ALCHEMY : JOURNAL OF CHEMISTRY

Artikel Penelitian

Hidrogel Selulosa Sabut Kelapa-Kitosan Termodifikasi EDTA Untuk Adsorpsi Ion Cu(II) dan Fe(III)

Nudia Tuljannah[1*], Sulastri[2], Zaskia Dwi Utami[3], Sitti Nurintan[4,*]

[1] Program Studi Sosial Ekonomi Perikanan, Fakultas Ilmu Perikanan dan Bisnis, Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros, Maros, Indonesia, 90552
[2]Program Studi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pancasakti, Makassar, Indonesia, 90121
[3]Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Andi Djemma, Palopo, Indonesia, 91913
[4]Program Studi Manajemen Sumber Daya Perairan, Institut Teknologi Pertanian, Takalar, Sulawesi Selatan, Indonesia, 92255

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel
Diterima: 19 Agustus 2026
Direvisi: 28 September 2026
Diterima: 29 September 2029
Tersedia online: 30 Oktober 2029

* Email (penulis korespodensi):
nudiatuljannah@itkpi.ac.id

DOI: https://doi.org/10.18860/al.v14i2.45705

ABSTRAK

Cellulose-based hydrogel is a porous material with potential applications as an adsorbent for the treatment of water contaminated with metal ions. This study aimed to evaluate the effect of varying ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) addition on the characteristics of coconut coir cellulose–chitosan-based hydrogel and its adsorption performance toward Cu(II) and Fe(III) ions. Cellulose was extracted from coconut coir through alkaline treatment and bleaching, and subsequently formulated with chitosan by adding EDTA at 0.100, 0.125, and 0.150 g. The hydrogel was prepared through four freeze–thaw cycles. Characterization included cellulose yield, physical properties, swelling ratio, gel fraction, and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, while the concentrations of metal ions before and after adsorption were determined using atomic absorption spectrophotometry. The cellulose yield obtained was 33.86%. The gel fractions were 86.00%, 92.00%, and 95.50% for EDTA additions of 0.100, 0.125, and 0.150 g, respectively. The highest swelling ratio was obtained with 0.125 g EDTA at 444.245%, whereas the swelling ratio decreased to 269.775% at 0.150 g EDTA, and the hydrogel exhibited greater brittleness. The FTIR spectra indicated the presence of O–H/N–H, C–H, C–O, and C–N functional groups, along with changes in the absorption bands after contact with metal ions. The highest adsorption efficiencies were obtained at 0.125 g EDTA, reaching 13.8656% for Cu(II) and 16.1172% for Fe(III), with adsorption capacities of 3.410 and 3.793 mg g^{-1}, respectively. These results demonstrate that the amount of EDTA influences the hydrogel network characteristics, swelling capacity, and accessibility of adsorption sites for metal ions.

Keywords: EDTA, cellulose, coconut coir, hydrogel.

Hidrogel berbasis selulosa merupakan material berpori yang berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk pengolahan air tercemar ion logam. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi penambahan etilendiamintetraasetat (EDTA) terhadap karakteristik hidrogel berbasis selulosa sabut kelapa–kitosan serta kemampuan adsorpsinya terhadap ion Cu(II) dan Fe(III). Selulosa diekstraksi dari sabut kelapa melalui perlakuan basa dan pemutihan, kemudian diformulasikan bersama kitosan dengan penambahan EDTA sebesar 0,100; 0,125; dan 0,150 g. Hidrogel dibentuk melalui empat siklus pembekuan–pelelehan. Karakterisasi meliputi rendemen selulosa, sifat fisik, rasio swelling, fraksi gel, dan Fourier transform infrared (FTIR), sedangkan konsentrasi ion logam sebelum dan setelah proses adsorpsi ditentukan menggunakan spektrofotometri serapan atom. Rendemen selulosa yang diperoleh sebesar 33,86%. Fraksi gel berturut-turut sebesar 86,00%; 92,00%; dan 95,50% pada penambahan EDTA 0,100; 0,125; dan 0,150 g. Rasio swelling tertinggi diperoleh pada EDTA 0,125 g sebesar 444,245%, sedangkan pada 0,150 g menurun menjadi 269,775% dan hidrogel menunjukkan sifat yang lebih rapuh. Spektrum FTIR menunjukkan keberadaan gugus O–H/N–H, C–H, C–O, dan C–N serta perubahan pita setelah kontak dengan ion logam. Efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada EDTA 0,125 g, yaitu 13,8656% untuk Cu(II) dan 16,1172% untuk Fe(III), dengan kapasitas adsorpsi masing-masing sebesar 3,410 dan 3,793 mg g^{-1}. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah EDTA memengaruhi karakteristik jaringan hidrogel, kemampuan swelling, dan aksesibilitas situs adsorpsi terhadap ion logam.

Kata Kunci: EDTA, Hidrogel, Logam, Sabut kelapa, Selulosa

1. Pendahuluan

Kontaminasi ion logam dalam perairan merupakan permasalahan lingkungan karena spesies logam tidak mengalami degradasi biologis seperti senyawa organik dan dapat bertahan di lingkungan serta mengalami akumulasi pada sistem perairan. Adsorpsi menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam pengolahan air karena prosesnya relatif sederhana, dapat diterapkan pada berbagai jenis adsorben, dan memungkinkan pemanfaatan material berbasis biomassa. Dalam beberapa tahun terakhir, material berbasis selulosa, termasuk hidrogel, memperoleh perhatian sebagai adsorben karena memiliki gugus fungsi hidroksil, struktur berpori, sifat hidrofilik, serta kemampuan untuk dimodifikasi secara kimia maupun fisik [1], [2].

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang banyak digunakan dalam pengolahan air karena memiliki luas permukaan dan struktur pori yang tinggi. Namun, penggunaan karbon aktif umumnya bergantung pada bahan baku dan proses aktivasi yang dapat meningkatkan biaya produksi serta menghasilkan material yang perlu melalui tahap pengolahan lebih lanjut setelah digunakan [2]. Hidrogel berbasis selulosa dari biomassa, seperti sabut kelapa, menawarkan pendekatan alternatif karena memanfaatkan sumber lignoselulosa yang terbarukan dan tersedia sebagai limbah pertanian. Selain menyediakan gugus hidroksil dari selulosa, penggabungan selulosa dengan kitosan memberikan gugus amino yang berpotensi berinteraksi dengan ion logam melalui interaksi elektrostatik maupun kompleksasi. Struktur jaringan hidrogel juga memungkinkan pengaturan kemampuan swelling dan aksesibilitas situs aktif melalui perubahan komposisi dan kondisi pembentukan jaringan. Oleh karena itu, hidrogel selulosa kitosan dari sabut kelapa berpotensi menjadi alternatif adsorben berbasis biomassa untuk penghilangan ion logam dari larutan berair [3].

Hidrogel merupakan jaringan polimer tiga dimensi yang mampu menyerap dan mempertahankan sejumlah besar air tanpa kehilangan struktur dasarnya. Pada hidrogel berbasis selulosa, kemampuan swelling, porositas, densitas jaringan, dan keberadaan gugus fungsi merupakan faktor penting yang menentukan perpindahan massa dan aksesibilitas ion terhadap situs adsorpsi. Modifikasi terhadap struktur selulosa dapat meningkatkan jumlah situs aktif dan mengubah selektivitas terhadap ion logam [3].

Selulosa merupakan salah satu polimer alam yang paling melimpah dan dapat diperoleh dari berbagai biomassa lignoselulosa. Pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber selulosa memberikan peluang untuk menghasilkan material adsorben berbasis sumber terbarukan sekaligus meningkatkan nilai tambah biomassa. Penelitian Lunardi *et al*. menunjukkan bahwa selulosa yang diperoleh dari limbah pertanian dapat diformulasikan menjadi hidrogel untuk adsorpsi Cu(II), dengan struktur hidrogel berperan dalam menyediakan jalur perpindahan massa menuju situs aktif. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa hidrogel berbasis selulosa dengan struktur jaringan yang dimodifikasi dapat digunakan untuk menangkap berbagai ion logam dari larutan air [4].

Sabut kelapa merupakan salah satu biomassa lignoselulosa yang tersedia dalam jumlah besar dan berpotensi digunakan sebagai sumber selulosa. Pemanfaatan serat sabut kelapa sebagai bahan adsorben telah dilaporkan untuk ekstraksi Cu(II), menunjukkan bahwa selulosa dari sabut kelapa dapat difungsionalisasi untuk meningkatkan interaksi terhadap ion logam. Belgasem dan Mohamad melaporkan penggunaan selulosa yang diekstraksi dari serat sabut kelapa dan dimodifikasi dengan senyawa hidrazon untuk ekstraksi Cu(II) dari larutan berair. Temuan tersebut memperkuat potensi sabut kelapa sebagai bahan dasar adsorben berbasis selulosa [5]. Selain selulosa, kitosan merupakan polimer alam yang menarik digunakan sebagai komponen hidrogel karena memiliki gugus amino yang dapat berinteraksi dengan ion logam. Penggabungan selulosa dan kitosan memungkinkan diperolehnya material komposit dengan karakteristik struktural selulosa dan situs aktif dari kitosan. Hidrogel komposit selulosa-kitosan telah dilaporkan mampu mengadsorpsi Cu(II), sedangkan modifikasi lebih lanjut terhadap gugus fungsi dapat meningkatkan kemampuan pengikatan ion logam [6].

Efektivitas adsorpsi hidrogel juga sangat dipengaruhi oleh struktur jaringan. Peningkatan densitas ikatan silang dapat meningkatkan kestabilan material, tetapi pada tingkat tertentu dapat mengurangi ruang bebas dan menghambat difusi ion menuju situs aktif. Oleh karena itu, terdapat keseimbangan antara kestabilan jaringan, swelling, porositas, dan aksesibilitas situs adsorpsi. Studi pada berbagai hidrogel berbasis selulosa menunjukkan bahwa perubahan komposisi dan densitas jaringan dapat menghasilkan perubahan yang signifikan pada kemampuan menyerap air dan menangkap ion logam [7].

EDTA merupakan ligan pengkelat yang memiliki beberapa atom donor dan banyak digunakan untuk meningkatkan kemampuan material dalam mengikat ion logam. Fungsionalisasi biomassa lignoselulosa

dengan EDTA telah dilaporkan meningkatkan kemampuan adsorpsi Cu(II). Dastgerdi *et al*. melaporkan penggunaan EDTA dianhidrida untuk memodifikasi biomassa lignoselulosa dan menghasilkan material dengan kemampuan mengadsorpsi Cu(II). Penelitian lain pada selulosa yang dimodifikasi EDTA juga menunjukkan bahwa gugus pengkelat berbasis EDTA dapat memberikan afinitas terhadap ion logam [8].

EDTA berperan sebagai ligan pengkelat yang dapat menyediakan atom donor, terutama atom oksigen dari gugus karboksilat, untuk berinteraksi dengan ion logam. Dalam sistem hidrogel selulosa–kitosan, keberadaan EDTA diharapkan dapat menambah atau memperkuat lingkungan kimia yang mampu berinteraksi dengan ion Cu(II) dan Fe(III), sedangkan gugus hidroksil selulosa dan gugus amino kitosan dapat berkontribusi terhadap interaksi dengan ion logam [8]. Dengan demikian, perubahan jumlah EDTA dapat memengaruhi karakteristik jaringan hidrogel sekaligus jumlah dan aksesibilitas gugus fungsional yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion logam. Penambahan EDTA dalam jumlah yang berbeda juga berpotensi menghasilkan perbedaan kepadatan jaringan, kemampuan swelling, serta kemudahan difusi ion logam ke dalam matriks hidrogel. Oleh karena itu, variasi EDTA dalam penelitian ini digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara komposisi hidrogel, sifat fisik jaringan, dan kemampuan adsorpsi terhadap Cu(II) dan Fe(III).

Penelitian terbaru bahkan menunjukkan bahwa hidrogel selulosa yang menggunakan komponen pengikat silang berbasis EDTA dapat mencapai kapasitas sorpsi Cu(II) yang tinggi. Hal tersebut memperlihatkan pentingnya gugus pengkelat dalam meningkatkan interaksi antara jaringan hidrogel dan ion logam. Namun, sistem tersebut berbeda dari penelitian ini karena menggunakan turunan selulosa dan struktur pengikat silang berbasis tetrahydrazide-EDTA, sedangkan penelitian ini menggunakan selulosa dari sabut kelapa, kitosan, dan variasi penambahan EDTA dalam jumlah kecil [9].

Selain Cu(II), Fe(III) juga merupakan ion yang relevan dalam studi adsorpsi berbasis hidrogel. Penelitian pada gel karboksimetilselulosa yang difungsionalisasi dengan karbon berpendar menunjukkan kemampuan material berbasis selulosa untuk berinteraksi dengan Fe(III), sedangkan hidrogel berbasis selulosa lain juga telah dikembangkan untuk mendeteksi sekaligus mengadsorpsi Fe(III). Perbedaan afinitas antara ion logam dapat dipengaruhi oleh karakteristik gugus donor, hidrasi, spesiasi, interaksi elektrostatik, serta kompleksasi pada permukaan adsorben [10].

Meskipun penelitian mengenai hidrogel selulosa dan modifikasi dengan gugus pengkelat telah berkembang pesat, kajian yang secara khusus menggunakan selulosa sabut kelapa–kitosan dengan variasi penambahan EDTA untuk membandingkan adsorpsi Cu(II) dan Fe(III) masih terbatas. Sebagian penelitian sebelumnya menggunakan selulosa dari sumber lain, modifikasi kimia yang lebih kompleks, atau sistem adsorpsi dengan kondisi eksperimen yang berbeda [11].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi EDTA terhadap karakteristik hidrogel selulosa sabut kelapa–kitosan serta kemampuan adsorpsinya terhadap Cu(II) dan Fe(III). Parameter karakteristik yang dikaji meliputi rendemen selulosa, sifat fisik, rasio swelling, fraksi gel, dan perubahan gugus fungsi menggunakan FTIR. Kemampuan adsorpsi dievaluasi berdasarkan efisiensi dan kapasitas adsorpsi pada kondisi eksperimen yang digunakan.

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan meliputi sabut kelapa (*Cocos nucifera* L.), kitosan (Sigma-Aldrich), ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) (Merck), Natrium Hidroksida (NaOH) (Merck), Natrium Hipoklorit (NaOCl) (Merck) asam asetat glasial (CH_3COOH), akuades, padatan $Fe(NO_3)_3$ dan $Cu(NO_3)_2$, kertas saring dan air deionisasi. Peralatan utama meliputi FTIR Thermo Fisher Scientific, spektrofotometer serapan atom AA240FS (Agilent Technologies), freezer, oven (Memmert), neraca analitik, *shaker*, *sieve shaker*, *hotplate*, pH meter, dan peralatan gelas.

2.2. Metode

2.2.1. Isolasi Selulosa

Sabut kelapa kering dipisahkan menjadi serat, dicuci menggunakan air, dikeringkan, kemudian dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 40 mesh. Sebanyak 20 g serbuk sabut kelapa ditambahkan ke dalam 600 mL NaOH 0,5 M dan dipanaskan pada 95 °C selama 2 jam sambil diaduk. Residu kemudian disaring dan dicuci hingga mencapai kondisi netral. Residu selanjutnya ditambahkan 200 mL NaOCl 3% dan 5 mL asam asetat glasial, kemudian dipanaskan pada 80 °C selama 1 jam. Residu dicuci hingga netral dan dikeringkan pada 100 °C sampai bobot konstan. Rendemen selulosa dihitung menggunakan persamaan (1) [12].

$$\text{Rendemen (\%)} = \frac{\text{massa selulosa kering}}{\text{massa awal sabut kelapa}} x100\% \qquad (1)$$

2.2.2. Pembuatan Hidrogel

Selulosa sabut kelapa ditimbang sebnyak 1 gram, kemudian ditambahkan kitosan sebanyak 1,5 gram dan dilarutkan dengan 25 mL CH3COOH 2%. Kemudian ditambahkan EDTA sebanyak 0,100; 0,125; dan 0,150 gram. Setelah itu, diteteskan NaOH 2 M sebanyak 5 tetes yang selanjutnya dicetak kedalam cawan petri dan ratakan ke seluruh permukaan cawan (Ritonga, dkk., 2019: 2). Hidrogel yang telah dicetak dalam cawan petri dibekukan pada suhu -20 ºC selama 18 jam, kemudian diletakkan pada suhu ruang selama 6 jam. Perlakuan tersebut dilakukan sebanyak 4 siklus, kemudian sediaan dioven pada suhu 70 ºC selama 7 jam [13], [14].

2.2.3. Karakterisasi Hidrogel

Karakterisasi dilakukan terhadap bentuk, elastisitas, tekstur, rasio swelling, fraksi gel, dan gugus fungsi menggunakan spektroskopi FTIR.

2.2.3.1. Spektroskopi FTIR

Karakterisasi gugus fungsi dilakukan menggunakan spektroskopi Fourier *Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama yang terdapat dalam hidrogel serta mengevaluasi perubahan pita serapan setelah kontak dengan ion Cu(II) dan Fe(III). Spektrum FTIR direkam pada rentang 4000–500 cm^{-1} [15].

2.2.3.2. Rasio Swelling

Rasio swelling ditentukan dengan menimbang hidrogel dalam keadaan kering sebelum perendaman dan setelah hidrogel mencapai kondisi swelling. Massa hidrogel kering sebelum perendaman dinyatakan sebagai $W_{0}s$, sedangkan massa hidrogel setelah perendaman dinyatakan sebagai W_s. Rasio swelling dihitung menggunakan persamaan (2).

$$\textit{Swelling}\ (\%) = \frac{Ws - W_{0S}}{W_{0S}} \text{ X } 100\% \qquad (2)$$

2.2.3.3. Fraksi Gel

Fraksi gel ditentukan berdasarkan perbandingan massa hidrogel setelah proses pencucian dan pengeringan terhadap massa awal hidrogel sebelum proses pencucian. Massa awal hidrogel dinyatakan sebagai W_{0g}, sedangkan massa hidrogel setelah pencucian dan pengeringan hingga massa konstan dinyatakan sebagai W_g. Fraksi gel dihitung menggunakan persamaan (3).

3

$$\text{Fraksi Gel (\%)} = \frac{Wg}{W_{0g}} \text{ X } 100\% \qquad (3)$$

2.2.4. Pengujian Adsorpsi

Sebanyak 20 mg hidrogel digunakan untuk mengadsorpsi 20 mL larutan Cu(II) dengan konsentrasi awal 24,5903 mg L^{-1} selama 120 menit dan larutan Fe(III) dengan konsentrasi awal 23,5344 mg L^{-1} selama 80 menit. Campuran dihomogenkan pada kecepatan 150 rpm. Setelah proses adsorpsi selesai, larutan dipisahkan dari hidrogel dan konsentrasi akhir ion logam ditentukan menggunakan spektrofotometer serapan atom [16]. *p*H larutan adsorpsi diukur menggunakan *p*H meter sebelum proses adsorpsi untuk mengetahui kondisi awal larutan. Efisiensi adsorpsi dihitung dengan menggunakan persamaan (4).

$$\text{Efisiensi Adsorpsi} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} X100 \quad (4)$$

Dengan C_0 adalah konsentrasi awal ion logam (mg/L) dan C_1 adalah konsentrasi akhir ion logam setelah proses adsorpsi (mg/L)

2.2.4.2. Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi dihitung dengan menggunakan persamaan (5)

$$q = \frac{(C_0 - C_1)V}{m} \quad (5)$$

Dengan q adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), C_0 adalah konsentrasi awal ion logam (mg/L), C_1 adalah konsentrasi akhir ion logam (mg/L), V adalah volume larutan (L) dan m adalah massa adsorben/hidrogel

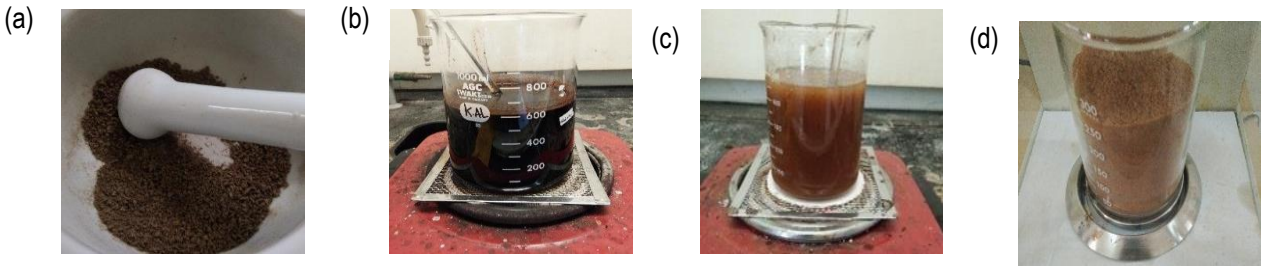
2.2.5. Pengolahan Data

Data disajikan sebagai rata-rata ± standar deviasi dari tiga pengulangan. Analisis dilakukan secara deskriptif untuk mengevaluasi kecenderungan pengaruh variasi EDTA terhadap karakteristik hidrogel dan performa adsorpsi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Rendemen Selulosa

Ekstraksi terhadap 20 g sabut kelapa menghasilkan 6,7712 g selulosa dengan rendemen sebesar 33,86%. Rendemen tersebut menunjukkan bahwa perlakuan alkali dan pemutihan mampu menghasilkan fraksi selulosa dari matriks lignoselulosa. Perlakuan alkali berperan dalam menghilangkan sebagian komponen non-selulosa, terutama lignin dan hemiselulosa, sedangkan proses pemutihan membantu meningkatkan kemurnian fraksi selulosa. Pemanfaatan biomassa lignoselulosa sebagai sumber hidrogel adsorben sejalan dengan perkembangan material berbasis selulosa untuk pengolahan air [17].



Gambar 1. Perubahan morfologi bahan selama proses isolasi selulosa dari sabut kelapa: (a) serbuk sabut kelapa, (b) hasil delignifikasi, (c) hasil bleaching, dan (d) selulosa sabut kelapa.

Hasil isolasi menunjukkan bahwa proses delignifikasi dan bleaching menyebabkan perubahan warna dan karakteristik visual bahan, yang mengindikasikan terjadinya penghilangan sebagian lignin dan komponen non-selulosa [18]. Perubahan bahan selama tahapan isolasi selulosa dari sabut kelapa ditunjukkan pada **Gambar 1.** Selanjutnya, rendemen selulosa yang diperoleh digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi keberhasilan proses isolasi.

3.2. Pembentukan Hidrogel

Hidrogel berhasil terbentuk pada seluruh variasi EDTA. Secara visual, hidrogel dengan EDTA 0,100 g memiliki tekstur padat dan elastis, sedangkan formulasi 0,125 g menghasilkan hidrogel yang relatif lebih elastis. Pada EDTA 0,150 g, hidrogel tetap terbentuk tetapi menunjukkan karakter yang lebih rapuh. Hidrogen sabut kelapa ditampilkan pada **Gambar 2**.

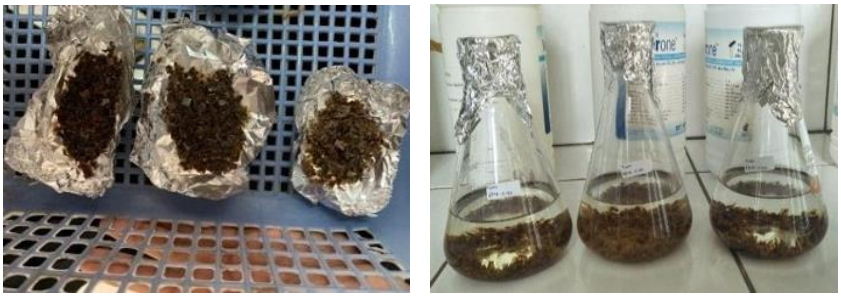


Gambar 2. Hidrogel sabut kelapa

Hidrogel berhasil terbentuk pada seluruh variasi penambahan EDTA, yang menunjukkan bahwa komposisi bahan yang digunakan mampu membentuk jaringan hidrogel melalui proses freeze–thaw. Secara visual, hidrogel dengan penambahan EDTA 0,100 g memiliki tekstur yang relatif padat dan elastis, sedangkan formulasi dengan EDTA 0,125 g menunjukkan karakter yang relatif lebih elastis. Pada penambahan EDTA 0,150 g, hidrogel tetap terbentuk tetapi menunjukkan karakter yang lebih rapuh dibandingkan formulasi lainnya. Perbedaan karakter fisik tersebut menunjukkan bahwa perubahan jumlah EDTA dapat memengaruhi struktur dan sifat mekanik jaringan hidrogel. Pengamatan visual ini selanjutnya didukung oleh hasil pengukuran rasio swelling dan fraksi gel yang menunjukkan adanya perubahan karakteristik jaringan pada setiap variasi EDTA.

3.3. Rasio Swelling

Hidrogen sebelum dan sesudah *swelling* ditampilkan pada **Gambar 3** dan nilai rasio swelling dirangkum pada **Tabel 1**. Rasio swelling meningkat dari 291,515 ± 1,531% pada EDTA 0,100 g menjadi 444,245 ± 2,328% pada EDTA 0,125 g, kemudian menurun menjadi 269,775 ± 2,230% pada EDTA 0,150 g. Pola tersebut menunjukkan bahwa penambahan EDTA memberikan pengaruh tidak linier terhadap kemampuan hidrogel menyerap air.



Gambar 3. Hidorgel (a) Sebelum (b) Setelah *swelling*

Tabel 1. Rasio *swelling* hidrogel pada variasi EDTA

Penambahan EDTA (g)	W_0s (g)	Ws_1 (g)	Ws_2 (g)	Ws_3 (g)	*Swelling (%)
0,100	2,0000	7,8303	7,7997	7,8303	291,515 ± 1,531
0,125	2,0000	10,8849	10,8383	10,8849	444,245 ± 2,328
0,150	2,0000	7,3955	7,3509	7,3955	269,775 ± 2,230

**Data disajikan sebagai rata-rata ± SD (n = 3).*

Nilai *swelling* tertinggi pada EDTA 0,125 g menunjukkan adanya keseimbangan antara pembentukan jaringan dan ruang bebas yang tersedia untuk penetrasi air. Hidrogel berbasis selulosa memiliki gugus hidroksil yang bersifat hidrofilik, sedangkan struktur tiga dimensinya memungkinkan air masuk ke dalam jaringan. Namun, peningkatan densitas jaringan dapat membatasi mobilitas rantai polimer dan mengurangi volume bebas yang tersedia untuk air [19]. Penurunan nilai swelling pada penambahan EDTA sebesar 0,150 g menunjukkan bahwa peningkatan jumlah EDTA tidak selalu menyebabkan peningkatan kemampuan hidrogel dalam menyerap air. Pada penelitian ini, nilai swelling meningkat dari 291,515% pada penambahan EDTA 0,100 g menjadi 444,245% pada penambahan EDTA 0,125 g, kemudian menurun menjadi 269,775% pada penambahan EDTA 0,150 g. Peningkatan swelling hingga konsentrasi EDTA 0,125 g menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut hidrogel memiliki keseimbangan antara kestabilan jaringan dan ruang yang tersedia untuk masuknya molekul air. Sementara itu, penambahan EDTA menjadi 0,150 g menghasilkan fraksi gel yang lebih tinggi, yaitu 95,50%, dibandingkan 92,00% pada EDTA 0,125 g. Kondisi tersebut mengindikasikan terbentuknya jaringan hidrogel yang lebih stabil dan relatif lebih rapat, sehingga mobilitas air dan ruang yang tersedia untuk pengembangan jaringan menjadi lebih terbatas. Dengan demikian, penurunan swelling pada EDTA 0,150 g diduga berkaitan dengan semakin rapatnya jaringan hidrogel, bukan semata-mata karena berkurangnya kemampuan gugus hidrofilik dalam berinteraksi dengan air.

Swelling yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan hidrogel dalam menyerap air dan mengembangkan jaringan internalnya, sehingga meningkatkan ruang yang tersedia bagi larutan untuk masuk dan memperluas aksesibilitas terhadap gugus fungsional yang berperan sebagai situs adsorpsi. Kondisi tersebut dapat meningkatkan peluang terjadinya kontak antara ion logam dengan situs aktif pada hidrogel. Namun, karena struktur internal hidrogel tidak dianalisis secara langsung dalam penelitian ini, perubahan karakteristik jaringan yang terjadi pada setiap variasi EDTA diinterpretasikan berdasarkan hasil *swelling* dan fraksi gel. Oleh karena itu, hubungan antara peningkatan swelling dan aksesibilitas ion terhadap situs adsorpsi dipandang sebagai indikasi berdasarkan karakteristik fisik hidrogel, bukan sebagai bukti langsung mengenai perubahan struktur internal secara mikroskopis [20], [21].

Hubungan antara rasio *swelling* dan kemampuan adsorpsi dapat dijelaskan melalui perubahan volume jaringan dan aksesibilitas ruang internal hidrogel. Ketika hidrogel mengalami *swelling*, molekul air masuk ke dalam jaringan polimer sehingga jarak antarsegmen rantai polimer dan ruang internal jaringan dapat meningkat. Kondisi tersebut dapat mempermudah perpindahan larutan yang mengandung ion logam dari permukaan menuju bagian internal hidrogel, sehingga meningkatkan peluang kontak ion dengan gugus fungsional yang berperan sebagai situs adsorpsi. Dalam hidrogel selulosa–kitosan, gugus hidroksil dan amino bersifat hidrofilik dan dapat berkontribusi terhadap interaksi dengan ion logam, sedangkan keberadaan EDTA dapat menyediakan gugus pengkelat yang berpotensi meningkatkan interaksi dengan kation logam. Dengan demikian, swelling yang lebih tinggi pada EDTA 0,125 g dapat dikaitkan dengan meningkatnya aksesibilitas situs aktif terhadap ion Cu(II) dan Fe(III) pada kondisi penelitian ini. Sebaliknya, penurunan *swelling* pada EDTA 0,150 g dapat menunjukkan terbentuknya jaringan yang lebih rapat atau perubahan struktur jaringan yang membatasi ruang untuk penetrasi larutan, sehingga perpindahan massa ion menuju situs aktif menjadi kurang optimal. Hubungan tersebut perlu dipahami sebagai hubungan antara sifat fisik jaringan dan

aksesibilitas situs adsorpsi, bukan sebagai bukti langsung mengenai ukuran pori tertentu karena ukuran pori hidrogel tidak ditentukan secara kuantitatif dalam penelitian ini.

3.4. Fraksi Gel

Hasil perhitungan fraksi gel hydrogen pada variasi EDTA dirangkum pada **Tabel 2**. Fraksi gel meningkat dari 86,00 ± 0,80% pada EDTA 0,100 g menjadi 92,00 ± 0,80% pada EDTA 0,125 g dan 95,50 ± 0,80% pada EDTA 0,150 g. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar penambahan EDTA, semakin besar proporsi material yang tetap berada dalam jaringan hidrogel setelah proses pencucian dan pengeringan.

Tabel 2. Fraksi gel hidrogel pada variasi EDTA

Penambahan EDTA (g)	W_og (g)	Wg_1 (g)	Wg_2 (g)	Wg_3 (g)	*Fraksi gel (%)
0,100	2,0000	1,7200	1,7040	1,7360	86,00 ± 0,80
0,125	2,0000	1,8400	1,8240	1,8560	92,00 ± 0,80
0,150	2,0000	1,9100	1,8940	1,9260	95,50 ± 0,80

Data disajikan sebagai rata-rata ± SD (n = 3).

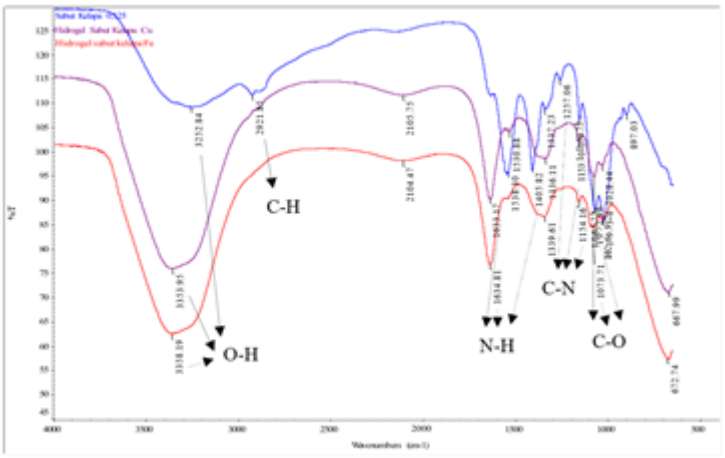
Nilai fraksi gel tertinggi pada EDTA 0,150 g menunjukkan bahwa formulasi tersebut menghasilkan jaringan yang paling stabil berdasarkan parameter fraksi gel. Namun, hasil tersebut tidak diikuti oleh peningkatan *swelling* maupun efisiensi adsorpsi. Fenomena ini penting karena menunjukkan bahwa stabilitas jaringan tidak identik dengan kemampuan adsorpsi yang tinggi. Jaringan yang terlalu rapat dapat mempertahankan material dengan lebih baik, tetapi sekaligus membatasi difusi air dan ion menuju bagian internal hidrogel. Hubungan antara densitas jaringan dan kemampuan perpindahan massa telah menjadi salah satu aspek penting dalam desain hidrogel adsorben [22], [23]. Dengan demikian, EDTA 0,150 g memberikan kestabilan jaringan tertinggi berdasarkan fraksi gel, sedangkan EDTA 0,125 g memberikan keseimbangan terbaik antara *swelling* dan adsorpsi pada kondisi penelitian ini.

Hasil fraksi gel memperkuat hasil *swelling* yang menunjukkan adanya perbedaan karakteristik jaringan hidrogel pada setiap variasi EDTA. Fraksi gel meningkat dari 86,00% pada EDTA 0,100 g menjadi 92,00% pada EDTA 0,125 g dan mencapai 95,50% pada EDTA 0,150 g. Peningkatan fraksi gel menunjukkan bahwa semakin banyak bagian hidrogel yang tetap berada dalam jaringan setelah proses pencucian, sehingga jaringan yang terbentuk menjadi lebih stabil. Namun, peningkatan stabilitas jaringan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kemampuan mengembang dalam air. Hal ini terlihat pada hidrogel dengan EDTA 0,150 g yang memiliki fraksi gel paling tinggi, tetapi nilai swelling paling rendah, yaitu 269,775%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa terdapat keseimbangan antara kestabilan jaringan dan kemampuan jaringan untuk mengembang, sehingga jumlah EDTA yang lebih tinggi tidak secara langsung menghasilkan *swelling* yang lebih besar.

3.5. Karakterisasi Spektroskopi FTIR

Spektra FTIR sampel ditampilkan pada **Gambar 4** dan hasil identifikasi dirangkum pada **Tabel 2**. Spektrum hidrogel menunjukkan pita pada 3252,84 cm^{-1} yang dikaitkan dengan vibrasi O–H/N–H, pita 2921,86 cm^{-1} yang berkaitan dengan C–H alifatik, 1405,82 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi tekukan N–H, 1065,75 cm^{-1} yang berkaitan dengan C–O, dan 1257,06 cm^{-1} yang berkaitan dengan C–N. Keberadaan gugus hidroksil dan amino menunjukkan adanya gugus polar yang berpotensi berinteraksi dengan ion logam. Literatur

menunjukkan bahwa gugus yang mengandung oksigen dan nitrogen merupakan salah satu komponen penting dalam pengikatan ion logam pada material berbasis selulosa dan kitosan [24].



Gambar 4. Spektra FTIR hidrogel sebelum dan setelah adsorpsi Cu(II) dan Fe(III).

Tabel 2. Bilangan gelombang utama FTIR hidrogel sebelum dan setelah adsorpsi

Gugus fungsi	Hidrogel (cm^{-1})	Setelah Cu(II) (cm^{-1})	Setelah Fe(III) (cm^{-1})
O–H/N–H	3252,84	3353,96	3358,19
C–H alifatik	2921,86	–	–
Tekukan N–H	1405,82	1633,17	1634,81
C–O	1065,75	1072,96	1073,71
C–N	1257,06	1153,00	1154,16

Setelah adsorpsi Cu(II), pita O–H/N–H bergeser dari 3252,84 menjadi 3353,96 cm^{-1}, sedangkan setelah adsorpsi Fe(III) bergeser menjadi 3358,19 cm^{-1}. Pergeseran tersebut menunjukkan perubahan lingkungan kimia gugus polar setelah kontak dengan ion logam. Perubahan juga terlihat pada pita C–O dan C–N. Fenomena perubahan pita FTIR setelah adsorpsi telah dilaporkan pada berbagai hidrogel berbasis selulosa dan material komposit, yang mengindikasikan keterlibatan gugus oksigen maupun nitrogen dalam interaksi dengan ion logam [25].

Perubahan bilangan gelombang setelah proses adsorpsi menunjukkan adanya perubahan lingkungan kimia pada gugus fungsi hidrogel setelah berinteraksi dengan ion logam. Pita O–H/N–H pada hidrogel sebelum adsorpsi teramati pada 3252,84 cm^{-1} dan bergeser menjadi 3353,96 cm^{-1} setelah kontak dengan Cu(II) serta 3358,19 cm^{-1} setelah kontak dengan Fe(III). Pergeseran pita tersebut menunjukkan bahwa lingkungan gugus yang mengandung O–H dan/atau N–H mengalami perubahan setelah kontak dengan ion logam. Selain itu, perubahan bilangan gelombang pada pita C–O dari 1065,75 cm^{-1} menjadi 1072,96 cm^{-1} setelah adsorpsi Cu(II) dan 1073,71 cm^{-1} setelah adsorpsi Fe(III) mengindikasikan perubahan lingkungan gugus yang mengandung oksigen. Pita C–N juga mengalami perubahan dari 1257,06 cm^{-1} menjadi 1153,00 cm^{-1} setelah adsorpsi Cu(II) dan 1154,16 cm^{-1} setelah adsorpsi Fe(III), yang menunjukkan perubahan lingkungan kimia pada gugus yang mengandung nitrogen. Perubahan pita O–H/N–H, C–O, dan C–N tersebut konsisten dengan kemungkinan keterlibatan gugus donor oksigen dan nitrogen dalam interaksi hidrogel dengan ion logam. Namun, perubahan spektrum FTIR saja belum dapat digunakan untuk memastikan terbentuknya ikatan koordinasi tertentu tanpa didukung oleh karakterisasi kimia tambahan.

3.6. Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi

Hasil perhitungan efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion logam dirangkum pada **Tabel 3.** Efisiensi adsorpsi Cu(II) meningkat dari 4,6054 ± 0,214% pada EDTA 0,100 g menjadi 13,8656 ± 0,386% pada EDTA 0,125 g, kemudian menurun menjadi 11,0730 ± 0,302% pada EDTA 0,150 g. Pola yang sama terjadi pada Fe(III), dengan efisiensi meningkat dari 9,6556 ± 0,327% menjadi 16,1172 ± 0,421%, kemudian turun menjadi 13,1866 ± 0,354%.

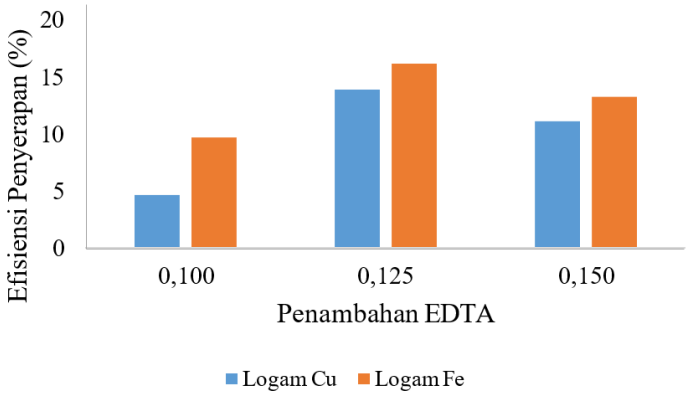
Tabel 3. Efisiensi dan kapasitas adsorpsi ion logam

EDTA (g)	Efisiensi adsorpsi untuk Cu(II) (%)	Kapasitas adsorpsi untuk Cu(II) (mg.g^{-1})	Efisiensi adsorpsi untuk Fe(III) (%)	Kapasitas adsorpsi untuk Fe(III) (mg.g^{-1})
0,100	4,6054 ± 0,214	1,132 ± 0,053	9,6556 ± 0,327	2,272 ± 0,077
0,125	13,8656 ± 0,386	3,410 ± 0,095	16,1172 ± 0,421	3,793 ± 0,099
0,150	11,0730 ± 0,302	2,723 ± 0,074	13,1866 ± 0,354	3,103 ± 0,083

**Data disajikan sebagai rata-rata ± SD (n = 3).*

Hasil tersebut menunjukkan bahwa EDTA 0,125 g memberikan kinerja adsorpsi terbaik di antara variasi yang diuji. Kondisi tersebut sejalan dengan nilai *swelling* tertinggi pada formulasi yang sama. *Swelling* yang lebih tinggi dapat meningkatkan penetrasi larutan ke dalam jaringan sehingga ion logam memiliki akses yang lebih besar terhadap situs aktif. Sebaliknya, penambahan EDTA hingga 0,150 g menghasilkan penurunan *swelling* dan peningkatan kerapuhan material, yang dapat mengindikasikan perubahan struktur jaringan yang kurang menguntungkan terhadap perpindahan massa. Konsep hubungan antara struktur jaringan, *swelling*, dan aksesibilitas situs aktif juga dilaporkan pada berbagai hidrogel selulosa [26], [27].

Perbandingan nilai efisiensi adsorpsi ditampilkan pada **Gambar 5**. Efisiensi untuk Fe(III) yang lebih tinggi dibandingkan Cu(II) pada seluruh variasi menunjukkan bahwa kedua ion memiliki interaksi yang berbeda terhadap jaringan hidrogel. Perbedaan ini tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan ukuran ion, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh hidrasi, spesiasi dalam larutan, sifat gugus donor, dan kecenderungan pembentukan kompleks. Penelitian pada hidrogel selulosa yang digunakan untuk Fe(III) juga menunjukkan bahwa material berbasis selulosa dapat menyediakan gugus aktif yang berinteraksi dengan ion besi [28].



Gambar 5. Efisiensi adsorpsi Cu(II) dan Fe(III)

Hasil adsorpsi menunjukkan bahwa hidrogel mampu mengadsorpsi ion Cu(II) dan Fe(III), dengan persentase adsorpsi yang berbeda pada setiap variasi konsentrasi EDTA. Perbedaan kemampuan adsorpsi tersebut berkaitan dengan keberadaan gugus fungsi aktif pada hidrogel yang dapat berinteraksi dengan ion logam. Kondisi pH larutan juga menjadi salah satu faktor yang memengaruhi proses adsorpsi. Berdasarkan pengukuran menggunakan pH meter sebelum proses adsorpsi, larutan berada pada kondisi asam dengan pH awal sekitar 4,8–5. Pada kondisi tersebut, gugus fungsi pada hidrogel, seperti –OH, $–NH_2$, dan gugus karboksilat dari EDTA, dapat mengalami protonasi maupun deprotonasi sebagian. Kondisi ini memengaruhi ketersediaan situs aktif untuk berinteraksi dengan ion Cu(II) dan Fe(III). Pada pH yang relatif asam, sebagian situs aktif dapat terprotonasi sehingga jumlah situs yang tersedia untuk mengikat ion logam menjadi lebih terbatas. Meskipun demikian, keberadaan gugus donor elektron dari EDTA tetap memungkinkan terjadinya interaksi/kompleksasi dengan ion logam.

Perbedaan persentase adsorpsi Cu(II) dan Fe(III) selanjutnya dapat dikaitkan dengan karakteristik masing-masing ion serta interaksinya dengan gugus aktif pada hidrogel. Kehadiran EDTA memberikan dasar kimia tambahan untuk interaksi dengan ion logam. EDTA dikenal sebagai ligan pengkelat, dan modifikasi material lignoselulosa dengan EDTA telah dilaporkan meningkatkan pengikatan Cu(II). Dastgerdi *et al*. memperoleh kapasitas adsorpsi Cu(II) sebesar 156,78 $mg.g^{-1}$ pada biomassa lignoselulosa yang difungsionalisasi EDTA dianhidrida. Hidrogel selulosa dengan komponen pengikat silang berbasis EDTA dapat mencapai kapasitas sorpsi Cu(II) hingga 102 $mg.g^{-1}$ [29]. Nilai kapasitas adsorpsi pada penelitian ini, yaitu 3,410 ± 0,095 $mg.g^{-1}$ untuk Cu(II) dan 3,793 ± 0,099 $mg.g^{-1}$ untuk Fe(III), lebih rendah dibandingkan beberapa hidrogel selulosa termodifikasi yang dilaporkan sebelumnya. Sebagai contoh, hidrogel CMC termodifikasi yang dilaporkan pada 2022 memiliki kapasitas Cu(II) sebesar 260,74 $mg.g^{-1}$, sedangkan hidrogel komposit kitosan–selulosa berfosfonat yang dilaporkan pada 2024 mencapai 74,29 $mg.g^{-1}$ untuk Cu(II) [30].

Perbedaan tersebut tidak serta-merta menunjukkan bahwa material penelitian ini kurang baik, karena kondisi eksperimen sangat berbeda. Kapasitas adsorpsi dipengaruhi oleh konsentrasi awal, pH, dosis adsorben, waktu kontak, struktur pori, tingkat fungsionalisasi, jenis gugus aktif, serta kondisi kesetimbangan. Studi mengenai hidrogel selulosa menunjukkan bahwa perubahan struktur dan tingkat modifikasi dapat meningkatkan maupun menurunkan kapasitas adsorpsi bergantung pada keseimbangan antara jumlah situs aktif dan aksesibilitasnya.

Hubungan antara *swelling*, fraksi gel, dan kemampuan adsorpsi menunjukkan bahwa karakteristik jaringan hidrogel berperan penting dalam proses penyerapan ion logam. Hidrogel dengan EDTA 0,125 g memiliki nilai *swelling* tertinggi sebesar 444,245% dan pada kondisi yang sama menunjukkan efisiensi adsorpsi tertinggi, yaitu 13,8656% untuk Cu(II) dan 16,1172% untuk Fe(III). Tingginya kemampuan mengembang memungkinkan lebih banyak air masuk ke dalam jaringan hidrogel sehingga lingkungan internal hidrogel menjadi lebih mudah diakses oleh ion logam dari larutan. Sebaliknya, pada penambahan EDTA 0,150 g, fraksi gel meningkat hingga 95,50%, tetapi *swelling* menurun menjadi 269,775% dan efisiensi adsorpsi juga menurun menjadi 11,0730% untuk Cu(II) dan 13,1866% untuk Fe(III). Hasil tersebut menunjukkan bahwa jaringan yang lebih stabil atau lebih rapat tidak selalu menghasilkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena aksesibilitas ion terhadap situs aktif dapat menjadi lebih terbatas. Oleh karena itu, berdasarkan hasil penelitian ini, penambahan EDTA sebesar 0,125 g menghasilkan keseimbangan yang lebih sesuai antara kestabilan jaringan, kemampuan mengembang, dan aksesibilitas terhadap ion logam dibandingkan variasi EDTA lainnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa fraksi gel dan rasio *swelling* tidak selalu menunjukkan kecenderungan yang sama. Penambahan EDTA dari 0,100 g menjadi 0,150 g meningkatkan fraksi gel dari 86,00 ± 0,80% menjadi 95,50 ± 0,80%, sedangkan rasio *swelling* justru mencapai nilai maksimum pada 0,125 g dan menurun pada 0,150 g. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan jaringan hidrogel tidak secara langsung menunjukkan kemampuan jaringan dalam menyerap air atau menyediakan akses terhadap situs adsorpsi. Pada EDTA 0,125 g, keseimbangan antara kestabilan jaringan dan ruang internal hidrogel menghasilkan *swelling* tertinggi serta efisiensi adsorpsi tertinggi untuk kedua ion logam. Sebaliknya, pada EDTA 0,150 g, fraksi gel yang lebih tinggi disertai penurunan *swelling* dapat menunjukkan bahwa jaringan menjadi lebih stabil tetapi aksesibilitas ruang internal terhadap air dan ion logam menjadi lebih terbatas. Oleh karena itu, kemampuan adsorpsi dalam penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai hasil keseimbangan antara jumlah situs fungsional, kestabilan jaringan, dan aksesibilitas situs tersebut terhadap ion logam.

4. Kesimpulan

Hidrogel berbasis selulosa sabut kelapa–kitosan dengan variasi penambahan EDTA sebesar 0,100; 0,125; dan 0,150 g berhasil dibuat melalui empat siklus pembekuan–pelelehan. Ekstraksi 20 g sabut kelapa menghasilkan 6,7712 g selulosa dengan rendemen sebesar 33,86%. Peningkatan penambahan EDTA meningkatkan fraksi gel dari 86,00 ± 0,80% menjadi 95,50 ± 0,80%, tetapi tidak menghasilkan peningkatan rasio *swelling* secara linier. Rasio *swelling* tertinggi diperoleh pada penambahan EDTA 0,125 g, yaitu 444,245 ± 2,328%. Karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan gugus O–H/N–H, C–H, C–O, dan C–N serta adanya perubahan bilangan gelombang setelah kontak dengan ion Cu(II) dan Fe(III), yang menunjukkan perubahan lingkungan kimia gugus fungsional hidrogel setelah proses adsorpsi. Efisiensi adsorpsi tertinggi pada kondisi penelitian ini diperoleh pada penambahan EDTA 0,125 g, yaitu 13,8656 ± 0,386% untuk Cu(II) dan 16,1172 ± 0,421% untuk Fe(III), dengan kapasitas adsorpsi masing-masing sebesar 3,410 ± 0,095 dan 3,793 ± 0,099 mg. g^{-1}. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi jumlah EDTA memengaruhi keseimbangan antara kestabilan jaringan, kemampuan *swelling*, dan aksesibilitas situs adsorpsi, sehingga penambahan EDTA 0,125 g menghasilkan kombinasi karakteristik fisik dan performa adsorpsi yang paling tinggi pada kondisi eksperimen yang digunakan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Kimia Analitik, Laboratorium Kimia Anorganik, dan Laboratorium Riset Fakultas Sains dan Teknologi UIN Alauddin Makassar serta Laboratorium Biofarmaka Fakultas Farmasi Universitas Hasanuddin atas dukungan fasilitas penelitian.

Daftar Pustaka

[1] J. Gao, L. Zhang, S. Liu, and X. Liu, “Enhanced adsorption of copper ions from aqueous solution by two-step DTPA-modified magnetic cellulose hydrogel beads,” International Journal of Biological Macromolecules, vol. 211, pp. 689–699, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.05.073.

[2] V. B. Lunardi, S. P. Santoso, A. E. Angkawijaya, K.-C. Cheng, P. L. Tran-Nguyen, A. W. Go, Y. Nakamura, S.-P. Lin, H.-Y. Hsu, M. Yuliana, F. E. Soetaredjo, and S. Ismadji, “Synthesis of cellulose hydrogel by utilizing agricultural waste and zeolite for adsorption of copper metal ions,” Industrial Crops and Products, vol. 210, Art. no. 118179, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.118179.

[3] F. Persano, C. Malitesta, and E. Mazzotta, “Cellulose-based hydrogels for wastewater treatment: A focus on metal ions removal,” Polymers, vol. 16, no. 9, Art. no. 1292, May 2024, doi: 10.3390/polym16091292.

[4] L. Yang, L. Bao, T. Dong, H. Xie, X. Wang, H. Wang, J. Wu, and C. Hao, “Adsorption properties of cellulose/guar gum/biochar composite hydrogel for Cu^{2+}, Co^{2+} and methylene blue,” International Journal of Biological Macromolecules, vol. 242, Art. no. 125021, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.125021.

[5] S.-C. Yang, Y. Liao, K. G. Karthikeyan, and X.-J. Pan, “Mesoporous cellulose-chitosan composite hydrogel fabricated via the co-dissolution-regeneration process as biosorbent of heavy metals,” Environmental Pollution, vol. 286, Art. no. 117324, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117324.

[6] J. Sun, R. Hu, X. Zhao, T. Liu, and Z. Bai, “A novel chitosan/cellulose phosphonate composite hydrogel for ultrafast and efficient removal of Pb(II) and Cu(II) from wastewater,” Carbohydrate Polymers, vol. 336, Art. no. 122104, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122104.

[7] H. Y. Xu, X. W. Yang, R. P. Yu, T. Zuo, Q. Y. Liu, S. P. Jia, and L. Y. Jia, “Adsorption properties of cellulose-derived hydrogel and magnetic hydrogels from Sophora flavescens on Cu^{2+} and Congo red,” International Journal of Biological Macromolecules, vol. 274, Art. no. 133209, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133209.

[8] H. Dastgerdi, F. Doulati Ardejani, and N. M. Mahmoodi, “Lignocellulosic biomass functionalized with EDTA dianhydride for removing Cu(II) and dye from wastewater: Batch and fixed-bed column adsorption,” Minerals Engineering, vol. 204, Art. no. 108423, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108423.

[9] T. A. Do, A. T. Phung Thi, T. H. Le, D. D. Van, T. K. Nguyen, and Q. V. Nguyen, “Cellulose nanomaterials functionalized with carboxylic group extracted from lignocellulosic agricultural waste: Isolation and Cu(II)

adsorption for antimicrobial application," ACS Omega, vol. 10, no. 6, pp. 6234–6243, Feb. 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c11464.

[10] M. K. Grewal, A. Fatona, Y. Su, J. Ungureanu, and J. M. Moran-Mirabal, "Tetrahydrazide-EDTA cross-linked cellulose hydrogels for water treatment by heavy metal chelation," ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 17, no. 27, pp. 39075–39088, Jul. 2025, doi: 10.1021/acsami.5c06439.

[11] M. Banza and H. Rutto, "Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling removal of Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} and Cd^{2+} ions from synthetic acid mine drainage by nanocomposite cellulose hydrogel," Journal of Environmental Science and Health, Part A, vol. 57, no. 2, pp. 117–129, 2022, doi: 10.1080/10934529.2022.2036552.

[12] J. Chen, X. Wang, X. Huang, Z. Tong, J. Zhou, Y. Shen, and C. Hao, "Construction of cellulose-based hydrogel compounded with modified kaolin and its removal performance for heavy metal ions and dyes in water," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 306, Art. no. 141398, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.141398.

[13] H. S. Tohamy, M. El-Sakhawy, B. Strachota, A. Strachota, E. Pavlova, S. Mares Barbosa, and S. Kamel, "Temperature- and pH-responsive super-absorbent hydrogel based on grafted cellulose and capable of heavy metal removal from aqueous solutions," Gels, vol. 9, no. 4, Art. no. 296, Apr. 2023, doi: 10.3390/gels9040296.

[14] N. C. Joshi, A. Joshi, D. Mitra, P. Gururani, N. Kumar, and H. K. Joshi, "Removal of heavy metals using cellulose-based materials: A mini-review," Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, vol. 21, Art. no. 100942, 2024, doi: 10.1016/j.enmm.2024.100942.

[15] K. Sharma, P. Choudhary, A. Majeed, S. Guleria, M. Kumar, A. K. Rana, and G. Rajauria, "Cellulose based membranes, hydrogels and aerogels for water treatment application," Industrial Crops and Products, vol. 225, Art. no. 120474, 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.120474.

[16] C. Yi, H.-Y. Niu, L. Sui, J.-J. Zhu, Y. Tian, C.-G. Niu, Z.-L. Chen, H. Wei, and D.-W. Huang, "A low-cost bio-based cellulose composite hydrogel with cross-linked structures for efficient capture of heavy metal ions," Separation and Purification Technology, vol. 358, Art. no. 130213, 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2024.130213.

[17] M. Li, P. Zhang, J. Mao, J. Li, Y. Zhang, B. Xu, J. Zhou, Q. Cao, and H. Xiao, "Construction of cellulose-based hybrid hydrogel beads containing carbon dots and their high performance in the adsorption and detection of mercury ions in water," Journal of Environmental Management, vol. 359, Art. no. 121076, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121076.

[18] J. Li, Q. Zhang, B. Chen, F. Li, and C. Pang, "Co-precipitation fabrication of cellulose/chitosan-aniline grafted composites for efficient removal of Pb^{2+} ions from aqueous solution," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 295, Art. no. 139383, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.139383.

[19] T. B. da Costa, P. H. Camani, R. R. Ferreira, A. G. Souza, M. G. A. Vieira, and D. S. Rosa, "Sustainable starch–microcellulose composite hydrogels for efficient removal of heavy metals from water," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 317, pt. 2, Art. no. 144710, 2025, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144710.

[20] C. D. Stachurski, N. E. Larm, A. J. Gulbrandson, P. C. Trulove, and D. P. Durkin, "Fiber welded EDTA-modified cellulose for remediation of heavy metal ions," Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, vol. 7, Art. no. 100504, 2024, doi: 10.1016/j.carpta.2024.100504.

[21] S. Rashidi, E. Ghorbani-Kalhor, B. Rashidzadeh, and J. Abolhasani, "Comparative adsorption of Cu(II), Hg(II), Co(II), and Ni(II) ions on novel magnetic chitosan/cellulose/laponite RD nanocomposite hydrogel," International Journal of Environmental Analytical Chemistry, vol. 104, no. 13, pp. 3098–3121, 2024, doi: 10.1080/03067319.2022.2077105.

[22] Q. Yang, J. Zhang, H. Yin, J. Guo, S. Lv, and Y. Li, "MXene/cellulose hydrogel composites: Preparation and adsorption properties of Pb^{2+}," Polymers, vol. 16, no. 2, Art. no. 189, Jan. 2024, doi: 10.3390/polym16020189.

[23] D. Zhao, H. Deng, W. Wang, L. Hu, S. Ye, J. Fu, and S. Zhang, "Synthesis, characterization and adsorption of Pb(II), Cd(II) and Cu(II) by red mud/polyacrylic acid/sodium carboxymethyl cellulose hydrogel," Arabian Journal of Chemistry, vol. 18, no. 1, Art. no. 106067, 2025, doi: 10.1016/j.arabjc.2024.106067.

[24] P. Singh, P. P. Pande, A. Chaurasiya, N. Kushwaha, and K. K. Dey, “Synthesis and characterization of cellulose-derived superabsorbent hydrogel and its applications in the treatment of wastewater containing heavy metal ions,” Journal of Dispersion Science and Technology, vol. 47, no. 3, pp. 563–578, 2025, doi: 10.1080/01932691.2024.2417684.

[25] S. Fujita, R. Sasa, N. Kinoshita, R. Kishimoto, and H. Kono, “Nano-fibrillated bacterial cellulose nanofiber surface modification with EDTA for the effective removal of heavy metal ions in aqueous solutions,” Materials, vol. 18, no. 2, Art. no. 374, Jan. 2025, doi: 10.3390/ma18020374.

[26] A. L. Obsa, N. T. Shibeshi, E. Mulugeta, and G. A. Workeneh, “Eco-friendly composite hydrogel based on cellulose and bentonite for removal of lead(II): Kinetics and isotherm studies,” Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, vol. 9, Art. no. 100637, 2025, doi: 10.1016/j.carpta.2024.100637.

[27] H. Zhang, X. Yang, X. Zhang, W. Liu, M. Fan, and L. Wang, “Functionalized cyclodextrin/carboxymethyl cellulose composite hydrogel with double network structure for adsorption of heavy metal ions in wastewater,” Molecules, vol. 29, no. 22, Art. no. 5414, Nov. 2024, doi: 10.3390/molecules29225414.

[28] A. K. Saleh, K. M. Aboelghait, E. M. El-Fakharany, and H. El-Gendi, “Multifunctional engineering of Mangifera indica L. peel extract-modified bacterial cellulose hydrogel: Unveiling novel strategies for enhanced heavy metal sequestration and cytotoxicity evaluation,” International Journal of Biological Macromolecules, vol. 278, pt. 2, Art. no. 134874, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.134874.

[29] R. Rajshree, R. Bansal, Baldev, V. Subbaramaiah, M. K. Jat, and M. Nemiwal, “Epichlorohydrin-crosslinked chitosan-cellulose composite beads for lead ions removal from aqueous media,” Inorganic Chemistry Communications, vol. 183, pt. 1, Art. no. 115778, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.inoche.2025.115778.

[30] J. Kushwaha, R. Singh, “Cellulose hydrogel and its derivatives: A review of application in heavy metal adsorption,” Inorganic Chemistry Communications, vol. 152, Art. no. 110721, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.inoche.2023.110721.