

## Sintesis dan Pemodelan Adsorben dari Bahan Alam untuk Logam Berat Timbal pada Sampel Air Sungai Mahakam

Rahmawati Munir<sup>1)</sup>, Ahmad Zarkasi<sup>2)</sup>, Dadan Hamdani<sup>1)</sup>, Sahara Hamas Intifadhah<sup>1,\*)</sup>, Akbar Perdana<sup>1)</sup> dan Alris Sanca Pratama Putra<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Laboratorium Fisika Teori dan Material, Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Barong Tongkok No.4 Kampus Gn Kelua, Samarinda 75123

<sup>2)</sup>Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Barong Tongkok No.4 Kampus Gn Kelua, Samarinda 75123

\*Email korespondensi : saharahamas@fmipa.unmul.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v20i3.16934>

Submitted: 21 Juli 2023; Accepted: 08 Oktober 2023

**ABSTRAK-** Sungai Mahakam merupakan sumber air bagi masyarakat kota Samarinda, Kalimantan Timur. Namun air sungai Mahakam tidak tergolong dalam air yang berkualitas. Adanya aktifitas industri penambangan menyebabkan air sungai tercemar logam berat seperti Timbal (Pb). Permasalahan tersebut dapat diatasi menggunakan metode adsorpsi untuk melakukan purifikasi atau penjernihan terhadap air. Metode adsorpsi telah menjadi populer dalam mengadsorpsi logam berat yang terkandung dalam air tercemar. Tujuan penelitian ini untuk mensintesis bahan alam yang berisifat sebagai adsorben logam berat Pb. Adapun bahan yang digunakan sebagai adsorben alami berupa limbah rumah tangga yakni Abu Gosok (AG), Cangkang Telur (CT), Ampas Teh (AT). Berdasarkan hasil uji karakterisasi *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) diperoleh data penurunan konsentrasi logam berat Pb pada sampel air sungai Mahakam. Konsentrasi awal sebesar 1,8 mg/L menjadi 0,24 mg/L (10 gr adsorben AG) dan menjadi 0,17 mg/L (10 gr adsorben AG+CT). Sedangkan penggunaan adsorben AT diaplikasikan pada limbah buatan dengan konsentrasi awal 40 mg/L menjadi 0,002 mg/L. Selanjutnya dari data hasil pengukuran, dilakukan pemodelan menggunakan model Langmuir Isotherm dan Freundlich Isotherm untuk menentukan kapasitas adsorpsi ampas teh, cangkang telur dan abu gosok.

**KATA KUNCI :** *adsorpsi; adsorben alami; logam berat pb; pemodelan isotherm*

**ABSTRACT-** The Mahakam River is a source of water for the people of Samarinda, East Kalimantan. However, Mahakam river water is not classified as quality water. As a result of industrial mining activities, river water is polluted by heavy metals such as Lead (Pb). These problems can be overcome by using the adsorption method to purify water. The adsorption method has become popular in adsorbing heavy metals contained in polluted water. The purpose of this study was to synthesize natural materials which are adsorbents for the heavy metal Pb. The materials used as natural adsorbents are household waste, namely ashes (AG), egg shells (CT), tea dregs (AT). Based on the results of the Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) characterization test, data were obtained on the decrease in the concentration of heavy metal Pb in samples of Mahakam river water. The initial concentration of 1.8 mg/L became 0.24 mg/L (10 gr adsorbent AG) and became 0.17 mg/L (10 gr adsorbent AG+CT). While the use of AT adsorbent was applied to artificial waste with an initial concentration of 40 mg/L to 0.002 mg/L. Furthermore, according to data measurement, modeling was carried out using the Langmuir Isotherm and Freundlich Isotherm models to determine the adsorption capacity of tea dregs, eggshells, and ashes.

**KEYWORDS :** *adsorption; pb heavy metal; isotherm modeling; natural adsorbent*

## PENDAHULUAN

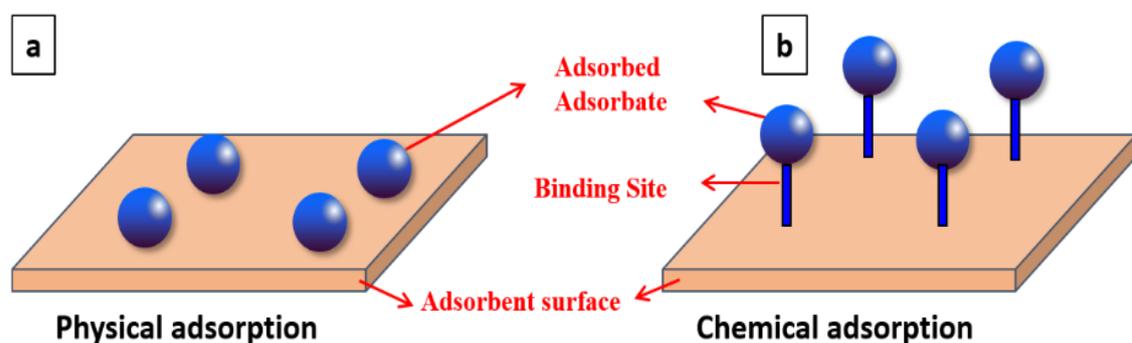
Terdapat banyak metode pengolahan air yang telah berhasil diterapkan untuk meningkatkan kualitas air, baik secara biologis maupun secara fisikokimia. Diantara metode-metode tersebut, metode adsorpsi merupakan salah satu metode yang paling cocok dan telah banyak diterapkan dalam pengolahan air. Alasan metode adsorpsi dianggap efisien dalam peningkatan kualitas air adalah biaya yang murah, ramah lingkungan, dan tidak menghasilkan produk intermediat (Unuabonah dkk, 2019).

Adsorpsi dapat dipandang sebagai fenomena permukaan dimana suatu fluida (cairan maupun gas) terikat ke suatu medium padat berpori, baik karena ikatan kimia atau fisika (Al-Ghouthi, 2020). Padatan yang permukaannya menjadi medium untuk proses adsorpsi disebut sebagai adsorben, sedangkan material/fluida yang akan diadsorpsi atau terserap dinamakan adsorbat (Worch, 2012).

Dalam proses adsorpsi, interaksi antara adsorben dan adsorbat sangat mempengaruhi hasil adsorpsi. Oleh karena itu, pemilihan adsorben menjadi hal yang penting dalam proses adsorpsi. Beberapa contoh adsorben dari bahan alami yaitu kayu, arang, cangkang, serbuk gergaji, gambut, abudan lainnya (Worch, 2012). Mekanisme utama pada proses adsorpsi molekul terbagi atas dua yaitu *physical adsorption* (*physisorption*) dan *chemical adsorption* (*chemisorption*). *Physical adsorption* terjadi ketika molekul atau ion teradsorpsi pada permukaan adsorben melalui gaya-gaya intermolekul yang lemah, seperti gaya *van der*

*Waals*, gaya *London*, dan gaya dipol-dipol. Mekanisme ini bersifat reversibel, di mana adsorbat dapat dengan mudah terlepas dari permukaan adsorben. *Chemical adsorption* terjadi ketika terjadi interaksi kimia antara adsorbat dan permukaan adsorben. Dalam mekanisme ini, ikatan kovalen atau ionik terbentuk antara adsorbat dan permukaan adsorben, menghasilkan ikatan yang lebih kuat daripada gaya intermolekul dalam *physical adsorption* (Worch, 2012). Ilustrasi *physical adsorption* dan *chemical adsorption* ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk mengetahui kemampuan suatu adsorben dalam menyerap logam berat, digunakan model isoterm. Analisis model isoterm sangat penting untuk dilakukan. Ini karena model isoterm dapat digunakan untuk memprediksi kemampuan adsorben, yang sangat berguna untuk menentukan kapasitas adsorpsi, mekanisme adsorpsi, dan desain sistem adsorpsi yang efektif (Al-Hazmi dkk, 2023). Pada penelitian (Nandiyanto dkk, 2020), diketahui bahwa model isoterm secara umum terbagi menjadi model isoterm dua parameter dan tiga parameter. Beberapa model isoterm dua parameter tersebut adalah *Langmuir*, *Freundlich*, *Dubin-Radushkevich*, *Temkin* dan *Flory-Huggins*. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis adsorben Abu Gosok (AG); Abu Gosok + Cangkang Telur (AG+CT); dan Ampas Teh (AT) sebagai Adsorben Logam berat Timbal serta menentukan model Isoterm untuk memperoleh kapasitas maksimum adsorben.



Gambar 1. Ilustrasi interaksi antara adsorbat dan permukaan adsorben (a) Physical Adsorption dan (b) Chemical Adsorption (Nandiyanto, 2020).

Keunggulan penelitian ini adalah memanfaatkan bahan alam sebagai adsorben, yang merupakan solusi berkelanjutan dan ramah lingkungan dalam mengatasi masalah pencemaran logam berat di sungai. Efisiensi penyerapan logam berat menggunakan adsorben yang disintesis dalam penelitian ini telah terbukti efektif dalam mereduksi logam berat timbal dari sampel air Sungai Mahakam. Konservasi Sumber Daya Air, dengan kemampuan adsorben ini menyerap logam berat pada air, maka berpotensi sebagai upaya konservasi sumber daya air alam yang sangat penting bagi ekosistem dan keberlanjutan lingkungan.

## METODE PENELITIAN

### Sintesis Adsorben

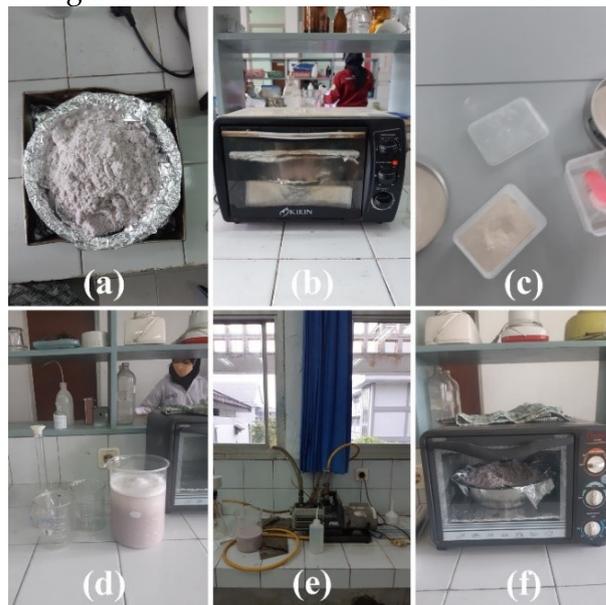
Tahapan preparasi abu gosok sebagai adsorben untuk logam berat timbal ditunjukkan pada Gambar 2. Prosedur pembuatan abu gosok sebagai adsorben mengikuti langkah pembuatan sekam padi sebagai adsorben (Wijayanti dan Kurniawati, 2019). Kemudian dimodifikasi langkah-langkahnya dengan dimulai dari tahap dimana bahan sudah dalam keadaan halus.

Pertama-tama abu gosok dikeringkan menggunakan oven pada suhu  $110^{\circ}\text{C}$  selama 3 jam, kemudian diblender untuk mereduksi ukurannya. Selanjutnya diayak menggunakan ayakan 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang homogen.

Tahap selanjutnya diaktivasi menggunakan  $\text{HCl}$  0,1 M 1500 ml selama 1 jam, kemudian disaring, dibilas dan dipanaskan kembali pada suhu 8 jam untuk menghilangkan kadar airnya. Hasilnya dapat digunakan sebagai adsorben.

Proses sintesis Cangkang Telur ditunjukkan pada Gambar 3. Prosedur yang dilakukan mengikuti langkah (Satriani dkk, 2016). Cangkang telur yang akan disintesis menjadi adsorben diawali dengan proses pencucian, selanjutnya perendaman dengan air panas pada suhu  $80^{\circ}\text{C}$  selama 15 menit. Kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari dan dihaluskan menggunakan blender, diayak dengan ayakan 100 mesh

untuk menyeragamkan ukurannya. Selanjutnya serbuk di oven selama 1 jam dengan suhu  $110^{\circ}\text{C}$  dan siap digunakan sebagai adsorben

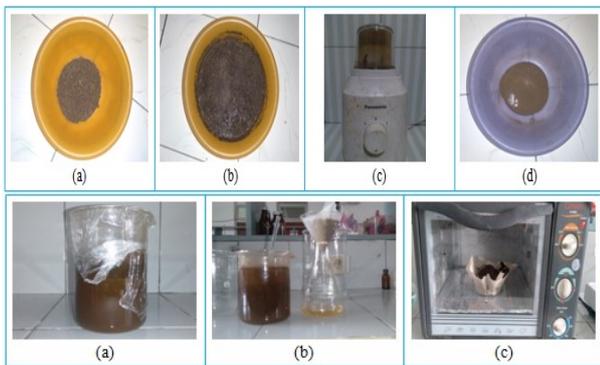


**Gambar 2.** Tahapan preparasi Abu Gosok (AG) sebagai adsorben.



**Gambar 3.** Sintesis serbuk Cangkang Telur (CT) sebagai adsorben.

Tahapan berikutnya yaitu sintesis serbuk ampas teh sebagai adsorben, ditunjukkan pada Gambar 4. Pembuatan adsorben mengikuti langkah dari (Pratama dkk, 2017). Sintesis serbuk ampas teh diawali dengan pencucian ampas teh. Proses pencucian ampas teh dengan merendamnya pada air. Hal tersebut bertujuan untuk menghilangkan kandungan warna pada ampas teh.



**Gambar 4.** Sintesis serbuk Ampas Teh (AT) sebagai adsorben.

Secara keseluruhan, perubahan warna pada air tidak membahayakan, namun menyebabkan air nampak lebih keruh. Oleh karena itu, sebaiknya pencucian ampas teh dilakukan sampai benar-benar tidak mempengaruhi warna air. Proses penghilangan warna pada ampas teh dilakukan juga kemungkinan untuk membuka pori-pori ampas teh. Langkah selanjutnya yang perlu diperhatikan adalah mengenai penghalusan ampas teh, aktivasi dengan larutan HCl kemudian dikeringkan untuk menghilangkan kandungan airnya. Serbuk yang kering siap digunakan sebagai adsorben.

### Preparasi Sampel

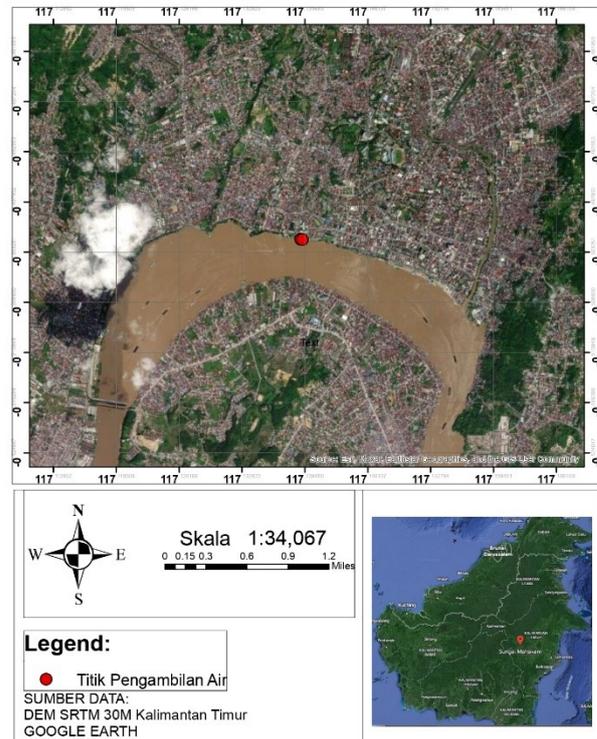
Air sungai mahakam yang digunakan pada penelitian ini diambil secara langsung di pinggiran sungai Mahakam Kota Samarinda, tepatnya di dermaga kapal yang berada di depan Kantor Gubernur Provinsi Kalimantan Timur.

Pengambilan sampel air sungai Mahakam dilakukan pada Tanggal 17 Oktober 2022 kemudian dilanjutkan dengan penelitian di Laboratorium Fisika Teori dan Material Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Mulawarman.

Pada proses adsorpsi oleh adsorben abu gosok terhadap logam berat timbal dilakukan dengan variasi massa. Disiapkan 10 botol sampel air yang masing-masing volume sampel air sungai Mahakam sebanyak 20 ml. Ditambahkan serbuk cangkang telur dengan variasi massa dalam satuan gram, yaitu 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10. Dilakukan shaker selama 30 menit, diendapkan selama 1 jam kemudian

disaring menggunakan kertas saring. Sampel air yang telah disaring selanjutnya diuji menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* atau AAS.

### PETA LOKASI TITIK PENGAMBILAN AIR SUNGAI MAHAKAM KOTA SAMARINDA PROVINSI KALIMANTAN TIMUR



**Gambar 5.** Peta lokasi titik pengambilan sampel air sungai Mahakam.

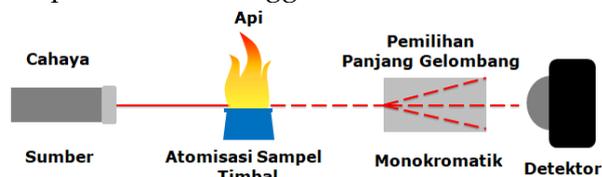
Dengan cara yang sama dilakukan pada adsorben kedua yaitu campuran antara serbuk cangkang telur dengan abu gosok. Variasi massa adsorben juga dilakukan dengan komposisi perbandingan massa adalah 1:1. Filtrat yang dihasilkan oleh adsorben campuran tersebut selanjutnya diuji menggunakan AAS.

Sedangkan untuk massa ampas teh yang digunakan adalah 1gr untuk setiap sampel. Adapun lama proses adsorpsi yang berlangsung adalah 30 menit. Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan (Azzahra & Taufik, 2020), proses penyerapan timbal oleh ampas teh bermassa 0,75gr dalam waktu 15 menit memiliki efektivitas penyerapan timbal dalam air hingga 93,75%. Penambahan massa dan waktu kontak pada penelitian ini dimaksudkan untuk melihat apakah peningkatan hal tersebut akan meningkatkan

efektivitas ampas teh dalam menyerap timbal menjadi lebih tinggi lagi atau tidak.

### Mekanisme Kerja AAS

Secara sederhana, cara kerja AAS dalam menentukan konsentrasi ion logam tertentu dalam sampel dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 6. Sumber energi yang digunakan pada AAS berupa cahaya. Sumber cahaya yang paling banyak digunakan adalah lampu katoda berongga.



**Gambar 6.** Ilustrasi Mekanisme kerja *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) (Beaty, R.D. & Kerber, J.D. 1993).

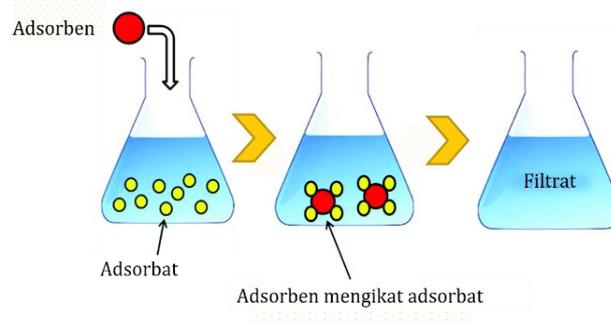
Lampu ini diatur untuk memancarkan spektrum atom dari unsur tertentu yang ingin ditentukan. Sumber cahaya tersebut kemudian dilewatkan pada sampel. Sampel tersebut diletakkan pada lingkungan berenergi termal. Hal ini bertujuan agar molekul dalam atom terurai menjadi unsur-unsur. Dibawah kondisi termal yang tepat, atom-atom akan berada pada keadaan dasar dan dapat menyerap cahaya yang berasal dari sumber. Sebelum dibaca oleh detektor, cahaya dilewatkan pada sebuah monokromatik. Monokromatik digunakan untuk menyebarkan berbagai panjang gelombang dan hanya mengisolasi sebuah cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Panjang gelombang ini adalah panjang gelombang dari unsur yang ingin diukur kuantitasnya. Hal ini memungkinkan untuk menentukan konsentrasi unsur tertentu, meski terdapat banyak jenis unsur di dalam sampel (Mohammed, 2021; Bisergaeva dkk, 2020)

## HASIL DAN DISKUSI

### Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi secara sederhana dapat diilustrasikan seperti Gambar 7. Tampak bahwa mula-mula sampel air yang mengandung partikel pengotor atau adsorbat yakni ion-ion logam berat timbal (Pb).

Kemudian ditambahkan adsorben, maka ion-ion tersebut diikat oleh adsorben sehingga menghasilkan sampel air yang telah terbebas dari ion pengotor tersebut (filtrat).

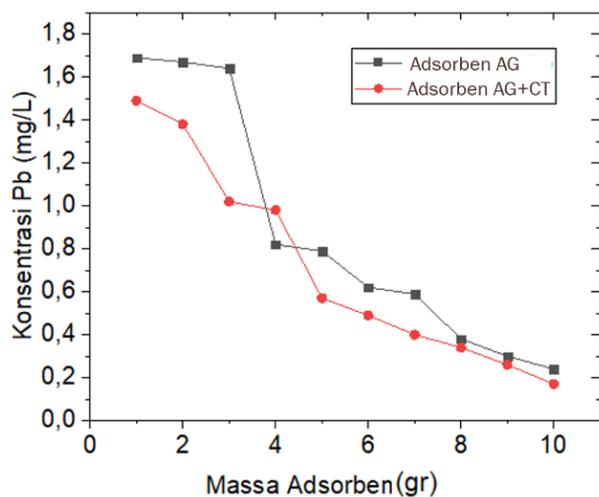


**Gambar 7.** Ilustrasi proses adsorpsi.

Penurunan konsentrasi logam berat timbal setelah proses adsorpsi berdasarkan hasil karakterisasi *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), dikarenakan oleh penambahan massa adsorben ke dalam sampel air Mahakam. Tampak pada Gambar 8, bahwa untuk adsorben dapat mereduksi konsentrasi Pb dari 1,8mg/L konsentrasi awal hingga menjadi 0,24mg/L pada massa 10gr. Untuk adsorben campuran Abu gosok dan serbuk cangkang telur menunjukkan kemampuan mengadsorpsi lebih besar. Konsentrasi mula-mula logam Pb sebesar 1,8gr/L mampu menurunkannya hingga menjadi 0,17mg/L pada massa 10gr.

Penelitian sebelumnya umumnya membahas bagaimana sifat adsorben serbuk cangkang telur dengan menggunakan sampel limbah buatan (Dayanidhi dkk, 2020; Harimu dkk, 2019; Isa dkk, 2020; Kasirajan dkk, 2022). Hal ini berbeda dengan penelitian ini yakni menggunakan sampel air Sungai Mahakam. Kemampuan adsorpsinya juga menunjukkan penurunan konsentrasi yang cukup signifikan. Selanjutnya penelitian lain membahas abu sekam padi sebagai adsorben (Ismah dkk, 2022), namun di sini digunakan abu gosok yang dicampurkan dengan serbuk cangkang telur dan hasilnya lebih baik. Kemampuan adsorpsinya lebih baik dibandingkan hanya menggunakan serbuk cangkang telur seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Analisa lebih lanjut untuk mengamati sistem adsorpsi adalah menyesuaikan data



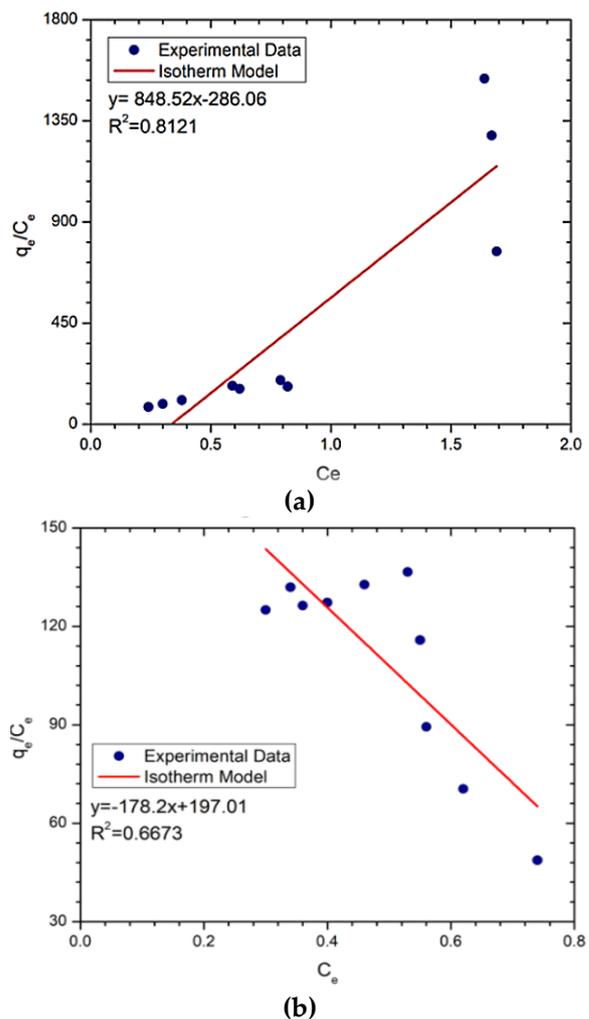
**Gambar 8.** Variasi penambahan massa adsorben untuk menyerap logam berat Pb pada sampel air sungai Mahakam.

kesetimbangan adsorpsi, yaitu dalam hal model isotherm. Hubungan kesetimbangan antara adsorben dan adsorbat dijelaskan dalam berbagai model. Model Isotherm yang paling banyak digunakan pada penelitian tentang penjernihan air diantaranya yaitu Model Isotherm Langmuir, Freundlich, Sips, Dubini-Radushkevich, dan Model Isotherm Temkin (Yousef dkk, 2020). Penelitian ini berfokus pada analisa menggunakan dua model yaitu Model Isotherm Langmuir dan Model Isotherm Freundlich.

### Model Isotherm Langmuir

Analisa model isotherm dilakukan dengan mencari nilai koefisien determinan ( $R^2$ ). Nilai  $R^2$  digunakan untuk mendapatkan model yang lebih cocok, untuk mewakili kesetimbangan dalam eksperimen adsorpsi (Petriciolet dkk, 2017).

Berdasarkan nilai koefisien determinan ( $R^2$ ) dari kedua adsorben tersebut menunjukkan bahwa model Langmuir paling sesuai pada pemodelan adsorben Abu Gosok (AG). Hal ini diindikasikan oleh nilai  $R^2$  sebesar 0,8121, ditunjukkan pada Gambar 9.a, jika dibandingkan model isotherm pada adsorben campuran Abu Gosok dan Cangkang Telur (AG+CT) yang nilainya sebesar 0,6673 pada Gambar 9.b. Namun secara umum, pemodelan isotherm Langmuir sesuai untuk kedua adsorben tersebut terhadap kemampuan penyerapan logam timbal (Pb) karena nilai  $R^2$  mendekati 1.

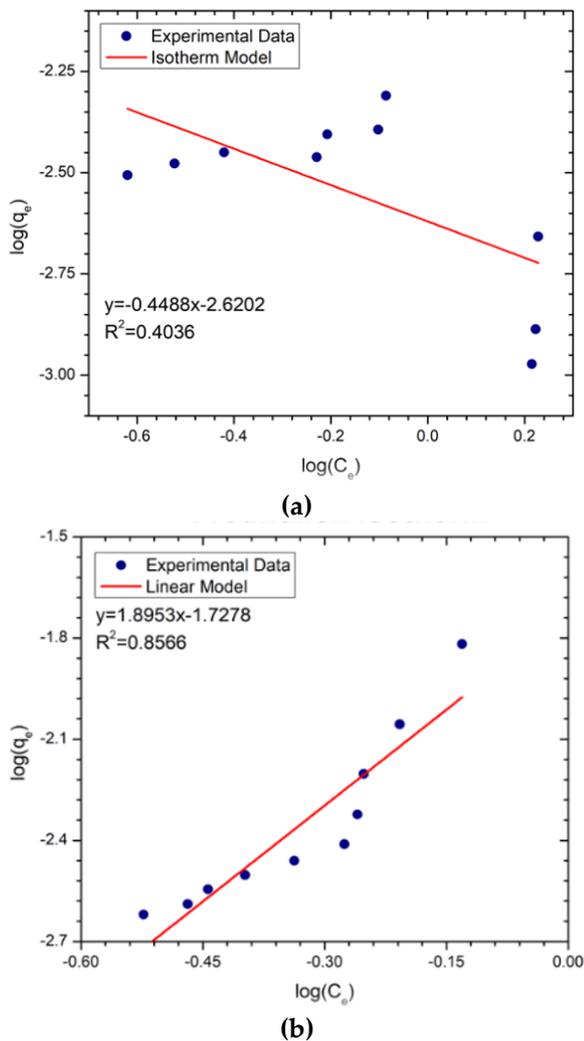


**Gambar 9.** Pemodelan isotherm Langmuir pada (a) Adsorben Abu Gosok (AG), (b) Adsorben campuran Abu Gosok dan Cangkang Telur (AG+CT) untuk logam berat timbal.

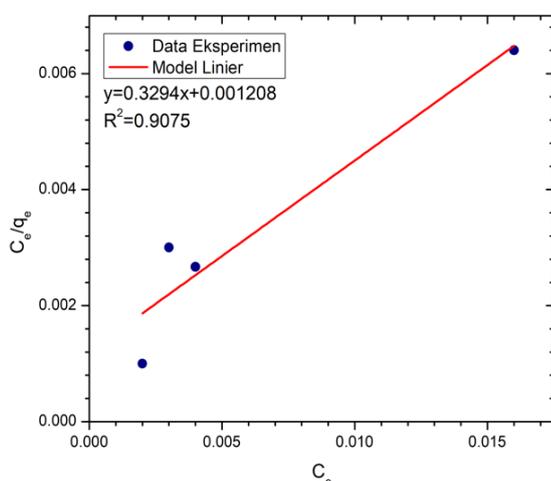
### Model Isotherm Freundlich

Analisa berikutnya adalah dengan model Isotherm Freundlich. Model ini mengasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi secara heterogen permukaan dan jumlah yang diserap meningkat tak terhingga dengan peningkatan konsentrasi (Petriciolet dkk, 2017).

Model Freundlich isotherm menunjukkan nilai koefisien determinan  $R^2$  pada adsorben abu gosok murni (AG) sebesar 0.4036, ditunjukkan dalam Gambar 10.a. Sedangkan untuk adsorben campuran abu gosok dan cangkang telur (AG+CT) nilai koefisien determinan  $R^2$  sebesar 0,8566, digambarkan pada Gambar 10.b, yang nilainya lebih mendekati 1 dibandingkan adsorben abu gosok murni (AG).



**Gambar 10. Pemodelan isotherm Freundlich pada (a) Adsorben abu gosok (AG), (b) adsorben dari campuran abu gosok dan cangkang telur (AG+CT) untuk logam berat timbal.**



**Gambar 11. Pemodelan Isoterm Langmuir adsorben Ampas Teh (AT) untuk penyerapan logam berat timbal pada sampel limbah buatan.**

Pemodelan isotherm untuk adsorben Ampas Teh (AT) menggunakan limbah buatan

dengan variasi konsentrasi timbal (Pb) sebagai adsorbat yakni 20mg/L, 30mg/L dan 40mg/L. Adapun massa adsorben ditetapkan sebanyak 1 gram untuk setiap sampel larutan. Setelah melakukan beberapa uji model ditetapkan bahwa pemodelan Isoterm Langmuir yang paling sesuai, dikarenakan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,9075 dan ditunjukkan dalam Gambar 11.

## KESIMPULAN

Telah dihasilkan adsorben dari bahan alam yang efektif untuk menyerap logam berat Timbal (Pb) pada air sungai Mahakam dan limbah buatan. Pada penelitian ini juga telah berhasil dimodelkan kemampuan mengadsorpsi logam berat Timbal (Pb) oleh adsorben dari AG, AG+CT dan AT menggunakan model Isoterm Langmuir dan Isoterm Freundlich.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Dana Hibah Penelitian PNBPFMIPA Universitas Mulawarman Tahun 2023. Selain itu terimakasih kepada Laboratorium Fisika Teori dan Material serta Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Mulawarman yang telah memberikan dukungan berupa sarana dan prasarana laboratorium selama proses penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Hazmi, G. H., Adam, A. M. A., El-Desouky, M. G., El-Bindary, A. A., Alsuhaibani, A. M., & Refat, M. S. (2023). Efficient adsorption of Rhodamine B using a composite of  $Fe_3O_4@zif-8$ : Synthesis, characterization, modeling analysis, statistical physics and mechanism of interaction. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 37(1), 211-229.
- Al-Ghouti, M. A. & Da'ana, D. A. Guidelines for the Use and Interpretation of Adsorption Isotherm Models: A Review. *Journal of Hazardous Materials*. 393: 1-22. [DOI: 10.1016/j.hazmat.2020.122383]

- Azzahra, R. F. & Taufik, M. (2020). Bio-Adsorben Berbahan Dasar Limbah Ampas Teh (*Camellia Sinensis*) Sebagai Agent Penyerap Logam Berat Fe dan Pb pada Air Sungai. *Jurnal Kinetika*, 11(01): 65-70
- Beaty, R. D., & Kerber, J. D. (1993). *Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry*. second Edi. North. The Perkin-Elmer Corporation, Norwalk, CT, USA.
- Bisergaeva, R. A., & Sirieva, Y. N. (2020, November). Determination of calcium and magnesium by atomic absorption spectroscopy and flame photometry. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1691, No. 1, p. 012055). IOP Publishing.
- Dayanidhi, K., Vadivel, P., Jothi, S., & Sheik Eusuff, N. (2019). White eggshells: a potential biowaste material for synergetic adsorption and naked-eye colorimetric detection of heavy metal ions from aqueous solution. *ACS applied materials & interfaces*, 12(1), 1746-1756.
- Harimu, L., Rudi, L., Haetami, A., & Santoso, G. A. P. (2019). Studi Variasi Konsentrasi NaOH dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Untuk Memurnikan Silika Dari Abu Sekam Padi Sebagai Adsorben Ion Logam Pb<sup>2+</sup> dan Cu<sup>2+</sup>. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 6(2), 81-87.
- Isa, Y. M., Harripersadth, C., Musonge, P., Sayago, A., & Morales, M. G. (2020). The application of eggshells and sugarcane bagasse as potential biomaterials in the removal of heavy metals from aqueous solutions. *South African Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 142-150.
- Ismah, Z. (2022). *Pemanfaatan Arang Aktif dari Ampas Kopi dan Sekam Padi sebagai Adsorben Logam Timbal (Pb)* (Doctoral dissertation, UIN Ar-Raniry).
- Kasirajan, R., Bekele, A., & Girma, E. (2022). Adsorption of lead (Pb-II) using CaO-NPs synthesized by solgel process from hen eggshell: Response surface methodology for modeling, optimization and kinetic studies. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40(1), 209-229.
- Mohammed, A. M. (2021). Elemental analysis using atomic absorption spectroscopy. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 6(7), 48-51.
- Nandiyanto, A. B. D. (2020). Isotherm adsorption of carbon microparticles prepared from pumpkin (*Cucurbita maxima*) seeds using two-parameter monolayer adsorption models and equations. *Moroccan Journal of Chemistry*, 8(3), 8-3.
- Petriciolet, A. B., Castillo, D. I. M., Avila, H. E. R. (2017). *Adsorption Processes for Water Treatment and Purification*. Switzerland : Springer International Publishing [DOI : 10.1007/978-3-319-58136-1]
- Pratama, D. A. (2017). Efektivitas ampas teh sebagai adsorben alternatif logam Fe dan Cu pada air sungai Mahakam. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(3), 131-138.
- Satriani, D., Ningsih, P., & Ratman, R. (2016). Serbuk Dari Limbah Cangkang Telur Ayam Ras Sebagai Adsorben Terhadap Logam Timbal (Pb). *Jurnal akademika kimia*, 5(3), 103-108.
- Unuabonah E.I., Omorogie M.O., Oladoja N.A. 2019. Modeling in Adsorption: Fundamental and Applications. *Composite Nanoadsorbents*, 85-118. [DOI: 10.1016/B978-0-12-814132-8.00005-8]
- Worch, E. (2012). *Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling*. Berlin/Boston, Germany : Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Yousef, R., Qiblawey, H., El-Naas, M. H. (2020). Adsorption as a Process for Produced Water Treatment: A Review. *Journal of Processes MDPI*. [DOI: 10.3390/pr8121657]