



INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research

Volume 4 Nomor 4 Tahun 2024 Page 16309-16331

E-ISSN 2807-4238 and P-ISSN 2807-4246

Website: <https://j-innovative.org/index.php/Innovative>

## Kinetika Pembentukan Silika Gel dari Bottom Ash Sebagai Adsorben

Nabila Salwa Pramudya<sup>1✉</sup>, Abu Hasan<sup>2</sup>, Robert Junaidi<sup>2</sup>

Politeknik Negeri Sriwijaya

Email: [nabilasalwapramudya91@gmail.com](mailto:nabilasalwapramudya91@gmail.com)<sup>1✉</sup>

### Abstrak

Penelitian yang berjudul "Kinetika Pembentukan Silika Gel dari Bottom Ash Sebagai Adsorben" menghasilkan beberapa kesimpulan penting. Pertama, kandungan silika yang relatif sedikit pada bottom ash menyebabkan beberapa sampel gagal membentuk gel. Kedua, efisiensi adsorpsi  $\text{CuSO}_4$  oleh bottom ash meningkat seiring dengan peningkatan waktu kontak dan suhu operasi. Ketiga, efisiensi adsorpsi tertinggi dicapai oleh sampel C pada suhu operasi  $100^\circ\text{C}$  dan waktu kontak 120 menit, dengan efisiensi mencapai 68%. Terakhir, efisiensi adsorpsi menurun dengan meningkatnya konsentrasi awal  $\text{Cu}^{2+}$ , karena rasio antara ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan situs aktif pada permukaan adsorben menjadi lebih rendah.

Kata Kunci: *Kinetika Pembentukan Silika Gel, Bottom Ash, Adsorben.*

## Abstract

The study titled "Kinetics of Silica Gel Formation from Bottom Ash as an Adsorbent" yields several important conclusions. First, the relatively low silica content in bottom ash led to the failure of some samples to form a gel. Second, the adsorption efficiency of  $\text{CuSO}_4$  by bottom ash increased with longer contact time and higher operating temperatures. Third, the highest efficiency was achieved at  $100^\circ\text{C}$  with a contact time of 120 minutes, reaching 68%. Finally, the adsorption efficiency decreased as the initial concentration of  $\text{Cu}^{2+}$  increased, due to the lower ratio between  $\text{Cu}^{2+}$  ions and active sites on the adsorbent surface.

Keyword: *Kinetics of Silica Gel Formation, Bottom Ash, Adsorbent.*

## PENDAHULUAN

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi menjadi sesuatu yang sangat penting dan diperluas pada abad ke-20, dimana hal ini diminati oleh para pengusaha dengan alasan hematnya biaya operasional dan ketersediaannya yang cukup melimpah. Adanya kecenderungan penggunaan batubara sebagai sumber energi, menyebabkan isu mengenai lingkungan dan melambatnya perekonomian secara global terus ditekan. Komponen organik yang ada pada batubara merupakan parameter dalam menentukan peringkat dan tipe batubara yang terbentuk dan memberikan pengaruh pada pemanfaatannya. Sementara komponen anorganik umumnya hanya memberikan kontribusi yang minim terhadap kegunaan batubara bahkan mengurangi nilai dari kegunaan batubara ditinjau dari sisi pemanfaatannya.

Fly ash dan bottom ash, yang dikenal sebagai FABA, merupakan produk sisa yang dihasilkan dari pembakaran batubara. Fly ash adalah abu halus yang berterbangan di atas tungku pembakaran, sesuai dengan penjelasan Kartika (2010). Ini adalah bagian yang lebih ringan dari proses pembakaran dan cenderung terbawa oleh gas-gas panas yang dihasilkan selama pembakaran batubara. Karena sifatnya yang halus dan ringan, fly ash biasanya dibawa oleh aliran gas dan dikumpulkan menggunakan perangkat pengendali polusi udara seperti filter elektrostatik. Di sisi lain, bottom ash adalah residu yang lebih berat dan mengendap di bagian bawah tungku pembakaran. Bottom ash memiliki tekstur yang lebih kasar dan padat dibandingkan dengan fly ash karena kandungan mineral yang lebih tinggi dan ukurannya yang lebih besar.

Komposisi FABA yang dihasilkan dari pembakaran batubara cenderung didominasi oleh fly ash, dengan persentase sekitar 80%-90% (Perera dan Trautman, 2006). Hal ini disebabkan oleh proses pembakaran batubara yang menyebabkan sebagian besar material abu menjadi partikel halus dan ringan, yang kemudian terbawa oleh aliran udara

panas. Bottom ash, dengan persentase sekitar 10%-20%, adalah sisa yang tetap di dalam tungku karena massa dan ukurannya yang lebih besar. Perbedaan komposisi ini menjelaskan mengapa fly ash lebih sering dibahas dalam konteks pengelolaan limbah, sementara bottom ash, meskipun dalam jumlah yang lebih sedikit, tetap memerlukan perhatian dalam penanganan dan pemanfaatannya.

Kedua jenis limbah ini, baik fly ash maupun bottom ash, memiliki karakteristik yang berbeda namun sama-sama penting untuk dikelola dengan baik. Pengelolaan limbah FABA memerlukan strategi yang berbeda-beda, tergantung pada jenis dan jumlah yang dihasilkan (Kartika, 2010; Perera dan Trautman, 2006). Fly ash, karena jumlahnya yang lebih besar dan sifatnya yang ringan, sering digunakan dalam industri konstruksi, misalnya dalam pembuatan beton dan semen. Di sisi lain, bottom ash yang lebih kasar dan berat, sering digunakan sebagai bahan pengisi atau material konstruksi dalam proyek-proyek infrastruktur. Dengan demikian, pemahaman yang baik tentang karakteristik dan komposisi FABA sangat penting untuk memastikan bahwa limbah ini dapat dimanfaatkan secara optimal dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Berdasarkan data yang dirilis oleh Kementerian Lingkungan Hidup, limbah fly ash yang dihasilkan setiap hari mencapai 85 ton, sementara limbah bottom ash mencapai 48 ton per hari. Kedua jenis limbah ini merupakan hasil pembakaran batubara dalam pembangkit listrik dan industri lainnya, yang jumlahnya sangat besar dan memerlukan penanganan yang tepat. Limbah ini menjadi tantangan lingkungan yang signifikan, terutama karena volumenya yang terus meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas industri. Pengelolaan yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak negatif yang serius terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 85 Tahun 1999 (PP 85/1999), limbah bottom ash diklasifikasikan sebagai limbah B3 atau bahan berbahaya dan beracun. Klasifikasi ini didasarkan pada kandungan kimia yang terdapat dalam bottom ash, yang sebagian besar terdiri dari silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dan besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Kandungan ini menunjukkan potensi bahaya jika limbah tersebut tidak dikelola dengan baik. Selain komponen utama tersebut, bottom ash juga mengandung unsur-unsur lain seperti karbon, kalsium, magnesium, dan belerang, yang semuanya berpotensi mencemari lingkungan jika tidak ditangani secara aman dan efisien.

Pentingnya pengelolaan limbah bottom ash secara hati-hati tidak dapat diabaikan, mengingat klasifikasinya sebagai limbah B3 yang berisiko tinggi. Pengelolaan yang efektif memerlukan strategi yang mencakup pencegahan, pengolahan, dan pemanfaatan kembali

limbah, seperti menggunakan bottom ash sebagai bahan baku dalam industri konstruksi atau sebagai bahan untuk pembuatan beton. Ini tidak hanya membantu mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan limbah tetapi juga memberikan nilai ekonomi tambahan dari penggunaan kembali material yang sebelumnya dianggap sebagai limbah. Dengan demikian, pendekatan holistik dalam pengelolaan limbah ini sangat penting untuk memastikan keseimbangan antara pembangunan industri dan pelestarian lingkungan.

*Bottom ash* merupakan sisa pembakaran batubara yang mengalami pembakaran pada suhu tinggi sekitar 1200-1400°C. Beberapa penelitian terkait *bottom ash* telah diketahui dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengurangi berbagai jenis logam berat dari limbah cair, karena memiliki porositas tinggi dan luas permukaan (Shim ddk., 2006). Bottom ash mempunyai kandungan utama yaitu silika, iron, alumina, magnesium, dan SO<sub>3</sub> serta bottom ash merupakan media adsorpsi yang digunakan untuk mengadsorb limbah (Dincer dkk., 2007).

Silika adalah suatu mineral yang penyusun utamanya berupa silikon dioksida (SiO<sub>2</sub>). Dimana tersusun dari dua unsur yaitu silikon (Si) dan oksigen (O<sub>2</sub>). Keduanya merupakan unsur yang paling banyak tersedia di alam. Diperkirakan 60% dari kerak bumi ini tersusun dari silika. Silika yang ada di bumi ini biasanya ditemukan dalam bentuk silikat (Lujan, 2007).

Silika gel merupakan salah satu bentuk silika amorf yang paling luas penggunaannya karena silika gel memiliki kemampuan menyerap air yang disebabkan permukaan silika gel sangat berpori dan memiliki Gugus Si-OH dipermukaannya sehingga mudah menyerap air. Sifat dari silika gel ini mengakibatkan silika gel mempunyai banyak kegunaan, salah satunya adalah sebagai adsorben untuk senyawa-senyawa polar, desikan, pengisi pada kolom kromatografi dan sebagai isolator. Silika gel juga dapat digunakan untuk menyerap ion logam dengan prinsip pertukaran ion (Mujiyanti, dkk., 2010).

Tembaga (II) sulfat merupakan suatu senyawa kimia dengan rumus molekul CuSO<sub>4</sub>. Senyawa garam ini memiliki bentuk fisik pada anhidrat berupa bubuk hijau atau abu-abu putih pucat dan juga bentuk pada pentahidrat (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O) berwarna biru terang. Tembaga sulfat pentahidrat sendiri sudah mulai berkembang sejak tahun 1885 sebagai salah satu campuran bordeaux mixture (sejenis fungisida) dan merupakan produk yang penting dari sejumlah produk lainnya. Kurang lebih 20-30% tembaga sulfat pentahidrat dipasarkan atau diproduksi dengan cara yang sederhana, yaitu kristalisasi liquid (Othmer, D.P, 1979).

Budiharti (2015) melakukan sintesis partikel silika dengan metode sol-gel dengan

menggunakan larutan TEOS sehingga mendapatkan silika dengan ukuran 216,9 – 291,9 nm. Aisah, (2018) Pernah melakukan sintesis silika gel berbasis *fly ash* sebagai adsorben untuk rodamin B yang menghasilkan sintesis silika gel dengan munculnya Gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (SiO-Si) dan kandungan unsur silika gel hasil sintesis yaitu O (50,28%), Si (43,21%), Al (2,65%) dan Na (3,27%). Kemampuan adsorpsi Rhodamin-B oleh SG dan abu terbang mengikuti model Langmuir dengan kapasitas adsorpsi masing-masing 19,841 mg/g dan 15,152 mg/g. Selain itu Nanda., (2023) juga sudah melakukan penelitian serupa dengan berbahan dasar *fly ash* yang juga dihasilkan dalam pembakaran batubara. Hasil yang didapat juga dapat dikatakan cukup baik dengan persentasi sebesar 77,16%, namun sayangnya penelitian ini belum menggunakan limbah yang dihasilkan oleh perusahaan ataupun limbah rumah tangga, akan tetapi menggunakan zat warna *methylene blue* sebagai adsorbat.

Dari penelitian tersebut, belum ada yang mempelajari tentang kinetika pembentukan silika gel, sehingga penulis memutuskan untuk melakukan penelitian tentang kinetika pembentukan silika gel dari *bottom ash* sebagai adsorben. Dimana pada penelitian ini difokuskan untuk mengadsorpsi  $\text{CuSO}_4$ . Bahan utama yang digunakan dalam proses adsorpsi adalah *bottom ash* (abu bawah) yang berasal dari limbah batubara.

## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Tempat

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang Jalan Srijaya Negara, Bukit Lama, Kec. Ilir Barat 1 Kota Palembang. Waktu penelitian berlangsung pada tanggal 27 Mei 2024 sampai dengan 06 Juli 2024. Studi pustaka dilakukan dengan penggalan informasi melalui internet dan jurnal ilmiah.

### Alat dan Bahan yang Digunakan

Tabel 1. Alat dan Bahan

No.	Alat	Jumlah	Merek	Negara Pembuat
	Gelas kimia	6	Iwaki	Indonesia
	<i>Hot plate</i>	1	Merck	Jerman
	Erlenmeyer	5	Iwaki	Indonesia
	<i>Magnetic stirrer</i>	1	Merck	Jerman
	Kaca arloji	1	Pyrex	Inggris

	pH Meter	1	Mettler Toledo	USA
	Labu ukur	6	Pyrex	Inggris
	Neraca analitik	1	Radwag	Polandi a
	<i>Oven</i>	1	MEMME RT	Germa n
0	Pipet ukur	1	Pyrex	Inggris
1	Bola karet	1	Pyrex	Inggris
2	Kertas Saring	20	Whatma n	Inggris
3	Desikator	1	DURAN	Germa n
4	Pipet Tetes	1	Pyrex	Inggris
5	Corong	1	Pyrex	Inggris
6	Spektrometri FTIR	1	SHIMAD ZU	Jepang
7	<i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i>	1		
o.	Bahan		Merek	Negara Pembuat
	Bottom Ash		ROFA	Indone sia
	Natrium hidroksida		PUMA	Indone sia
	Aquadest		ROFA ROFA	Indone sia
	Reagent Cu			
	Asam Sulfat			Indone sia
	Asam Klorida			Indone

---

## Prosedur Penelitian

1. Pengeringan Awal *Bottom Ash*
  - a. Ditimbang *bottom ash* menggunakan neraca analitik.
  - b. Dimasukkan *bottom ash* ke dalam cawan.
  - c. Dikeringkan *bottom ash* di dalam oven dengan temperature 100°C selama 12 jam.
  - d. Dimasukkan *bottom ash* ke dalam desikator dan siap digunakan.
2. Persiapan Sampel  $\text{CuSO}_4$ 
  - a. Ditimbang sebanyak 44 gram  $\text{CuSO}_4$
  - b. Dimasukan  $\text{CuSO}_4$  kedalam labu ukur lalu dilarutkan menggunakan aquadest sebanyak 500 ml.
  - c. Diambil filtrat sebanyak 44 ml untuk setiap sampel yang akan dikontakkan dengan adsorben.
3. Pembuatan Silika Gel
  - a. Diambil masing-masing 44 gram *Bottom ash* yang telah siap digunakan untuk di kontakkan dengan larutan  $\text{NaOH}$  yang berkonsentrasi 1 M di dalam erlenmeyer berukuran 250 ml.
  - b. Diaduk filtrat dengan menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam dan didiamkan selama 24 jam.
  - c. dicuci bersih residu abu dasar menggunakan *demineralized water* hingga filtrat yang diperoleh netral dan bebas ion klorida.
  - d. Disaring residu dengan kertas saring whatman no. 41 yang dioven selama 15 menit, ditimbang dan dicatat massanya.
  - e. Dibilas endapan yang diperoleh dengan 150 mL akuades panas, lalu didinginkan pada suhu kamar dan dicatat volumenya.
  - f. Disaring larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  terlebih dahulu, kemudian ditambahkan  $\text{HCl}$  1M tetes demi tetes sambil diaduk dengan magnetic stirrer sehingga terbentuk gel dan diteruskan sampai pH 7.
  - g. Diamkan selama 18 jam dan ditutup dengan aluminium foil.
  - h. Disaring gel yang terbentuk dengan corong buchner dan kertas saring whatman no. 41, dan dicatat massa gel yang diperoleh.
  - i. Dicuci dengan akuades sampai netral dan dikeringkan pada suhu 80 °C selama 12 jam. Silika gel dan kertas saring ditimbang dan dicatat massanya

- j. Digerus menggunakan alu dan mortar.
- k. Dikalsinasi serbuk silika gel pada suhu 550 °C selama 4 jam dalam furnace, selanjutnya ditimbang dan disimpan dalam desikator.
- 4. Proses Pengkontakkan *Bottom Ash* dengan  $\text{CuSO}_4$ 
  - a. Dikontakkan sample dengan adsorben yang telah diaktifasi sebanyak 44 gram dalam beaker gelas dengan interval konsentrasi aktivator 1 M selama 30 menit, 60 menit, 90 menit dan 120 menit lalu kemudian menyaringnya dengan kertas saring whatman 41.
  - b. Diukur filtrat dengan *Spektrofotometer Serapan Atom* untuk mengetahui konsentrasi kandungan amonia yang tersisa dalam larutan.

#### Pengamatan

Percobaan ini dilakukan dengan berbagai macam perlakuan dan variasi berat bahan penyerap dan konsentrasi larutan activator untuk mendapatkan titik optimum dalam proses penyerapan adsorpsi logam  $\text{CuSO}_4$ . Adapun data yang diperlukan dalam penelitian ini, yaitu: konsentrasi adsorbat awal ( $c_0$ ), konsentrasi adsorbat akhir ( $c_e$ ), kapasitas adsorpsi ( $q$ ) dan % penyerapan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Data Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 27 Mei 2024 sampai dengan 5 Juli 2024, di Laboratorium Utilitas dan Laboratorium Satuan Operasi Politeknik Negeri Sriwijaya dari penelitian tersebut didapatkan data-data sebagai berikut.

Tabel 2. Perlakuan pada Pembuatan Adsorbden Bottom Ash

Jenis Bottom Ash	Konsentrasi NaOH (M)	Konsentrasi HCl (M)	Massa Bottom Ash (gr)	Waktu Aktivasi (jam)
A	1	1	44	24
B	1	1	44	24
C	1	1	44	24

Tabel 3. Hasil Uji Kinerja Bottom Ash terhadap Adsorpsi  $\text{CuSO}_4$

Jenis Bottom Ash	Waktu Kontak (menit)	Suhu Operasi (°C)	C <sub>0</sub> (mg/L)	C <sub>e</sub> (mg/L)	q (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)
A	( )	(°)				

sh	Menit)	C)					)
A	3	8	5	3	2	40	
	0	0	0	0	.27	50	
	6	8	5	2	2	56	
	0	0	0	5	.84	60	
	9	8	5	2	3		
	0	0	0	2	.18		
	1	8	5	2	3		
	20	0	0	0	.41		
B	3	9	5	2	2	44	
	0	0	0	8	.50	54	
	6	9	5	2	3	60	
	0	0	0	3	.07	64	
	9	9	5	2	3		
	0	0	0	0	.41		
	1	9	5	1	3		
	20	0	0	8	.64		
C	3	1	5	2	2	48	
	0	00	0	6	.73	58	
	6	1	5	2	3	64	
	0	00	0	1	.30	68	
	9	1	5	1	3		
	0	00	0	8	.64		
	1	1	5	1	3		
	20	00	0	6	.86		

Tabel 4. Analisa Gugus Fungsi Bottom Ash (FTIR)

Tipe Vibrasi	Bilangan Gelombang
-OH stretch	3400 - 3600
Si-O-Si stretch	1000 - 1100
Al-O stretch	700 - 900
Si-O bend	400 - 500

Tabel 5. Nilai Efisiensi Adsorpsi *Bottom Ash* Terhadap  $\text{CuSO}_4$

Jenis Bottom Ash	Variasi Konsentrasi Cu (mg/L)	Efisiensi Adsorpsi
	10	75
	25	68
	A 50	60
	100	52
	200	45
	10	80
	25	72
	B 50	64
	100	56
	200	48
	10	85
	25	76
	C 50	68
	100	60
	200	52

Tabel 6. Nilai Adsorpsi  $\text{CuSO}_4$  oleh *Bottom Ash* – Model Langmuir

Sampel	Konsentrasi Cu (mg/L)	Ce (mg/L)	qe (mg/L)	e/qe	
A	10	2.5	0.76		
	25	8	1.70	.30	
	50	20	3.02	4.71	
					.62
	100	48	5.25		
	200	110	8.91		.15
B	10	2	0.79		
	25	7	1.82	.52	

				.85
	50	18	3.24	.56
	100	44	5.62	.82
	200	104	9.55	0.89
	10	1.6	0.85	
	25	6	1.91	.88
C	50	16	3.39	3.15
				.72
	100	40	6.03	.64
	200	96	10.47	.17

Tabel 7. Nilai Adsorpsi oleh Adsorben Model Freundlich

Sa mpel	Konsentrasi Cu (mg/L)	log Ce	log qe
A	10	0.40	0.90
	25	1,30	0.12
	50		0
			.23
			0
			.48
	100	1,68	0
			.72
	200	2.04	0
			.95
B	10	0.30	0.85
	25	1,26	0.10
	50		0
			.26
			0

			.51
	100	1,64	0
			.75
	200	2,02	0
			.98
	10	0.18	0.78
	25	1.20	0.07
	50		0
			.28
			0
C			.53
	100	1.60	0
			.78
	200	1.98	1
			.02

Tabel 8. Nilai Mekanisme Adsorpsi Isoterm Langmuir dan Freundlich untuk CuSO<sub>4</sub> pada Bottom Ash

Isoterm	Konstanta	Sam pel A	Sa mpel B	S ampel C
	Qm b	12.5	13.	1
		0.02	2	4.1
		1	0.0	0
Langmuir			25	.030
	R <sup>2</sup>	0.93	0.9	0
		15	319	.9135
	n	1.8	1.9	2
	Kf	0.62	0.7	.1
Freundlich			1	0

				.85
	R <sup>2</sup>	0.99	0.9	0
		23	91	.9996

## Pembahasan

### 1. Analisis Komposisi *Bottom Ash*

Hasil analisis komposisi bottom ash pada Tabel 4. memberikan informasi tentang karakteristik kimia dari bahan adsorben yang digunakan dalam penelitian ini. Komponen utama yang teridentifikasi adalah silika (SiO<sub>2</sub>) dengan persentase 18,57%. Kandungan silika yang signifikan ini merupakan indikator positif untuk potensi bottom ash sebagai adsorben yang efektif.

Silika memiliki peran dalam proses adsorpsi karena strukturnya yang unik dan luas permukaan spesifiknya yang tinggi. Menurut Perumal et al. (2019), silika dalam bottom ash dapat membentuk struktur berpori yang meningkatkan luas permukaan kontak antara adsorben dan adsorbat. Struktur ini memfasilitasi penjerapan ion logam seperti Cu<sup>2+</sup> melalui mekanisme pertukaran ion dan pembentukan kompleks permukaan.

Selain silika, keberadaan aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sebesar 1,60% juga berkontribusi signifikan terhadap kemampuan adsorpsi bottom ash. Alumina memiliki sifat amfoter yang memungkinkannya berinteraksi dengan berbagai jenis adsorbat, baik kationik maupun anionik. Kombinasi silika dan alumina dalam bottom ash menciptakan struktur aluminosilikat yang dikenal memiliki kapasitas pertukaran ion yang baik, terutama untuk logam berat seperti tembaga (Khatari et al., 2017).

Kandungan oksida logam lainnya seperti CaO, K<sub>2</sub>O, MgO, dan Na<sub>2</sub>O, meskipun dalam jumlah kecil, juga dapat berkontribusi pada proses adsorpsi melalui mekanisme pertukaran ion. Kehadiran unsur-unsur ini menambah kompleksitas permukaan adsorben, yang dapat meningkatkan selektivitas terhadap ion logam tertentu.

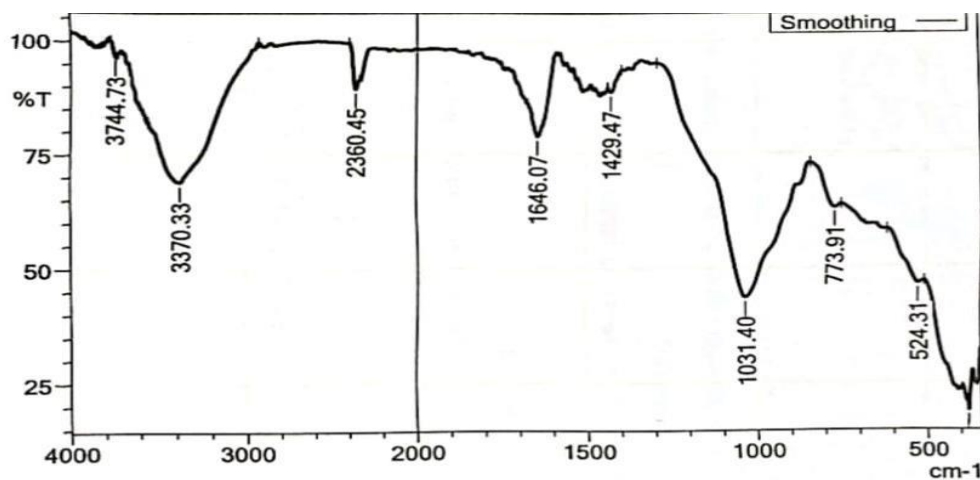
Persentase Loss on Ignition (LOI) sebesar 7,90% mengindikasikan adanya kandungan bahan organik atau karbon yang tidak terbakar dalam bottom ash. Meskipun umumnya dianggap sebagai pengotor, kehadiran karbon dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui mekanisme adsorpsi fisika.

Kadar air (moisture) yang cukup tinggi (37,15%) menunjukkan bahwa bottom ash memiliki kemampuan untuk mengikat air. Hal ini dapat mempengaruhi proses adsorpsi, terutama dalam kondisi basah. Namun, dalam aplikasi praktis, bottom ash biasanya

dikeringkan terlebih dahulu untuk mengoptimalkan kapasitas adsorpsinya. Analisis komposisi ini juga menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat berbahaya seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan arsen (As) sangat rendah atau di bawah batas deteksi. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan bottom ash sebagai adsorben tidak menimbulkan risiko kontaminasi sekunder yang signifikan terhadap lingkungan.

## 2. Analisis Gugus Fungsi *Bottom Ash* (FTIR)

Hasil analisis FTIR berupa analisis gugus fungsi bottom ash dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



Gambar 1. Hasil Analisa FTIR *Bottom Ash*

Analisis FTIR memberikan informasi tentang struktur kimia dan gugus fungsi yang ada pada permukaan bottom ash. Hasil yang ditampilkan pada Tabel 5 mengonfirmasi keberadaan beberapa gugus fungsi kunci yang berperan dalam proses adsorpsi.

Puncak pada bilangan gelombang 3400-3600  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH). Gugus ini memiliki peran penting dalam proses adsorpsi, terutama untuk ion logam, melalui mekanisme pertukaran ion dan pembentukan ikatan hidrogen.

Menurut Cheng et al. (2018), gugus -OH pada permukaan adsorben dapat berinteraksi dengan ion logam melalui pembentukan kompleks permukaan, yang berkontribusi signifikan terhadap kapasitas adsorpsi total.

Puncak yang teridentifikasi pada bilangan gelombang 1000-1100  $\text{cm}^{-1}$  mengindikasikan adanya ikatan Si-O-Si, yang merupakan karakteristik utama dari silika dalam bottom ash. Ikatan ini membentuk kerangka dasar struktur adsorben dan berkontribusi pada stabilitas mekanik dan kimia bottom ash. Selain itu, ikatan Si-O-Si juga dapat berperan dalam adsorpsi melalui interaksi elektrostatik dengan ion logam (Khatri et al., 2017).

Keberadaan puncak pada 700-900  $\text{cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi Al-O mengkonfirmasi adanya struktur aluminosilikat dalam bottom ash. Struktur ini penting karena dapat membentuk situs pertukaran ion yang efektif untuk adsorpsi logam berat. Kombinasi Si-O dan Al-O dalam struktur aluminosilikat menciptakan muatan negatif pada permukaan adsorben, yang sangat menguntungkan untuk adsorpsi kation logam seperti  $\text{Cu}^{2+}$ .

Puncak pada 400-500  $\text{cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi bending Si-O memberikan informasi tambahan tentang struktur silika dalam bottom ash. Vibrasi ini berkaitan dengan fleksibilitas struktur silika, yang dapat mempengaruhi aksesibilitas pori-pori adsorben terhadap adsorbat.

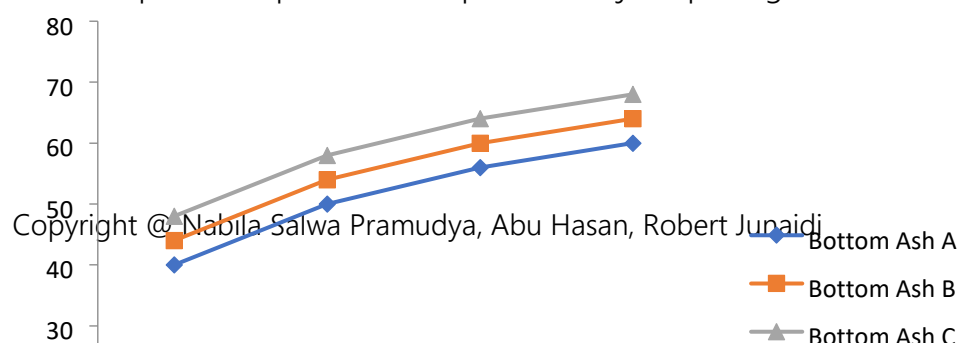
Keberadaan gugus fungsi ini mendukung mekanisme adsorpsi yang melibatkan baik proses fisika maupun kimia pada permukaan adsorben. Adsorpsi fisika dapat terjadi melalui gaya van der Waals dan interaksi elektrostatik, sementara adsorpsi kimia melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan gugus fungsi pada permukaan adsorben.

### 3. Pengaruh Waktu Kontak dan Suhu terhadap Efisiensi Adsorpsi

Data pada Tabel 3 menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat seiring bertambahnya waktu kontak dan suhu operasi. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa perspektif kinetika dan termodinamika adsorpsi.

#### a. Pengaruh Waktu Kontak

Peningkatan efisiensi adsorpsi dengan bertambahnya waktu kontak (dari 30 menit hingga 120 menit) menunjukkan bahwa proses adsorpsi  $\text{Cu}^{2+}$  oleh bottom ash belum mencapai kesetimbangan pada tahap awal. Pada menit-menit awal, laju adsorpsi cenderung tinggi karena tersedianya banyak situs aktif kosong pada permukaan adsorben. Seiring berjalannya waktu, laju adsorpsi melambat karena semakin berkurangnya situs aktif yang tersedia dan meningkatnya resistensi transfer massa. Sampel C, yang dioperasikan pada suhu 100°C, menunjukkan peningkatan efisiensi dari 48% pada 30 menit menjadi 68% pada 120 menit. Peningkatan ini konsisten dengan model kinetika adsorpsi pseudo-orde kedua yang sering diamati pada adsorpsi logam berat oleh adsorben padat (Patel, 2019). Model ini mengasumsikan bahwa laju adsorpsi bergantung pada kuadrat jumlah situs aktif yang tersedia, yang menjelaskan peningkatan signifikan efisiensi pada tahap awal dan perlambatan pada tahap akhir. Ini dapat terlihat jelas pada gambar:



Waktu kontak (menit)

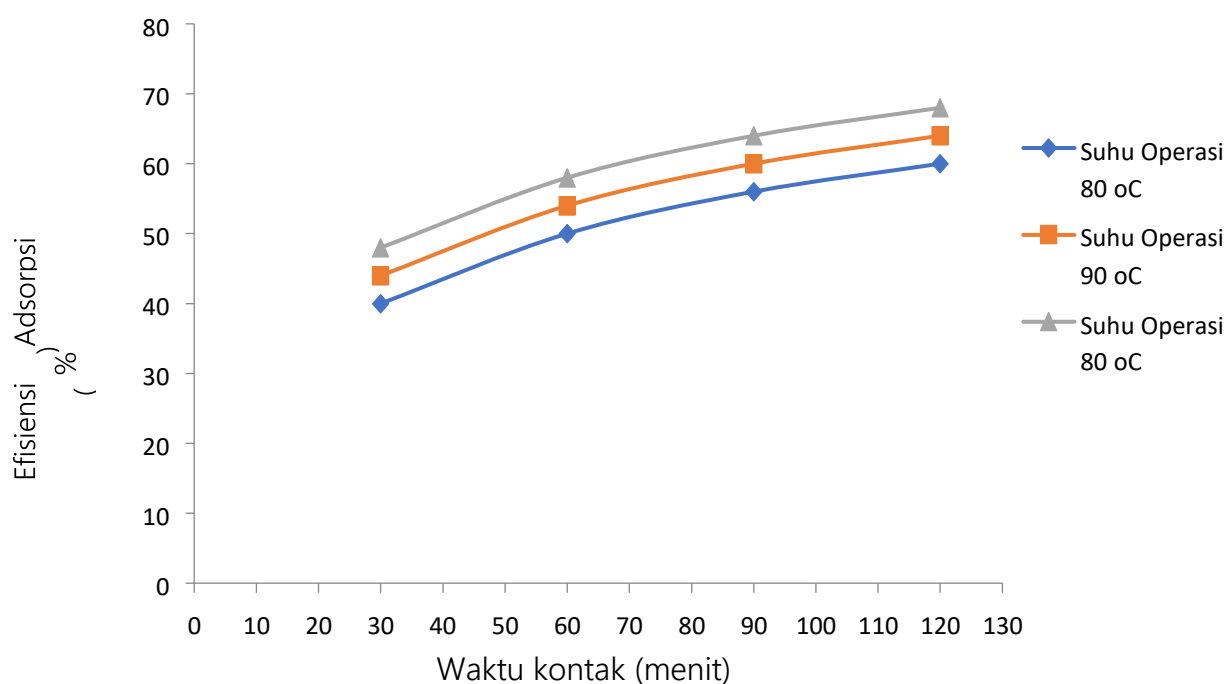
Gambar 2. Diagram Batang Efisiensi Adsorpsi terhadap waktu kontak

Molekul-molekul pada permukaan adsorben akan dikelilingi oleh molekul lain yang asimetris. Hal ini menyebabkan gaya-gaya pada permukaan adsorben menjadi tidak seimbang yang mengakibatkan molekul-molekul pada permukaan adsorben akan menarik molekul lainnya yang memicu terjadinya tahapan adsorpsi. (Osjick, J. dalam Widwastuti H *et. al*, 2019).

Menurut Muchlisiyah dalam Yusrita D *et. al*, (2021) semakin lama waktu kontak pada proses adsorpsi akan meningkatkan penyisihan logam Cu sehingga efisiensi adsorpsinya bertambah. Hal ini sesuai dengan teori semakin lama waktu kontak antara adsorben dan adsorbat menyebabkan semakin banyak terbentuk ikatan antara partikel adsorben dan adsorbat sampai mencapai titik seimbang.

b. Pengaruh Suhu

Pengaruh suhu operasional dilakukan dengan variasi suhu operasional yaitu 80 °C, 90 °C dan 100 °C. Pengaruh suhu operasional ini dapat terlihat pada gambar 4.3 sebagai berikut :



Gambar 3. Grafik Efisiensi adsorpsi dan waktu kontak pada saat suhu operasi 80 °C,

90 °C dan 100 °C

Peningkatan suhu operasi dari 80°C (Sampel A) hingga 100°C (Sampel C) menunjukkan pengaruh positif terhadap efisiensi adsorpsi. Pada waktu kontak 120 menit, efisiensi meningkat dari 60% (80°C) menjadi 64% (90°C) dan 68% (100°C).

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme:

1) Peningkatan Mobilitas Ion

Suhu yang lebih tinggi meningkatkan energi kinetik ion  $\text{Cu}^{2+}$  dalam larutan, mempercepat difusi mereka ke permukaan dan ke dalam pori-pori adsorben.

2) Ekspansi Pori Adsorben

Pemanasan dapat menyebabkan ekspansi pori-pori bottom ash, meningkatkan luas permukaan efektif dan aksesibilitas situs adsorpsi.

3) Desorpsi Air

Suhu tinggi dapat membantu desorpsi molekul air yang sebelumnya menempati situs adsorpsi, membuat lebih banyak situs tersedia untuk ion  $\text{Cu}^{2+}$ .

4) Aktivasi Proses Endotermik

Jika proses adsorpsi bersifat endotermik, peningkatan suhu akan menggeser kesetimbangan ke arah produk ( $\text{Cu}^{2+}$  teradsorp), meningkatkan kapasitas adsorpsi (Kumer et al., 2019).

Meskipun peningkatan suhu menunjukkan efek positif, perlu dipertimbangkan bahwa operasi pada suhu tinggi memerlukan input energi yang lebih besar, yang dapat mempengaruhi efisiensi ekonomi proses secara keseluruhan.

Berdasarkan ketiga grafik di atas menunjukkan bahwa konsentrasi  $\text{Cu}^{2+}$  yang terserap semakin besar seiring dengan meningkatnya suhu operasi atau dengan kata lain peningkatan suhu operasi berbanding lurus terhadap konsentrasi  $\text{Cu}^{2+}$  terserap, Menurut Ghazali *et.al.* dalam Wirawan W *et.al.*, (2015) kenaikan suhu menyebabkan kenaikan kapasitas adsorpsi dan laju adsorpsi. Peningkatan laju adsorpsi ini mengakibatkan adanya gaya adsorpsi yang kuat di antara sisi aktif adsorben dan molekul yang berdekatan dengan fasa adsorbat (Ayanda O S *et.al.* dalam dalam Wirawan W *et.al.*, 2015).

4. Pengaruh Konsentrasi Awal  $\text{CuSO}_4$  terhadap Efisiensi Adsorpsi

Tabel 4.5 menunjukkan tren penurunan efisiensi adsorpsi dengan meningkatnya konsentrasi awal Cu untuk semua sampel bottom ash. Sampel C, yang menunjukkan performa terbaik, memiliki efisiensi 85% pada konsentrasi Cu 10 mg/L, namun menurun menjadi 52% pada konsentrasi 200 mg/L. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa faktor:

a. Ketersediaan Situs Aktif

Pada konsentrasi Cu yang rendah, rasio antara jumlah ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan situs aktif pada permukaan adsorben masih tinggi. Hal ini memungkinkan sebagian besar ion  $\text{Cu}^{2+}$  untuk menemukan situs adsorpsi yang tersedia, menghasilkan efisiensi yang tinggi. Seiring meningkatnya konsentrasi Cu, situs adsorpsi mulai jenuh, menyebabkan penurunan efisiensi.

b. Gaya Dorong Konsentrasi

Meskipun efisiensi menurun, jumlah absolut Cu yang teradsorp sebenarnya meningkat dengan konsentrasi yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan gaya dorong yang dihasilkan dari gradien konsentrasi yang lebih besar antara larutan dan permukaan adsorben.

c. Kompetisi antar Ion

Pada konsentrasi tinggi, terjadi peningkatan kompetisi antar ion  $\text{Cu}^{2+}$  untuk situs adsorpsi yang terbatas. Hal ini dapat menyebabkan beberapa ion tidak teradsorp dan tetap dalam larutan.

d. Perubahan pH Larutan

Peningkatan konsentrasi Cu dapat menyebabkan perubahan pH larutan, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi muatan permukaan adsorben dan kelarutan Cu. Perubahan ini dapat mempengaruhi efisiensi adsorpsi secara keseluruhan.

e. Efek Sterik

Pada konsentrasi tinggi, adsorpsi multilayer dapat terjadi, di mana ion  $\text{Cu}^{2+}$  yang telah teradsorp dapat menghalangi akses ion lain ke situs adsorpsi yang lebih dalam, mengurangi efisiensi keseluruhan.

5. Analisis Isoterm Adsorpsi

Analisis isoterm adsorpsi memberikan mekanisme, kapasitas, dan afinitas adsorpsi Cu oleh bottom ash. Berdasarkan data pada Tabel 9, kedua model isoterm

Langmuir dan Freundlich menunjukkan korelasi yang baik dengan data eksperimental, namun model Langmuir memberikan koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang sedikit lebih tinggi untuk semua sampel.

a. Model Isoterm Langmuir

Model Langmuir mengasumsikan adsorpsi monolayer pada permukaan homogen dengan jumlah situs adsorpsi yang terbatas. Nilai  $R^2$  yang tinggi (0,9135 - 0,9319) mengindikasikan bahwa asumsi ini cukup sesuai dengan karakteristik adsorpsi Cu pada

*bottom ash*. Parameter-parameter Langmuir memberikan informasi penting:

1)  $Q_m$  (kapasitas adsorpsi maksimum)

Nilai  $Q_m$  tertinggi diperoleh pada sampel C (14,1 mg/g), diikuti oleh sampel B (13,2 mg/g) dan A (12,5 mg/g). Hal ini menunjukkan bahwa sampel C memiliki kapasitas adsorpsi terbaik, konsisten dengan hasil efisiensi adsorpsi sebelumnya.

2)  $b$  (konstanta Langmuir)

Nilai  $b$  meningkat dari sampel A (0,021) ke C (0,030), mengindikasikan peningkatan afinitas adsorben terhadap  $\text{Cu}^{2+}$ . Hal ini dapat dikaitkan dengan perbedaan dalam karakteristik permukaan dan distribusi situs aktif antar sampel.

Grafik Isoterm Langmuir Model Langmuir didasarkan pada asumsi bahwa energi adsorpsi adalah konstan dan tidak tergantung pada cakupan permukaan dimana adsorpsi terjadi pada situs terlokalisasi tanpa interaksi antara molekul adsorbat. Konsentrasi  $\text{Cu}^{2+}$  teradsorpsi pada permukaan adsorben secara homogen membentuk monolayer. Jumlah  $\text{Cu}^{2+}$  yang dapat teradsorpsi pada permukaan adsorben dinyatakan sebagai kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_m$ ). Bentuk linear model isoterm adsorpsi Langmuir adalah

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L}$$

(SARASWATI IN L P A, 2022)

## 6. Mekanisme Adsorpsi

Berdasarkan hasil analisis komposisi, FTIR, dan isoterm adsorpsi, beberapa mekanisme adsorpsi  $\text{Cu}^{2+}$  oleh *bottom ash* dapat diusulkan:

### 1. Pertukaran Ion

Kehadiran kation seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$  dalam *bottom ash* memainkan peran penting dalam proses adsorpsi, terutama dalam konteks pertukaran ion dengan  $\text{Cu}^{2+}$ . Kation-kation ini dapat digantikan oleh ion  $\text{Cu}^{2+}$  pada permukaan adsorben, memungkinkan  $\text{Cu}^{2+}$  untuk menempel pada situs-situs aktif yang tersedia di permukaan *bottom ash*. Proses pertukaran ion ini sangat sesuai dengan model Langmuir, yang mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada situs spesifik dengan jumlah yang terbatas. Dalam model ini, setiap situs adsorpsi dianggap memiliki afinitas yang sama untuk ion tertentu, sehingga memungkinkan pertukaran kation terjadi secara efisien, meningkatkan efektivitas adsorpsi  $\text{Cu}^{2+}$  oleh *bottom ash*.

### 2. Kompleksasi Permukaan

Gugus hidroksil ( $-\text{OH}$ ) yang terdeteksi melalui analisis FTIR memiliki peran penting

dalam pembentukan kompleks dengan ion  $\text{Cu}^{2+}$ . Proses ini terjadi melalui ikatan koordinasi antara ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan atom oksigen dalam gugus  $-\text{OH}$ , di mana atom oksigen bertindak sebagai donor elektron, membentuk ikatan yang kuat dengan  $\text{Cu}^{2+}$ . Pembentukan kompleks ini meningkatkan stabilitas dan afinitas adsorben terhadap ion  $\text{Cu}^{2+}$ , yang dapat dijelaskan oleh tingginya nilai konstanta Langmuir (b). Nilai konstanta yang tinggi menunjukkan bahwa adsorben memiliki kapasitas dan kecenderungan yang kuat untuk mengikat  $\text{Cu}^{2+}$ , menjadikan mekanisme ini krusial dalam proses adsorpsi ion logam berat.

### 3. Adsorpsi Fisika

Gaya van der Waals dan interaksi elektrostatik antara ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan permukaan bermuatan negatif dari aluminosilikat dalam bottom ash berperan penting dalam proses adsorpsi fisika. Interaksi ini memungkinkan  $\text{Cu}^{2+}$  untuk menempel pada permukaan adsorben, membentuk lapisan-lapisan adsorbat yang stabil. Mekanisme ini mendukung terbentuknya adsorpsi multilayer, yang tidak terbatas pada satu lapisan permukaan saja, sehingga memberikan penjelasan yang tepat untuk pola adsorpsi yang sesuai dengan model Freundlich. Model Freundlich, yang mencerminkan adsorpsi multilayer dan permukaan yang heterogen, memperlihatkan bagaimana interaksi ini menghasilkan penyerapan  $\text{Cu}^{2+}$  yang lebih kompleks dan efisien dalam sistem adsorpsi.

Pada pH tertentu, ion  $\text{Cu}^{2+}$  dapat mengalami presipitasi sebagai  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  pada permukaan adsorben, sebuah proses yang dikenal sebagai presipitasi permukaan. Meskipun presipitasi ini bukan merupakan mekanisme adsorpsi murni, namun tetap berkontribusi secara signifikan terhadap penghilangan total  $\text{Cu}^{2+}$  dari larutan. Proses ini terjadi ketika konsentrasi  $\text{Cu}^{2+}$  dan kondisi pH memungkinkan terbentuknya endapan  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  yang stabil, yang kemudian menempel pada permukaan adsorben. Dengan demikian, selain melalui adsorpsi fisik dan kimia, penghilangan  $\text{Cu}^{2+}$  dari larutan juga diperkuat oleh presipitasi permukaan, meningkatkan efisiensi keseluruhan dalam proses pengolahan air atau limbah.

### 4. Difusi Intrapartikel

Struktur berpori dari bottom ash memberikan jalur yang luas bagi difusi ion  $\text{Cu}^{2+}$  ke dalam pori-pori adsorben, memungkinkan proses adsorpsi yang lebih efektif. Difusi ini menjadi lebih signifikan seiring dengan meningkatnya waktu kontak, karena molekul  $\text{Cu}^{2+}$  memiliki lebih banyak waktu untuk menembus dan menjangkau situs-situs aktif yang lebih dalam di dalam pori-pori. Selain itu, suhu yang lebih tinggi juga mempercepat pergerakan molekul, meningkatkan laju difusi dan memperkuat ikatan antara  $\text{Cu}^{2+}$  dan permukaan

adsorben. Kombinasi dari waktu kontak yang lama dan suhu tinggi ini, seperti yang tercermin pada Tabel 3, menjelaskan peningkatan efisiensi adsorpsi  $\text{Cu}^{2+}$  oleh bottom ash.

## SIMPULAN

Dalam penelitian saya yang berjudul "Kinetika Pembentukan Silika Gel dari Bottom Ash Sebagai Adsorben" didapatkan beberapa Kesimpulan, antara lain yaitu:

1. Kandungan silika pada *bottom ash* yang relative sedikit menyebabkan beberapa sampel penelitian mengalami kegagalan karena tidak terbentuk gel.
2. Efisiensi adsorpsi  $\text{CuSO}_4$  oleh bottom ash meningkat seiring dengan peningkatan waktu kontak dan suhu operasi.
3. Efisiensi tertinggi dicapai oleh sampel C dengan suhu operasi  $100^\circ\text{C}$  dan waktu kontak 120 menit, dengan efisiensi mencapai 68%.
4. Efisiensi adsorpsi menurun seiring meningkatnya konsentrasi awal  $\text{Cu}^{2+}$ , di mana rasio antara ion  $\text{Cu}^{2+}$  dan situs aktif pada permukaan adsorben menjadi lebih rendah.

## DAFTAR PUSTAKA

Aisah, Siti; Zulfikar, Z.; Sulistiyo, dan Yudi Aris. Sintesis Silika Gel Berbasis Fly Ash Batu Bara PLTU Paiton Sebagai Adsorben Zat Warna Rhodamin B. Berkala Saintek [S.I.], v. 6, n. 1, p. 31-35, may 2018.

Alasadi, A.M., Khaili, F.I. dan Awwad, A.M., 2019, Adsorption of Cu (II), Ni (II) and Zn (II) ions by nano kaolinite: Thermodynamics and kinetics studies, Chem. Int., 5(4), 258-268.

Asokbunyarat, V., Lens, P.N.L., van Hullebusch, E.D., dan Annachhatre, A.P., 2015, Coal Bottom Ash as Sorbing Material for Fe (II), Cu (II), Mn (II), and Zn (II) Removal from Aqueous Solutions, Water Air Soil Pollut., 226(143), 1-17.

Day, R.A. dan Underwood, A.L. 2002. Analisis Kimia Kuantitatif. Jakarta: Erlangga.

Dincer, A.R., Güneş, Y. dan Karakaya, N., 2007, Coal-Based Bottom Ash (CBBA)

Waste Material As Adsorbent for Removal of Textile Dyestuffs From Aqueous Solution, J. Hazard. Mater., 141, 529–535.

Foo, K.Y. dan Hameed, B.H. (2010) Insights into the Modeling of Adsorption Isotherm Systems. Chemical Engineering Journal, 156, 2-10.

Gupta, H. dan Roy, S. 2007. Geothermal Energy an Alternate Resource for the 21<sup>st</sup> Century. Amsterdam: Elsevier B.V.

Kartika, Siska Ela. 2010. Modifikasi Limbah Fly Ash sebagai Adsorben Zat Warna Tekstil

Congo Red yang Ramah Lingkungan dalam Upaya Mengatasi Pencemaran Industri Batik Di Surakarta. Surakarta : Penerbit Universitas Sebelas Maret.

Kurama, h. dan kaya, m., 2007, usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture, construction and building material, 22: 1922-1928.

Lujan, M. Crystalline Silica Primer Staff, Branch of Industrial Mineral.

Mujiyanti, D. R., Nuryono, dan Kunarti, E. S. (2010). Sintesis dan Karakterisasi Silika Gel dari Abu Sekam Padi yang Diimobilisasi dengan 3- (Trimetoksisilil)-1 Propantioil. *Jurnal Sains dan Terapan Kimia*, 4(2), 150–167.

Perera, S.D. dan Trautman L.R., 2006, Geopolymers with the Potential for Use as Refractory Castables, *Azojomo*, 2: 132-140

Skoog, D. A. 2000. Principles of Instrumental Analysis. USA: CSB College Publishing.

Supriyanto, Samin dan Kamal, Z. 2007. Analisis Cemar Logam Berat Pb, Cu dan Cd Pada Ikan Air Tawar Dengan Metode Spektrometri Nyala Serapan Atom (SSA). Prosiding Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta. ISSN 1978-0176.

Virandi. Muhammad Okta. 2012, "Pembuatan Silika Gel dari Abu Cangkang Kelapa Sawit dari Limbah PT.SEP. Laporan akhir Tidak diterbitkan.

Wahyuni, S., 2010, Adsorpsi Ion Logam Zn(II) Pada Zeolit A Yang Disintesis Dari Abu Dasar Batubara PT Ipmomi Paiton Dengan Metode Batch, Tugas Akhir Jurusan Kimia, Fakultas MIPA ITS, Surabaya.

Wicaksana, E. 2016. Pengaruh Suhu Pirolisis dan Jumlah Katalis Silika Gel Terhadap Yield dan Kualitas Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik Jenis Polypropilena. Indonesia-Sumatra Utara: Skripsi Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik USU.

Welveni.2010. "Pemanfaatan Limbah Padat Abu Fly Ash Batubara menjadi Bahan Baku Pembuatan Silica Gel". (on-line) Riau : Universitas Negeri Riau.

Y. A. Sulistiyo, N. Andriana, B. Piluharto, dan Z. Zulfikar, "Silica Gels from Coal Fly Ash as Methylene Blue Adsorbent: Isotherm and Kinetic Studies," *Bull.Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 12, no. 2, p. 263, 2017.

Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze S. dan Ang, H. M. (2014). "Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review." *Adv. Colloid Interface Sci.*, 209, 172-184