

PEMODELAN MATEMATIS ISOTERM DAN KINETIKA ADSORPSI ION CR(VI) PADA LIMBAH ELEKTROPLATING MENGGUNAKAN ADSORBEN TEMPURUNG KELAPA

**Madalena Da Costa^{1,*}, Oktavina G. LP Manulangga²
Martinho Dos Santos Martins³**

*^{1,2}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Perencanaan,
Universitas San Pedro*

*³Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan
Alam, Universitas Katolik Widya Mandira Kupang*

**email: madalenadacosta042@gmail.com*

Abstrak: Peningkatan jumlah industri di Indonesia berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi nasional, namun juga menimbulkan ancaman serius terhadap lingkungan akibat pencemaran air dan tanah oleh limbah organik maupun anorganik. Industri elektroplating merupakan salah satu sumber utama limbah berbahaya, khususnya yang mengandung ion logam berat kromium heksavalen (Cr(VI)) seperti kromat, dikromat, dan bikromat, yang tergolong limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Salah satu metode yang dinilai efektif dan ekonomis untuk mengatasi pencemaran ini adalah proses adsorpsi menggunakan karbon aktif. Dalam penelitian ini, digunakan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa untuk mengadsorpsi ion Cr(VI) dari limbah elektroplating. Efektivitas adsorpsi dikaji melalui pendekatan model isoterm Langmuir, Freundlich, dan Temkin, serta analisis kinetika adsorpsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan koefisien determinasi (R^2) tertinggi sebesar 0,954, yang mengindikasikan terjadinya adsorpsi monolayer pada permukaan adsorben yang homogen. Dengan demikian, karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki potensi besar sebagai adsorben alami yang efisien dan ramah lingkungan untuk penanganan limbah logam berat Cr(VI).

Kata Kunci: Adsorpsi; Cr(VI); Tempurung Kelapa; Isoterm Langmuir; Limbah Elektroplating; Karbon Aktif

Abstract: The growth of industrial activity in Indonesia contributes positively to national economic development but simultaneously poses serious environmental threats due to contamination of water and soil by organic and inorganic pollutants. The electroplating industry is a significant source of hazardous waste, particularly containing hexavalent chromium (Cr(VI)) ions such as chromate, dichromate, and bichromate, all of which are classified as hazardous and toxic substances (B3).

Among various treatment methods, adsorption has been considered both effective and cost-efficient, especially using activated carbon. This study employs coconut shell-based activated carbon as an adsorbent for the removal of Cr(VI) ions from electroplating wastewater. The adsorption behavior was analyzed using isotherm models, namely Langmuir, Freundlich, and Temkin, along with adsorption kinetics. The results indicate that the adsorption process follows the Langmuir isotherm model with the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.954$), suggesting a monolayer adsorption mechanism on a homogeneous surface. Therefore, coconut shell-derived activated carbon demonstrates high potential as an efficient and environmentally friendly natural adsorbent for treating Cr(VI)-contaminated industrial wastewater.

Keywords: Adsorption; Cr(VI); Coconut Shell; Langmuir Isotherm; Electroplating Wastewater; Activated Carbon

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah industri berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia, akan tetapi paralel menciptakan ancaman lingkungan karena dapat menyebabkan terjadinya pencemaran sumber daya air dan tanah dengan polutan organik dan anorganik (Jyoyi dkk, 2023). Industri elektroplating menjadi salah satu industri yang limbah cairnya berbahaya bagi lingkungan karena pada kegiatan pelapisan (plating) logam menggunakan larutan kimia asam kromat sebagai bahan utama kegiatan lapis halus (Costa, 2019). Dengan demikian industri ini menghasilkan polutan anorganik yang mengandung senyawa Cr (VI), seperti kromat (CrO_4^{2-}), dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), dan bikromat (HCrO_4^-) yang merupakan limbah logam berat dan kategori limbah bahan beracun berbahaya (B3).

Mengatasi permasalahan ini, telah digunakan beberapa pendekatan untuk menghilangkan kandungan logam Cr dalam limbah yaitu dengan metode presipitasi (Mulyadi et al., 2020), elektrokoagulasi (Wahyulis et al., 2014), filtrasi (Zulfi et al., n.d.), dan proses adsorpsi (Guo et al., 2024). Diantara pendekatan yang digunakan, adsorpsi merupakan metode yang dinilai efisien dan hemat biaya karena operasinya yang murah (Leonard et al., 2023) dan efisien untuk menghilangkan ion logam berat. Adsorpsi kontaminan oleh karbon aktif telah diidentifikasi sebagai salah satu teknologi yang paling efektif dan layak karena sifat karbon aktif yang berpori mikro, distribusi ukuran pori yang menguntungkan, reaktivitas permukaan yang tinggi, kapasitas adsorpsi yang besar, keserbagunaan dan ketersediaan yang mudah (Zhu & Kolar, 2016). Bahan baku pembuatan karbon aktif dapat berasal dari limbah pertanian yang memiliki lignoselulosa seperti tempurung kelapa (Zhu & Kolar, 2014).

Efektifitas media karbon aktif tempurung kelapa dalam mengadsorpsi ion kromium dalam limbah elektroplating dapat dipelajari melalui metode adsorpsi dan

kinetika media adsorpsi tersebut. Metode isotherm merupakan hubungan matematis atau kurva yang menggambarkan bagaimana jumlah zat yang teradsorpsi (adsorbat) pada permukaan suatu zat (adsorben) berubah seiring dengan perubahan tekanan, pada suhu yang konstan. Beberapa metode adsorpsi isotherm yang umum digunakan meliputi model Langmuir, Freundlich, Sips, BET (Brunauer-Emmett-Teller), dan Temkin.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penentuan isotherm adsorpsi persamaan Langmuir, freundlich dan Temkin. Metode preparasi, karbonisasi dan aktivasi media karbon aktif mengikuti Da Costa, 2019. Penentuan mekanisme perpindahan ion logam Cr dalam limbah elektroplating dapat digambarkan melalui ke-tiga metode isotherm yang akan digunakan, serta mekanisme perpindahan yang digambarkan pada beberapa metode isotherm yang ditetapkan.

Prosedur penentuan ini dimulai dari melakukan penentuan, pH waktu dan massa optimum berdasarkan penelitian Da Costa (2019). Variasi massa yang digunakan 1, gr, 2 gr, 3 gr, 4 gr, 5 gr. Waktu kontak optimum adalah 120 mneit dengan pH optimum adsorpsi adalah 5. Perhitungan Jumlah Ion yang teradsorpsi per gram adsorben (q_e) dengan rumus

-

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V$$

dengan q_e : jumlah ion yang teradsorpsi (mg/g), C_0 : konsentrasi awal ion (mg/L), C_e : konsentrasi kesetimbangan (mg/L), V : volume larutan (L), m : massa adsorben (g)

Isotherm Adsorpsi

Tabel 1. Model-model persamaan matematika dalam mempelajari Isotherm Adsorpsi Ion Cr (VI) menggunakan adsorben tempurung kelapa

Model Isotherm	Bentuk Linear	Plot grafik	
Langmuir (Da Costa, 2019)	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_0} + \frac{1}{bQ_0C_e}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e	(1)
Freundlich (Da Costa, 2019)	$\log q_e = \log KF + \frac{1}{n} \log C_e$	$\log q_e$ vs $\log C_e$	(2)
Temkin (Naat, 2021)	$q_e = \left(\frac{RT}{bT} \ln AT \right) + \frac{RT}{bT} \ln C_e$	q_e vs $\ln C_e$	(3)

dengan Q_0 = kapasitas adsorpsi (mg/g), C_e = konsentrasi adsorbat pada saat kesetimbangan (mg/L), b = konstanta isotherm Langmuir (dm^3/mg), q_e adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada adsorben saat kesetimbangan (mg/g), KF adalah konstanta Freundlich yang berhubungan dengan kapasitas adsorpsi (mg/g)/(mg/L), R = konstanta gas (8,314 J/mol K), T = suhu (K), bT = konstanta isotherm Temkin, AT = konstanta kesetimbangan isotherm Temkin yang berhubungan dengan energi maksimum antara adsorbat dengan adsorben (L/g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan model isotherm adsorpsi dalam penelitian ini diawali dengan menghitung jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben pada kondisi kesetimbangan, yang dinotasikan dengan q_e . Nilai q_e ini diperoleh dari data hasil analisis pendauluan (Da Costa, 2019).

Tabel 1. Hasil variasi masaa, pH dan waktu optimum untuk menentukan isotherm adsorpsi

t (jam)	Massa (g)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	V (l)
0,5	6	2,06	1,48	0,1
1	6	2,06	1,12	0,1
2	6	2,06	0,67	0,1
4	6	2,06	0,05	0,1
6	6	2,06	0,21	0,1

Berdasarkan tahapan penentuan konsentrasi Cr (IV) dalam limbah elektroplating untuk menentukan isotherm adsorpsi pada permukaan media adsorben dilakukan variasi pH, massa dan konsentrasi dari penelitian terdahulu q_e (Da Costa, 2019). Nilai q_e dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V$$

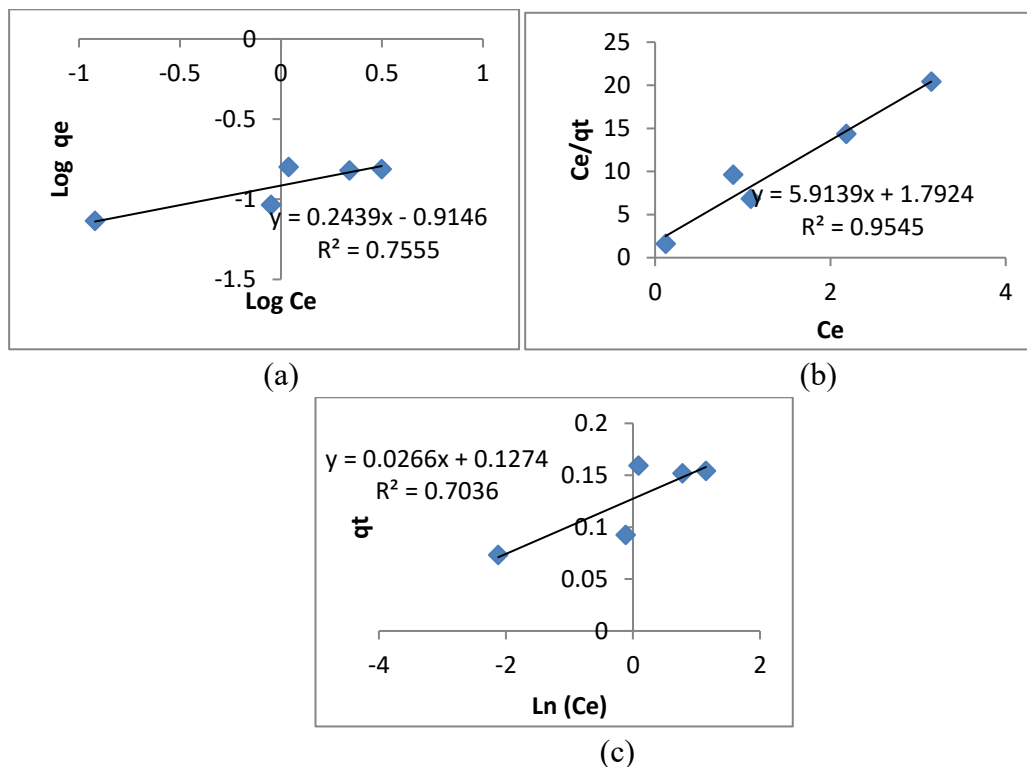
dengan C_0 merupakan konsentrasi awal adsorbat (mg/L), C_e adalah konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan (mg/l) dan V adalah volume larutan (l) dan m merupakan merupakan massa adsorben (g) dengan q_e adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g). Berdasarkan perhitungan jumlah adsorbat yang teradsorpsi diperoleh nilai q_e sebagai berikut;

Tabel 2. Hasil perhitungan nilai q_t , dan t/q_t

q_t (mg/g)	t/q_t	Persentase
0,01	51,72	28,16
0,02	63,83	45,63
0,02	86,33	67,48
0,03	119,40	97,57
0,03	194,59	89,81

Selanjutnya untuk memperoleh pemodelan isotherm adsorpsi dilakukan plotting $\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e

Untuk penentuan model isotherm langmuir, $\log q_e$ vs C_e untuk model isotherm Langmuir dan q_e vs C_e untuk model isotherm Temkin, hasil plotting ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 4. Model Isotherm Adsorpsi (a) Freundlich, (b) Langmuir, (c) Temkin

Tabel 3. Model-model isotherm adsorpsi

No	Model Isotherm Adsorpsi	Parameter	Nilai
----	-------------------------	-----------	-------

1	Langmuir	Qm	0,169 mg/g
		KL	3,28 L/mg
		R ²	0,954
2	Freundlich	N	4,09
		KF	0,122
		R ²	0,755
3	Temkin	N	5
		R ²	0,703

Berdasarkan hasil perhitungan nilai q_e yang diperoleh dari variasi waktu kontak, diperoleh bahwa jumlah adsorbat Cr(VI) yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (tempurung kelapa) meningkat seiring waktu, hingga mencapai titik optimum pada waktu kontak 4 jam. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara progresif hingga mencapai keadaan kesetimbangan. Setelah mencapai waktu 4 jam, peningkatan nilai q_e mulai melambat, menandakan bahwa sebagian besar situs aktif pada permukaan adsorben telah terisi.

Untuk menentukan jenis model isoterm adsorpsi yang paling sesuai, data eksperimental diplot ke dalam tiga model isoterm yaitu: Langmuir, Freundlich, dan Temkin.

1. Model Langmuir

Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi berlangsung pada permukaan homogen dengan lapisan monolayer dan tidak terjadi interaksi antar molekul adsorbat. Hasil plot $\frac{C_e}{q_e}$ terhadap C_e menunjukkan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,954$, yang paling tinggi dibandingkan model lain. Parameter Langmuir lainnya yaitu $Q_m = 0,169 \text{ mg/}$ (kapasitas maksimum adsorpsi) dan $K_L = 3,28 \text{ L/mg}$. Hal ini menunjukkan bahwa model Langmuir paling cocok menggambarkan proses adsorpsi ion Cr(VI) menggunakan adsorben tempurung kelapa, dan bahwa adsorpsi cenderung membentuk lapisan tunggal (monolayer) pada permukaan adsorben.

2. Model Freundlich

Model ini menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dan multilayer. Hasil plot $\log q_e$ terhadap $\log C_e$ memberikan nilai $R^2 = 0,755$, yang lebih rendah dari Langmuir. Nilai $n = 4,09$ (di atas 1) menunjukkan bahwa adsorpsi bersifat favorable, namun model ini kurang sesuai dibandingkan Langmuir karena nilai koefisien korelasi lebih rendah.

3. Model Temkin

Model Temkin mempertimbangkan interaksi antara adsorbat dan adsorben serta penurunan energi adsorpsi secara linier terhadap cakupan permukaan. Dari hasil plot diperoleh $R^2 = 0,703$, yang merupakan yang terendah dari ketiga model. Ini menandakan bahwa model Temkin kurang mampu menjelaskan karakter adsorpsi Cr(VI) oleh tempurung kelapa dalam penelitian ini.

Secara keseluruhan, nilai R^2 tertinggi ditunjukkan oleh model Langmuir, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses adsorpsi ion Cr(VI) oleh adsorben tempurung kelapa mengikuti model isotherm Langmuir, yang menggambarkan mekanisme adsorpsi monolayer pada permukaan adsorben yang bersifat homogen. Hasil ini konsisten dengan studi sebelumnya oleh Da Costa (2019) yang juga menemukan kecocokan model Langmuir pada sistem adsorpsi logam berat menggunakan bahan karbon aktif alami.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa adsorben tempurung kelapa efektif dalam menurunkan konsentrasi ion Cr(VI) dari limbah artifisial elektroplating, dengan kinerja adsorpsi yang meningkat seiring waktu kontak hingga mencapai kondisi kesetimbangan pada waktu 4 jam. Hasil perhitungan jumlah adsorbat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (q_e) menunjukkan nilai optimum pada variasi waktu dan konsentrasi tertentu, yang kemudian digunakan untuk analisis model isotherm adsorpsi. Dari ketiga model isotherm yang diuji, Langmuir, Freundlich, dan Temkin, diperoleh bahwa model isotherm Langmuir memberikan hasil yang paling sesuai dengan nilai koefisien determinasi tertinggi yaitu $R^2 = 0,954$, dibandingkan dengan model Freundlich $R^2 = 0,755$ dan Temkin $R^2 = 0,703$. Sesuai karakteristik model Langmuir, proses adsorpsi ion Cr(VI) oleh tempurung kelapa terjadi secara monolayer pada permukaan adsorben yang homogen, dengan kapasitas maksimum adsorpsi sebesar $0,169 \text{ mg/g}$. Dengan demikian, tempurung kelapa dapat dijadikan sebagai adsorben alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan untuk mengurangi pencemaran logam berat Cr(VI) dalam limbah elektroplating.

DAFTAR PUSTAKA

- Bharagava, R. N., & Mishra, S. (2018). Ecotoxicology and Environmental Safety Hexavalent chromium reduction potential of Cellulosimicrobium sp . isolated from common e ffl uent treatment plant of tannery industries. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147(May 2017), 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.040>
- Costa, M. Da. (2019). Studi Penurunan Kadar Logam Kromium (Cr) dalam Limbah

- Buatan Elektroplating Menggunakan Metode Presipitasi dan Adsorpsi. *Tesis*, 4, 47-57.
- Dwivedi, S. K. (2023). *Hexavalent chromium (Cr + 6) detoxification potential and stress response of fungus Talaromyces pinophilus isolated from tannery wastewater*. 13(September).
- Guo, T., Zhang, Y., Chen, J., & Liu, W. (2024). Case Studies in Thermal Engineering Investigation of CO₂ adsorption on nitrogen-doped activated carbon based on porous structure and surface acid-base sites. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53(December 2023), 103925. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103925>
- Leonard, J., Sivalingam, S., Venkata, R., & Mishra, S. (2023). Environmental Chemistry and Ecotoxicology Efficient removal of hexavalent chromium ions from simulated wastewater by functionalized anion exchange resin: Process optimization, isotherm and kinetic studies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5(December 2022), 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.03.001>
- Mulyadi, F., Pratama, Y., Apriyanti, L., Lingkungan, J. T., & Teknik, F. (2020). *Penyisihan Kandungan Kromium Hexavalen (Cr⁶⁺) pada Limbah Hasil Analisis COD dengan Metoda Presipitasi oleh NaOH dan Ca(OH)₂*. 4, 9–13.
- Naat, J. N. (2022). *Adsorpsi Ion Pb (II) Menggunakan Silika Berbasis Pasir Alam [Ion Pb (II) Adsorption Using Silica from Natural Sand of Takari-NTT]*. 8(3), 266–279.
- Namasivayam, C. (1993). *WASTE Fe (III)/Cr (III) HYDROXIDE AS ADSORBENT For The Removal Of Cr (VI) From Aqueous Solution AND CHROMIUM Plating INDUSTRY Wastewater* *. 82, 255–261.
- Priastomo, Y., & Rohma, H. (2020). Journal of Environmental Chemical Engineering Simultaneous removal of lead (II), chromium (III), and copper (II) heavy metal ions through an adsorption process using C-phenylcalix [4] pyrogallolarene material. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103971. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103971>
- Rai, R., Lochan, R., Paudyal, H., Kumar, S., Nath, K., Raj, M., & Raj, B. (2023). Heliyon Acid-treated pomegranate peel; An efficient biosorbent for the excision of hexavalent chromium from wastewater. *Heliyon*, 9(5), e15698. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15698>
- Sun, J., Li, M., Zhang, Z., & Guo, J. (2019). Applied Surface Science Unravelling the adsorption disparity mechanism of heavy-metal ions on the biomass-derived hierarchically porous carbon. *Applied Surface Science*, 471(December 2018), 615–620. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.050>
- Wahyulis, N. C., Ulfen, I., Kunci, K., Fe, E., Kulit, I. P., & Pendahuluan, I. (2014). *Optimasi Tegangan pada Proses Elektrokoagulasi Penurunan Kadar Kromium*

dari Filtrat Hasil Hidrolisis Limbah Padat Penyamakan Kulit. 3(2), 9–11.

Wang, H., Wang, S., Chen, Z., Zhou, X., Wang, J., & Chen, Z. (2020). Bioresource Technology Engineered biochar with anisotropic layered double hydroxide nanosheets to simultaneously and efficiently capture Pb^{2+} and CrO_4^{2-} from electroplating wastewater. *Bioresource Technology*, 306(March), 123118. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123118>

Zhu, Y., & Kolar, P. (2014). Journal of Environmental Chemical Engineering Adsorptive removal of p-cresol using coconut shell-activated char. *Biochemical Pharmacology*, 2(4), 2050–2058. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.08.022>

Zhu, Y., & Kolar, P. (2016). activated carbon. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 0, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.07.044>

Zulfi, F., Dahlan, K., & Sugita, P. (n.d.). *KARAKTERISTIK FLUKS MEMBRAN DALAM PROSES.* 10(1), 19–29.