

Submitted: 6 October 2025

Revised: 19 April 2025

Accepted: 11 June 2025

## OPTIMASI ADSORPSI TIMBAL (Pb) MENGGUNAKAN KERTAS HVS BEKAS DENGAN PENDEKATAN *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY*

Novi Sylvia\*, Rozanna Dewi, Mawaddah Fitria, Melani Annisa Putri, Wiza Ulfa Fibarzi  
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Aceh Utara, 24353,  
Indonesia

\*Email: [novi.sylvia@unimal.ac.id](mailto:novi.sylvia@unimal.ac.id)

### Abstrak

Salah satu limbah industri yang berbahaya adalah logam timbal (Pb). Adsorpsi sering digunakan untuk mengurangi unsur logam berat karena prosesnya yang sederhana dan efektif. Pada penelitian ini, digunakan adsorben dari limbah kertas HVS karena kandungan selulosanya yang memungkinkan penyerapan logam tertentu. Selain itu, limbah kertas mudah diperoleh dan berbiaya rendah. Penelitian dilakukan untuk mengkaji pengaruh waktu kontak dan massa adsorben terhadap kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan. Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu pembuatan adsorben dan limbah artifisial, serta proses adsorpsi secara *batch* dengan rentang massa adsorben (0,2 sampai 1 g) dan waktu kontak (30 sampai 120 menit). Optimasi parameter proses dilakukan terhadap konsentrasi awal dan waktu kontak menggunakan pendekatan *response surface methodology* (RSM). Desain penelitian ini menggunakan model *central composite design* (CCD) model linier yang menunjukkan nilai  $R^2$  sebesar 0,785. Hasil optimum diperoleh pada konsentrasi limbah 20 ppm dengan waktu kontak 113 menit dan massa adsorben 1 g, menghasilkan efisiensi penyisihan maksimum 95% dan kapasitas adsorpsi maksimum 1.254 mg/g.

**Kata Kunci:** Adsorben; Adsorpsi; Isoterm adsorpsi; Kertas HVS bekas; Timbal (Pb)

### Abstract

*One of the dangerous industrial wastes is lead (Pb). Adsorption is often used to lower heavy metal levels because of its simple and effective process. In this study, adsorbents from HVS paper waste were used because of their cellulose content, allowing certain metals to be absorbed. In addition, paper waste is easy to obtain and low-cost. The study examined the effect of contact time and adsorbent mass on adsorption capacity and elimination efficiency. The research was carried out in three stages: adsorbent synthesis, artificial waste synthesis, and batch adsorption process with adsorbent mass range (0.2 to 1 g) and contact time (30 to 120 minutes). Process parameter optimization was carried out on the initial concentration and contact time using the response surface methodology (RSM) approach. The research design used a linear model, central composite design (CCD), which showed an  $R^2$  value of 0.785. Optimum results were obtained at a waste concentration of 20 ppm with a contact time of 113 minutes and an adsorbent mass of 1 g, resulting in a maximum dispensing efficiency of 95% and a maximum adsorption capacity of 1,254 mg/g.*

**Keywords:** Adsorbent; Adsorption; Adsorption isotherm; HVS paper waste; Lead (Pb)

### 1. PENDAHULUAN

Penyisihan logam berat dari limbah cair sangat penting karena logam berat merupakan bahan beracun yang dapat menimbulkan dampak serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), dan

arsenik (As) memiliki tingkat toksisitas yang tinggi, yang dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan seperti kerusakan organ, gangguan saraf, penyakit kronis, dan kanker. Paparan jangka panjang terhadap logam-logam ini, meskipun dalam konsentrasi rendah, dapat mengakibatkan akumulasi

dalam tubuh karena sulit diuraikan dan dikeluarkan, sehingga menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. Selain itu, pencemaran lingkungan menjadi perhatian utama, karena limbah cair yang mengandung logam berat dapat mencemari sumber air seperti sungai, danau, dan air tanah, yang pada gilirannya merusak ekosistem akuatik dan mengganggu rantai makanan. Jika tidak ditangani dengan baik, logam berat dapat meresap ke dalam tanah, merusak kesuburan, dan mengkontaminasi tanaman. Banyak negara telah memberlakukan regulasi yang ketat mengenai batas maksimum kandungan logam berat khususnya timbal (Pb) sebesar 0,005 ppm dalam limbah cair (SNI 01-3553-2006) dan kegagalan untuk mematuhi peraturan ini dapat mengakibatkan sanksi hukum yang berat (Gultom & Lubis, 2014; Permanawati et al., 2013).

Selain aspek lingkungan dan kesehatan, penyerapan logam berat juga berkontribusi pada pemulihan logam yang memiliki nilai ekonomi tinggi seperti tembaga dan seng. Proses penyerapan memungkinkan pemulihan logam-logam ini untuk didaur ulang, yang pada akhirnya mengurangi kebutuhan untuk menambang sumber daya alam baru. Oleh karena itu, penyerapan logam berat dari limbah cair tidak hanya melindungi kesehatan manusia dan lingkungan, tetapi juga mendukung pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan (Khoo et al., 2018).

Salah satu logam berat pencemar yang berbahaya dalam industri yaitu timbal. Timbal masih digunakan dalam berbagai aplikasi industri meskipun penggunaannya telah menurun. Salah satu penggunaan utama timbal adalah dalam pembuatan baterai timbal-asam, yang banyak digunakan dalam kendaraan bermotor dan sebagai sumber daya cadangan untuk sistem tenaga listrik. Selain itu, timbal juga digunakan dalam beberapa cat dan pelapis untuk melindungi permukaan dari korosi, meskipun penggunaannya telah dibatasi karena potensi bahaya bagi kesehatan (Moelyaningrum, 2020; Permanawati et al., 2013).

Proses pemisahan timbal dari limbah cair merupakan langkah penting dalam pengelolaan limbah industri yang mengandung logam berat. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk memisahkan dan menghilangkan timbal dari limbah cair, di antaranya: presipitasi, pertukaran ion, koagulasi, adsorpsi, filtrasi dengan membran, dan elektrolisis. Di antara semua proses pemisahan timbal dari limbah cair yang disebutkan, adsorpsi adalah metode yang paling banyak digunakan dalam industri. Proses adsorpsi merupakan metode yang efektif dan sering digunakan untuk pemisahan timbal dari limbah cair pada konsentrasi rendah dan memiliki efisiensi pemisahan yang tinggi (Rahmi et al., 2018). Proses ini dianggap ramah lingkungan karena memungkinkan penggunaan adsorben berbasis biomassa atau limbah pertanian, serta potensi regenerasi adsorben untuk mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang. Bahan dasar adsorben yang dapat digunakan, seperti karbon aktif, zeolit, biomassa, atau material berpori lainnya. Dalam beberapa tahun terakhir, telah terjadi pengembangan adsorben alternatif berbiaya rendah yang memiliki kemiripan dengan karbon aktif komersial dari segi

keunggulan. Salah satu di antaranya adalah perusahaan yang terlibat dalam pengembangan bio-adsorben yang terbuat dari selulosa (Afrianita & Dewilda, 2013; Gultom & Lubis, 2014; Mulyawan et al., 2015).

Kertas bekas merupakan material selulosa yang ketersediaannya melimpah dengan kandungan selulosanya di atas 90% dan dapat diperbarui, sehingga berpotensi digunakan sebagai adsorben logam berat. Limbah kertas menyumbang sekitar 25 hingga 33% dari total sampah di tempat pembuangan (Amalia et al., 2022; Rahmi et al., 2018). Jika dibuang begitu saja akan mengakibatkan pelepasan senyawa klorin ke lingkungan, sehingga menyebabkan pencemaran udara, air, dan tanah, sehingga kertas bekas dapat dimanfaatkan sebagai adsorben logam berat.

Pemanfaatan kertas HVS sebagai adsorben timbal telah dilakukan sebelumnya oleh Amalia et al. (2022), begitu juga dengan Fitria et al. (2023) dan Maulana et al. (2022). Namun, penelitian-penelitian tersebut hanya mempelajari pengaruh variabel terhadap efisiensi adsorpsi. Belum pernah dilakukan optimasi pada variabel-variabel tersebut. Pada penelitian ini, dilakukan optimasi parameter proses berupa konsentrasi awal dan waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan. Rancangan penelitian menggunakan *central composite design* (CCD) dalam pendekatan *response surface methodology* (RSM) dengan bantuan perangkat lunak Design Expert Versi 13. RSM adalah sebuah teknik pemodelan empiris yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara seperangkat faktor eksperimental dan respons yang diamati. Rancangan CCD dipilih karena hanya terdapat dua variabel utama yang dianalisis dan dianggap sangat berpengaruh terhadap proses. Secara umum, teknik RSM terdiri dari tiga langkah utama, yaitu melakukan eksperimen secara statistik, memperkirakan koefisien dalam model matematis, dan memprediksi respons serta memeriksa kecocokan model (Singh & Bhatnara, 2020).

## 2. BAHAN DAN METODE

### 2.1 Bahan

Bahan baku yang digunakan antara lain limbah kertas HVS bekas, NaOH 10%, dan Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> pro analisis (Smartlab).

### 2.2 Metode Penelitian

#### 2.2.1 Preparasi adsorben dari kertas HVS bekas

Limbah kertas HVS bekas dipotong dengan ukuran yang seragam sekitar 2 cm. Lalu dilakukan aktivasi untuk menghilangkan pengotornya berupa lignin, dengan merendamnya dalam larutan NaOH 10% sambil diaduk selama 2 jam. Kemudian dilakukan penyaringan dan pencucian menggunakan akuades sampai pH-nya netral yaitu 6,5-7. Setelah itu, kertas tersebut dikeringkan di dalam oven pada temperatur 105 °C.

#### 2.2.2 Pembuatan larutan limbah artifisial Pb 20 ppm

Serbuk Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> sebanyak 1,6 g dilarutkan dengan akuades dalam labu ukur pada volume 1.000 mL untuk mendapatkan larutan baku Pb 1.000 mg/L. Sebanyak 2

mL larutan baku diencerkan menjadi 100 mL untuk mendapatkan larutan limbah Pb 20 ppm.

2.2.3 Proses adsorpsi larutan Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> menggunakan adsorben kertas HVS bekas

Sebanyak 100 mL limbah Pb 20 ppm diadsorpsi menggunakan adsorben dengan variasi jumlah adsorben dan waktu kontak seperti pada Tabel 2. Selama proses adsorpsi berlangsung, larutan diaduk dengan menggunakan pengaduk magnetik. Setelah itu, larutan limbah disaring dengan kertas saring. Untuk menganalisis konsentrasi timbal dalam larutan limbah, digunakan spektroskopi serapan atom (AAS) merek Thermo Scientific. Penentuan efisiensi penyisihan Pb selanjutnya ditentukan dalam persamaan (1).

$$\text{Efisiensi penyisihan (\%)} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

Di mana C<sub>i</sub> adalah konsentrasi awal (mg/L) dan C<sub>e</sub> adalah konsentrasi akhir (mg/L).

Perhitungan kapasitas adsorpsi (q<sub>e</sub>) dapat dihitung menggunakan persamaan (2).

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{m} \times V \quad (2)$$

Di mana q<sub>e</sub> adalah Pb yang teradsorpsi oleh adsorben (mg/g), C<sub>i</sub> adalah konsentrasi awal Pb (mg/L), C<sub>e</sub> adalah konsentrasi akhir Pb (mg/L), m adalah massa adsorben (g), dan V adalah volume larutan yang diadsorpsi (L).

Penelitian ini memiliki dua variabel respons, yaitu efisiensi penyisihan (Y<sub>1</sub>) dan kapasitas adsorpsi (Y<sub>2</sub>). Penelitian dijalankan menggunakan *response surface methodology* (RSM) dengan pendekatan *desirability function* (DF) menggunakan perangkat lunak Design Expert 13. Desain eksperimen dilakukan secara *central composite design* (CCD) dengan 2 variabel bebas, yaitu massa adsorben (X<sub>1</sub>) dan waktu kontak (X<sub>2</sub>), dan terdiri dari 13 perlakuan dan dijalankan secara acak. Faktor dan tingkat penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor dan tingkat penelitian

Faktor	Tingkat				
	-α	-1	0	+1	+α
Massa adsorben (g)	0,03	0,2	0,6	1	1,2
Waktu kontak (menit)	11	30	90	120	139

3. PEMBAHASAN

3.1 Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi

Dari data Tabel 2, estimasi nilai respons dilakukan menggunakan model linier melalui perangkat lunak Design Expert. Berdasarkan analisis regresi berganda, persamaan efisiensi penyisihan Pb diturunkan ke dalam model statistik yang dibentuk dari data eksperimen, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 3 (Sadhukhan et al., 2016; Khoo et al., 2018; Kutluay et al., 2020).

$$Y_1 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + \dots + \epsilon \quad (3)$$

Persamaan ini menunjukkan hubungan antara variabel respons efisiensi penyisihan dengan variabel bebas. Tahapan optimasi variabel independen terhadap variabel dependen. Berdasarkan data pada Tabel 2, efisiensi penyisihan (Y<sub>1</sub>) tertinggi yang dicapai adalah

94%, sedangkan nilai terendah yang tercatat adalah 60%. Sementara itu, kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 3.674 mg/g, dan nilai minimumnya adalah 750 mg/g. Persamaan korelasi antara variabel bebas dan kapasitas adsorpsi ditunjukkan pada Persamaan 4 dan 5.

$$Y_1 = 82,67 + 10,36.X_1 + 3,57.X_2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 1729,62 + 306,21.X_1 - 733,68.X_2 \quad (5)$$

Di mana X<sub>1</sub> adalah waktu kontak dan X<sub>2</sub> adalah massa adsorben.

Tabel 2. Matriks desain eksperimen CCD untuk efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi

No	X <sub>1</sub> (menit)	X <sub>2</sub> (g)	Efisiensi penyisihan (Y <sub>1</sub> ) (%)	Kapasitas adsorpsi (Y <sub>2</sub> ) (mg/g)
1	75	0,6	85	1764
2	75	0,6	85	1764
3	30	0,2	75	3025
4	11	0,6	60	750
5	75	1,2	87	900
6	75	0,03	70	1632
7	75	0,6	85	1764
8	120	0,2	92	3674
9	120	1	95	954
10	30	1	77	775
11	139	0,6	94	1900
12	75	0,6	85	1764
13	75	0,6	85	1764

Tabel 3. Statistik ringkasan model regresi optimasi untuk efisiensi penyisihan

Source	Sequential p-value	Lack of fit p-value	R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	
Linear	0,0002		0,7865	0,6323	Suggested
2FI	0,9197		0,7631	0,4949	
Quadratic	0,4074		0,7643	0,0372	
Cubic			10,000		Aliased

Tabel 3 menunjukkan nilai R<sup>2</sup> model linier yang mendekati 1 untuk memprediksi efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi sebagai variabel respons, bersama dengan p-value yang lebih kecil di semua model. Ketika nilai R<sup>2</sup> mendekati 1, hal ini menandakan nilai p-value yang lebih kecil mengindikasikan model yang lebih baik untuk prediksi respons (Ghosh et al., 2019). Secara khusus, analisis dari Tabel 4 mengindikasikan bahwa model linier untuk respon Y<sub>1</sub> tidak bersifat bias, yang menegaskan penerapannya dalam menggambarkan hubungan antara respon Y dan variabel interaksi.

Demikian pula Tabel 4 yang juga menggambarkan keefektifan model linier dengan nilai  $R^2 = 0,6015$ . Analisis Tabel 4 menegaskan bahwa model linier untuk respon  $Y_2$  yang disarankan, mendukung kesesuaiannya dalam menggambarkan hubungan antara respon  $Y_2$  dan variabel interaksi (Ghosh et al., 2019; Kutluay et al., 2020).

**Tabel 4.** Statistik ringkasan model regresi optimasi untuk kapasitas adsorpsi (mg/g)

Source	Sequential p-value	Lack of fit p-value	$R^2$	Predicted $R^2$	
<b>Linear</b>	<b>0,01</b>		<b>0,6015</b>	<b>0,1271</b>	<b>Suggested</b>
2FI	0,711		0,4772	-0,4872	
Quadratic	0,9911		0,3295	-17,624	
Cubic			10,000		Aliased

Tabel 5 menunjukkan hasil analisis varians (ANOVA) untuk model linier efisiensi penyisihan timbal. ANOVA untuk model linier pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai probabilitas ( $Prob > F$ ) untuk variabel  $X_1$  dan  $X_2$  lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa model linier, di mana variabel  $X_1$  dan  $X_2$  secara signifikan mempengaruhi efisiensi penyisihan timbal. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik, variabel-variabel tersebut memiliki pengaruh yang besar terhadap efisiensi penyisihan timbal (Ghaedi et al., 2015; Hill, 1949; Mulyawan et al., 2015; Singh & Bhataria, 2020).

**Tabel 5.** ANOVA model linier efisiensi penyisihan timbal

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	969,06	2	484,53	23,1	0,0002	Significant
$X_1$ - Waktu Kontak	863,61	1	863,61	41,18	< 0,0001	
$X_2$ -Massa Adsorben	105,44	1	105,44	5,03	0,048	
Residual	209,71	10	20,97			
Lack of Fit	209,71	6	34,95			
Pure Error	0					
Cor Total	1178,77					

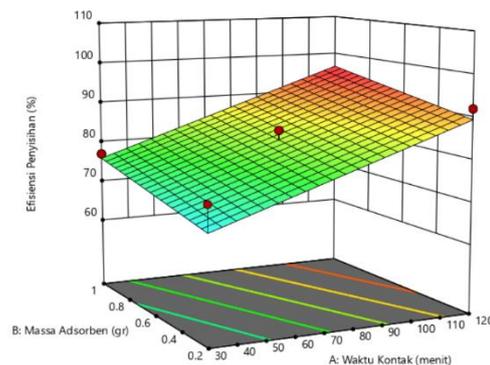
Tabel 6 menunjukkan hasil analisis varians (ANOVA) untuk model linier kapasitas adsorpsi timbal. ANOVA untuk model linier pada Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai probabilitas ( $Prob > F$ ) untuk variabel  $X_2$  lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa model linier, di mana variabel  $X_2$  secara signifikan mempengaruhi kapasitas adsorpsi timbal. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik variabel-variabel tersebut tidak terlalu berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi timbal, namun tetap dimasukkan ke dalam model, mengingat kemungkinan variabel-

variabel tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap adsorpsi.

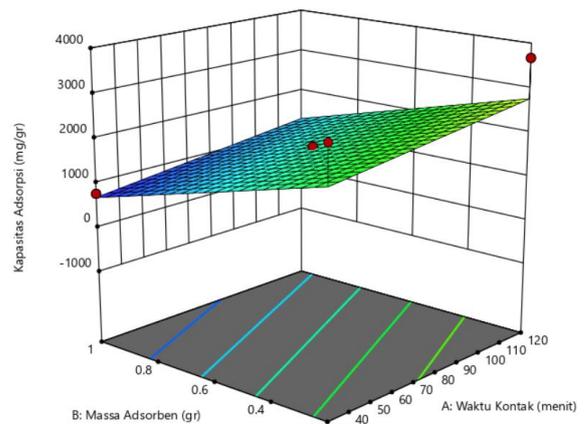
**Tabel 6.** ANOVA model linier kapasitas adsorpsi

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	5,21E+09	2	2,61E+09	7,55	0,01	significant
$X_1$ -Waktu kontak	7,54E+08	1	7,54E+08	2,19	0,0170	
$X_2$ -Massa adsorben	4,46E+09	1	4,46E+09	12,91	0,0049	
Residual	3,45E+09	10	3,45E+08			
Lack of fit	3,45E+09	6	5,75E+08			
Pure error	0	4	0			
Cor total	8,66E+09	12				

Gambar 1 menunjukkan bahwa respons optimasi efisiensi penyerapan timbal sebesar 95% berada pada massa adsorben 1 g dan waktu kontak 113 menit. Kapasitas adsorpsi optimum yang diperoleh adalah sebesar 1.254 mg/g (Sadhukhan et al., 2016; Kutluay et al., 2020).



(a)



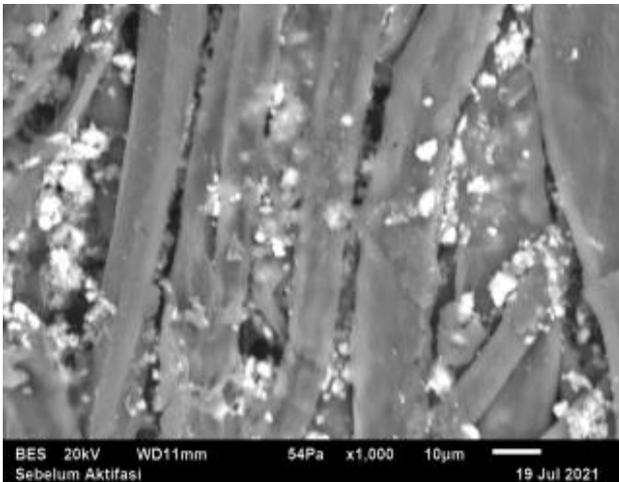
(b)

**Gambar 1.** Plot permukaan respons pengaruh waktu kontak dan massa adsorben terhadap (a) efisiensi penyerapan; (b) kapasitas penyerapan

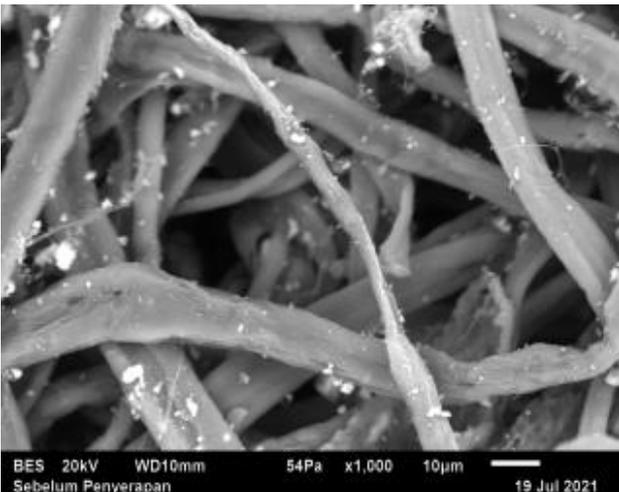
Kondisi optimum terjadi saat penggunaan adsorben yang rendah namun mampu menghasilkan efisiensi penyisihan timbal yang maksimal.

### 3.2 Karakterisasi Adsorben Menggunakan SEM

Morfologi permukaan adsorben berpengaruh pada proses adsorpsi. Salah satu kriteria adsorben yang baik adalah memiliki pori-pori untuk menjerap zat adsorbat (Haryati et al., 2012; Khoo et al., 2018). Aktivasi adsorben dilakukan untuk membuka pori-pori dari adsorben kertas HVS. Berdasarkan gambar 2, dapat dilihat bahwa adsorben dari kertas HVS bekas sebelum proses aktivasi menunjukkan distribusi ukuran partikel yang bervariasi tanpa pembentukan pori. Hal ini disebabkan karena proses aktivasi belum dilakukan, sehingga permukaan partikel saling terhubung oleh lapisan-lapisan yang masih terikat. Akibatnya, tidak terbentuk porositas pada morfologi dan topografi adsorben.



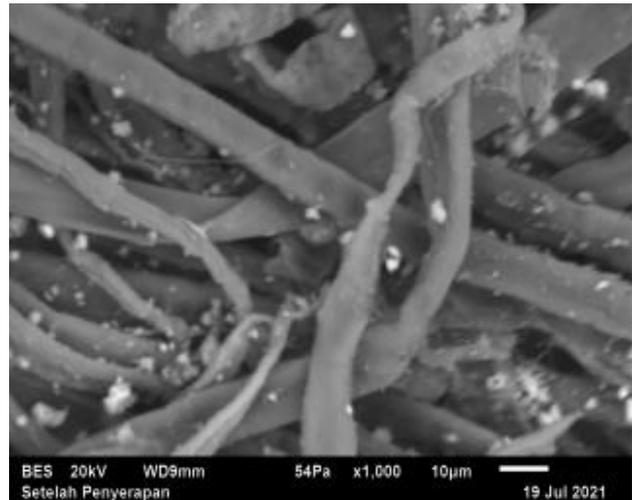
**Gambar 2.** Kertas HVS bekas sebelum aktivasi (perbesaran 1.000×)



**Gambar 3.** Kertas HVS bekas setelah aktivasi (perbesaran 1.000×)

Proses aktivasi berpengaruh pada morfologi permukaan adsorben, yaitu untuk membuka pori-pori permukaan pada kertas HVS bekas (Khoo et al., 2018). Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui bahwa kertas

HVS bekas setelah aktivasi pada permukaannya sudah terbentuk pori-pori.



**Gambar 4.** Kertas HVS bekas setelah penyerapan (perbesaran 1.000×)

Berdasarkan Gambar 4, ukuran pori menjadi menurun setelah pemakaian dikarenakan penyumbatan pori oleh adsorbat. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan kadar ion timbal dalam larutan yang lebih banyak (Amalia et al., 2022; Moelyaningrum, 2020; Ummartyotin & Pechyen, 2016).

## 4. KESIMPULAN

Limbah kertas HVS bekas teraktivasi dapat menyisihkan Pb dengan efisiensi mencapai 95% dan kapasitas adsorpsi maksimumnya mencapai 1.254 mg/g. Nilai tersebut didapatkan pada massa adsorben 1 g dengan waktu kontak 113 menit. Penggunaan kertas HVS bekas dapat dijadikan sebagai adsorben alternatif untuk menurunkan kadar logam berat Pb pada air limbah.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Afrianita, R., & Dewilda, Y. (2013). Efisiensi dan kapasitas penyerapan fly ash sebagai adsorben dalam penyisihan logam timbal (Pb) limbah cair industri percetakan di Kota Padang. *Dampak*, 10(1), 1-10.
- Amalia, V., Hadisantoso, E. P., Rohmatulloh, Y., & Wahyuni, I. R. (2022). HVS wastepaper as low-cost adsorbent for Pb (II) Treatment. *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 23(1).
- Sadhukhan, B., Mondal, N. K., & Chattoraj, S. (2016). Optimisation using central composite design (CCD) and the desirability function for sorption of methylene blue from aqueous solution onto Lemna major. *Karbala International Journal of Modern Science*, 2(3), 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2016.03.005>
- Fitria, M., Sylvia, N., & Meriatna, M. (2023). Pemanfaatan kertas HVS bekas sebagai adsorben untuk menurunkan kadar timbal (Pb) dalam limbah artifisial. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 3(4), 548-559.

- Ghaedi, M., & Kokhdan, S. N. (2015). Removal of methylene blue from aqueous solution by wood millet carbon optimization using response surface methodology. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 136, 141-148.
- Ghosh, R. K., Ray, D. P., Debnath, S., Tewari, A., & Das, I. (2019). Optimization of process parameters for methylene blue removal by jute stick using response surface methodology. *Environmental progress & sustainable energy*, 38(5), 13146.
- Gultom, E. M., & Lubis, M. T. (2014). Aplikasi karbon aktif dari cangkang kelapa sawit dengan aktivator  $H_3PO_4$  untuk penyerapan logam berat Cd dan Pb. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 3(1), 5-10.
- Haryati, M., Purnomo, T., & Kuntjoro, S. (2012). Kemampuan tanaman genjer (*Limnocharis Flava* (L.) Buch.) menyerap logam berat timbal (Pb) limbah cair kertas pada biomassa dan waktu pemaparan yang berbeda. *Lateral Bio*, 1(3), 131-138.
- Hill, T. L. (1949). Statistical mechanics of adsorption. V. Thermodynamics and heat of adsorption. *The Journal of chemical physics*, 17(6), 520-535.
- Khoo, R. Z., Chow, W. S., & Ismail, H. (2018). Sugarcane bagasse fiber and its cellulose nanocrystals for polymer reinforcement and heavy metal adsorbent: A review. *Cellulose*, 25, 4303-4330.
- Kutluay, S., Baytar, O., Şahin, Ö., & Arran, A. (2020). Optimization of process conditions for adsorption of methylene blue on formaldehyde-modified peanut shells using Box-Behnken experimental design and response surface methodology. *European Journal of Technique*, 10(1), 131-142.
- Maulana, M. N., Ridwan, M. G., & Murwani, S. Modifikasi kaolin dengan limbah kertas sebagai adsorben timbal dan besi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(4), 816-823. <https://doi.org/10.14710/jil.20.4.816-823>
- Moelyaningrum, A. D. (2020). Pemanfaatan Cangkang Telur Puyuh Sebagai Pengikat Logam Berat Timbal (Pb) dalam Air. *Jurnal Kesehatan*, 13(2), 96-101.
- Mulyawan, R., Saefumillah, A., & Foliatini, F. (2015). Biosorpsi timbal oleh biomassa daun ketapang. *Molekul*, 10(1), 45-56.
- Permanawati, Y., Zuraida, R., & Ibrahim, A. (2013). Kandungan logam berat (Cu, Pb, Zn, Cd, dan Cr) dalam air dan sedimen di perairan Teluk Jakarta. *Jurnal geologi kelautan*, 11(1), 9-15.
- Rahmi, R., & Sajidah, S. (2018, April). Pemanfaatan adsorben alami (biosorben) untuk mengurangi kadar timbal (Pb) dalam limbah cair. In *Prosiding Seminar Nasional Biologi, Teknologi dan Kependidikan* (Vol. 5, No. 1).
- Singh, R., & Bhateria, R. (2020). Optimization and experimental design of the  $Pb^{2+}$  adsorption process on a nano- $Fe_3O_4$ -based adsorbent using the response surface methodology. *ACS omega*, 5(43), 28305-28318. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04284>
- Ummartyotin, S., & Pechyen, C. (2016). Strategies for development and implementation of bio-based materials as effective renewable resources of energy: A comprehensive review on adsorbent technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 654-664.