproduct of coal combustion, has great potential as an adsorbent for hazardous gas pollutants due to its physical and chemical properties. This research aims to evaluate the effectiveness of fly ash as an adsorbent in reducing gas pollutants such as CO₂, SO₂, and NO₂, as well as to examine the influence of temperature and material characteristics on adsorption capacity. The results indicate that the maximum adsorption capacity for each gas pollutant is achieved at different temperatures, fly ash demonstrating the highest performance at 150 °C for CO₂ adsorption, achieving an efficiency of 94.7%. For SO₂ and NO₂, the optimum temperatures are 200 °C, with efficiencies of 72.17% and 100%, respectively. This study also emphasizes the importance of selecting the appropriate characteristics of the adsorbent material to enhance adsorption efficiency. This finding has the potential to support the development of more efficient and sustainable air pollution reduction technologies in the future, by utilizing industrial waste such as fly ash as an innovative solution.

Review: Pengaruh Karakteristik Bahan, dan Kondisi Proses dalam Mengurangi Polutan Gas Menggunakan Adsorben Berbahan Baku Fly Ash (FA)

ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar fosil yang intensif telah menyebabkan peningkatan signifikan polusi udara yang berdampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Fly ash (FA), produk sampingan dari pembakaran batubara, memiliki potensi besar sebagai adsorben polutan gas berbahaya karena sifat fisik dan kimiawinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas FA sebagai adsorben dalam mengurangi polutan gas seperti CO₂, SO₂, dan NO_x, serta mengkaji pengaruh suhu dan karakteristik material terhadap kapasitas adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi maksimum untuk setiap polutan gas dicapai pada suhu yang berbeda, fly ash menunjukkan kinerja tertinggi pada suhu 150°C untuk adsorpsi CO₂, dengan efisiensi mencapai 94,7%. Untuk SO₂ dan NO₂, suhu optimum masing-masing adalah 200°C, dengan efisiensi masing-masing sebesar 72,17% dan 100%. Penelitian ini juga menekankan pentingnya pemilihan karakteristik material adsorben yang tepat untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi. Temuan ini berpotensi mendukung pengembangan teknologi pengurangan polusi udara yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan, dengan memanfaatkan limbah industri seperti fly ash sebagai solusi inovatif.

Kata kunci: Abu Batu Bara, Adsorben, CO₂, Polutan Gas; Penyerapan, Sox Kelapa Sawit

PENDAHULUAN

Sejak terjadinya revolusi industri, dunia telah mengalami lonjakan penggunaan bahan bakar fosil secara konsisten. Ketergantungan yang berlebihan pada bahan bakar fosil ini memiliki

konsekuensi yang serius, salah satunya adalah peningkatan polusi udara yang signifikan. Polusi udara ini memberikan efek merugikan bagi kesehatan manusia dan lingkungan, dengan berbagai gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida



(NO_x), sulfur dioksida (SO₂), metana (CH₄), hidrogen sulfida (H₂S), serta senyawa organik yang mudah menguap (VOC). Polusi udara ini dapat memengaruhi berbagai sistem dalam tubuh manusia, termasuk sistem imunologi, pernapasan, dan kardiovaskular. Paparan jangka panjang terhadap polutan ini dapat menyebabkan penyakit serius, termasuk kanker. Kelompok rentan, seperti anak-anak dan orang lanjut usia, lebih mudah terpengaruh bahkan oleh konsentrasi polutan yang rendah. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) telah mengategorikan gas-gas ini sebagai ancaman kesehatan paling serius di seluruh dunia, yang dapat menyebabkan sekitar 4,2 juta kematian setiap tahun akibat efek berbahaya, baik langsung maupun tidak langsung, pada kesehatan manusia (Ahmed et al., 2022; El Morabet, 2019; Labidi et al., 2024; Leroutier & Quirion, 2022; Wen et al., 2024; Zhao & Yin, 2024). Selain itu, emisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil juga berkontribusi pada pemanasan iklim, yang dapat meningkatkan konsentrasi gas asam dan alkali di atmosfer. Peningkatan konsentrasi gas ini berdampak signifikan terhadap iklim global lingkungan dan kesehatan ekosistem (Hou et al., 2024; Jin et al., 2023; Ukaogo et al., 2020).

Indonesia, sebagai salah satu negara berkembang, masih bergantung pada bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menjadi salah satu sumber utama energi listrik di Indonesia, dengan batubara sebagai jenis bahan bakar yang dominan (Muhammad et al., 2022; Yana et al., 2022). Data menunjukkan bahwa konsumsi listrik di Indonesia terus meningkat setiap tahunnya, seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsumsi Listrik di Indonesia

No	Tahun	Juta SBM
1	2011	98,0
2	2012	106,7
3	2013	115,0
4	2014	121,7
5	2015	124,3
6	2016	132,4
7	2017	136,8
8	2018	157,0
9	2019	160,6
10	2020	162,2

Sumber: (Yudiantono et al., 2022)

Peningkatan konsumsi listrik ini mendorong penggunaan batubara di PLTU untuk memenuhi kebutuhan energi, yang pada gilirannya menghasilkan limbah berupa abu batubara, yang terdiri dari *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) (Mekkadina et al., 2020). Abu batubara biasanya mengandung sekitar 20% BA dan 80% FA, dengan karakteristik fisik yang beragam, termasuk ukuran partikel yang berkisar antara 0,5 hingga 100 µm dan sebagian besar terdiri dari silikon dioksida (SiO₂), aluminium oksida (Al₂O₃), dan oksida besi (Fe₂O₃) seperti yang terdapat pada Tabel 2. Dengan meningkatnya penggunaan batubara di PLTU, jumlah abu batubara yang dihasilkan juga akan meningkat, yang dapat menambah beban pencemaran lingkungan (Cwirzen, 2020).

Tabel 2. Komposisi Kimia dari Elemen-Elemen Utama yang terdapat dalam *Fly Ash* (FA)

No	Komponen	Komposisi (%)
1	SiO ₂	58,71
2	Al ₂ O ₃	26,44
3	Fe ₂ O ₃	5,42
4	K ₂ O	3,47
5	CaO	1,72
6	TiO ₂	1,49
7	Minor elements	1,39
8	LOI	1,36

Sumber: (Viola et al., 2023)

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengendalikan polusi udara adalah teknik adsorpsi. Adsorpsi merupakan proses dimana konsentrasi suatu zat meningkat pada antarmuka antara fase padat dan cair atau gas akibat adanya gaya permukaan. Proses ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk pemisahan, pemurnian, dan pengendalian polusi udara akibat gas polutan (Hu et al., 2023). Adsorpsi melibatkan masuknya satu zat (adsorbat) ke dalam volume atau curah bahan lain (adsorben), di mana adsorbat akan menempel pada permukaan padat dari adsorben tersebut (He et al., 2024; Pourhakkak et al., 2021).

Salah satu produk sampingan industri yang menjanjikan sebagai adsorben adalah FA, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara. FA memiliki karakteristik yang membuatnya potensial untuk digunakan dalam mengurangi polutan gas berbahaya. Setiap tahun, PLTU menggunakan lebih dari 80% pasokan batubara, yang menghasilkan sejumlah besar FA. Misalnya, pada tahun 2017, PLTU menghasilkan sekitar 686

juta ton FA, dengan angka yang terus meningkat pada tahun-tahun berikutnya (Wang et al., 2021). Dengan ketersediaan yang tinggi dan karakteristik kimia yang menguntungkan, FA memiliki potensi besar untuk dijadikan adsorben dalam pengurangan polutan gas. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa FA mampu menangkap polutan gas seperti CO₂, SO₂, dan H₂S dengan efisiensi yang baik (Jha & Singh, 2016).

Artikel ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas FA sebagai adsorben dalam mengurangi polutan gas berbahaya dan mengevaluasi pengaruh karakteristik material dan kondisi operasional, seperti suhu, terhadap kapasitas adsorpsi. Dengan pemahaman yang lebih baik mengenai mekanisme adsorpsi dan karakteristik adsorben, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi pengurangan polusi yang lebih efisien dan berkelanjutan di masa depan.

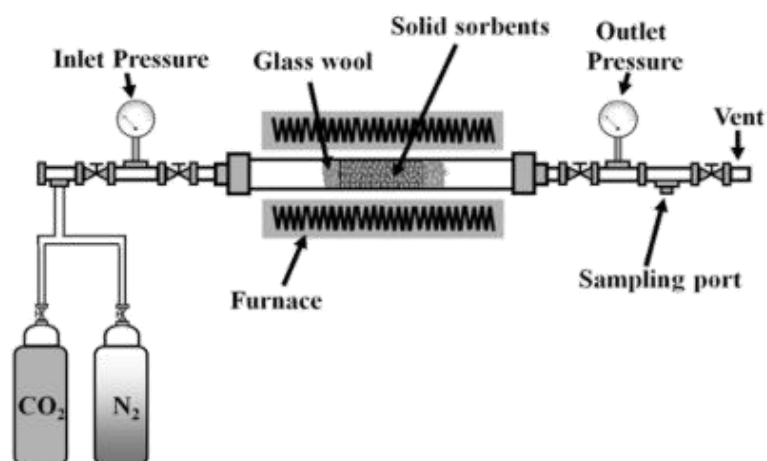
METODE PENYISIHAN BERBAGAI POLUTAN GAS MENGGUKAN ADSORBEN

Kegiatan industri menghasilkan berbagai jenis polutan, termasuk gas-gas berbahaya yang dapat mencemari udara dan lingkungan. Gas-gas ini tidak hanya berasal dari industri, tetapi juga dari aktivitas sehari-hari, seperti penggunaan

kendaraan bermotor dan pembakaran sampah. Kendaraan bermotor menghasilkan gas buang yang mengandung polutan berbahaya bagi kesehatan, sementara pembakaran sampah memproduksi asap yang beracun dan dapat meningkatkan risiko penyakit jantung, masalah pernapasan, dan kanker (Akbar, 2023; Balcom et al., 2021; Kováts et al., 2022; Muhtadi et al., 2023; Pathak et al., 2023; Velis & Cook, 2021).

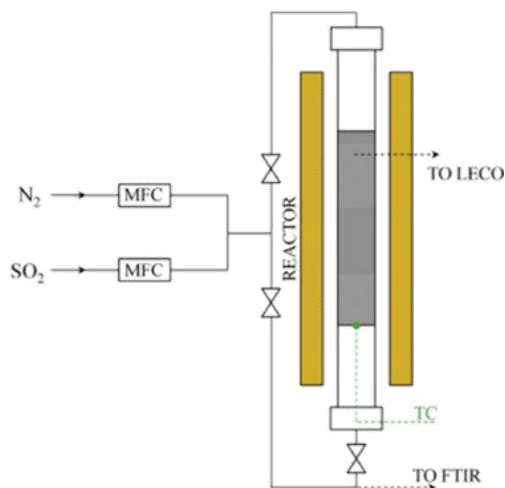
Untuk mengatasi masalah polusi ini, banyak penelitian dilakukan untuk mengembangkan metode penyisihan gas polutan, salah satunya adalah penggunaan adsorben berbasis limbah padat. Limbah padat, seperti FA, menunjukkan potensi besar sebagai adsorben untuk berbagai jenis polutan gas. FA merupakan limbah berlimpah yang mengandung aluminosilikat, yang dikenal efektif menyerap polutan gas (Ho et al., 2022; Viola et al., 2023).

Dalam penelitian oleh Siriruang et al., (2016), efektivitas FA sebagai adsorben untuk CO₂ dieksplorasi melalui proses adsorpsi permukaan dan karbonisasi dalam reaktor tubular yang diatur menggunakan *Proportional-Integral-Derivative (PID) controller*. Skema eksperimen ini dapat dilihat pada Gambar 1, dimana gas nitrogen digunakan untuk membawa sampel gas dari reaktor menuju *Gas Chromatography (GC)* dan *Thermal Conductivity Detector (TCD)* mengukur jumlah CO₂ di saluran keluar. Hasil eksperimen menunjukkan penyerapan CO₂ mencapai 807,1 $\mu\text{mol.g}^{-1}$ dalam satu jam tanpa modifikasi pada FA.



Gambar 1. Skema Penangkapan CO₂ dengan Metode Adsorpsi Menggunakan Adsorben FA
Sumber : (Siriruang et al., 2016)

Penelitian lain oleh Kisiela et al., (2016) menyelidiki penyisihan gas SO₂ menggunakan reaktor *fixed-bed* yang disusun secara vertikal. Proses ini ditunjukkan pada Gambar 2, di mana gas yang mengandung 5% SO₂ melewati reaktor dengan suhu terkontrol pada 100°C, sementara konsentrasi SO₂ diukur secara *real-time* menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Meskipun eksperimen ini menunjukkan efektivitas desulfurisasi, diskusi lebih lanjut diperlukan terkait penerapan metode ini dalam skala industri.



Gambar 2. Skema Instalasi Eksperimental untuk Pengujian Adsorpsi SO₂ Menggunakan Adsorben FA
Sumber : (Kisiela et al., 2016)

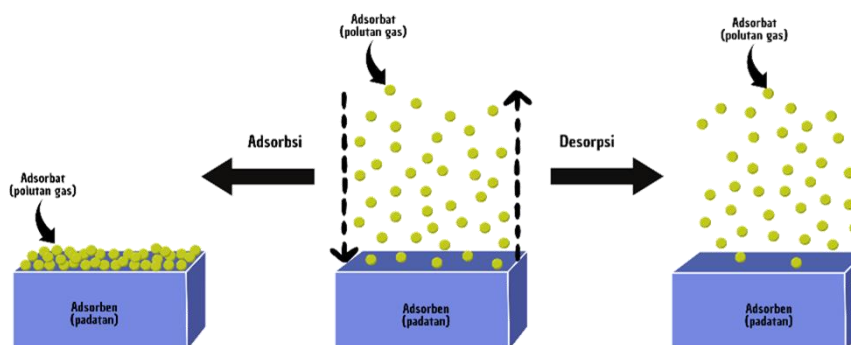
Kedua skema, baik yang secara horizontal pada reaktor *tubular* maupun yang vertikal pada reaktor *fixed-bed*, sama-sama menggunakan prinsip adsorpsi dalam proses penyisihan polutan gas. Adsorpsi adalah proses molekuler dimana zat terlarut (adsorbat) melekat pada permukaan padat (adsorben) oleh gaya tarik-menarik. Media

berpori dengan luas permukaan internal yang besar membentuk zat padat yang digunakan untuk adsorpsi (Yousef et al., 2020).

Secara sederhana, proses adsorpsi telah digambarkan pada Gambar 3, dimana molekul-molekul polutan gas (adsorbat) seperti CO₂ atau SO₂ akan menempel pada permukaan adsorben. Proses ini berlangsung ketika gas yang mengandung polutan melewati adsorben, yang kemudian menangkap dan mengikat polutan pada permukaannya. Adsorpsi efektif dalam menurunkan kadar polutan dari aliran gas, dan dapat diikuti oleh proses desorpsi. Desorpsi adalah proses dimana atom atau molekul yang sebelumnya terikat pada permukaan fase terkondensasi, seperti padatan, meninggalkan permukaan tersebut. Proses ini merupakan kebalikan dari adsorpsi, dimana polutan yang terperangkap pada permukaan adsorben dilepaskan kembali ke fase gas (Adawiah et al., 2020). Faktor-faktor seperti kondisi operasi dan juga metode dalam pembuatan adsorben dapat mempercepat terjadinya proses desorpsi.

PEMBAHASAN PENGARUH KONDISI OPERASI DAN ADSORBEN TERHADAP KAPASITAS DAN EFISIENSI ADSORPSI POLUTAN GAS

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai efisiensi metode adsorpsi dalam menangani berbagai polutan gas, Tabel 3 menyajikan ringkasan kinerja berbagai adsorben berbasis FA dalam menyerap beberapa polutan gas. Tabel ini memberikan gambaran tentang potensi aplikasi adsorben tersebut dalam berbagai kondisi eksperimen yang telah dilakukan oleh para peneliti.



Gambar 3. Proses Adsorpsi dan Desorpsi pada Polutan Gas

Tabel 3. Ringkasan Kondisi Adsorpsi Berbagai Polutan oleh Adsorben Berbasis FA

Polutan Gas	Adsorben	Metode	Suhu (°C)	Waktu (jam)	Kapasitas penyerapan	Efisiensi	Referensi
CO ₂	FA		30	1	807,1 µmol/g	>99%	(Siriruang et al., 2016)
	WNC	Aktivasi Kimia	800	1		105,1%	(Lee et al., 2014)
	WNCF	Aktivasi Kimia	150	1		94,7%	(Lee et al., 2014)
	MCM-41-	Proses	75	1	13,31 wt.%	90%	(Panek et al., 2017)
	PFA	Hidrotermal					
	S.81-50P	Proses Fusi Alkali	85		1,307 mmol/g	13,4%	(Viola et al., 2023)
	FA	Aktivasi Kimia	110	0,233		65,5%	(Faradilla et al., 2016)
	S.81-50T	Proses Fusi Alkali	85		2,026 mmol/g	56,8%	(Viola et al., 2023)
CO	FA	Aktivasi Kimia	45	2,25	181,76 g/kg	100%	(Mazzella et al., 2016)
	FA	Aktivasi Kimia	200	1	1393,15 mg/Nm ³	90,94%	(Haspiadi et al., 2021)
H ₂ SO ₄	FA	Aktivasi Kimia	110	0,2		81,65%	(Faradilla et al., 2016)
	FA-CaO	Aktivasi Kimia	120	2		100%	(Shu et al., 2015)
	FA-H ₂ O	Aktivasi Kimia	120	2		>60%	(Shu et al., 2015)
SO ₂	FA-NaOH	Aktivasi Kimia	120	2		100%	(Shu et al., 2015)
	CFA-AKP-5		100	1,5	46,6 g/kg		(Kisiela et al., 2016)
H ₂ S	FA	Aktivasi Kimia	200	1	121,45 mg/Nm ³	72,17%	(Haspiadi et al., 2021)
NO ₂	OFA	Aktivasi Kimia	22	0,25	0,3001 mg/g	100%	(Aslam et al., 2015)
BTX (Benzen, Toluen, Xylen)	FA	Aktivasi Kimia	200	1	20,65 mg/ Nm ³	100%	(Haspiadi et al., 2021)
	Zeolite Na-X	Proses	150		383,67 mmol/g B		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-X	Hidrotermal					
	Zeolite Na-X	Proses	200		582,91 mmol/g p-X		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-X	Hidrotermal					
	Zeolite Na-X	Proses	270		525,03 mmol/g T		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-X	Hidrotermal					
	Zeolite Na-X	Proses	280		545,26 mmol/g o-X		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-X	Hidrotermal					
	Zeolite Na-X	Proses	280		563,82 mmol/g m-X		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-X	Hidrotermal					
	Zeolite Na-P	Proses	100		26,22 mmol/g o-X		(Bandura et al., 2016)
	Zeolite Na-P	Hidrotermal					
	Zeolite Na-P	Proses	100		10,52 mmol/g T		(Bandura et al., 2016)
Zeolite Na-P	Hidrotermal						
Zeolite Na-P	Proses	100		20,52 mmol/g p-X		(Bandura et al., 2016)	
Zeolite Na-P	Hidrotermal						
Zeolite Na-P	Proses	100		25,96 mmol/g m-X		(Bandura et al., 2016)	
Zeolite Na-P	Hidrotermal						
Zeolite Na-P	Proses	120		1,44 mmol/g B		(Bandura et al., 2016)	
Zeolite Na-P	Hidrotermal						

Berdasarkan Tabel 3, dapat melihat bahwa ada beberapa faktor yang memengaruhi efisiensi dan kapasitas penyerapan dalam proses adsorpsi berbasis FA. Kondisi operasi seperti suhu dan waktu memainkan peran penting dalam menentukan seberapa besar kapasitas penyerapan adsorben terhadap polutan gas. Selain itu, metode pembuatan adsorben berbasis FA juga memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi proses

adsorpsi, dimana modifikasi atau perlakuan tertentu pada FA dapat meningkatkan daya serapnya terhadap gas polutan.

Pengaruh Suhu dan Adsorben terhadap Kapasitas Penyerapan Polutan Gas

Pengaruh suhu dan jenis adsorben terhadap kapasitas penyerapan polutan gas yang telah dilakukan oleh Bandura et al., (2016) dapat dilihat

pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, setiap polutan gas memiliki kondisi suhu yang berbeda-beda untuk mencapai kapasitas penyerapan maksimal. Sebagai contoh, menggunakan adsorben *Zeolite Na-X* pada suhu 150°C, gas *benzene* memiliki kapasitas penyerapan maksimal sebesar 383,67 mmol/g. Untuk gas *p-Xylene*, kapasitas penyerapan maksimal sebesar 582,91 mmol/g dicapai pada suhu 200°C. Pada suhu yang lebih tinggi, yaitu 270°C, gas *Toluene* dapat mencapai kapasitas penyerapan maksimal sebesar 525,03 mmol/g. Sedangkan untuk gas *o-Xylene* dan *m-Xylene*, meskipun kondisi suhu optimumnya sama, yaitu pada suhu 280°C, kapasitas penyerapan mereka berbeda, yaitu masing-masing sebesar 545,26 mmol/g dan 563,82 mmol/g.

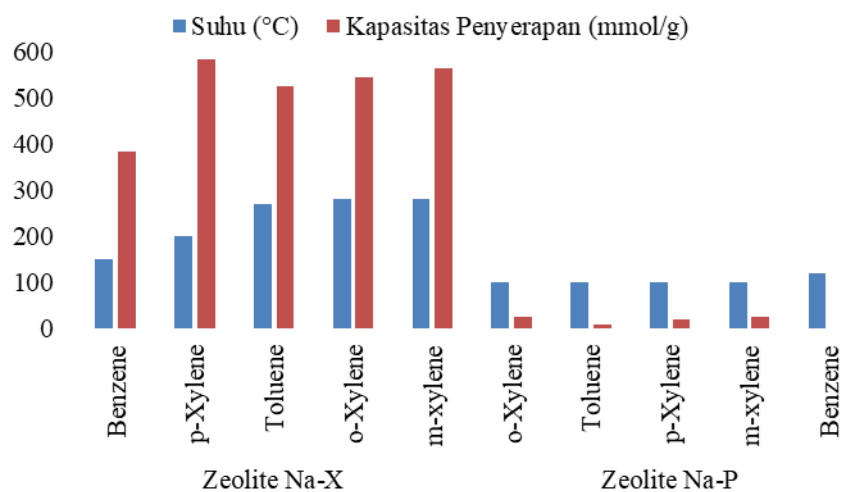
Selain kondisi operasi yang digunakan, hal lain yang dapat memengaruhi hasil kapasitas penyerapan polutan gas yaitu adsorben yang digunakan. Dengan menggunakan adsorben yang berbeda maka kapasitas penyerapan maksimal polutan gas akan berbeda dan kondisi optimal suhu yang akan digunakan proses adsorpsi tersebut akan berbeda. Sebagai contoh hasil kapasitas penyerapan maksimal dan kondisi suhu optimal dengan menggunakan adsorben *Zeolite Na-P* pada suhu yang sama yakni 100°C untuk gas *o-Xylene*, *Toluene*, *p-Xylene*, dan *m-Xylene* menghasilkan kapasitas penyerapan yang berbeda-beda, yaitu masing-masing sebesar 26,22 mmol/g, 10,52 mmol/g, 20,52 mmol/g, dan 25,96 mmol/g. Sedangkan pada gas *benzene* diperoleh kapasitas penyerapan maksimal yang kecil jika

dibandingkan dengan gas lain yaitu sebesar 1,44 mmol/g pada kondisi 120°C. Berdasarkan hasil tersebut, jika kita bandingkan antara hasil kapasitas penyerapan maksimal antara adsorben *Zeolite Na-X* dan *Zeolite Na-P* maka akan berbeda. Adsorben *Zeolite Na-X* menghasilkan kapasitas penyerapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben *Zeolite Na-P*.

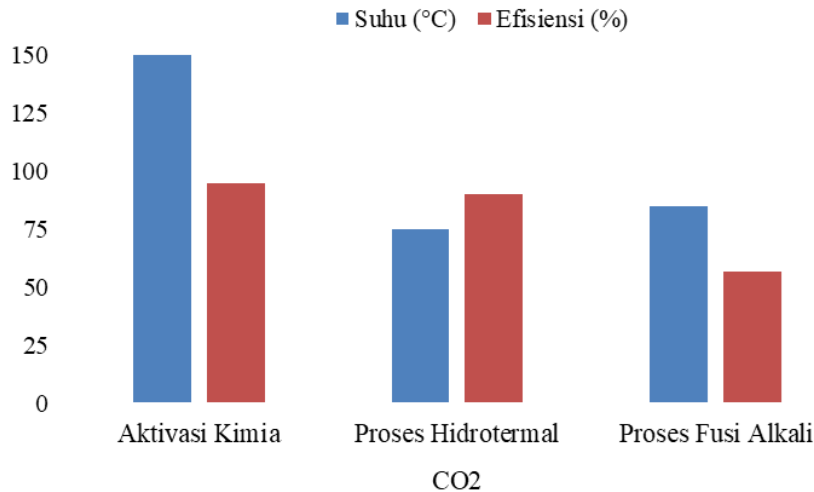
Kondisi operasi, khususnya suhu yang digunakan saat proses adsorpsi pada polutan gas, sangat memengaruhi jumlah zat yang teradsorpsi pada material adsorben. Hal ini karena adsorpsi polutan gas menggunakan adsorben umumnya merupakan proses eksotermik, yang mana apabila pada saat proses terjadi dan suhu meningkat maka akan mengakibatkan terjadinya desorpsi (pelepasan) polutan gas yang telah teradsorpsi oleh adsorben. Peristiwa tersebut dapat menurunkan kapasitas penyerapan karena polutan gas akan sulit untuk menempel pada permukaan adsorben (Hamal et al., 2021; Tsiotsias et al., 2024). Dengan menggunakan suhu yang tepat, serta adsorben yang sesuai maka proses adsorpsi dapat mencapai kapasitas penyerapannya yang lebih tinggi.

Pengaruh Suhu dan Metode terhadap Efisiensi Adsorpsi Polutan Gas

Pengaruh suhu dan metode dalam pembuatan adsorben terhadap efisiensi adsorpsi polutan gas yang telah dilakukan oleh Lee et al., (2014); Panek et al., (2017); Viola et al., (2023) dapat dilihat pada grafik di Gambar 5.



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Suhu dan Adsorben Terhadap Kapasitas Penyerapan Maksimal Polutan Gas



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Suhu Dan Metode Terhadap Efisiensi Adsorpsi Polutan Gas

Berdasarkan grafik pada Gambar 5, setiap metode yang digunakan dalam pembuatan adsorben memiliki kondisi operasi yang optimal, pada hal ini suhu dan juga efisiensi adsorpsi yang berbeda-beda meskipun diaplikasikan pada jenis polutan gas yang sama dan dengan bahan baku adsorben yang sama yaitu *FA*. Sebagai contoh, pada proses adsorpsi polutan gas CO_2 dengan menggunakan metode aktivasi kimia memperoleh hasil efisiensi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan metode proses hidrotermal dan proses fusi alkali yaitu sebesar 94,7%, akan tetapi suhu yang diperlukan lebih tinggi dibandingkan dengan metode yang lain yaitu sebesar 150 °C.

Dalam hal ini suhu yang tinggi pada pengaplikasikan suatu metode tidak selalu akan menghasilkan efisiensi yang tinggi pula. Hal ini dapat kita lihat pada metode proses fusi alkali, meskipun suhu yang digunakan lebih tinggi yaitu 85 °C dibandingkan dengan metode hidrotermal yang hanya sebesar 75 °C, namun efisiensi yang dihasilkan oleh metode proses fusi alkali tidak lebih besar yaitu sebesar 56,8%, dibandingkan dengan metode hidrotermal yang dapat mencapai efisiensi sebesar 90%.

Perbedaan ini menyoroti bahwa faktor lain selain suhu, seperti karakteristik bahan awal, jenis aktivator, dan kondisi proses lainnya, juga berperan penting dalam menentukan efisiensi adsorpsi. Oleh karena itu, dalam upaya mengoptimalkan proses adsorpsi polutan gas, penting untuk mempertimbangkan semua variabel yang terlibat, bukan hanya suhu operasi. Hal ini juga berarti bahwa metode yang berbeda mungkin lebih cocok untuk aplikasi yang berbeda, tergantung pada kebutuhan spesifik efisiensi dan kondisi operasi yang diinginkan.

KESIMPULAN

Penggunaan bahan bakar fosil yang intensif telah menyebabkan peningkatan polusi udara yang merugikan kesehatan manusia dan lingkungan. Adsorpsi adalah salah satu metode yang efektif untuk mengatasi masalah ini, dan *fly ash (FA)* menunjukkan potensi besar sebagai adsorben polutan gas. Faktor-faktor lain seperti karakteristik bahan awal, jenis aktivator, dan kondisi proses juga berperan penting dalam menentukan efisiensi adsorpsi. Oleh karena itu, dengan pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh suhu dan jenis adsorben, optimasi proses adsorpsi dapat dilakukan untuk mengurangi polutan gas secara efektif dan efisien.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah terlibat dalam proses penelitian ini. Secara khusus, kami juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Ahmad Dahlan dan Program Magister Teknik Kimia atas fasilitas, dukungan akademis, dan bimbingan yang telah diberikan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Adawiah, S. R., Sutarno, & Suyanta. (2020). Adsorption-Desorption Studies of Phosphate on CTAB Modified Bentonite . *Indonesian Journal of Chemical Research*, 8(2), 125–136.

- <https://doi.org/10.30598/ijcr.2020.8-sra>
- Ahmed, F., Ali, I., Kousar, S., & Ahmed, S. (2022). The Environmental Impact of Industrialization and Foreign Direct Investment: Empirical Evidence from Asia-Pacific Region. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(20), 29778–29792. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17560-w>
- Akbar, R. Z. (2023). Analisis Tingkat Pencemaran Udara Kendaraan Bermotor di Area Parkir Selatan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 8(1), 25–33. <https://doi.org/10.33084/mitl.v8i1.4680>
- Aslam, Z., Shawabkeh, R. A., Hussein, I. A., Albaghli, N., & Eic, M. (2015). Synthesis of Activated Carbon from Oil Fly Ash for Removal of H₂S from Gas Stream. *Applied Surface Science*, 327, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.152>
- Balcom, P., Cabrera, J. M., & Carey, V. P. (2021). Extended Energy Sustainability Analysis Comparing Environmental Impacts of Disposal Methods for Waste Plastic Roof Tiles in Uganda. *Development Engineering*, 6(100068), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2021.100068>
- Bandura, L., Panek, R., Rotko, M., & Franus, W. (2016). Synthetic Zeolites from Fly Ash for an Effective Trapping of BTX in Gas Stream. *Microporous and Mesoporous Materials*, 223, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.10.032>
- Cwirzen, A. (2020). 10 - Properties of SCC with Industrial By-Products as Aggregates. In *Self-Compacting Concrete: Materials, Properties, and Applications* (pp. 249–281). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817369-5.00010-6>
- El Morabet, R. (2019). Effects of Outdoor Air Pollution on Human Health. In *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 278–286). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11509-X>
- Faradilla, A. R., Yulinawati, H., & Suswanto, E. (2016). Pemanfaatan Fly Ash sebagai Adsorben Karbon Monoksida dan Karbon Dioksida pada Emisi Kendaraan Bermotor. *Seminar Nasional Cendekiawan*, 1–8. <https://doi.org/10.25105/semnas.v0i0.874>
- Hamal, P., Subasinghege Don, V., Nguyenhuu, H., Ranasinghe, J. C., Nauman, J. A., McCarley, R. L., Kumar, R., & Haber, L. H. (2021). Influence of Temperature on Molecular Adsorption and Transport at Liposome Surfaces Studied by Molecular Dynamics Simulations and Second Harmonic Generation Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B*, 125(37), 10506–10513. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c04263>
- Haspiadi, H., Fitriani, F., & Budiarta, Y. (2021). Pengaruh Aktivasi Kimia terhadap Adsorben Fly Ash Batubara untuk Penyerap Polutan Emisi Gas Buang. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 15(1), 65. <https://doi.org/10.26578/jrti.v15i1.6880>
- He, J., Chen, K., Xu, J., Sun, Y., Xu, J., & Sun, Y. (2024). Urban Air Pollution and Control. In M. A. B. T.-E. of S. T. (Second E. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 143–159). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00009-7>
- Ho, H. J., Iizuka, A., Shibata, E., & Ojumu, T. (2022). Circular Indirect Carbonation of Coal Fly Ash for Carbon Dioxide Capture and Utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108269. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108269>
- Hou, Y., Chen, Y., He, X., Wang, F., Cai, Q., & Shen, B. (2024). Insights into the Adsorption of CO₂, SO₂ and NO_x in Flue Gas by Carbon Materials : A Critical Review. *Chemical Engineering Journal*, 490, 151424. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151424>
- Hu, Q., Lan, R., He, L., Liu, H., & Pei, X. (2023). A Critical Review of Adsorption Isotherm Models for Aqueous Contaminants: Curve Characteristics, Site Energy Distribution and Common Controversies. *Journal of Environmental Management*, 329, 117104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117104>

- Jha, B., & Singh, D. N. (2016). Applications of Fly Ash Zeolites : Case Studies. *Advanced Structured Materials*, 78, pp 191-202. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1404-8_7
- Jin, Y., Xu, Q., Zheng, F., & Lu, J. (2023). Enhancement in CO₂ Adsorption by Zeolite Synthesized from Co-Combustion Ash of Coal and Rice Husk Modified with Lithium Ion. *Journal of the Energy Institute*, 110, 101348. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101348>
- Kisiela, A. M., Czajka, K. M., Moro, W., Rybak, W., & Andryjowicz, C. (2016). Unburned Carbon from Lignite Fly Ash as an Adsorbent for SO₂ Removal. *Energy*, 116, 1454–1463. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.143>
- Kováts, N., Hubai, K., Sainnokhoi, T. A., Eck-Varanka, B., Hoffer, A., Tóth, Á., Kakasi, B., & Teke, G. (2022). Ecotoxic Emissions Generated by Illegal Burning of Household Waste. *Chemosphere*, 298(134263), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134263>
- Labidi, A., Ren, H., Zhu, Q., Liang, X., Liang, J., Wang, H., Sial, A., Padervand, M., Lichtfouse, E., Rady, A., Allam, A. A., & Wang, C. (2024). Coal Fly Ash and Bottom Ash Low-Cost Feedstocks for CO₂ Reduction Using the Adsorption and Catalysis Processes. *Science of The Total Environment*, 912, 169179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169179>
- Lee, J., Han, S. J., & Wee, J. H. (2014). Synthesis of Dry Sorbents for Carbon Dioxide Capture using Coal Fly Ash and Its Performance. *Applied Energy*, 131, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.009>
- Leroutier, M., & Quirion, P. (2022). Air Pollution and CO₂ from Daily Mobility: Who Emits and Why? Evidence from Paris. *Energy Economics*, 109, 105941. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105941>
- Mazzella, A., Errico, M., & Spiga, D. (2016). CO₂ Uptake Capacity of Coal Fly Ash: Influence of Pressure and Temperature on Direct Gas - Solid Carbonation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 4120–4128. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.020>
- Mekkadina, Suwarno, S., Garniwa, I., & Agustina, H. (2020). Review Regulation on the Determination of Fly Ash and Bottom Ash from Coal Fired Power Plant as Hazardous Waste in Effort to Increase Utilization in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 519(1), 12051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/519/1/012051>
- Muhammad, D., Berlianto, F., & Wijaya, R. S. (2022). Pengaruh Transisi Konsumsi Energi Fosil Menuju Energi Baru Terbarukan Terhadap Produk Domestik Bruto di Indonesia. *Perspektif Ekonomi Dan Pembangunan Daerah*, 11(2), 105–112. <https://doi.org/10.22437/pdpd.v11i2.17944>
- Muhtadi, A., Rohman, B. N., & Faristiana, A. R. (2023). Dampak Penggunaan Motor di Desa Mempengaruhi Perubahan Masyarakat & Lingkungan. *TUTURAN: Jurnal Ilmu Komunikasi, Sosial Dan Humaniora*, 1(3), 1–14. <https://doi.org/10.47861/tuturan.v1i3.260>
- Panek, R., Wdowin, M., Franus, W., Czarna, D., Stevens, L. A., Deng, H., Liu, J., Sun, C., Liu, H., & Snape, C. E. (2017). Fly Ash-Derived MCM-41 as a Low-Cost Silica Support for Polyethyleneimine in Post-Combustion CO₂ Capture. *Journal of CO₂ Utilization*, 22, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.09.015>
- Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., Moyer, E., Latkar, A., Simbaya, J., Pakasi, D., Taqueban, E., & Love, J. (2023). Plastic Pollution and the Open Burning of Plastic Wastes. *Global Environmental Change*, 80(2), 102648. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102648>
- Pourhakkak, P., Taghizadeh, A., Taghizadeh, M., Ghaedi, M., & Haghdoost, S. (2021). Chapter 1 - Fundamentals of Adsorption Technology. In *Adsorption: Fundamental Processes and Applications* (Vol. 33, pp. 1–70). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12->

- 818805-7.00001-1
- Shu, Y., Wei, X., Fang, Y., Lan, B., & Chen, H. (2015). Removal of Sulfuric Acid Mist from Lead-Acid Battery Plants by Coal Fly Ash-Based Sorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.014>
- Siriruang, C., Toochinda, P., Julnipitawong, P., & Tangtermsirikul, S. (2016). CO₂ Capture using Fly Ash from Coal Fired Power Plant and Applications of CO₂-Captured Fly Ash as a Mineral Admixture for Concrete. *Journal of Environmental Management*, 170, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.010>
- Tsiotsias, A. I., Georgiadis, A. G., Charisiou, N. D., Hussien, A. G. S., Dabbawala, A. A., Polychronopoulou, K., & Goula, M. A. (2024). Mid-Temperature CO₂ Adsorption over Different Alkaline Sorbents Dispersed over Mesoporous Al₂O₃. *ACS Omega*, 9(10), 11305–11320. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07204>
- Ukaogo, P. O., Ewuzie, U., & Onwuka, C. V. (2020). 21 - Environmental Pollution: Causes, Effects, and the Remedies. In *Microorganisms for Sustainable Environment and Health* (pp. 419–429). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8>
- Velis, C. A., & Cook, E. (2021). Mismanagement of Plastic Waste through Open Burning with Emphasis on the Global South: A Systematic Review of Risks to Occupational and Public Health. *Environmental Science and Technology*, 55(11), 7186–7207. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08536>
- Viola, V. O., Aquino, T. F. d., Estevam, S. T., Bonetti, B., Riella, H. G., Soares, C., & Padoin, N. (2023). Synthesis and Application of Two Types of Amine Sorbents Impregnated on Silica from Coal Fly Ash for CO₂ Capture. *Results in Engineering*, 20(101596), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101596>
- Wang, C., Xu, G., Gu, X., Gao, Y., & Zhao, P. (2021). High Value-Added Applications of Coal Fly Ash in the Form of Porous Materials: A Review. *Ceramics International*, 47(16), 22302–22315. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.070>
- Wen, W., Wen, C., Wang, D., Zhu, G., Yu, J., Ling, P., Xu, M., & Liu, T. (2024). A Review on Activated Coke for Removing Flue Gas Pollutants (SO₂, NO_x, HgO, and VOCs): Preparation, Activation, Modification, and Engineering Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 111964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.111964>
- Yana, S., Nelly, Ibrahim, N., Zubir, A. A., Zulfikar, T. M., & Yulisma, A. (2022). Dampak Ekspansi Biomassa sebagai Energi Terbarukan: Kasus Energi Terbarukan Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(4), 4036–4050. <https://doi.org/10.32672/jse.v7i4.4963>
- Yousef, R., Qiblawey, H., & El-Naas, M. H. (2020). Adsorption as a Process for Produced Water Treatment: A Review. *Process*, 8(1657), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr8121657>
- Yudiantono, Windarta, J., & Adiarso. (2022). Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 3(3), 201–217. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.14264>
- Zhao, X., & Yin, Y. (2024). Hazards of pollutants and Ventilation Control Strategy in Industrial Workshops: Current State and Future Trend. *Building and Environment*, 251, 111229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111229>