VENN: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences
ISSN: 2964-867X
Journal Homepage: https://pustaka.my.id/journals/venn/index

Studi Adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) Menggunakan Komposit Selulosa Tongkol Jagung Teroksidasi TEMPO/PANI–GO

Hasri[1], Rini Perdana[2], Ahmad Fudhail[3]

[1,2,3] Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia
hasriu@unm.ac.id[1], rini.perdana@unm.ac.id[2], ahmad.fudahail@unm.ac.id[3]

Corresponding Author: Rini Perdana, E-mail: rini.perdana@unm.ac.id

Article Information
Received : 20 November 2026
Reviced : 23 November 2026
Accepted : 26 November 2026
Published : 26 November 2026

ABSTRACT
Timbal [Pb(II)] dan kadmium [Cd(II)] di lingkungan perairan memerlukan strategi pengikatan yang efektif dengan bahan berbasis biomassa. Penelitian ini mengevaluasi adsorpsi kedua ion menggunakan komposit selulosa tongkol jagung teroksidasi TEMPO/polianilin–grafena oksida (CNF/PANI–GO). Material dipreparasi melalui delignifikasi, bleaching, oksidasi dan fibrilasi, kemudian dimodifikasi PANI dan GO pada rasio massa 1:1 dengan penambahan nominal total 20% terhadap selulosa. Karakterisasi dilakukan menggunakan FTIR, XRD dan SEM; pengujian batch menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi ion sisa. Pada pH 6 dan konsentrasi awal 50 mg/L, kapasitas adsorpsi mencapai 40,2 mg/g untuk Pb(II) dan 32,4 mg/g untuk Cd(II), setara penyisihan 80,4% dan 64,8%. Profil waktu mendekati plateau sekitar 90–120 menit, dengan kesesuaian lebih tinggi pada model pseudo-second-order daripada pseudo-first-order. Isoterm Langmuir memberikan estimasi q_{max} 86,17 mg/g untuk Pb(II) dan 82,71 mg/g untuk Cd(II). Perubahan karakteristik spektral dan ketergantungan terhadap pH konsisten dengan kemungkinan interaksi gugus beroksigen dan nitrogen, tanpa membuktikan mekanisme koordinasi tertentu. Kondisi pH 6 dan waktu kontak 120 menit direkomendasikan untuk sistem uji ini; penerapan air nyata memerlukan verifikasi tambahan

KEYWORDS
Tongkol jagung, selulosa TEMPO, PANI–GO, Pb(II), Cd(II)

ARTICLE DOI:
https://doi.org/10.53696/venn.v5i6.703

How to Cite: Perdana, R., Hasri, H., & Fudhail, A. (2026). Studi Adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) Menggunakan Komposit Selulosa Tongkol Jagung Teroksidasi TEMPO/PANI–GO. Venn: Journal of Sustainable Innovation on Education, Mathematics and Natural Sciences, 5(6), 1391–1402. https://doi.org/10.53696/venn.v5i6.703

A. Pendahuluan

Kontaminasi timbal [Pb(II)] dan kadmium [Cd(II)] pada sumber air masih menjadi tantangan lingkungan. Dalam kajian DAS Citarum Hulu, rata-rata konsentrasi Pb dan Cd pada sampel air tanah masing-masing dilaporkan sebesar 0,046 dan 0,004 mg/L (Astuti et al., 2024). Sebagai pembanding konteks kesehatan, pedoman WHO menetapkan nilai acuan air minum 0,010 mg/L untuk Pb dan 0,003 mg/L untuk Cd (World Health Organization, 2026); nilai tersebut bukan baku mutu khusus air limbah ataupun konsentrasi air pada percobaan ini. Kondisi tersebut menegaskan kebutuhan material pengikat logam terlarut yang berasal dari bahan terbarukan. Adsorpsi merupakan salah satu pendekatan yang banyak dikaji karena kondisi operasinya fleksibel dan sifat permukaan adsorben dapat direkayasa (Ismail et al., 2024; Bhattacharyya et al., 2024).

Tongkol jagung adalah residu lignoselulosa yang dapat dimanfaatkan sebagai prekursor selulosa. Pemurnian dan fibrilasi mengubah morfologi serta aksesibilitas gugus permukaan, sedangkan modifikasi kimia memperluas kemungkinan interaksi dengan ion logam (Si et al., 2022;

Copyright: © 2026 the Author(s). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Jiang et al., 2023). Isolasi selulosa dari tongkol jagung melalui perlakuan kimia dan mekanis telah dilaporkan (Rajanna et al., 2022; Sartika et al., 2023). Oksidasi yang dimediasi sistem TEMPO pada posisi C6 gugus hidroksil primer selulosa dapat memperkenalkan karboksil/karboksilat dan membantu fibrilasi, tetapi besar muatan permukaan dan dimensi fibril tetap memerlukan pembuktian tersendiri (Isogai et al., 2011; Saito & Isogai, 2005).

Polianilin (PANI) mempunyai lingkungan nitrogen amina dan imina yang dipengaruhi keadaan protonasi, sedangkan grafena oksida (GO) menyediakan gugus hidroksil, epoksi, karbonil dan karboksil (Samadi et al., 2021; Khine et al., 2022). Komposit berbasis PANI/GO telah dikaji untuk pemurnian air (Elessawy et al., 2022; Uysal et al., 2025); sistem karboksimetilselulosa–GO juga pernah digunakan untuk mengurangi Pb(II) dan Cd(II) (Shakil et al., 2024). Penelitian pada selulosa teroksidasi dan biohibrida selulosa–GO menunjukkan relevansinya bagi pengikatan ion logam (Yu et al., 2021; Zhu et al., 2017). Sementara itu, Li et al. (2020) telah meneliti arsitektur selulosa/GO/PANI untuk elektroda superkapasitor, tetapi bukan adsorpsi dua ion pada matriks tongkol jagung teroksidasi.

Research gap penelitian ini terletak pada keterbatasan informasi yang secara khusus mengaitkan hasil preparasi selulosa tongkol jagung teroksidasi TEMPO/PANI–GO dengan respons adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) pada variasi pH, waktu kontak dan konsentrasi awal. Literatur yang dibahas menunjukkan bahwa keberadaan komponen CNF, PANI dan GO secara bersamaan tidak dengan sendirinya membuktikan sinergi atau mekanisme dominan. Pengaruh protonasi, spesiasi logam, perpindahan massa dan kemungkinan presipitasi perlu dibedakan dalam interpretasi data. Demikian pula, kecocokan kinetika PSO atau isoterm Langmuir merupakan pendekatan matematis dan tidak cukup sebagai bukti tunggal *chemisorption* maupun permukaan homogen (Vareda, 2023).

Penelitian ini bertujuan (i) mendeskripsikan perubahan gugus fungsi, pola difraksi dan morfologi selama isolasi serta pembentukan komposit; (ii) menentukan respons adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) pada perubahan pH, waktu kontak dan konsentrasi awal; dan (iii) mendiskusikan kemungkinan interaksi gugus oksigen dan nitrogen yang konsisten dengan hasil pengujian. Kontribusi material yang diuji terletak pada penggunaan selulosa tongkol jagung teroksidasi TEMPO sebagai matriks bagi PANI–GO dengan kondisi preparasi yang dilaporkan, bukan klaim pertama kali atau sinergi kuantitatif yang belum dibuktikan. Pembandingan kedua ion dilakukan pada sistem ion tunggal, bukan uji selektivitas kompetitif.

B. Metode Penelitian

1. Bahan dan preparasi selulosa teroksidasi

Bahan baku berupa tongkol jagung. Reagen meliputi NaOH, $NaClO_2$, katalis nitroksil yang dalam catatan prosedur tertulis sebagai 4-hidroksi-2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oksil, NaBr, NaClO, HCl, HNO_3, PANI bentuk garam emeraldin, GO (ITNANO), $Pb(NO_3)_2$, dan $Cd(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$; preparasi menggunakan air deionisasi.

Tongkol jagung dicuci, dikeringkan, digiling dan diayak hingga 80 mesh. Delignifikasi dilakukan dengan NaOH 2% (b/v) pada 80 °C selama 4 jam, kemudian dicuci hingga mendekati netral. Tahap *bleaching* menggunakan $NaClO_2$ 1,7% (b/v) pada 80 °C selama 4 jam, diikuti pencucian. Selulosa hasil pemurnian (6,0 g) didispersikan dalam 450 mL air deionisasi dan ditambah 0,075 g katalis nitroksil serta 0,750 g NaBr. Selanjutnya, 24 mL NaClO 12,5% ditambahkan bertahap sambil mempertahankan pH 10,0–10,5; produk dinetralkan dan dicuci. Fibrilasi dilakukan menggunakan *high-shear homogenizer* pada 12.000 rpm selama 5 menit, lalu 18.000 rpm selama 10 menit; setelah pendinginan, homogenisasi dilanjutkan pada 18.000 rpm selama 10 menit. Suspensi akhir diencerkan menjadi sekitar 1% (b/v).

2. Preparasi dan karakterisasi komposit

PANI dan GO masing-masing didispersikan dalam air–etanol (70:30, v/v) sebagai stok berkonsentrasi 5 dan 2 mg/mL. Kedua dispersi dicampur pada rasio massa PANI:GO = 1:1 dan ditambahkan ke suspensi selulosa teroksidasi. Penambahan PANI dan GO ditetapkan masing-masing 10% terhadap massa kering selulosa, sehingga total modifier yang dimasukkan adalah 20% (basis massa selulosa). Campuran diaduk 2 jam, didiamkan 12 jam, dipisahkan, dicuci dan dikeringkan. Perubahan gugus fungsi, pola difraksi dan morfologi dievaluasi menggunakan FTIR, XRD dan SEM.

3. Uji adsorpsi batch dan analisis data

Percobaan batch dilakukan terpisah untuk Pb(II) dan Cd(II) menggunakan 25 mg komposit kering dalam 25 mL larutan logam. Pengaruh pH awal (3, 4, 5, 6, 7 dan 8) diamati pada C_0 50 mg/L, pengocokan 120 rpm, suhu 25 ± 1 °C selama 120 menit. Pada pH 6, variasi waktu kontak adalah 5, 15, 30, 60, 90, 120, 180 dan 240 menit, sedangkan konsentrasi awal divariasikan pada 10, 25, 50, 75, 100 dan 150 mg/L. Prosedur menyatakan tiga ulangan per kondisi. Setelah kontak, padatan dipisahkan dari supernatan dengan sentrifugasi dengan kecepatan 6000rpm selama 10 menit. Konsentrasi residu diukur menggunakan AAS.

Kapasitas pada waktu t (q_t) dan saat kesetimbangan (q_e) serta persentase penyisihan (R) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

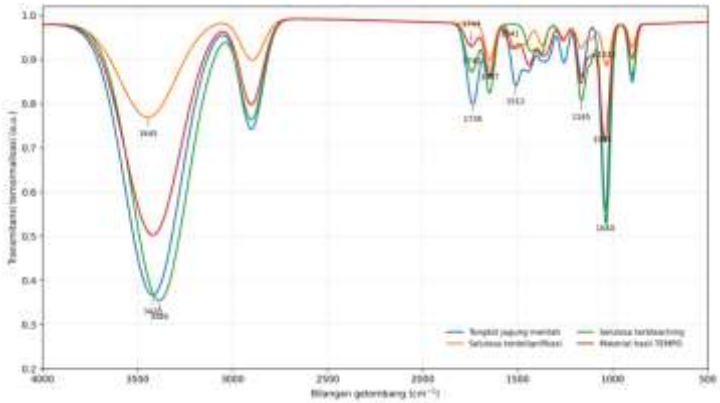
$$R\,(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

C_0, C_t dan C_e masing-masing menyatakan konsentrasi awal, konsentrasi pada waktu t, serta konsentrasi kesetimbangan (mg/L); V ialah volume larutan (L) dan m massa adsorben kering (g). Kinetika dievaluasi dengan *pseudo-first-order* (PFO), $q_t = q_e[1 - \exp(-k_1 t)]$, dan *pseudo-second-order* (PSO), $q_t = (k_2 q_e^2 t)/(1 + k_2 q_e t)$. Kesetimbangan dikaji menggunakan Langmuir, $q_e = (q_{max} K_L C_e)/(1 + K_L C_e)$, dan Freundlich, $q_e = K^F C_e\text{^}(1/n)$. Konversi mg/g ke mmol/g menggunakan massa molar Pb 207,2 dan Cd 112,414 mg/mmol.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Isolasi dan karakterisasi selulosa tongkol jagung

Perubahan kimia pada tahapan preparasi diperlihatkan oleh FTIR (Gambar 1). Tongkol jagung mentah memiliki pita O–H 3419,79 cm^{-1}, C–H 2900,94 cm^{-1}, dan serapan 1735,93 serta 1512,19 cm^{-1} yang terkait lingkungan karbonil dan aromatik lignoselulosa. Setelah delignifikasi, pita sekitar 1514,12 cm^{-1} masih tampak, sehingga penghilangan lignin tidak dapat dipastikan berlangsung sempurna. Pada sampel *bleaching*, pita 1165,00; 1033,85 dan 896,90 cm^{-1} tetap teramati dan mendukung keberadaan kerangka utama selulosa.



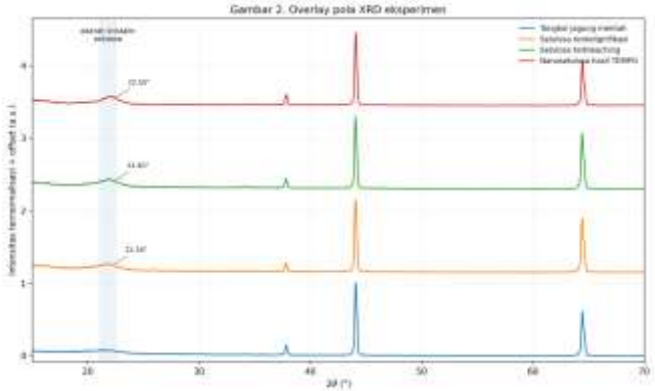
Gambar 1. Perbandingan spektrum FTIR tongkol jagung mentah, hasil delignifikasi, bleaching dan perlakuan TEMPO

Setelah perlakuan oksidasi, pita FTIR pada 3352,28; 2899,01; 1741,72; 1645,28; 1429,25; 1371,39; 1163,08; 1058,92; 1031,92 dan 896,90 cm^{-1} masih menunjukkan karakteristik selulosa. Pita 1741,72 cm^{-1} juga telah hadir pada hasil *bleaching* dan serapan sekitar 1645 cm^{-1} dapat dipengaruhi oleh air teradsorpsi. Karena itu, FTIR mendukung perubahan lingkungan gugus beroksigen, tetapi belum merupakan pengukuran kuantitatif kadar karboksilat hasil oksidasi (Isogai et al., 2011).

TABEL 1. Pita FTIR representatif selama preparasi selulosa

Tahapan	Pita FTIR utama (cm^{-1})	Interpretasi
Tongkol mentah	3419,79; 2900,94; 1735,93; 1512,19; 1163,08; 1039,63; 896,90	Lignoselulosa; karbonil; aromatik; karbohidrat
Delignifikasi	3444,87; 2897,08; 1647,21; 1514,12; 1166,93; 1031,92; 896,90	Komposisi berubah; pita aromatik tersisa
Bleaching	3385,07; 2900,94; 1741,72; 1647,21; 1431,18; 1165,00; 1033,85; 896,90	Pita sidik jari selulosa bertahan
Perlakuan TEMPO	3352,28; 2899,01; 1741,72; 1645,28; 1429,25; 1371,39; 1163,08; 1058,92; 1031,92; 896,90	Lingkungan gugus beroksigen berubah

Pada difraktogram Gambar 2, daerah difraksi melebar sekitar 2θ = 21–23° tetap teramati sesudah preparasi, konsisten dengan masih terdapatnya keteraturan struktur terkait selulosa. Refleksi tajam sekitar 37,8°, 44,0° dan 64,4° memiliki posisi hampir sama pada semua sampel.

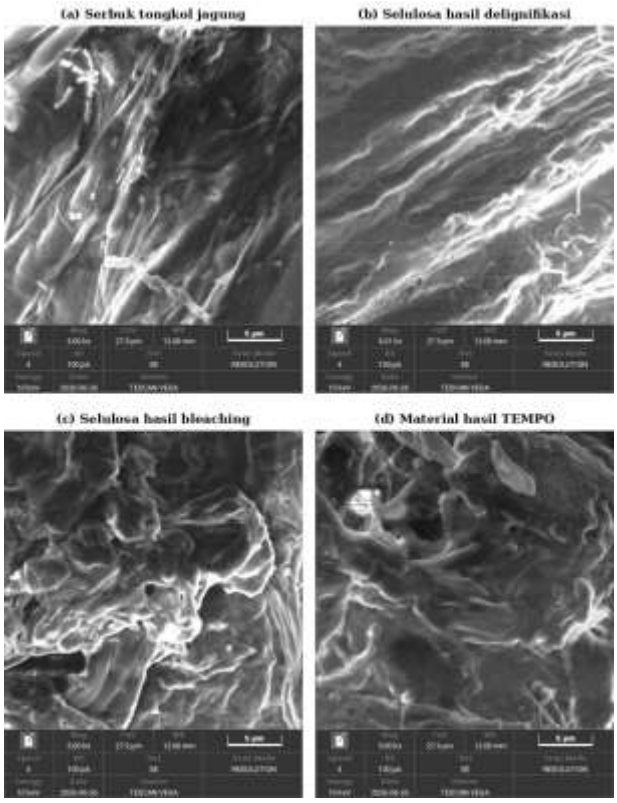


Gambar 2. Overlay pola XRD empat tahapan preparasi selulosa.

TABEL 2. Daerah XRD dan refleksi sudut tinggi selama preparasi

Tahapan	Daerah terkait selulosa (2θ)	Refleksi teramati (2θ)
Tongkol mentah	Daerah lebar sekitar 20°	37,8178; 44,0710; 64,4387
Delignifikasi	21,08–22,84°	37,8035; 44,0483; 64,4108
Bleaching	21,06–22,40°	37,8069; 44,0482; 64,4153
Perlakuan TEMPO	21,50–22,50°	37,8214; 44,0703; 64,4373

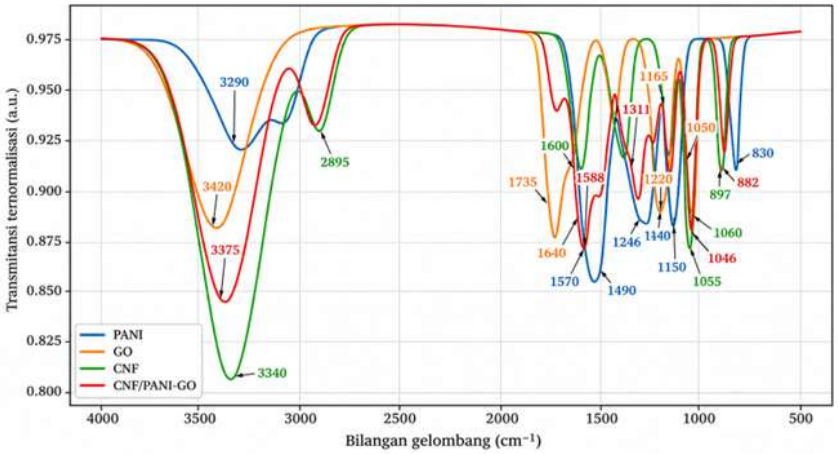
Citra SEM (Gambar 3) memperlihatkan bundel serat yang relatif kompak pada tongkol jagung mentah, diikuti pembukaan sebagian bundel setelah delignifikasi dan perubahan bentuk setelah *bleaching*. Perlakuan oksidasi dan fibrilasi mekanis menghasilkan morfologi lebih terdisintegrasi. Pengamatan ini mendukung perubahan struktur serat secara kualitatif, tetapi ukuran diameter nanofibril belum ditentukan secara kuantitatif dari citra yang ditampilkan.



Gambar 3. Citra SEM: (a) tongkol jagung mentah, (b) delignifikasi, (c) bleaching dan (d) material setelah TEMPO/fibrilasi.

2. Sintesis dan karakterisasi komposit CNF/PANI–GO

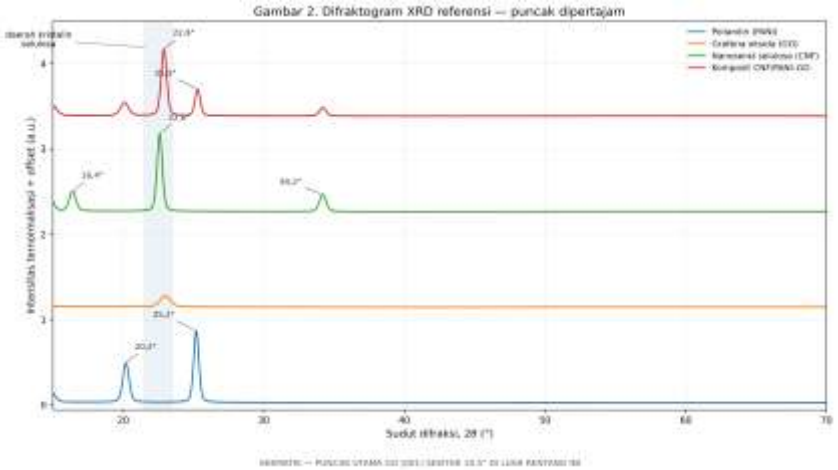
Penggabungan selulosa teroksidasi, PANI dan GO pada rasio nominal PANI:GO = 1:1 dimaksudkan menghadirkan lingkungan oksigen (CNF/GO) dan nitrogen (PANI). Pada FTIR komposit (Gambar 4), pita sekitar 3375 cm^{-1} berkaitan dengan regangan O–H/N–H; pita sekitar 1588 dan 1311 cm^{-1} berada pada daerah yang relevan bagi struktur *quinoid* dan C–N PANI. Pita sekitar 1153 dan 1046 cm^{-1} dapat mencakup kontribusi C–O/C–O–C dari selulosa dan GO. Karena adanya tumpang tindih spektrum, satu pita saja tidak dapat digunakan untuk menetapkan jenis ikatan antarkomponen secara definitif (Samadi et al., 2021; Khine et al., 2022).



Gambar 4. Spektrum FTIR komponen PANI, GO, CNF dan komposit CNF/PANI–GO.

Daerah serapan tersebut berkaitan dengan laporan Li et al. (2020) mengenai komposit *cellulose/GO/PANI* untuk elektrokimia, khususnya kontribusi pita *quinoid*, C–N dan C–O. Kesamaan daerah serapan dapat mendukung interpretasi gugus fungsi pada komposit penelitian ini, tetapi bukan bukti bahwa bentuk antarmukanya sama dengan material terdahulu.

Pola XRD komponen penyusun dan komposit diperlihatkan pada Gambar 5. Refleksi sekitar 22,9° berada dalam rentang yang dapat berkaitan dengan keteraturan selulosa, sedangkan fitur sekitar 25,3° berpotensi memuat kontribusi PANI. Namun, refleksi dari komponen penyusun dapat saling bertumpang tindih, sehingga atribusi kristalin spesifik GO/PANI tidak dapat ditetapkan hanya dari kecocokan posisi puncak. Hasil ini mendukung interpretasi kualitatif keberadaan komponen, tanpa menyimpulkan derajat kristalinitas komposit yang belum dihitung.



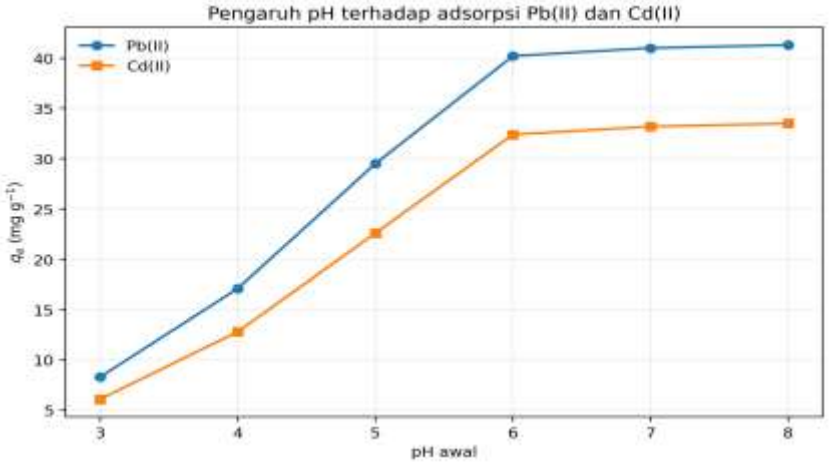
Gambar 5. Pola XRD PANI, GO, CNF dan komposit CNF/PANI–GO

3. Pengaruh pH terhadap adsorpsi Pb(II) dan Cd(II)

Kapasitas pada waktu kontak 120 menit (q_{120}) bertambah seiring kenaikan pH awal 3–8 (Tabel 3, Gambar 6). Pada pH 3 nilainya 8,3 mg/g untuk Pb(II) dan 6,1 mg/g untuk Cd(II). Pada pH 6, kapasitas meningkat menjadi 40,2 dan 32,4 mg/g dengan efisiensi penyisihan 80,4% dan 64,8%; peningkatan setelah pH 6 relatif kecil, hingga 41,3 dan 33,5 mg/g pada pH 8. pH 6 kemudian dipilih sebagai kondisi operasi praktis untuk uji waktu dan konsentrasi.

TABEL 3. Respons adsorpsi Pb(II) dan Cd(II) pada variasi pH awal (C_0 = 50 mg/L)

pH	Pb (mg/g)	Pb (%)	Pb (mmol/g)	Cd (mg/g)	Cd (%)	Cd (mmol/g)
3	8,3	16,6	0,040	6,1	12,2	0,054
4	17,1	34,2	0,083	12,8	25,6	0,114
5	29,5	59,0	0,142	22,6	45,2	0,201
6	40,2	80,4	0,194	32,4	64,8	0,288
7	41,0	82,0	0,198	33,2	66,4	0,295
8	41,3	82,6	0,199	33,5	67,0	0,298



Gambar 6. Pengaruh pH awal terhadap kapasitas penjerapan Pb(II) dan Cd(II).

Kecenderungan pH konsisten dengan berkurangnya kompetisi H^+ dan meningkatnya ketersediaan sebagian gugus karboksilat terdeprotonasi; keadaan protonasi PANI juga dapat berubah (Saito & Isogai, 2005; Bulin et al., 2022). Namun, tanpa pH akhir dan blanko ion tanpa adsorben, pengaruh presipitasi atau spesiasi pada pH 7–8 belum dapat dipisahkan dari pengikatan pada padatan. Pada pH 6, kapasitas molar Pb(II) adalah 0,194 mmol/g dan Cd(II) 0,288 mmol/g; karena konsentrasi awal disamakan dalam mg/L dan pengujian dilakukan terpisah, data tersebut tidak dapat diartikan sebagai selektivitas intrinsik.

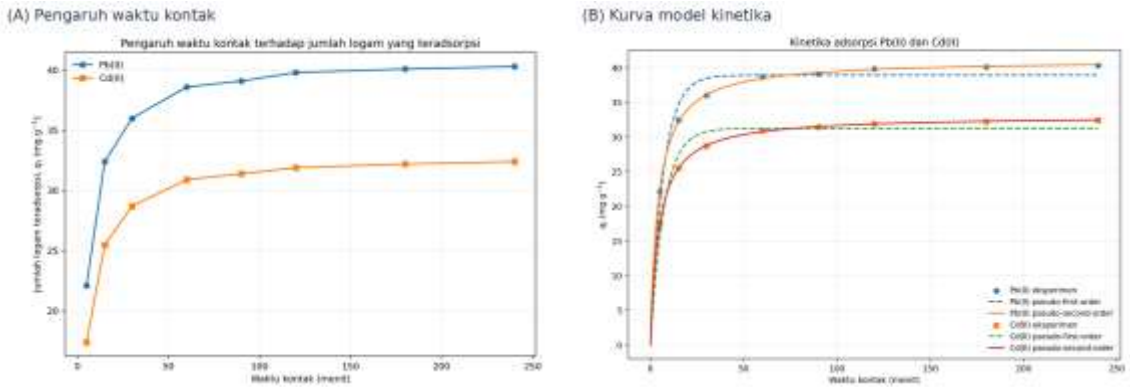
4. Pengaruh waktu kontak dan kinetika adsorpsi

Pada pH 6, penurunan konsentrasi logam berlangsung cepat di awal kontak. Kapasitas pada 5 menit mencapai sekitar 22,1 mg/g untuk Pb(II) dan 17,4 mg/g untuk Cd(II), kemudian meningkat pada 30 menit menjadi 36,0 dan 28,7 mg/g. Pada 120 menit masing-masing mencapai 39,8 dan 31,9 mg/g, sementara pada 240 menit sekitar 40,3 dan 32,4 mg/g. Pertambahan yang relatif kecil setelah 90–120 menit menjadi dasar pemilihan 120 menit sebagai waktu kontak operasional (Gambar 7).

TABEL 4. Parameter model kinetika adsorpsi Pb(II) dan Cd(II)

Ion	Model	q_e model (mg/g)	Konstanta laju	R^2
Pb(II)	PFO	38,91	k_1 = 0,1465 menit^{-1}	0,932
Pb(II)	PSO	41,11	k_2 = 0,00577 g mg^{-1} menit^{-1}	0,999
Cd(II)	PFO	31,21	k_1 = 0,1391 menit^{-1}	0,927
Cd(II)	PSO	33,04	k_2 = 0,00676 g mg^{-1} menit^{-1}	1,000*

**Nilai R^2 Cd(II) pada model PSO dilaporkan 1,000 setelah pembulatan; angka tersebut tidak menyatakan kecocokan sempurna secara matematis.*



Gambar 7. (A) Pengaruh waktu kontak dan (B) perbandingan respons eksperimen dengan kurva kinetika PFO dan PSO.

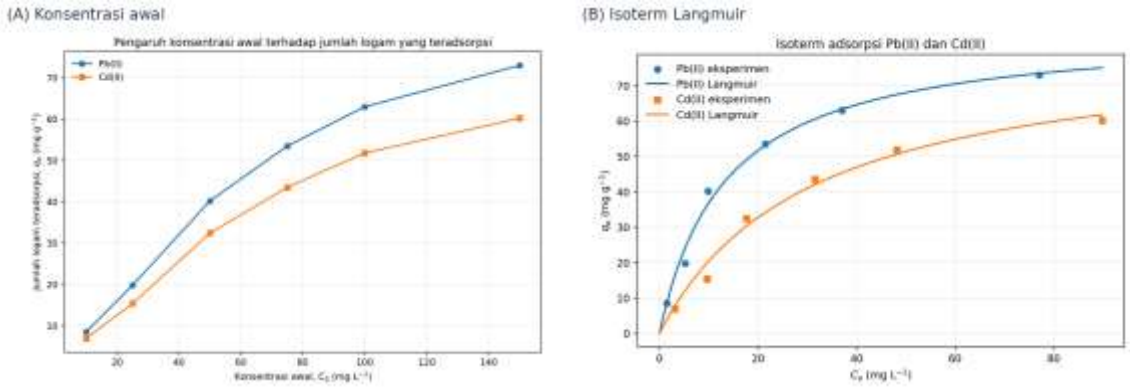
Model PSO lebih sesuai secara numerik dibanding PFO dalam rentang waktu percobaan, dengan R^2 mencapai 0,999 pada Pb(II) dan 1,000 (pembulatan) pada Cd(II) serta q_e model yang mendekati hasil percobaan di waktu panjang (Tabel 4). Namun, kesesuaian PSO merupakan deskripsi empiris dan tidak boleh dijadikan bukti tunggal bahwa pengikatan berlangsung melalui *chemisorption* (Ho & McKay, 1999; Vareda, 2023).

5. Pengaruh konsentrasi awal dan kesetimbangan adsorpsi

Peningkatan konsentrasi awal dari 10 hingga 150 mg/L pada pH 6 meningkatkan kapasitas yang teramati (Gambar 8). Pada rentang tersebut, kapasitas tertinggi adalah sekitar 73,0 mg/g untuk Pb(II) dan 60,2 mg/g untuk Cd(II). Pertambahan kapasitas dapat berkaitan dengan meningkatnya gaya pendorong transfer massa dan jumlah ion yang tersedia, namun tidak otomatis berarti situs permukaan telah mencapai saturasi mutlak.

TABEL 5. Parameter isoterm Langmuir dan Freundlich

Ion	Model	Parameter model	R^2
Pb(II)	Langmuir	q_{max} = 86,17 mg/g; K^L = 0,0748 L/mg	0,989
Pb(II)	Freundlich	K^f = 13,75; n = 2,49	0,926
Cd(II)	Langmuir	q_{max} = 82,71 mg/g; K^L = 0,0328 L/mg	0,986
Cd(II)	Freundlich	K^f = 6,90; n = 2,01	0,936



Gambar 8. (A) Pengaruh konsentrasi awal dan (B) hubungan data kesetimbangan dengan kurva model Langmuir.

Parameter Langmuir memiliki R^2 lebih tinggi daripada Freundlich untuk kedua ion (Tabel 5), dengan q_{max} model 86,17 mg/g untuk Pb(II) dan 82,71 mg/g untuk Cd(II). Nilai ini merupakan

prediksi kapasitas asimtotik model, berbeda dari kapasitas terbesar yang benar-benar terukur (73,0 dan 60,2 mg/g). Kesesuaian Langmuir pada rentang konsentrasi yang diuji tidak otomatis membuktikan permukaan homogen dan pengikatan monolapis ideal (Langmuir, 1918; Freundlich, 1906).

6. Integrasi karakteristik material, adsorpsi dan mekanisme yang diusulkan

Gabungan FTIR, XRD dan SEM memperlihatkan perubahan karakteristik gugus beroksigen serta disintegrasi serat selama preparasi; FTIR komposit juga memuat fitur yang relevan dengan gugus nitrogen PANI. Kecenderungan adsorpsi yang sensitif terhadap pH sejalan dengan kemungkinan kontribusi $–COO^-$ dari selulosa teroksidasi/GO serta situs nitrogen PANI yang pasangan elektronnya masih tersedia ketika tidak seluruh gugus nitrogen terprotonasi. Untuk menggambarkan mekanisme yang diusulkan, kesetimbangan asam–basa karboksilat, asosiasi karboksilat–logam, dan koordinasi nitrogen dituliskan secara skematis berikut ini:

$$\mathrm{R-COOH} \rightleftharpoons \mathrm{R-COO^- + H^+} \quad (8)$$

$$2\,\mathrm{R-COO^- + M^{2+}} \rightleftharpoons \mathrm{(R-COO)_2M} \quad (9)$$

$$\mathrm{PANI-N{:} + M^{2+}} \rightleftharpoons \mathrm{PANI-N{:}\rightarrow M^{2+}} \quad (10)$$

Dalam persamaan (8)–(10), M^{2+} = Pb(II) atau Cd(II), sedangkan PANI–N: menyatakan gugus amina/imina dengan pasangan elektron bebas yang tersedia. Skema ini tidak menetapkan stoikiometri koordinasi, besarnya kontribusi PANI pada pH 6, ataupun dominasi suatu jalur adsorpsi. Pada pH tersebut, status protonasi PANI tidak diukur sehingga perannya dinyatakan sebagai kemungkinan mekanistik.

Setelah kontak dengan logam, pita FTIR sekitar 1602 cm^{-1} dilaporkan bergeser menjadi 1589 cm^{-1} pada sampel Pb(II) dan 1594 cm^{-1} pada sampel Cd(II). Pergeseran ini konsisten dengan perubahan lingkungan kimia, tetapi belum memungkinkan atribusi tunggal ke karboksilat, struktur PANI, ataupun koordinasi spesifik tanpa spektrum pembanding, pemeriksaan pH dan kontrol material yang lengkap. Dengan pendekatan *hard–soft acid–base* (HSAB), perbedaan afinitas donor oksigen dan nitrogen terhadap Pb(II)/Cd(II) dapat didiskusikan sebagai hipotesis, bukan bukti selektivitas pada pengujian ion tunggal (Bulin et al., 2022).

Kontribusi penelitian ini adalah evaluasi perilaku adsorpsi ion tunggal Pb(II) dan Cd(II) oleh komposit selulosa tongkol jagung teroksidasi TEMPO/PANI–GO dengan parameter pH, kinetika dan isoterm. Keterbatasannya meliputi belum adanya kuantifikasi –COOH, kontrol CNF/CNF–PANI/CNF–GO, pengujian ion campuran, validasi blanko pH tinggi, regenerasi, pelindian, dan evaluasi air nyata. Karena itu, hasil ini mendukung potensi awal material, tetapi belum cukup untuk menyatakan sinergi komponen, mekanisme koordinasi definitif, atau kesiapan aplikasi pada air lingkungan.

D. Kesimpulan

Preparasi selulosa tongkol jagung teroksidasi melalui perlakuan kimia dan fibrilasi menghasilkan perubahan kimia permukaan serta morfologi, sedangkan komposit PANI–GO memperlihatkan karakteristik spektral gugus oksigen dan nitrogen. Pada sistem ion tunggal, kapasitas adsorpsi meningkat sampai kondisi operasi pH 6 dan dapat dideskripsikan lebih baik oleh model PSO dan Langmuir dalam rentang pengujian. Untuk penggunaan awal di kondisi yang diteliti, pH 6 dan waktu kontak 120 menit merupakan pilihan operasional yang disarankan, dengan pengakuan bahwa efektivitas pada air nyata belum diuji. Penelitian lanjutan paling mendesak adalah memvalidasi kontribusi adsorpsi melalui blanko spesiasi/presipitasi dan kontrol komponen pada sistem campuran.

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial

- *Penulis menggunakan bantuan ChatGPT (OpenAI) untuk penyuntingan bahasa, pengorganisasian naskah, dan pemeriksaan konsistensi sitasi.*

Pernyataan Kontribusi Penulis

Penulis	*Kontribusi*
Hasri	*konseptualisasi, metodologi, investigasi, analisis data, dan penulisan draf awal.*
Rini Perdana	*supervisi, validasi, telaah kritis, penyuntingan serta korespondensi.*
Ahmad Fudhail	*investigasi, pengumpulan dan visualisasi data, serta kontribusi terhadap revisi.*

Pernyataan Pendanaan

- *Penelitian didukung oleh Universitas Negeri Makassar melalui skema Penelitian Dasar PNBP Tahun Anggaran 2026.*

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian, penulisan dan publikasi artikel.

Daftar Pustaka

Astuti, R. D. P., Maria, R., Nurohman, H., Shoedarto, R. M., Rusydi, A. F., Marganingrum, D., Damayanti, R., Mulyono, A., Rahayudin, Y., Dida, E. N., & Yuliyanti, A. (2024). Potentially toxic elements contamination in the water resources: An integrated risk assessment approach in the upper Citarum watershed area. Environmental Geochemistry and Health, 46(3), 77. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01818-y

Bhattacharyya, K., Sen, D., Banik, A. K., & Ganguly, S. (2024). Adsorptive removal of cadmium from aqueous medium—A critical review. Physics and Chemistry of the Earth, 134, 103538. https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103538

Bulin, C., Zheng, R., Guo, T., & Zhang, B. (2022). Incorporating hard-soft acid-base theory in multi-aspect analysis of the adsorption mechanism of aqueous heavy metals by graphene oxide. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 170, 110934. https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110934

Elessawy, N. A., Gouda, M. H., Elnouby, M., Ali, S. M., Salerno, M., & Youssef, M. E. (2022). Sustainable microbial and heavy metal reduction in water purification systems based on PVA/IC nanofiber membrane doped with PANI/GO. Polymers, 14(8), 1558. https://doi.org/10.3390/polym14081558

Freundlich, H. (1906). Über die Adsorption in Lösungen. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 57, 385–470.

Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34(5), 451–465.

Ismail, U. M., Vohra, M. S., & Onaizi, S. A. (2024). Adsorptive removal of heavy metals from aqueous solutions: Progress of adsorbents development and their effectiveness. Environmental Research, 251, 118562. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118562

Isogai, A., Saito, T., & Fukuzumi, H. (2011). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. Nanoscale, 3, 71–85. https://doi.org/10.1039/C0NR00583E

Jiang, H., Wu, S., & Zhou, J. (2023). Preparation and modification of nanocellulose and its application to heavy metal adsorption: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 236, 123916. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123916

Khine, Y. Y., Wen, X., Jin, X., Foller, T., & Joshi, R. (2022). Functional groups in graphene oxide. Physical Chemistry Chemical Physics, 24, 26337–26355. https://doi.org/10.1039/D2CP04082D

Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, 40(9), 1361–1403.

Li, Y., Xia, Z., Gong, Q., Liu, X., Yang, Y., Chen, C., & Qian, C. (2020). Green synthesis of free standing cellulose/graphene oxide/polyaniline aerogel electrode for high-performance flexible all-solid-state supercapacitors. Nanomaterials, 10(8), 1546. https://doi.org/10.3390/nano10081546

Rajanna, M., Shivashankar, L. M., Shivamurthy, O. H., et al. (2022). A facile synthesis of cellulose nanofibers from corn cob and rice straw by acid hydrolysis method. Polymers, 14(20), 4383. https://doi.org/10.3390/polym14204383

Saito, T., & Isogai, A. (2005). Ion-exchange behavior of carboxylate groups in fibrous cellulose oxidized by the TEMPO-mediated system. Carbohydrate Polymers, 61(2), 183–190. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.04.009

Samadi, A., Xie, M., Li, J., Shon, H., Zheng, C., & Zhao, S. (2021). Polyaniline-based adsorbents for aqueous pollutants removal: A review. Chemical Engineering Journal, 418, 129425. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129425

Sartika, D., Firmansyah, A. P., Junais, I., Arnata, I. W., Fahma, F., & Firmanda, A. (2023). High yield production of nanocrystalline cellulose from corn cob through a chemical-mechanical treatment under mild conditions. International Journal of Biological Macromolecules, 240, 124327. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124327

Shakil, M. S. R., Aktar, M. S., Hossain, M. A., & Ahmed, S. (2024). Synthesis and application of carboxymethyl cellulose–graphene oxide composite for the mitigation of Pb^{2+} and Cd^{2+} from aqueous solution. Cleaner Engineering and Technology, 18, 100724. https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100724

Si, R., Pu, J., Luo, H., Wu, C., & Duan, G. (2022). Nanocellulose-based adsorbents for heavy metal ion. Polymers, 14(24), 5479. https://doi.org/10.3390/polym14245479

Uysal, A. S., Gülerman, A., Akay, A., & Yıldırım-Tirgil, N. (2025). Reduced graphene oxide/polyaniline nanocomposites for lead (Pb) removal. Journal of the Indian Chemical Society, 102(12), 102326. https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102326

Vareda, J. P. (2023). On validity, physical meaning, mechanism insights and regression of adsorption kinetic models. Journal of Molecular Liquids, 376, 121416. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121416

World Health Organization. (2026). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first, second and third addenda. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240121225

Yu, H., Zheng, L., Zhang, T., Ren, J., Cheng, W., Zhang, L., & Meng, P. (2021). Adsorption behavior of Cd(II) on TEMPO-oxidized cellulose in inorganic/organic complex systems. Environmental Research, 195, 110848. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110848

Zhu, C., Liu, P., & Mathew, A. P. (2017). Self-assembled TEMPO cellulose nanofibers: Graphene oxide-based biohybrids for water purification. ACS Applied Materials & Interfaces, 9(24), 21048–21058. https://doi.org/10.1021/acsami.7b06358