

## Kinetika Adsorpsi Ion Zn Menggunakan Serbuk Gergaji Kayu Jati (*Tectona grandis*) Teraktivasi EDTA dalam Air Limbah Batik Kayu

### Adsorption Kinetics of Zn Ion Using EDTA Activated Teak Wood Sawdust (*Tectona grandis*) in Batik Wood Wastewater

Endang Sulistyawati\*, Septia Citra Rosa Firdaus, Meliyana Safitri dan Sri Wahyu Murni

Program Studi Teknik Kimia, FTI, UPN "Veteran" Yogyakarta Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Sleman, 55283, Indonesia

#### Artikel histori :

Diterima 17 Mei 2024  
Diterima dalam revisi 11 Juni 2024  
Diterima 13 Juni 2024  
Online 19 Juli 2024

**ABSTRAK:** Limbah cair yang dihasilkan kerajinan batik kayu mengandung ion logam berat  $Zn^{2+}$  sebesar 7,6188 mg/L. Nilai tersebut melebihi batas yang diperbolehkan sehingga berpotensi mencemari lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan. Penelitian ini bertujuan mengetahui kemampuan serbuk gergaji kayu jati teraktivasi EDTA sebagai adsorben ion logam  $Zn^{2+}$  dengan meninjau kinetika adsorpsi. Adsorben teraktivasi digunakan untuk adsorpsi  $Zn^{2+}$  dengan variasi waktu kontak (5-60 menit) dan suhu (30-55 °C). Identifikasi gugus fungsi adsorben dilakukan menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR) sedangkan kadar  $Zn^{2+}$  yang terjerap diuji menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Kondisi optimal terjadi pada suhu 45°C dan waktu kontak 45 menit dengan konsentrasi ion logam Zn setelah adsorpsi 4,812 mg/L dan nilai kapasitas adsorpsi 1.2806 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan kelayakan larutan sampel setelah proses adsorpsi sebagai air hygiene sanitasi. Analisis kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa proses ini mengikuti model kinetika Lagergren orde dua semu dengan persamaan konstanta laju adsorpsi  $k = 1,527 \times 10^5 \exp(-4592,5/T)$  (g/mg.mnt) dengan nilai energi aktivasi 38,182 kJ/mol yang menunjukkan bahwa adsorpsi terjadi secara fisisorpsi. Hasil ini memberikan pemahaman mekanisme adsorpsi logam Zn menggunakan serbuk gergaji kayu jati teraktivasi EDTA yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan metode pengelolaan limbah yang efektif.

**Kata Kunci:** Limbah Batik Kayu; Logam Berat Zn; Adsorpsi; Serbuk Gergaji Kayu Jati; Aktivator EDTA; Kinetika Adsorpsi

**ABSTRACT:** The liquid waste produced from wooden batik crafts contains high levels of  $Zn^{2+}$  ions at 7,6188 mg/L. It exceeds permissible limits and posing environmental and health risks. This study investigates the effectiveness of activated teak sawdust powder with EDTA as an adsorbent for  $Zn^{2+}$  ions, focusing on adsorption kinetics. The activated adsorbent was used for  $Zn^{2+}$  adsorption with varying contact times (5-60 minutes) and temperatures (30-55 °C). Fourier Transform Infrared (FTIR) analysis identifies functional groups, while Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) measures  $Zn^{2+}$  concentration. Optimal conditions are found at 45°C for 45 minutes, resulting in a post-adsorption Zn concentration of 4.812 mg/L and adsorption capacity 1.2806 mg/g. The treated solution meets sanitation standards. Kinetic analysis indicates pseudo-second-order Lagergren kinetics with the adsorption rate constant equation  $k = 1,527 \times 10^5 \exp(-4592,5/T)$  (g/mg.min), with an activation energy value 1.2806 mg/g suggesting physisorption. These findings offer insight into Zn adsorption mechanisms using activated teak sawdust powder with EDTA, potentially aiding in effective waste management methods.

**Keywords:** Wooden Batik; Zinc; Adsorption; Teak Sawdust; EDTA Activator; Adsorption Kinetic

#### 1. Pendahuluan

Desa Kreet, Bantul, Yogyakarta adalah salah satu daerah yang terkenal sebagai industri kerajinan batik kayu. Batik kayu merupakan kerajinan batik yang menggunakan media

kayu untuk menggambar motif atau corak. Dalam proses pembuatannya, pada tahap pewarnaan menggunakan zat warna sintetis seperti naptol dan indigosol yang mengandung konstituen logam berat (Oginawati et al., 2022). Hasil penelitian Widyastuti et al., (2019)

\* Corresponding author  
Email address: [tiadi@upnyk.ac.id](mailto:tiadi@upnyk.ac.id)

menunjukkan bahwa logam berat  $Zn^{2+}$  merupakan salah satu polutan yang banyak ditemukan di dalam limbah cair batik kayu Krebet, dengan kadar di atas nilai baku yang diperbolehkan yaitu berkisar antara 70-2947 mg/kg. Paparan logam tersebut dalam jumlah berlebihan dapat mengganggu kesehatan yang serius seperti mual, kram perut, anemia, kanker, hingga gangguan imunologi (Velusamy et al., 2021). Oleh karena itu, sisa proses pewarnaan ini perlu diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke badan utama sungai. Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair meliputi *reverse osmosis*, *filtrasi membran*, *ion exchange*, *chemical precipitation*, *evaporation*, *biological treatment* dan adsorpsi. Sebagian besar teknologi ini memiliki beberapa kelemahan, seperti modal dan biaya operasional yang tinggi, pembuangan limbah lumpur logam, dan umumnya tidak cocok untuk industri skala kecil. Diantara metode tersebut, adsorpsi dianggap sebagai metode yang menjanjikan karena efisien, murah, dan selektivitasnya tinggi (Melliti et al., 2023).

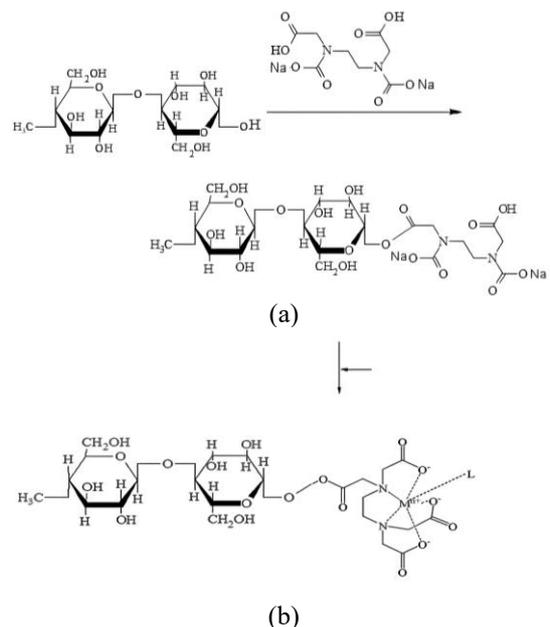
Oleh karena itu, dalam penelitian ini untuk menghilangkan ion logam  $Zn^{2+}$  dari air limbah batik kayu menggunakan metode adsorpsi. Adsorpsi adalah proses penjerapan adsorbat oleh permukaan adsorben karena adanya gaya tarik menarik atau adanya reaksi kimia antara adsorben dengan adsorbat. Adsorpsi terjadi pada permukaan adsorben dimana polutan akan berpindah dari larutan ke permukaan adsorben padat (Wang, 2023). Terdapat dua jenis adsorpsi berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, yaitu adsorpsi fisik (*physisorption*) dan adsorpsi kimia (*chemisorption*) (Zulfania et al., 2022). Adsorpsi fisika terjadi karena adanya gaya *van der Waals* pada permukaan adsorben, dan mempunyai nilai energi aktivasi 5-40 kJ/mol. Adsorpsi kimia terjadi karena adanya reaksi dengan zat yang diserap dengan adsorben. Komponen yang terikat adsorben mempunyai ikatan kimia yang kuat sehingga tidak dapat bergerak di permukaan. Penyerapan cenderung menempati seluruh permukaan adsorben, dengan nilai energi aktivasi 40 – 800 kJ/mol (Zhang et al., 2017).

Proses adsorpsi memerlukan adsorben sebagai agen penjerap senyawa yang diadsorpsi. Adsorpsi oleh biosorben melibatkan gugus fungsional yang terikat pada makromolekul di dalam permukaan adsorben seperti protein, selulosa dan biopolimer lain yaitu gugus -OH, dan C-O. Gugus -OH menyebabkan sifat polar pada adsorben, sehingga dapat mengikat komponen adsorbat.

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai metode alternatif untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair telah diteliti. Salah satu metode yang saat ini potensial dikembangkan adalah adsorpsi dengan menggunakan bahan penjerap yang murah dan mudah didapat. Menurut Lestari (2024) adsorben kulit langsung mampu menjerap ion Zn (II) di dalam air dengan kapasitas paling baik 11,7168 mg/g. Zeolit alam mampu menjerap ion Cr dalam limbah industri penyamakan kulit, dengan daya serap 12,1065 mg/g (Setyaningsih et al., 2017) dan 149,9977 mg/g (Aini, 2018). Beberapa adsorben lain yang bisa digunakan untuk

biosorpsi logam berat diantaranya serbuk gergaji pinus sebagai penjerap  $Cu^{2+}$  (Orozco et al., 2023), sekam padi sebagai penjerap Fe (Assyifa et al., 2023), serbuk kayu pohon gayam sebagai penjerap ion logam Pb(II) (Mutiara et al., 2020).

Serbuk gergaji (*sawdust*) kayu jati yang berasal dari industri furnitur, merupakan limbah yang mempunyai kadar selulosa yang cukup tinggi yaitu 46,5% (Putri, 2019). Jumlah serbuk gergaji kayu yang dihasilkan dari industri furnitur berkisar 0,78 juta  $m^3$ /tahun dengan pemanfaatan yang masih terbatas (Arini, 2020), sehingga sangat berpotensi dimanfaatkan sebagai biosorben. Selulosa dalam serbuk gergaji akan mengikat ion logam berat  $Zn^{2+}$  yang ada pada limbah batik karena adanya gugus -OH. Karakteristik utama adsorben adalah memiliki permukaan aktif yang dapat menjerap partikel adsorbat. Oleh karena itu, adsorben perlu diaktivasi terlebih dahulu sebelum digunakan guna mengoptimalkan kemampuan adsorpsinya (Setyaningsih et al., 2017). Kemampuan penjerapan partikel adsorbat akan berkaitan dengan kapasitas adsorpsi suatu adsorben (Fadl, 2023). Keefektifan pengikatan logam berat melalui gugus -OH ini dapat ditingkatkan dengan melakukan aktivasi menggunakan aktivator *Ethylene Diamine Tetraacetic Acid* (EDTA). EDTA adalah agen aktif dan *biodegradable* yang mengandung dua gugus amino dan empat gugus karboksil sehingga memiliki kemampuan dalam mengikat ion logam berat seperti ditunjukkan Gambar 1 (Zhang et al., 2021)



**Gambar 1.** (a) Reaksi aktivasi antara selulosa dengan EDTA (b) Pengikatan logam berat oleh selulosa teraktivasi EDTA (Irdhawati et al., 2020)

Menurut Harni et al., (2015) EDTA memiliki efektifitas sebagai penjerap logam lebih tinggi dibandingkan dengan aktivator lain. Konsentrasi optimum EDTA yang dapat digunakan sebagai aktivator sekitar 15% pada suhu 100°C. (Irdhawati et al., 2020). Selain melalui proses aktivasi terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi proses

adsorpsi, diantaranya adalah waktu kontak, ukuran molekul adsorben, pH, suhu dan berat adsorben (Harni et al., 2015).

Kinetika adsorpsi penting dalam evaluasi unjuk kerja adsorben. Analisis kinetika diperlukan untuk mengoptimalkan berbagai kondisi untuk proses adsorpsi (Fadl, 2023). Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penjerapan adsorbat oleh adsorben sebagai fungsi waktu. Faktor seperti pengadukan, jumlah adsorben, konsentrasi, dan suhu mempengaruhi kinetika adsorpsi. Pengadukan intens meningkatkan laju adsorpsi dengan menipiskan lapisan film, sedangkan jumlah adsorben dan konsentrasi adsorbat juga berperan. Kenaikan suhu meningkatkan kapasitas penjerapan (Zhang et al., 2021). Kecepatan pengadukan yang semakin tinggi meningkatkan penurunan kadar logam berat karena pengikatan adsorbat oleh adsorben menjadi lebih baik akibat homogenisasi senyawa pada limbah cair. Kecepatan pengadukan optimum berada dalam rentang 90-120 rpm (Syauqiah et al., 2011).

Model kinetik adsorpsi yang umum digunakan untuk menganalisis data eksperimental adalah *pseudo-first-order (PFO)*, *pseudo-second-order (PSO)*, dan model Elovich. Model tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi berdasarkan kapasitas adsorben dan penjerapan akan terus berlangsung seiring berjalannya waktu. Dalam model *PFO*, hanya salah satu reaktan yang mengalami perubahan konsentrasi. Dalam sistem adsorbat tunggal, air dianggap sebagai reaktan kedua yang konsentrasinya tetap, sehingga laju reaksi bergantung pada konsentrasi adsorbat. Model *PSO* mengasumsikan bahwa dua reaktan kompetitif berbeda tergantung dari rasio adsorbat dan adsorben (Agbovi, 2021). Model ini menggambarkan bahwa proses adsorpsi dibatasi oleh kapasitas adsorben dan akan mencapai kesetimbangan seiring waktu. Penggunaan model ini disesuaikan dengan ada atau tidaknya waktu kesetimbangan. Model kinetika Elovich menggambarkan laju adsorpsi berdasarkan kapasitas jerapan pada permukaan yang heterogen (Ilham et al., 2023).

Model kinetika pseudo orde satu, yang diusulkan oleh Lagergren, menjelaskan proses penjerapan molekul dari fase cair ke fase padat sebagai proses yang dapat dianggap *reversible*. Kesetimbangan terbentuk antara fase larutan dan fase padat. Lagergren (1898) pertama kali mengusulkan persamaan kinetika orde satu semu untuk adsorpsi asam oksalat dan asam malonat pada permukaan adsorben arang aktif. Sedangkan model kinetika pseudo orde dua mengasumsikan kapasitas penyerapan zat padat proporsional terhadap jumlah adsorben dan disesuaikan dengan kemampuan penjerap. Blanchard et al. (1984) pertama kali mengusulkan persamaan orde dua semu untuk penyisihan ion logam berat dalam larutan menggunakan zeolit alami (Jasper et al., 2020). Model elovich juga banyak digunakan dalam kinetika adsorpsi, yang menjelaskan mekanisme adsorpsi kimia (Wu et al., 2009).

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian Widyastuti et al., (2019) yaitu dengan melakukan reduksi logam  $Zn^{2+}$  pada limbah batik kayu Krebet melalui proses adsorpsi menggunakan biosorben serbuk kayu jati. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui efektifitas proses adsorpsi tersebut dan memastikan kelayakan limbah

yang dihasilkan jika dibuang ke lingkungan sesuai dengan parameter kadar logam yang diperbolehkan oleh regulasi yang ada. Disamping itu, dilakukan peninjauan kinetika adsorpsi yang dimaksudkan untuk mengetahui laju adsorpsi berdasarkan model kinetika yang sesuai dengan perubahan konsentrasi logam sebagai fungsi waktu pada berbagai suhu.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu air limbah batik kayu dengan kadar ion logam  $Zn^{2+}$  sebesar 17,6187 mg/L yang diperoleh dari Sanggar Peni Desa Krebet Bantul Yogyakarta, serbuk gergaji kayu jati dengan kadar air sebesar 1,65% dan kadar selulosa 77,6% diperoleh dari limbah penggergajian kayu di Jepara Jawa Tengah, EDTA ( $C_{10}H_{16}N_2O_8$ ) dibeli dari toko Hanschem, Aquades dibeli dari CV. Progo Mulyo, NaOH 0,1N dibeli dari toko Hanschem.

### 2.2. Pembuatan dan Aktivasi Adsorben

Serbuk gergaji dengan berat 100 g dicuci menggunakan 2 L aquades sebanyak tiga kali, dan direndam dalam 1,5 L larutan NaOH 0,1 N selama 2 jam untuk membersihkan serbuk dari pengotor dan menghilangkan lignin yang dapat menghambat transfer ion Zn ke sisi aktif adsorben. Kemudian dilakukan pencucian menggunakan aquades hingga pH 7 dan pengeringan pada suhu 100 °C selama 6 jam. Serbuk gergaji kering diayak untuk menghasilkan ukuran -50+100 mesh. Aktivasi dilakukan menggunakan EDTA 15% selama 2 jam pada suhu 100°C. Adsorben disaring dan dikeringkan pada suhu 50°C dilanjutkan dengan analisis menggunakan FTIR Type IR Prestige-21 SHIMADZU.

### 2.3. Proses Adsorpsi

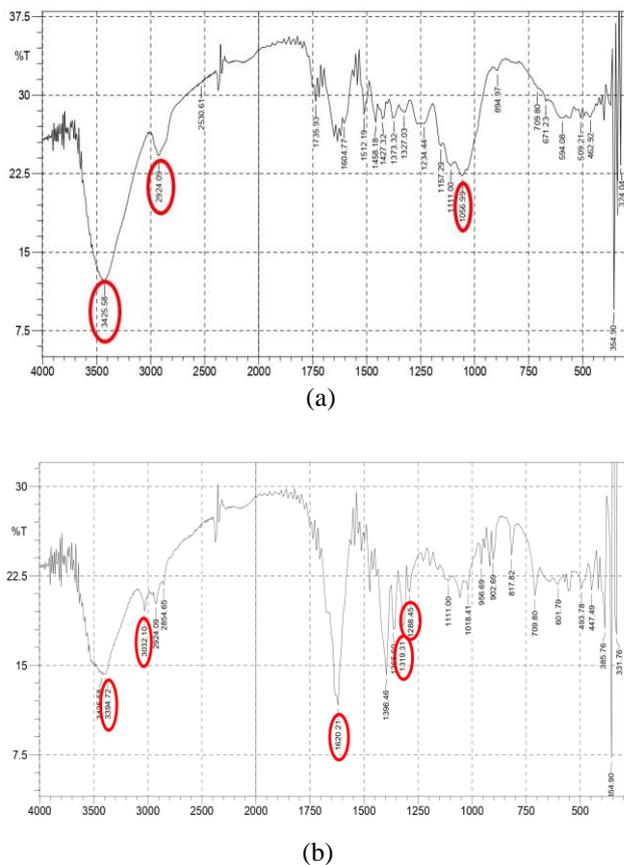
Proses adsorpsi dilakukan dengan menggunakan serbuk gergaji teraktivasi EDTA sebanyak 1 g di dalam 100 mL air limbah. Peubah yang diamati adalah waktu kontak 0, 15, 30, 45, 60 menit dan suhu 30°C, 45°C, 55°C. Kecepatan pengadukan diatur pada kecepatan 100 rpm dan pH 6,5. Penyesuaian pH menggunakan larutan NaOH. Filtrat diuji dengan AAS Tipe: Agient 200 Series AA, untuk mengetahui berapa kandungan  $Zn^{2+}$  yang masih terdapat dalam sampel limbah.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Karakterisasi Adsorben

Gugus fungsi adsorben dianalisis menggunakan FTIR berdasarkan serapan gelombang bilangan yang diperoleh. Sampel ditempatkan di antara dua plat untuk membentuk lapisan film tipis. Spektrum inframerah dihasilkan melalui transmisi cahaya, dengan pengukuran intensitas cahaya menggunakan detektor. Hasil diperoleh dalam bentuk plot intensitas energi terhadap bilangan gelombang. Puncak-puncak yang berbeda menunjukkan adanya ikatan kimia yang berbeda pada sampel. Penyelusuran gugus fungsi dilakukan pada rentang daerah frekuensi 4000-400  $cm^{-1}$ .

Hasil identifikasi gugus fungsi serbuk gergaji sebelum aktivasi dan sesudah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1.



**Gambar 2.** Spektrum FTIR : (a) sebelum (b) sesudah aktivasi dengan EDTA

Gugus fungsi – OH, –CH dan C-O glikosidik merupakan gugus utama selulosa. Hasil interpretasi gugus fungsi sampel serbuk gergaji kayu jati sebelum aktivasi menunjukkan bahwa gugus hidroksil –OH terletak pada bilangan gelombang 3425,58  $\text{cm}^{-1}$ , gugus C-H pada 2924,09  $\text{cm}^{-1}$ , ikatan C-O pada 1056,99  $\text{cm}^{-1}$ . Perlakuan sampel setelah aktivasi, muncul gelombang serapan pada 1319,31  $\text{cm}^{-1}$ . Hal ini mengindikasikan keberadaan gugus amina (C-N). Bilangan gelombang lain pada 1620,21  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya gugus karboksilat (C=O). Sedangkan gugus fungsi –OH, –CH dan C-O setelah aktivasi terjadi pergeseran, yaitu pada bilangan gelombang 3394,72  $\text{cm}^{-1}$ , 3032,10  $\text{cm}^{-1}$ , dan 1288,45  $\text{cm}^{-1}$ .

Perlakuan alkilasi menyebabkan pengurangan ikatan hidrogen dan peregangan pada hidroksil gugus (OH) selulosa. Pergeseran bilangan gelombang pada gugus selulosa setelah aktivasi mengidentifikasi terjadinya peregangan asimetris dan simetris karena adanya ion karboksilat, sesuai dengan penelitian Pereira et al., (2010). Berdasarkan reaksi dapat diketahui bahwa EDTA yang memiliki 4 gugus asam karboksilat akan bereaksi dengan selulosa pada serbuk gergaji kayu dan mengaktifkan gugus

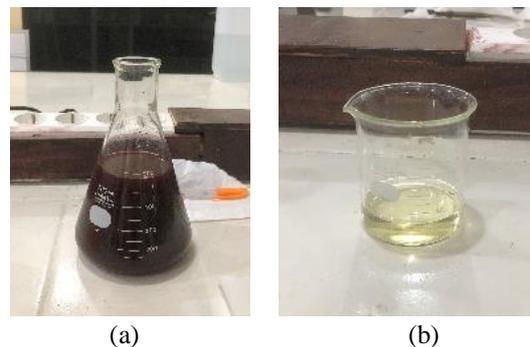
OH. Analisis FTIR menunjukkan bahwa gugus hidroksil selulosa bereaksi dengan fungsi EDTA yang memperkenalkan gugus fungsi karboksilat dan amina pada adsorben. Ini mengarah ke kapasitas adsorpsi yang kuat untuk ion logam  $\text{Zn}^{2+}$  dalam air limbah.

**Tabel 1.** Hasil karakterisasi FTIR sebelum dan sesudah aktivasi

Ikatan	Bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )	Bilangan gelombang sebelum aktivasi ( $\text{cm}^{-1}$ )	Bilangan gelombang sesudah aktivasi ( $\text{cm}^{-1}$ )
O-H	2500-3650	3425,58	3394,72
C-H	2850-3300	2924,09	3032,10
C-O	1050-1300	1056,99	1288,45
C-N	1180-1360	-	1319,31
C=O	1400-1760	-	1620,21

### 3.2 Daya Jerap

Limbah cair dari proses pewarnaan batik kayu di Sanggar Peni, Desa Krebet, Bantul Yogyakarta, pada mulanya berwarna ungu gelap. *Pretreatment* dilakukan dengan penyaringan untuk menghilangkan pengotor. Selanjutnya dilakukan proses adsorpsi sehingga larutan limbah akan mengalami perubahan warna menjadi kuning muda seperti terlihat pada Gambar 3.

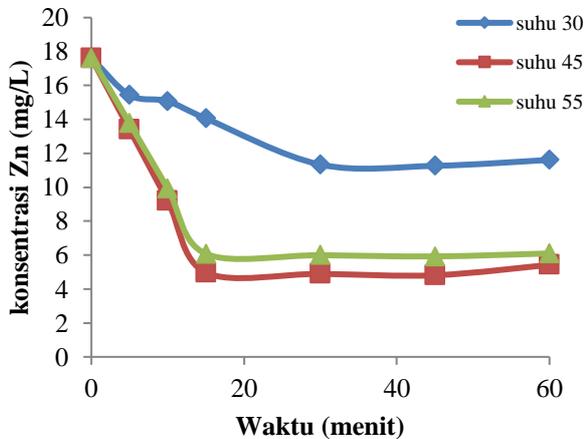


**Gambar 3.** (a) Limbah batik kayu sebelum proses adsorpsi dan (b) sesudah proses adsorpsi

Kadar ion  $\text{Zn}^{2+}$  dalam limbah dianalisis menggunakan AAS dengan membuat larutan standar logam  $\text{Zn}^{2+}$  (0,4 - 1,6)  $\mu\text{g/mL}$ . Kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi ion  $\text{Zn}^{2+}$  dapat diketahui dengan mengukur konsentrasi ion  $\text{Zn}^{2+}$  sebagai fungsi waktu. Hasil pengamatan direpresentasikan dalam Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4 terlihat bahwa, konsentrasi ion  $\text{Zn}^{2+}$  dalam sampel air limbah cenderung berkurang seiring bertambahnya waktu kontak pada semua suhu penelitian. Proses adsorpsi meningkat dari awal hingga sekitar 45 menit. Pada 30 menit terjadi penurunan konsentrasi berlangsung cepat, kemudian perlahan-lahan menuju kesetimbangan. Hal ini disebabkan oleh interaksi awal antara ion  $\text{Zn}^{2+}$  dan adsorben dalam menyerap ion  $\text{Zn}^{2+}$  berlangsung secara cepat. Penjerapan cepat terjadi karena proses difusi di permukaan adsorben. Akan tetapi setelah waktu kontak mencapai waktu optimum, yaitu pada waktu

mendekati 60 menit, terjadi kejenuhan ( $q_e$ ) yang diikuti dengan sedikit penurunan kapasitas adsorpsi. Hal ini kemungkinan disebabkan pada waktu yang lama terjadi kerusakan adsorben sehingga adsorbat yang sudah terjerap terlepas lagi.

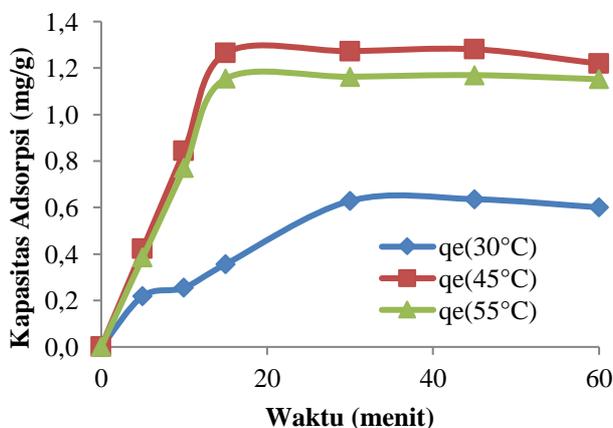


**Gambar 4.** Hubungan waktu kontak dengan konsentrasi ion logam Zn pada pada suhu 30, 40 dan 50°C

Kapasitas adsorpsi biosorben terhadap logam berat dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \dots \dots \dots (1)$$

Gambar 4 dan 5 menunjukkan, bahwa pada suhu 30 dan 45°C terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi. Semakin tinggi suhu nilai kapasitas adsorpsi semakin besar sehingga konsentrasi ion logam  $Zn^{2+}$  pada limbah semakin menurun. Hal ini disebabkan pada suhu yang tinggi terjadi pengaktifan sisi aktif permukaan adsorben serta peningkatan energi kinetik sistem, sehingga meningkatkan mobilitas adsorbat. Akan tetapi pada suhu 55°C kapasitas adsorpsi justru menurun. Penurunan kapasitas adsorpsi ini disebabkan karena adsorpsi sudah terjadi di atas suhu optimum yang menyebabkan energi panas pada sistem meningkat lebih besar. mobilitas adsorbat lebih cepat sehingga terjadi desorpsi atau lepasnya komponen yang telah teradsorpsi.



**Gambar 5.** Hubungan waktu kontak dengan kapasitas adsorpsi ion Zn pada suhu 30, 40 dan 50°C

Selain itu, pemanasan pada suhu tinggi dan waktu yang lama kemungkinan dapat menyebabkan pemutusan ikatan. Oleh karena itu, kondisi yang relatif baik dipilih pada suhu 45°C dan waktu kontak 45 menit dengan kecepatan pengaduk 100 rpm. Pada keadaan tersebut diperoleh nilai kapasitas adsorpsi 1,2806 mg/g dan kandungan ion Zn sebesar 4,8121 mg/L sehingga terjadi penurunan kadar ion  $Zn^{2+}$  sebesar 72,69%. Hasil ini lebih kecil dibanding adsorpsi ion Cr (VI) menggunakan bagase sorgum teraktivasi NaOH dengan prosentase kapasitas maksimum 99,03 % (Putri et al., 2024). Hal ini kemungkinan disebabkan di dalam limbah batik selain terdapat logam berat selain Zn juga mengandung zat warna yang akan ikut terjerap, sedangkan pada penelitian Putri et al., (2024), sampel yang digunakan adalah air yang hanya mengandung ion Zn.

**Tabel 2.** Kesesuaian standar baku mutu

	Baku Mutu (mg/L)	Hasil Penelitian (mg/L)	Memenuhi Standar
Permenkes No. 492 Th. 2010 (Air Minum)	3	4,8121	Tidak
Permenkes No. 32 Th. 2017 (Higiene Sanitasi)	15	4,8121	Ya

Hasil tersebut masih belum memenuhi baku mutu persyaratan kualitas air minum tetapi sudah memenuhi syarat baku mutu untuk digunakan sebagai air *hygiene* sanitasi, sebagaimana ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017 (Tabel 2). Hal ini dapat terjadi karena pada saat proses adsorpsi, komponen yang terjerap tidak hanya ion  $Zn^{2+}$  tetapi juga zat warna yang ada dalam sampel limbah, ditandai dengan perubahan warna limbah yang menjadi lebih jernih.

### 3.3 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi mampu menggambarkan mekanisme adsorpsi ion logam berat dan menentukan laju adsorpsi logam berat dari air limbah (Raji et al., 2023). Parameter ini digunakan untuk menilai laju adsorpsi pada adsorben terhadap adsorbat dengan indikator waktu kontak. Data kinetika dianalisis menggunakan model pseudo orde satu, pseudo orde dua, dan model orde tiga. Evaluasi kesesuaian terhadap persamaan menggunakan nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ). Model kinetika yang paling sesuai adalah yang memiliki nilai  $R^2$  mendekati 1 (Abechi et al., 2011). Asumsi-asumsi yang diambil untuk model tersebut mencakup: (1) adsorpsi terjadi pada lokasi tertentu tanpa interaksi antar adsorbat; (2) energi adsorpsi tidak bergantung pada cakupan permukaan; (3) pencapaian cakupan monolayer pada permukaan adsorben menghasilkan adsorpsi maksimum; (4) konsentrasi adsorbat tetap. (Tan, 2017).

### 3.3.1 Persamaan Orde Satu Semu

Model kinetika ini dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

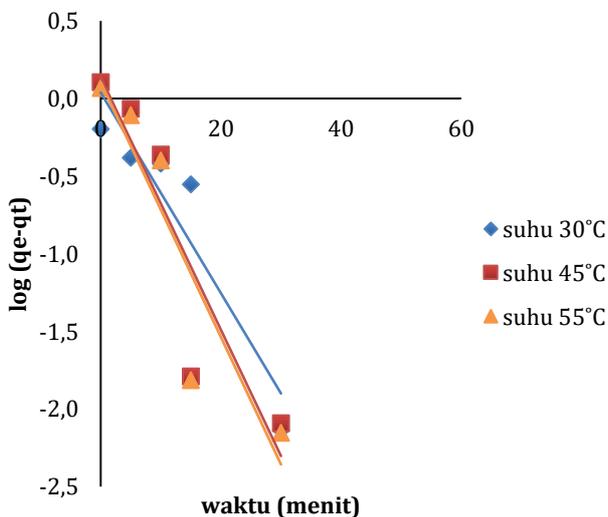
$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \dots\dots\dots(2)$$

Hasil integrasi dengan kondisi batas ( $t = 0, q_t=0$ , dan  $t=t, q=q_t$ ) dan linierisasi persamaan (2), diperoleh:

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \dots\dots\dots(3)$$

Nilai  $q_e$  (mg/g) diperoleh pada saat  $t$  mendekati tak hingga atau pada saat keseimbangan.

Data pada Gambar 4 dan 5, selanjutnya dibuat grafik hubungan antara  $\log(q_e - q_t)$  terhadap  $t$  untuk model kinetika adsorpsi pada persamaan 3 tersebut. Hasil pengolahan data ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Model kinetika orde satu semu pada suhu 30, 40 dan 50°C

Nilai  $k_1$  adalah konstante laju adsorpsi orde satu semu ( $\text{min}^{-1}$ ) yang merupakan tangen arah dari Gambar 6.

### 3.3.2 Persamaan Orde Dua Semu

Model ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

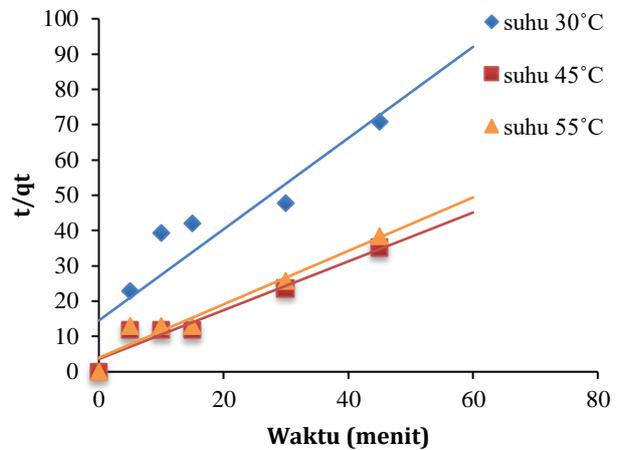
$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \dots\dots\dots(4)$$

Hasil integrasi dan linearisasi model kinetika orde dua semu pada persamaan (4) dengan kondisi batas ( $t=0, q_t=0$ , dan  $t=t, q=q_t$ ) menghasilkan persamaan (5) dan (6).

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \dots\dots\dots(5)$$

$$\left[ \frac{t}{q_t} \right] = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} (t) \dots\dots\dots(6)$$

Jika dilakukan plot ( $t/q_t$ ) dengan  $t$ , maka akan diperoleh nilai  $k_2$  dan  $q_e$ . Nilai  $k_2$  dan  $q_e$  diperoleh dari kemiringan dan intersep grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Model kinetika orde dua semu pada suhu 30, 40 dan 50°C

### 3.3.3 Persamaan Elovich

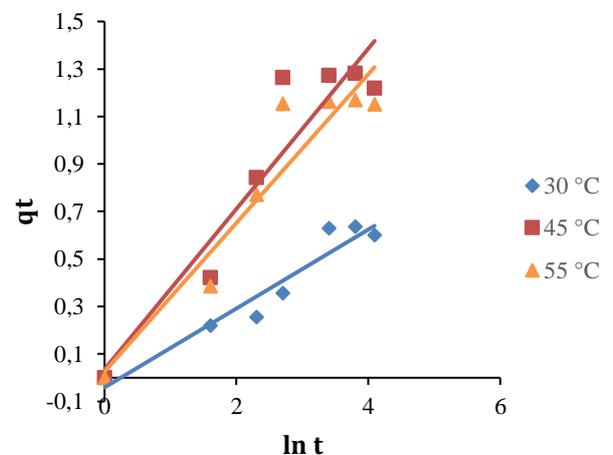
Model kinetika elovich dirumuskan dengan persamaan di bawah ini:

$$\frac{dq_t}{dt} = a \exp(-bq_t) \dots\dots\dots(7)$$

Dimana  $a$  dan  $b$  adalah konstanta selama percobaan, Hasil integrasi dan linearisasi model elovich pada persamaan (7) dengan kondisi batas ( $t=0, q_t=0$ , dan  $t=t, q=q_t$ ) menghasilkan persamaan (8).

$$q_t = \left(\frac{1}{b}\right) \ln ab + \left(\frac{1}{b}\right) \ln t \dots\dots\dots(8)$$

Jika dilakukan plot  $q_t$  dengan  $\ln t$ , maka akan diperoleh nilai  $a$  dan  $b$ .  $a$  adalah laju adsorpsi awal (mg/(g min)) dan  $b$  merupakan permukaan yang tertutup adsorbat (g/mg). Nilai  $a$  dan  $b$  diperoleh dari kemiringan dan intersep grafik pada Gambar 8.



Gambar 8. Model Kinetika Elovich pada suhu 30, 40, dan 50°C

Tes validasi terhadap model, dilakukan dengan menentukan nilai  $R^2$  pada Gambar 6, 7 dan 8, sehingga diperoleh nilai  $q_e$ ,  $k$ , dan  $R^2$  untuk persamaan kinetika adsorpsi Lagergren orde satu-semu, orde dua-semu dan Elovich seperti ditunjukkan pada Tabel 3, 4, dan 5.

**Tabel 3.** Parameter kinetika model orde satu semu

T (°C)	Persamaan Orde Satu Semu			
	qe data (mg/g)	qe hitung (mg/g)	k <sub>1</sub> (1/mnt)	R <sup>2</sup>
30	0,6357	1,0925	0,1487	0,8814
45	1,2806	1,3694	0,1872	0,8361
55	1,1624	1,2710	0,1889	0,8446

Berdasarkan perbandingan data dari Tabel 3,4, dan 5, kinetika adsorpsi  $Zn^{2+}$  pada limbah batik kayu sesuai dengan model Lagergren orde dua-semu. Hal ini ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  yang lebih tinggi pada model orde dua-semu. Dari model elovich diperoleh nilai  $b$  yang cukup besar dapat menggambarkan permukaan adsorben yang cukup heterogen (Sari et al., 2014).

**Tabel 4.** Parameter kinetika model orde dua semu

T (°C)	Persamaan Orde Dua Semu			
	qe data (mg/g)	qe hitung (mg/g)	k <sub>2</sub> (g/mg.mnt)	R <sup>2</sup>
30	0,6357	0,9930	0,0433	0,9028
45	1,2806	1,6114	0,0660	0,9492
55	1,1625	1,3208	0,1446	0,9492

Nilai  $b$  juga untuk menggambarkan kecenderungan energi aktivasi proses adsorpsi kation  $Zn^{2+}$  pada adsorben. Nilai  $q_e$  semakin tinggi maka kapasitas adsorpsi juga semakin tinggi. Pada penelitian ini, nilai  $q_e$  tertinggi terjadi pada suhu 45°C yaitu sebesar 1,2806 mg/g. Model orde dua-semu sering memberikan hasil yang lebih baik dalam kinetika proses adsorpsi. Adsorpsi ion Cr menggunakan serbuk gergaji oleh Baral et al. (2006), dan adsorpsi logam Zn menggunakan biomassa pseudomonas oleh Hidayati et al (2016), keduanya mengikuti model kinetika orde dua-semu. Kemampuan adsorpsi ion Fe oleh sedimentasi Teluk Jakarta juga mengikuti kinetika adsorpsi orde dua-semu (Nurhidayati et al., 2022).

**Tabel 5.** Parameter kinetika model Elovich

T (°C)	Persamaan Elovich			R <sup>2</sup>
	qe data (mg/g)	a mg/(g.menit)	b (mg/g)	
30	0,6357	0,1300	6,0168	0,9270
45	1,2807	0,3755	2,9621	0,8879
55	1,1695	0,3399	3,1928	0,9000

### 3.4 Energi Aktivasi

Jenis adsorpsi yang terjadi dapat ditelaah berdasarkan nilai energi aktivasinya (Ea). Estimasi nilai Ea diperoleh dengan

menggunakan pedekatan persamaan Arrhenius sebagai berikut:

$$k = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \dots\dots\dots(9)$$

Linearisasi persamaan (9) akan diperoleh persamaan (10):

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT} \dots\dots\dots(10)$$

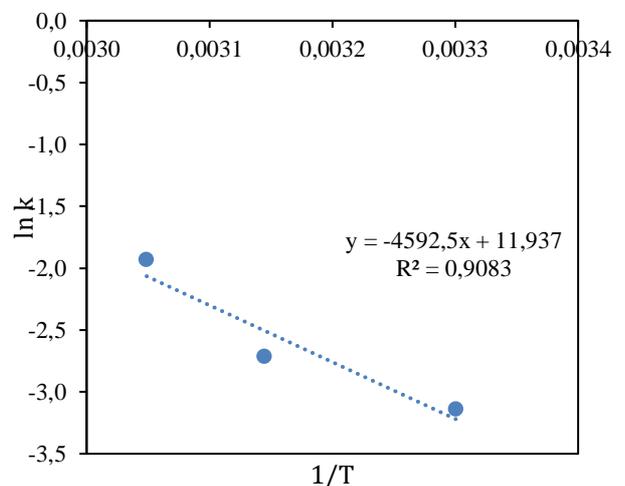
Apabila dibuat grafik hubungan antara  $\ln k$  terhadap  $\frac{1}{T}$  maka akan diperoleh  $\ln A$  sebagai intersep dan  $-\frac{Ea}{RT}$  sebagai tangen arah. Berdasarkan validasi data hubungan  $k$  pada berbagai suhu disajikan pada Tabel 6 dan Gambar 9.

**Tabel 6.** Parameter energi aktivasi (Ea)

Suhu (Kelvin)	k <sub>2</sub> (g/mg.mnt)	1/T	ln k
303	0,0433	0,0033	-3,1393
318	0,0660	0,0031	-2,7170
328	0,1446	0,0030	-1,9337

Berdasarkan Gambar 9 diperoleh nilai pra eksponensial A sebesar  $1,527 \times 10^5$  g/mg.min dan Ea sebesar 38,18 kJ/mol, sehingga persamaan konstanta laju penghilangan ion  $Zn^{2+}$  sebagai fungsi suhu (T) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$k = 1,527 \times 10^5 \exp\left(-\frac{4592,5}{T}\right) \dots\dots\dots(11)$$



**Gambar 9.** Hubungan 1/T terhadap ln k

Nilai Ea tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi Zn menggunakan serbuk gergaji teraktivasi EDTA tergolong sebagai fisisorpsi. Sehingga dapat dinyatakan bahwa terserapnya ion logam  $Zn^{2+}$  dalam serbuk gergaji kayu jati karena adanya gaya *van der Waals* (gaya elektostatik) yaitu gaya tarik menarik antara molekul dalam senyawa. Gaya ini timbul akibat adanya muatannya yang berlawanan yaitu

gugus OH<sup>-</sup> yang bermuatan negatif dengan ion Zn<sup>2+</sup>. Hasil ini juga sesuai dengan penelitian Puriyandari (2019) yang menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam Cu dengan adsorben kulit kacang termasuk jenis fisisorpsi. Darmokoesoemo (2019) juga mengungkapkan bahwa adsorpsi Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, dan Ni<sup>2+</sup> termasuk fisisorpsi. Berdasarkan penelitian Huang et al (2024) menunjukkan bahwa adsorpsi Cr (VI) oleh adsorben kulit pisang termodifikasi asam termasuk fisisorpsi dan mengikuti model kinetika orde dua semu.

#### 4. Kesimpulan

Serbuk gergaji kayu jati teraktivasi EDTA terbukti mampu menjerap ion logam berat Zn pada limbah proses pewarnaan batik kayu. Hasil adsorpsi relatif baik diperoleh pada suhu 45°C dan waktu kontak 45 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 1,2806 mg/g dan kandungan Zn<sup>2+</sup> sebesar 4,8121 mg/L. Hasil ini memenuhi syarat baku mutu untuk air *hygiene* sanitasi, sebagaimana ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017. Model kinetika adsorpsi yang sesuai mengikuti model Lagergren orde dua semu dengan persamaan konstante laju adsorpsi sebagai fungsi suhu  $k = 1,527 \times 10^5 \exp\left(\frac{-4592,5}{T}\right)$  (g/mg.menit), T dalam K dan termasuk dalam mekanisme adsorpsi fisika.

#### Daftar Notasi

A	= faktor frekuensi (g/mg.menit)
a	= laju adsorpsi awal (mg/(g.menit))
b	= konstanta elovich (g/mg)
Ea	= energi aktivasi (kJ/mol)
C <sub>0</sub>	= konsentrasi logam awal (mg/L)
C <sub>e</sub>	= konsentrasi kesetimbangan (mg/L)
k	= konstanta laju adsorpsi (g/mg.menit)
k <sub>1</sub>	= konstanta kecepatan adsorpsi model orde satu semu (1/menit)
k <sub>2</sub>	= konstanta kecepatan adsorpsi model orde dua semu (g/mg.menit)
k <sub>3</sub>	= konstanta kecepatan adsorpsi model orde tiga
m	= massa adsorben (g),
q <sub>e</sub>	= massa logam teradsorpsi pada kesetimbangan (mg/g)
q <sub>t</sub>	= massa logam teradsorpsi pada waktu t (mg/g)
R	= tetapan gas umum (8,31x 10 <sup>-3</sup> kJ mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
R <sup>2</sup>	= koefisien korelasi
t	= waktu (menit)
T	= suhu (K)
V	= volume larutan (L).

#### Daftar Pustaka

Abechi, E. S., Gimba, C. E., Uzairu, A., & Kagbu, J. A. (2011). Kinetics of Adsorption of Methylene Blue onto Activated Carbon Prepared from Palm Kernel Shell.

- Scholars Research Library, 3(1), 154–164.
- Agbovi, H. K., & Wilson, L. D. (2021). Adsorption processes in biopolymer systems: fundamentals to practical applications, In: Natural polymers-based green adsorbents for water treatment, 1-51.
- Aini, S., & Supratikno, S. (2018). Penerapan Lima Model Kesetimbangan Adsorpsi Isoterm pada Adsorpsi Ion Logam Chrom VI oleh Zeolit. *Eksergi*, 15(2), 48–53.
- Arini, G. A., & Aminah, S. (2020). Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu Jati (*Tectona Grandis L.F*) sebagai adsorben logam Cu (II). *Media Eksakta* 16 (2), 89–97.
- Assyifa, N., Dewi, T. S., & Silmi, A. (2023). Efektivitas Penggunaan Abu Sekam Padi (*Oryza sativa*) Sebagai Adsorben Terhadap Kadar Besi ( Fe ) Pada Pengolahan Air Baku. *Jurnal Techlink*, 7(1), 40–48.
- Baral, S. S., Das, S. N., & Rath, P. (2006). Hexavalent chromium removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust. *Biochemical Engineering Journal*, 31, 216–222.
- Darmokoesoemo, H. (2019). Pengembangan Adsorben Limbah Tahu Padat (LTP) Terimmobilisasi pada Permukaan Silika untuk Penyisihan Berbagai Ion Logam Berat Bivalensi dari Sampel Limbah Sintetik. *Disertasi*, 1–219.
- Fadl, M. G. (2023). Prediction of heavy metal biosorption mechanism through studying isotherm kinetic equations. *Scientific Reports*, 13,1576, 1–10.
- Harni, R. M., Iryani, A., & Affandi, H. (2015). Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu Jati ( *Tectona Grandis L . f .* ) Sebagai Adsorben Logam Timbal ( Pb ). *Jurnal FMIPA Universitas Pakuan*,1-9.
- Hidayati, F., Tamira Fajrin, I., & Rasyid Ridho, R. (2016). Sifat Fisika dan Mekanika Kayu Jati Unggul “Mega” dan Kayu Jati Konvensional yang ditanam di Hutan pendidikan Wanagama, Gunungkidul, Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 10, 98–107.
- Huang, Z., Campbell, R., & Mangwandi, C. (2024). Aqueous Solutions Using Acid-Modified Banana Peel. *Molecules*, 29, 1-18.
- Ilham, R., Rahmah, F. K., Said, N. F., & Rofianto, E. (2023). Studi Kinetika Adsorpsi : Pemanfaatan Limbah Biji Pepaya (*Carica papaya L.*) sebagai Adsorben Ion Logam Cd(II) dan Pb(II) Pada Limbah Dengan Metode Batch. *Akta Kimia Indonesia*, 8(2), 89–110.
- Irdhawati, Triyunita Sinthadevi, N. N., & Sahara, E. (2020). Serbuk Gergaji Kayu Jati Teraktivasi EDTA Sebagai Penjerap Ion Tembaga (II) dan Krom (III). *Indonesian Journal of Chemical Research*, 7(2), 114–119.
- Jasper, E. E., Ajibola, V. O., & Onwuka, J. C. (2020). Nonlinear regression analysis of the sorption of crystal violet and methylene blue from aqueous solutions onto an agro-waste derived activated carbon. *Applied Water Science*, 10, 132.
- Lestari, K., & Kurniawati, D. (2024). Pengaruh Konsentrasi Terhadap Penyerapan Ion Zn(II) Menggunakan Biosorben Kulit Langsung (*Lansium domesticum Corr*). *Pendidikan Dan Sains*, 4, 523–531.

- Melliti, A., Yılmaz, M., Sillanpää, M., Hamrouni, B., & Vurm, R. (2023). Low-cost date palm fiber activated carbon for effective and fast heavy metal adsorption from water: Characterization, equilibrium, and kinetics studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 672, 131775, 1-10.
- Mutiara, T., Aziz, J. D., & Irsack, M. G. (2020). Pemanfaatan Serbuk Kayu Pohon Gayam (*Inocarpus Fagiferus*) sebagai Bio Adsorbent Penjerap Ion Logam Berat Pb(II) dalam Limbah Cair. *Eksergi*, 17(1), 7-10.
- Nurhidayati, I., Mellisani, B., Puspita, F., & Rahmawati Putri, F. A. (2022). Penentuan Isoterm dan Kinetika Adsorpsi Ion Besi oleh Sedimen Sebagai Adsorben. *Warta Akab*, 46(1), 75-83.
- Oginawati, K., Suharyanto, Susetyo, S. H., Sulung, G., Muhayatun, Chazanah, N., Dewi Kusumah, S. W., & Fahimah, N. (2022). Investigation of dermal exposure to heavy metals (Cu, Zn, Ni, Al, Fe and Pb) in traditional batik industry workers. *Heliyon*, 8(2), 1-7.
- Orozco, C. I., Freire, M. S., Gómez-Díaz, D., & González-Álvarez, J. (2023). Removal of copper from aqueous solutions by biosorption onto pine sawdust. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, 1-17.
- Pereira, F. V., Gurgel, L. V. A., & Gil, L. F. (2010). Removal of  $Zn^{2+}$  from aqueous single metal solutions and electroplating wastewater with wood sawdust and sugarcane bagasse modified with EDTA dianhydride (EDTAD). *Journal of Hazardous Materials*, 176, 856–863.
- Puriyandari, D., & Laksono, P. J. (2019). Pengaruh Ion Cr(VI) Pada Variasi pH Terhadap Serapan Ion Cu(II) Oleh Adsorben Kulit Kacang Tanah dengan Spektrofotometri Serapan Atom. *Jurnal Pendidikan Kimia*, 3(1), 15–29.
- Putri, D.A., & Hidayat, T. (2019). Serbuk Kayu Jati (*Tectona Grandis* Linn. F.) Sebagai Substrat Alternatif Untuk Produksi Enzim Selulase. *Scripta Biologica*, 6(2).
- Putri, D. I. M., Darmokoesoemo, H., Supriyanto, G., Zahro, N. F., & Widyaningrum, B. A. (2024). Penyisihan Ion Logam Cr ( VI ) dari Larutan Menggunakan Biosorben Berbasis Limbah Pertanian Bagase Sorgum Teraktivasi NaOH. *Eksergi*, 21(2), 111–121.
- Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation. *Waste*, 1, 775–805.
- Sari, R. A., Muhdarina, & Nurhayati. (2014). Adsorpsi Kation Pb (II) Pada Lempung Cengar Teraktivasi Asam Sulfat : Pengaruh Waktu Kontak. *Jurnal Online Mahasiswa FMIPA*, 40–47.
- Setyaningsih, L. W. N., Asmira, Z. I., & W, N. C. F. (2017). Aktivasi dan Aplikasi Zeolit Alam Sebagai Adsorben Logam Kromium Dalam Air Limbah Industri Penyamakan Kulit Activation and Application of Natural Zeolite for Adsorbent of Chromium in Wastewater of Leather Industry. *Eksergi*, 14(1), 7–11.
- Syauqiah, I., Amalia, M., & Kartini, H. A. (2011). Analisis Variasi Waktu Dan Kecepatan Pengaduk Pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat Dengan Arang Aktif. *Info Teknik*, 12(1), 11–20.
- Tan, K. L., & Hameed, B. H. (2017). Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 74, 25–48.
- Velusamy, S., Roy, A., Sundaram, S., & Kumar Mallick, T. (2021). A Review on Heavy Metal Ions and Containing Dyes Removal Through Graphene Oxide-Based Adsorption Strategies for Textile Wastewater Treatment. *Chemical Record*, 21, 1570–1610.
- Wang, J., & Guo, X. (2023). Adsorption kinetics and isotherm models of heavy metals by various adsorbents: An overview. *Environmental Science and Technology*, 53(21), 1-31.
- Widyastuti, D., Mukhlison, M., Kamulyan, B., Mayani, M., Rofi'i, I., Rachman, N. F., & Albihad, D. (2019). Kajian Limbah Kerajinan Batik Kayu di Desa Wisata Kreet Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 18(1), 50–56.
- Wu, F. C., Tseng, R. L., & Juang, R. S. (2009). Characteristics of Elovich equation used for the analysis of adsorption kinetics in dye-chitosan systems. *Chemical Engineering Journal*, 150, 366–373.
- Zhang, K., Dai, Z., Zhang, W., Gao, Q., Dai, Y., Xia, F., & Zhang, X. (2021). EDTA-based adsorbents for the removal of metal ions in wastewater. *Coordination Chemistry Reviews*, 434, 213809, 1-14.
- Zhang, Y., Yu, F., Cheng, W., Wang, J., & Ma, J. (2017). Adsorption Equilibrium and Kinetics of the Removal of Ammoniacal Nitrogen by Zeolite X/Activated Carbon Composite Synthesized from Elutrilithe. *Journal of Chemistry*. 1936829, 1-10.
- Zulfania, F., Aribadin, Fathoni, R., & Moh.Nur, A. (2022). Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Cu dengan Menggunakan Adsorben Kulit Jagung (*Zea Mays*). *Jurnal Chemurgy*, 6(2), 65–69.