

Studi Kinetika dan Keseimbangan Adsorpsi Kadmium dengan Nano Kristal Selulosa Terimpregnasi EDTA

Mega Mustikaningrum^{1*}, Farah Khilma Yustica¹, Naili Ulya¹,
Fadhil Muhammad Nuryanto¹, Pemta Tiadeka²

¹Program Studi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Jurusan Rekayasa Mesin dan Industri Pertanian,
Politeknik Negeri Cilacap

Jl. Dr. Sotomo No. 1, Cilacap, Jawa Tengah Indonesia

²Program Studi Farmasi, Fakultas Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Gresik

Jl. Sumatera No.101, Gresik, Jawa Timur Indonesia

Email: mega.mustikaningrum@pnc.ac.id

Abstrak

Kadmium merupakan logam berat yang berbahaya, yang dapat terakumulasi ke lingkungan, termasuk dalam air, tanah, dan sedimen yang dapat menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia karena paparannya menyebabkan masalah ginjal, kerusakan tulang, gangguan pernafasan, hingga kemungkinan kanker. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan logam tersebut yaitu dengan metode adsorpsi menggunakan nano kristal selulosa (NCC) terimpregnasi EDTA. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas NCC-EDTA dalam mengadsorpsi ion kadmium (Cd^{2+}) serta mengidentifikasi model kinetika dan isoterm yang paling mempresentasikan proses adsorpsi. Metode batch digunakan dengan konsentrasi awal Cd^{2+} sebesar 1 mg/L, kemudian data dianalisis menggunakan beberapa model kinetika dan isoterm. Hasil menunjukkan bahwa model isoterm Elovich merupakan model kinetika paling sesuai dengan nilai K sebesar 15,5069 mg/m.min, sedangkan model isoterm Jovanovic dipilih untuk menggambarkan fenomena keseimbangan dengan nilai K sebesar 3,9601 L/mg. Adsorben NCC-EDTA mampu menurunkan kadar kadmium hingga 74% dari 1 mg/L menjadi 0,26 mg/L. Dengan demikian, NCC terimpregnasi EDTA terbukti efektif sebagai adsorben ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam kadmium.

Kata kunci : Adsorpsi, Kadmium, Nano Kristal Selulosa, Kinetika, Isoterm

Abstract

Study of kinetics and Equilibrium of morption with EDTA-Impregnated Cellulose Nanocrystals

Cadmium is a hazardous heavy metal that can accumulate in the environment, including air, soil, and sediment, which can poses a risk to human health because exposure can cause kidney problems, bone damage, respiratory disorders, and even possible cancer. One method that can be used to remove these logans is the adsorption method using nano crystalline cellulose (NCC) impregnated with EDTA. This research was conducted to evaluate the effectiveness of NCC-EDTA in adsorbing cadmium ions (Cd^{2+}) and to identify the kinetic and isotherm models that best represent the adsorption process. The batch method was used with an initial Cd^{2+} concentration of 1 mg/L, then the data was analyzed using several kinetic and isotherm models. The results showed that the Elovich isotherm model was the most appropriate kinetic model with a K value of 15.5069 mg/m.min, while the Jovanovic isotherm model was chosen to describe the equilibrium phenomenon with a K value of 3.9601 L/mg. The NCC-EDTA adsorbent was able to reduce cadmium levels by up to 74% from 1 mg/L to 0.26 mg/L. Thus, EDTA-impregnated NCC has proven to be an effective, environmentally friendly adsorbent for processing liquid waste containing cadmium.

Keywords: Adsorption, Cadmium, Cellulose Nanocrystals, Kinetics, Isotherm

*Correponding author

DOI : 10.14710/metana.v21i2.78700

Diterima: 21-10-2025

Disetujui: 16-12-2025

PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) merupakan salah satu elemen paling berbahaya bagi manusia, banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri, seperti produksi paduan logam, pengolahan logam, pelapisan dengan listrik, pewarna, plastik, dan baterai (Rasin, *et al.*, 2025). Ion Cd^{2+} dapat memasuki tubuh manusia melalui makanan dan terakumulasi di berbagai jaringan, yang bisa memicu penyakit berat serta mengancam kesehatan dan keselamatan hidup manusia (Qu & Zheng, 2024). Sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA), dan Aliansi Kesehatan Masyarakat Eropa (EPHA), tingkat maksimum pencemaran Cd^{2+} dalam air untuk konsumsi tidak boleh lebih dari 0,003 mg L⁻¹ (Siegel, 2002). Kadmium (Cd), bersama dengan merkuri (Hg) dan timbal (Pb), termasuk dalam kategori tiga logam berat paling berbahaya bagi lingkungan. Logam berat ini tidak dapat terurai secara alami, dan penumpukannya dalam rantai makanan dapat menimbulkan masalah kesehatan serius atau bahkan berujung pada kematian (Angon, *et al.*, 2024). Lymburner, pada tahun 1974, menyatakan bahwa pemanfaatan produk kadmium mengalami peningkatan sebesar 5–10% setiap tahun, dan potensi penyebarannya masih sangat tinggi (Lymburner, 1974). Mengingat tingkat toksisitas yang sangat tinggi serta dampak negatifnya terhadap lingkungan, sangat penting untuk menemukan cara yang tepat untuk menghapus kadmium dari limbah industri.

Saat ini, teknologi utama untuk menghilangkan Cd^{2+} mencakup presipitasi kimia (Ekubatsion, *et al.*, 2021), filtrasi membran (Cheng, *et al.*, 2023) (Zhao, *et al.*, 2019), adsorpsi (Mendizábal, *et al.*, 2024), pertukaran ion (Naili & Almabrok, 2024), elektrodialisis, (Saib, *et al.*, 2019) dan metode biologis (Wang, *et al.*, 2024). Di antara semua metode ini, adsorpsi terbukti menjadi cara yang efisien dan hemat biaya untuk menghapus Cd^{2+} dari sumber air karena kesederhanaannya, kemudahan dalam pengoperasian, biaya yang rendah, serta kemampuan adsorpsinya yang sangat baik (Yin Pang, *et al.*, 2022). Metode adsorpsi umumnya digunakan untuk menghilangkan logam berat melalui proses adsorpsi di mana interaksi fisikokimia melakukan adsorpsi ion logam berat

dengan struktur internal yang berpori dan area aktif pada permukaan bahan penyerap (Graduate, *et al.*, 2025). Beberapa bahan penyerap dapat diregenerasi dan didaur ulang melalui proses desorpsi yang tepat. Setelah bertahun-tahun melakukan penelitian, para ilmuwan telah menciptakan berbagai jenis bahan penyerap yang memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi untuk logam berat. Namun, penerapan praktis sebagian besar bahan penyerap masih sangat terbatas akibat faktor biaya. Oleh karena itu, pengembangan penyerap logam berat yang terjangkau dan efektif tetap menjadi fokus utama dalam penelitian terkait pengolahan limbah cair. Pemilihan jenis adsorben yang tetap menjadi faktor utama dalam keefektifan penyerapan logam kadmium.

Adsorben berbasis nano kristal selulosa akhir-akhir ini semakin populer, nano kristal selulosa memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, sifat mekanik yang sangat baik, dan biokompatibilitas yang baik, membuatnya sangat cocok untuk perakitan adsorben ion logam berat (Si, *et al.*, 2022). Adsorben yang menggunakan selulosa telah dijelaskan untuk berbagai macam aplikasi. Telah dilaporkan bahwa sifat adsorpsi nano kristal selulosa untuk ion logam berat lebih unggul daripada selulosa makro dan mikrofibril.

Namun, dikarenakan nano kristal selulosa mengalami tantangan terkait hidrofilitas alami serta kemampuan adsorpsi ion logam berat yang kurang efektif, memungkinkan untuk secara langsung atau tidak langsung menambahkan kelompok fungsi penting ke dalam nano kristal selulosa atau menyusun struktur yang optimal demi meningkatkan kemampuan adsorpsi ion logam berat pada adsorben yang berbasis nano kristal selulosa. Untuk meningkatkan titik pengikatan nano kristal selulosa bagi ion logam berat, diperlukan penambahan beberapa kelompok fungsi utama ke dalam nano kristal selulosa. Selain dari fungsionalisasi nano kristal selulosa, cara untuk menyusun adsorben berbasis nanoselulosa sangat penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi maksimum ion logam berat. Modifikasi permukaan selulosa bisa dilakukan dengan menggunakan impregnasi asam etilendiamintetraasetat (EDTA), yang dapat membentuk kompleks bermuatan negatif yang kuat dengan kation logam divalen dalam larutan berkat dua amina dan empat gugus karboksilat

yang dimilikinya. Kegiatan ini sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Tiadeka, *et al.*, 2025), sedangkan fokus penulisan paper ini adalah untuk melakukan tinjauan secara kinetika dan isoterm untuk menemukan parameter terkait konstanta kecepatan adsorpsi dan kesetimbangan. Penelitian ini menghadirkan kebaharuan melalui pengkajian terintegrasi antara parameter kinetika dan termodinamika untuk mengungkap mekanisme adsorpsi secara lebih komprehensif.

METODOLOGI

PROSES ADSORPSI

Percobaan adsorpsi batch dilakukan menggunakan 0,04 g adsorben dalam 1 L larutan Cd dengan konsentrasi awal 1 mg/L. Suspensi diaduk dengan kecepatan 200 rpm.

Studi Kinetika Dan Isoterm

Studi tentang laju dan mekanisme adsorpsi bertujuan untuk mengetahui bagaimana proses adsorpsi bekerja dan seberapa cepat terjadi, memperkirakan durasi yang diperlukan untuk mencapai keadaan seimbang, serta mendapatkan parameter penting yang diperlukan untuk merancang dan memperbaiki sistem adsorpsi di

dunia industri. Rumus yang digunakan tercantum dalam Tabel 1.

Sedangkan, studi isoterm adsorpsi adalah untuk menentukan kapasitas adsorpsi maksimum adsorben dan menganalisis mekanisme serta karakteristik proses adsorpsi seperti kesetimbangan dan jenis interaksi antara adsorbat dan adsorben. Persamaan yang digunakan pada studi isoterm (kesetimbangan), dapat dilihat pada Tabel 2.

Persamaan yang digunakan dalam mencari nilai kapasitas adsorpsi adalah

$$q = \frac{C_o - C_a}{m} V$$

Dimana, q merupakan kapasitas adsorpsi (mg/g), C_o merupakan konsentrasi kadmium mula mula dalam larutan (mg/liter), C_a adalah konsentrasi kadmium pada akhir adsorpsi (mg/liter), m merupakan massa adsorben (gram) dan V merupakan volume larutan (Liter). Untuk nilai persen removal, persamaan yang digunakan adalah

$$\% \text{ Removal} = \frac{C_o - C_a}{C_o} \times 100 \%$$

Tabel 1. Persamaan – Persamaan Studi Kinetika (Omokpariola, 2021)

Model Kinetika	Persamaan	Bentuk Linier	Ploting
Pseudo Second Order	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	$\frac{t}{q_t}$ vs t
Weber -Morris (Intra Particle Diffusion)		$q_t = k_{ip} t^{\frac{1}{2}} + C_i$	q_t vs $t^{\frac{1}{2}}$
Elovich	$\frac{dq_t}{dt} = \alpha \exp^{-\alpha q_t}$	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln \alpha \beta + \frac{1}{\beta} \ln t$	q_t vs $\ln t$
Bangham		$\log \log \left(\frac{C_o}{C_o - q_t M} \right) = \log \left(\frac{K_o}{2.303 V} \right) + \alpha \log t$	$\log \log \left(\frac{C_o}{C_o - q_t M} \right)$ vs t

Dimana, q_t dan q_e adalah jumlah kadmium yang teradsorpsi (mg/g) pada waktu t dan saat setimbang, t adalah waktu (menit), k_2 adalah nilai konstanta laju adsorpsi pada pseudo second order (g/mg.menit), k_{ip} adalah konstanta laju intra partikel (mg/g.menit^{1/2}), C_i merupakan intersep dari persamaan, α merupakan laju adsorpsi mula-mula (mg/g.menit), β adalah luas cakupan permukaan adsorpsi (g/mg), M adalah massa adsorben (g), V merupakan volume total larutan (mL), K_o dan α adalah konstanta.

Tabel 2. Persamaan- Persamaan Studi Isoterm (Omokpariola, 2021)

Model Isoterm	Persamaan	Bentuk Linier	Ploting
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}}$	$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$	$\log q_e$ vs $\log C_e$
Temkin	$q_e = \frac{\beta}{b} \ln(K_T C_e)$ $\beta = \frac{RT}{b}$	$q_e = \left(\frac{RT}{b}\right) \ln K_T + \left(\frac{RT}{b}\right) \ln C_e$	q_e vs $\ln C_e$
Jovanovic	$q_e = q_m \exp(K_J C_e)$	$\ln q_e = \ln q_m - K_J C_e$	$\ln q_e$ vs $\ln C_e$

Dimana q_e merupakan jumlah adsorbat yang teradsorpsi saat mencapai kesetimbangan (mg/g), C_e merupakan konsentrasi adsorpsi saat setimbang (mg/liter), q_m adalah kapasitas adsorpsi maksimum, K_F merupakan konstanta kesetimbangan Freundlich (L/mg), $1/n$ merupakan nilai kapasitas adsorpsi, K_T merupakan konstanta Temkin (L/g), β merupakan konstanta terkait dengan panas adsorpsi, b merupakan konstanta kesetimbangan Temkin terkait dengan panas adsorpsi (J/mol), R adalah konstanta gas ideal (8.314 J/mol.K), K_J adalah konstanta jovanovic.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengambilan Data Adsorpsi

Proses adsorpsi kadmium berlangsung selama 60 menit dengan konsentrasi mula mula dari kadmium sebesar 1 mg/liter, dengan hasil perolehan data adsorpsi dilihat pada Gambar 1. Gambar 1 menggambarkan penurunan konsentrasi logam selama proses adsorpsi. Penurunan ini secara signifikan terjadi dari menit pertama hingga menit ke-60. Pada awalnya, konsentrasi logam tercatat sebesar 1 ppm, sedangkan konsentrasi akhir yang terukur dalam larutan uji adalah 0,26 mg/l. Proses ini melibatkan interaksi antara permukaan adsorben dan ion logam.

Pada tahap awal konsentrasi logam di dalam larutan masih tinggi, yang menyebabkan gaya dorongnya besar. Di fase awal proses adsorpsi, terdapat banyak situs aktif pada adsorben, sehingga pengikatan kadmium pada permukaan adsorben dapat terjadi secara maksimal. Antara menit ke 20 hingga 60, jumlah situs aktif pada adsorben mulai menurun, yang menyebabkan gradien konsentrasi antara larutan dan adsorben semakin berkurang serta laju ekstraksi menjadi lebih lambat (Mustikaningrum, *et al.*, 2021). Proses adsorpsi ini akan selesai ketika mencapai keadaan seimbang di mana persentase penghilangan cenderung stabil. Persentase penghilangan pada setiap waktu disajikan dalam Gambar 2.

Hasil persentase penghilangan dalam studi adsorpsi kadmium menggunakan nano kristal

selulosa yang terimpregnasi mencapai 74%. Keberhasilan NCC-EDTA dalam menyerap logam kadmium disebabkan oleh keberadaan gugus aktif yang terdeteksi. Gugus aktif yang berkontribusi antara lain adalah gugus karboksilat (-COOH) dan amina (-NH₂) yang berasal dari EDTA, bersama dengan gugus hidroksil (-OH) yang terdapat pada nano kristal selulosa.

Gugus hidroksida yang terdapat pada selulosa mendukung proses pengikatan kadmium melalui gaya elektrostatis, yaitu interaksi antara OH⁻ dan Cd²⁺. Selain itu, fungsi gugus ini berperan dalam pengikatan EDTA pada NCC. Di sisi lain, gugus karboksilat (-COOH) yang terdeprotonasi menjadi -COO⁻ pada pH basa dapat membentuk ikatan dengan logam Cd²⁺. Demikian pula, interaksi antara elektron bebas pada nitrogen dan kadmium dapat menstabilkan kompleks EDTA-Cd.

Studi Kinetika Proses Adsorpsi

Studi kinetika pada proses adsorpsi bertujuan untuk mengetahui kecepatan dan cara kerja dari proses tersebut, menetapkan durasi yang diperlukan untuk mendapatkan keadaan seimbang, serta memperkirakan efektivitas adsorben. Hasil dari parameter studi kinetika berdasarkan berbagai model disajikan dalam Tabel 3.

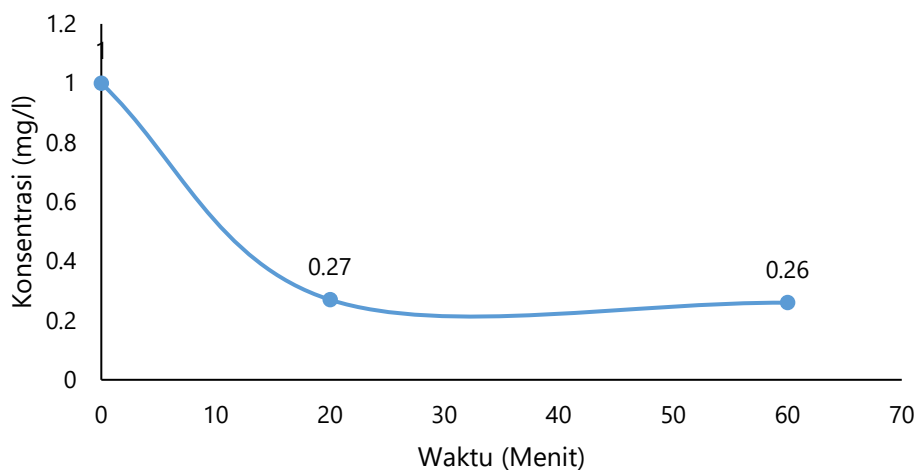
Nilai koefisien determinasi (R^2) adalah parameter statistik yang menunjukkan seberapa besar variasi data eksperimen yang dapat dijelaskan oleh suatu model matematis. Untuk nilai R^2 mendekati 1, model menjelaskan data dengan

sempurna dan dianggap mampu mengintrepetasikan fenomena yang terjadi. Nilai yang dianggap mampu menggambarkan fenomena tersebut dapat dilihat dengan nilai R^2 yang lebih besar. Meskipun nilai R^2 menunjukkan tingkat korelasi yang tinggi, kecocokan model tidak hanya ditentukan oleh parameter tersebut, tetapi juga ditunjukkan melalui kesesuaian mekanisme asuntif model, distribusi residual yang acak, serta parameter hasil pemodelan yang memiliki makna fisik dan kimia yang realistis

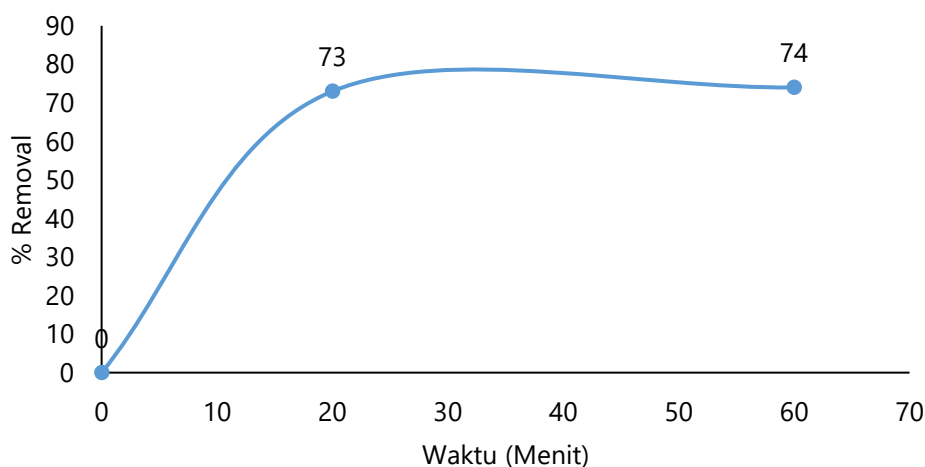
Pada hasil kinetika adsorpsi yang diuji pada berbagai model, terlihat bahwa model Elovic adalah yang paling sesuai untuk mendeskripsikan keseluruhan proses adsorpsi. Kesimpulan ini didapat dari nilai regresi optimal yang diperoleh pada model Elovic. Menurut model Elovic, nilai

konstanta kecepatan adsorpsi tercatat sebesar 15,5069 mg/m. min.

Model Elovich menjelaskan kemisorpsi pada permukaan yang tidak seragam, yang menunjukkan bahwa laju penyerapan berkurang secara eksponensial seiring bertambahnya jumlah bahan yang diserap seiring waktu (Gopalakrishnan, *et al.*, 2024). Beberapa interpretasi penting meliputi: model ini relevan untuk reaksi yang melibatkan penyerapan secara kimia, di mana konstanta a (laju awal) dan b (konstanta desorpsi/aktivasi) memberikan pemahaman mengenai proses tersebut, serta koefisien korelasi yang tinggi (nilai R^2) ketika data eksperimen disesuaikan dengan persamaan Elovich menunjukkan bahwa kemisorpsi adalah mekanisme utama.



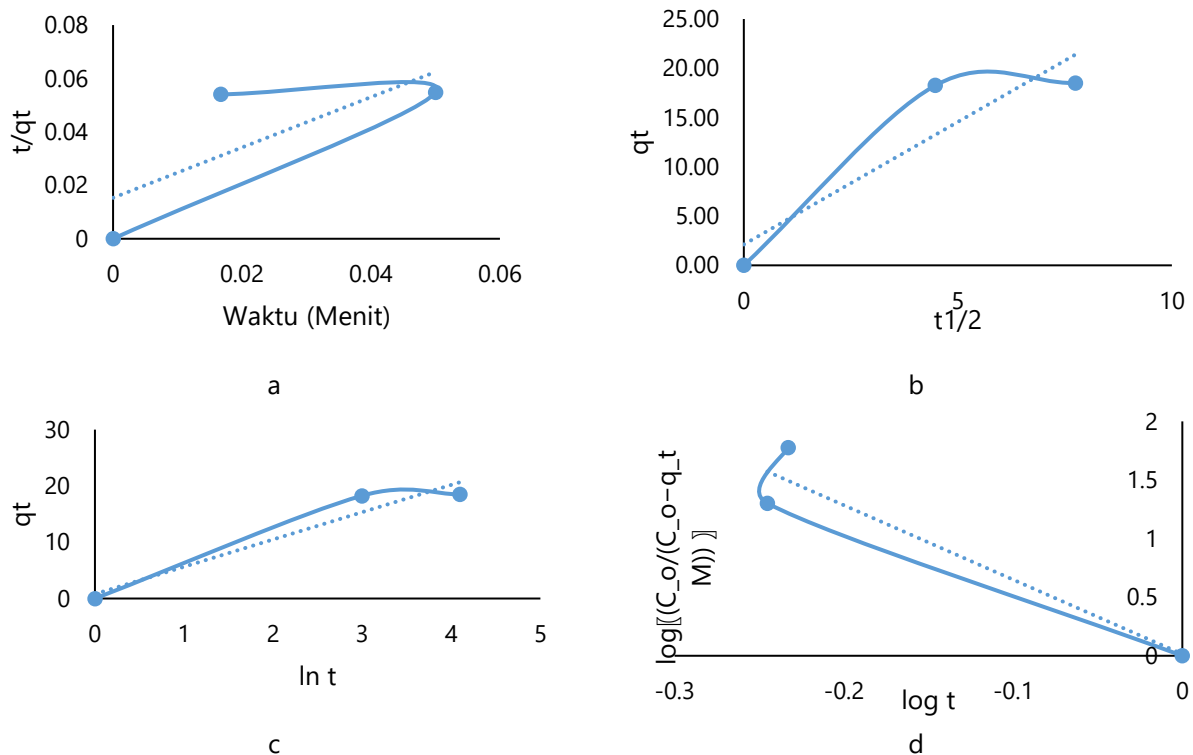
Gambar 1. Penurunan Kadar Kadmium



Gambar 2. Kenaikan Persen Removal Setiap Waktu

Tabel 3. Hasil Parameter Kinetika

Model	Persamaan	Parameter	Regresi (R^2)
Pseudo Second Order	$Y = 0,9425 X + 0,0153$	k : 0,8883 mg/g.min	0,5831
Weber Morris	$Y = 2,4883 X + 2,1158$	k : 2,4883 mg/g.min ^{1/2}	0,8317
Elovich	$Y = 4,8503 X + 0,7869$	Beta : 4,8503 Alfa : 15,5069 mg/m.min	0,9386
Bangham	$Y = -6,3519 X + 0,0143$	Alfa : -2,2261 K : 2380,09	0,9087

**Gambar 3.** Model Kinetika (a) Pseudo Second Order, (b) Webber-Moris, (c) Elovich, (d) Bangham

Model Elovich dianggap sebagai model yang cocok untuk fenomena penyerapan kadmium dengan menggunakan NCC-EDTA, karena jenis ikatan yang terlibat adalah logam atau ion. Nilai alfa yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa proses awal penyerapan terjadi dengan cepat, yang ditunjukkan oleh perbedaan konsentrasi yang signifikan. Nilai beta yang tinggi juga menunjukkan bahwa ada hubungan antara situs aktif yang cepat mencapai jenuh.

Studi Kesetimbangan (Isoterm) Proses Adsorpsi

Fungsi utama dari penelitian isoterm adsorpsi adalah untuk mengetahui seberapa besar

kapasitas adsorpsi, meramalkan cara kerja proses penyerapan substansi pada adsorben, serta memahami karakteristik permukaan dan ketertarikan adsorben terhadap zat yang terlarut. Hasil dari parameter penelitian kinetika dalam berbagai model dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil regresi yang diperoleh dari persamaan yang diuji, terlihat bahwa model Jovanovic memiliki nilai regresi tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa dalam kondisi ini, model Jovanovic berhasil menginterpretasikan fenomena yang terjadi. Isoterm Jovanović, yang dinyatakan dengan $Q=Q_m(1-\exp(-KC))$, menggambarkan proses adsorpsi monolapis pada permukaan yang

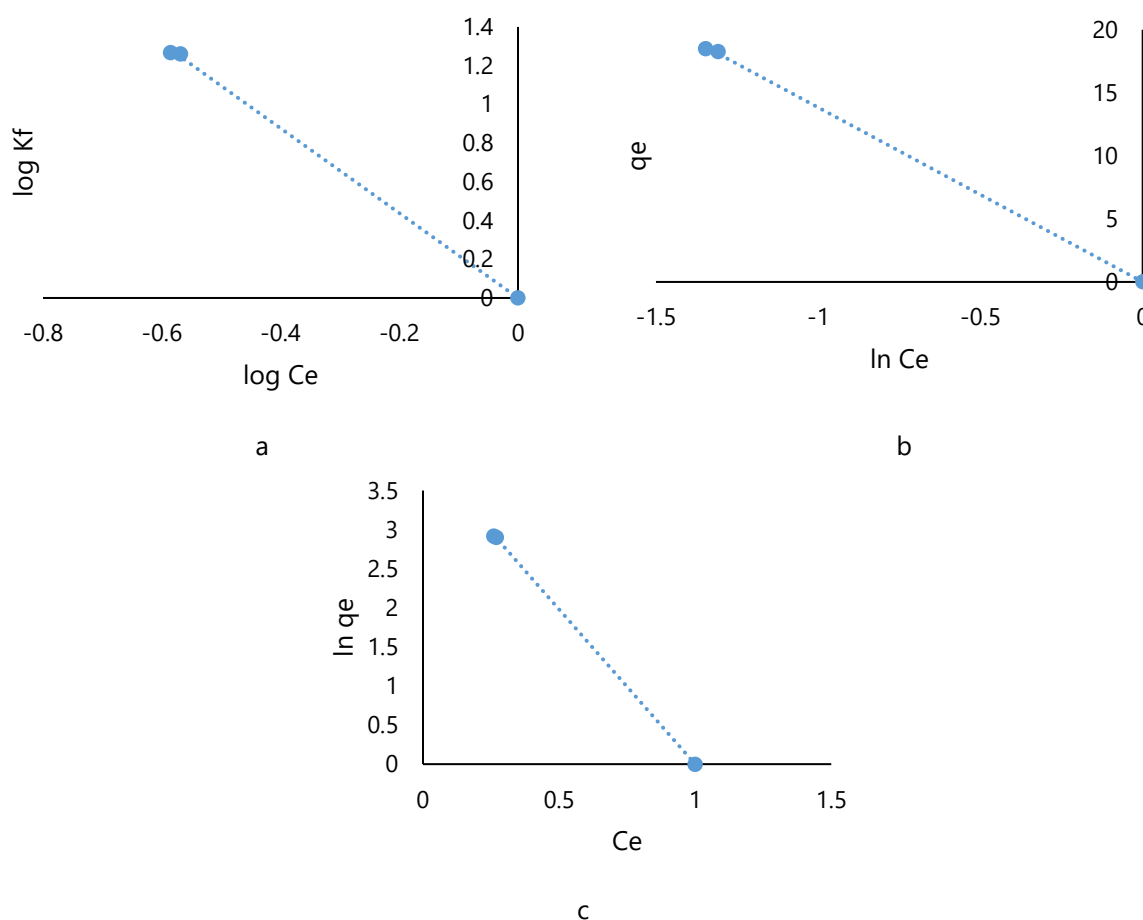
seragam, di mana molekul-molekul adsorbat awalnya terpisah dan tidak saling berinteraksi dengan molekul di sekitarnya. Di sini, Q_m menunjukkan kapasitas maksimum adsorpsi dan K adalah konstanta yang berkaitan dengan energi serta durasi proses adsorpsi. Interpretasinya berorientasi pada pendekatan eksponensial terhadap kapasitas maksimum, yang menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya konsentrasi kesetimbangan (C), jumlah yang teradsorpsi (Q) meningkat cepat pada awalnya dan kemudian melambat saat mendekati batas maksimum Q_m . Tanpa Interaksi Lateral: Isoterm ini juga berasumsi

bahwa molekul-molekul adsorbat saling terpisah dan tidak berinteraksi satu sama lain, suatu keadaan yang lebih mencerminkan pada konsentrasi yang cukup rendah.

Berdasarkan nilai konstanta kesetimbangan yang didapatkan sebesar 3,9691 L/mg, nilai ini merujuk terhadap afinitas antara kadmium dengan NCC-EDTA. Nilai konstanta ini masih dirasa memungkinkan adanya fase balik dari kadmium yang terinteraksi dengan gugus aktif. Untuk meningkatkan afinitas adsorpsi ini dapat dilakukan dengan modifikasi gugus aktif dari NCC-EDTA dan mengkondisikan pH pada keadaan basa sehingga

Tabel 4. Hasil Parameter Isoterm

Model	Persamaan	Parameter	Regresi (R^2)
Freudlich	$Y = -2,1905 X + 0,0004$	$K_f: 0,00644 \text{ L/mg}$	0,9996
Temkin	$Y = -13,83 X + 0,0039$	$K_T: 0,9997 \text{ L/g}$	0,9998
Jovanovic	$Y = -3,9601 X + 3,9603$	$K_j: 3,9601 \text{ L/mg}$	0,9999



Gambar 4. Model Isoterm (a) Freundlich, (b) Temkin, (c) Jovanovic

mampu mempermudah protonasi dari gugus karboksilat.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran fenomena adsorpsi logam kadmium berbantuan adsorben nano kristal selulosa terimpregnasi EDTA dengan menggunakan studi kinetika dan termodinamika. Berdasarkan studi kinetika didapatkan bahwa Model Elovich merupakan model yang sesuai untuk menggambarkan keseluruhan proses adsorpsi, dimana didapatkan nilai parameter konstanta penjerapan sebesar 15,5069 mg/m.min, dengan nilai regresi didapatkan 0,9386. Model Elovich mengintrepetasikan bahwa interaksi antara adsorben dengan logam berorientasi pada jenis ikatan kimia. Untuk mendukung bagaimana kekuatan interaksi ikatan antara adsorben dengan adsorbat, diketahui bahwa model jovanovic merupakan jenis model yang sesuai. Besaran konstanta kesetimbangan yang didapatkan sebesar $K_j : 3,9601 \text{ L/mg}$, dengan besaran regresi bernilai 0,9999.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis berikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Vokasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini. Tidak lupa kami mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Gresik guna memberikan sarana untuk berjalannya proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Angon, P.B., Khan, M.A., Islam, M.S., Hossain, M.S., Rahman, M.M., Ahmed, S., Islam, M.K., Rahman, M.S., & Islam, M.R. 2024. Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7): e28357. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28357
- Cheng, R., Li, J., Wang, J., Zhang, Y., Wang, X., & Wang, S. 2023. Deeply removal of trace Cd^{2+} from water by bacterial cellulose membrane loaded with nanoscale zerovalent iron: Practical application and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 468: 143668. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143668
- Ekubatsion, L.H., Thriveni, T., & Ahn, J.W. 2021. Removal of Cd^{2+} and Pb^{2+} from Wastewater through Sequent Addition of KR-Slag, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Derived from Eggshells and CO_2 Gas. *ACS Omega*, 6(40): 27600–27609. DOI: 10.1021/acsomega.1c00946
- Gopalakrishnan, A., Asare, S., Adu-Boahene, F., & Schäfer, A.I. 2024. Uranium adsorption by iron modified zeolite and zeolite composite membranes. *Chemosphere*, 368: 143711. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143711
- Graduate, X.M., Graduate, Y.L., & Doctorate, S.L. 2025. Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 324: 101399. DOI: 10.1016/j.dwt. 2025.101399
- Lymburner, D. 1974. The production, use and distribution of cadmium in Canada. Canada: Inland Wat Directorate Canada Centre Inland Wat.
- Mendizábal, E., González, F., Rodríguez, R., & Tapia, F. 2024. Use of Chitosan–Iron Oxide Gels for the Removal of Cd^{2+} Ions from Aqueous Solutions. *Gels*, 10(10): 630. DOI: 10.3390/gels 10100630
- Mustikaningrum, M., Cahyono, R.B., & Yuliansyah, A.T. 2021. Adsorption of methylene blue on nano-crystal cellulose of oil palm trunk: Kinetic and thermodynamic studies. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(3): 953–964. DOI: 10.22146/ijc.72156
- Naili, E.E., & Almabrok, S.H. 2024. Cadmium ion (Cd^{2+}) removal from produced water using ion technique: Amberlite IR120H and modified amberlite IRA-400 Cl^- resins. *International Journal of Science and Research Archieve*, 12(1): 1331–1338.
- Omokpariola, D.O. 2021. Experimental Modelling Studies on the removal of crystal violet, methylene blue and malachite green dyes using Theobroma cacao (Cocoa Pod Powder). *Journal of Chemistry Letters*, 2(1): 9–24. DOI: 10.22034/jchemlett.2021.272842. 1020
- Qu, F., & Zheng, W. 2024. Cadmium Exposure: Mechanisms and Pathways of Toxicity and

- Implications for Human Health. *Toxics*, 12(6): 388. DOI: 10.3390/toxics12060388
- Rasin, P., Kumar, A., Singh, V., & Kumar, P. 2025. Exposure to cadmium and its impacts on human health: A short review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17: 100608. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100608
- Saib, F., Arous, O., Mazari, A., & Trari, M. 2019. Photo-Electrodialysis Combination System for Cd Removal Using Polymeric. *Macromolecular Symposia*, 386(1): 1800245.
- Siegel, F. 2002. Contaminant/natural background values: timing and processes. In *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*, 77–101. DOI: 10.1007/978-3-662-04739-2_5
- Si, R., Guo, Y., Wang, J., Zhang, Y., & Li, J. 2022. Nanocellulose-Based Adsorbents for Heavy Metal Ion. *Polymers*, 14(24): 5479. DOI: 10.3390/polym14245479
- Tiadeka, P., Mustikaningrum, M., Cahyono, R.B., & Yuliansyah, A.T. 2025. Fabrication of Nanocellulose-EDTA Composite from Oil Palm Trunks for Cadmium Removal from Aqueous Solutions. *Menara Perkebunan*, 93(1): 68–73. DOI: 10.22302/iribb.jur.mp.v93i1.615
- Wang, J., Zhang, Y., Li, H., Chen, S., & Wang, X. 2024. Enhanced removal of Cd²⁺ from water by a bacterioferritin from *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* within engineering bacteria. *Chemical Engineering Journal*, 484: 149699. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149699
- Yin Pang, C.Z., Liu, Y., Li, Y., & Wang, J. 2022. Adsorption performance and mechanism of Cd(II) from aqueous solution using red mud modified with amorphous MnO₂. *Scientific Reports*, 12: 4424. DOI: 10.1038/s41598-022-08451-2
- Zhao, Y., Li, J., Wang, J., Zhang, Y., & Wang, X. 2019. Removal of Dyes and Cd²⁺ in Water by Kaolin/Calcium Alginate Filtration Membrane. *Coatings*, 9(4): 218. DOI: 10.3390/coatings9040218