

*Potential of Cellulose from Agricultural Biomass as an Eco-Friendly
Adsorbent for Aquatic Remediation*

**Potensi Selulosa dari Biomassa Pertanian sebagai Adsorben Ramah
Lingkungan untuk Remediasi Perairan**

Nudia Tuljannah¹, Siti Yasya Ey Fathanah², Kartini J³, Afifah Nur Fadhillah⁴, Winda⁵

^{1,2,3,4,5}Institut Teknologi dan Kesehatan Permata Ilmu Maros, Maros, Indonesia

Article Info

Corresponding Author:

Nudia Tuljannah

✉ nudiatuljannah@itkpi.ac.id

History:

Submitted: 20-05-2026

Revised: 15-06-2026

Accepted: 25-06-2026

Published: 30-06-2026

Keywords:

Adsorbent; Aquatic; Biomass;
Cellulose; Remediation.

Kata Kunci:

Adsorben; Biomassa; Perairan;
Remediasi; Selulosa.

Abstract

Water pollution caused by heavy metals and other contaminants has become an increasingly serious environmental issue due to industrial, agricultural, and domestic activities. These pollutants can degrade water quality, disrupt aquatic ecosystems, and pose significant risks to human health through bioaccumulation. Adsorption technology using biomass-based materials has emerged as a promising approach because it is environmentally friendly, cost-effective, renewable, and widely available. Cellulose, the primary component of lignocellulosic biomass, contains abundant hydroxyl (-OH) functional groups that provide active sites for the adsorption of various aquatic pollutants. This study aimed to evaluate the potential of cellulose derived from agricultural biomass as an eco-friendly adsorbent for aquatic remediation based on the cellulose content of several biomass sources. A quantitative descriptive method was employed through comparative analysis of cellulose content in corn cobs, coconut coir, and rice husks obtained from experimental studies. The results revealed that coconut coir possessed the highest cellulose content (54.30%), followed by corn cobs (36.48%) and rice husks (22.44%). Differences in cellulose content indicate variations in the availability of hydroxyl functional groups that may influence adsorption performance toward aquatic pollutants. Therefore, agricultural biomass, particularly coconut coir, demonstrates considerable potential as an environmentally friendly adsorbent to support effective and sustainable aquatic remediation technologies.

Abstrak

[Pencemaran perairan akibat logam berat dan senyawa pencemar lainnya merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat seiring dengan perkembangan aktivitas industri, pertanian, dan domestik. Keberadaan polutan tersebut dapat menurunkan kualitas perairan, mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik, serta membahayakan kesehatan manusia melalui proses bioakumulasi. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah teknologi adsorpsi menggunakan material berbasis biomassa karena bersifat ramah lingkungan, ekonomis, mudah diperoleh, dan dapat diperbarui. Selulosa merupakan komponen utama biomassa lignoselulosa yang memiliki gugus hidroksil (-OH) aktif sehingga berpotensi mengadsorpsi berbagai jenis polutan di perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi selulosa dari biomassa pertanian sebagai adsorben ramah lingkungan untuk remediasi perairan berdasarkan kandungan selulosa pada beberapa jenis biomassa. Penelitian menggunakan metode deskriptif kuantitatif melalui analisis komparatif terhadap

kandungan selulosa biomassa tongkol jagung, sabut kelapa, dan sekam padi yang diperoleh dari hasil penelitian eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sabut kelapa memiliki kandungan selulosa tertinggi sebesar 54,30%, diikuti tongkol jagung sebesar 36,48%, dan sekam padi sebesar 22,44%. Perbedaan kandungan selulosa tersebut menunjukkan variasi jumlah gugus hidroksil yang berpotensi memengaruhi kemampuan adsorpsi terhadap polutan di perairan. Dengan demikian, biomassa pertanian, khususnya sabut kelapa, berpotensi dikembangkan sebagai adsorben ramah lingkungan untuk mendukung teknologi remediasi perairan yang efektif dan berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Pencemaran perairan merupakan permasalahan lingkungan yang semakin kompleks akibat meningkatnya aktivitas industri, pertanian, pertambangan, dan domestik. Aktivitas tersebut menghasilkan berbagai limbah seperti logam berat, zat warna sintetis, pestisida, dan senyawa organik yang bermuara ke badan air tanpa pengolahan memadai. Akumulasi polutan ini menurunkan kualitas air, mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik, serta meningkatkan risiko gangguan kesehatan manusia melalui bioakumulasi dan biomagnifikasi dalam rantai makanan. Kondisi ini menjadikan pencemaran perairan sebagai isu penting dalam pengelolaan sumber daya air berkelanjutan (Aslam dkk., 2023; Abubakar dkk., 2024).

Berbagai teknologi pengolahan air telah dikembangkan, seperti presipitasi kimia, koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, pertukaran ion, proses oksidasi lanjut, dan adsorpsi. Namun, metode-metode tersebut masih memiliki keterbatasan seperti biaya tinggi, konsumsi energi besar, serta potensi pembentukan limbah sekunder. Selain memiliki biaya yang relatif rendah, adsorben berbasis biomassa juga mendukung konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah pertanian sebagai material bernilai tambah (Yadav dkk., 2024).

Oleh karena itu, pendekatan berbasis material alami dari biomassa semakin banyak dikaji sebagai alternatif yang lebih berkelanjutan (Aslam dkk., 2023).

Biomassa lignoselulosa merupakan salah satu sumber daya alam yang melimpah dan banyak dihasilkan dari aktivitas pertanian, kehutanan, dan agroindustri (Yadav dkk., 2024). Biomassa ini tersusun atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dengan proporsi yang berbeda-beda tergantung jenis tanaman dan kondisi pertumbuhannya. Selulosa merupakan komponen utama yang paling stabil dan dominan, serta memiliki peran penting dalam menentukan sifat fisik dan kimia biomassa secara keseluruhan (Mergbi dkk., 2023; Sharma dkk., 2025).

Selulosa sebagai polimer alami tersusun atas rantai β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-glukosa yang membentuk struktur kristalin dengan banyak gugus hidroksil (-OH) pada permukaannya. Gugus ini memberikan sifat reaktif melalui kemampuan membentuk ikatan hidrogen dan interaksi antarmolekul lainnya. Karena struktur kimianya yang khas, selulosa menjadi komponen kunci yang menentukan potensi pemanfaatan biomassa dalam berbagai aplikasi berbasis material alami (Aslam dkk., 2023; El Mahdaoui dkk., 2024). Gugus hidroksil pada selulosa dapat dimodifikasi untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap berbagai jenis polutan anorganik maupun organik di lingkungan perairan (Tuljannah dkk., 2024).

Selain itu, kandungan selulosa dalam biomassa sangat bervariasi tergantung jenis tanaman, bagian tanaman, umur panen, serta kondisi lingkungan tumbuh. Variasi ini menyebabkan setiap biomassa memiliki karakteristik kimia dan fisik yang berbeda, termasuk dalam hal rasio selulosa terhadap hemiselulosa dan lignin. Oleh karena itu, kajian komparatif kandungan selulosa antar biomassa menjadi penting untuk memahami potensi dasar masing-masing material (Jayakumar dkk., 2023).

Indonesia sebagai negara agraris menghasilkan biomassa pertanian dalam jumlah besar, seperti tongkol jagung, sabut kelapa, dan sekam padi. Ketiga biomassa ini merupakan limbah lignoselulosa yang tersedia melimpah namun pemanfaatannya masih terbatas dan cenderung belum optimal. Padahal, perbedaan struktur jaringan dan komposisi kimia pada masing-masing biomassa menyebabkan variasi kandungan selulosa yang signifikan, sehingga berpotensi memberikan karakteristik material yang

berbeda (Mergbi dkk., 2023; Sharma dkk., 2025). Pemanfaatan limbah lignoselulosa sebagai adsorben juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah padat sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan (Aniza dkk., 2023).

Tongkol jagung, sabut kelapa, dan sekam padi dipilih dalam penelitian ini karena merupakan biomassa pertanian yang paling banyak tersedia di Indonesia dan memiliki struktur lignoselulosa yang berbeda. Tongkol jagung umumnya memiliki struktur relatif lebih porous, sabut kelapa kaya akan serat panjang dengan kandungan lignin tinggi (Li dkk., 2024), sedangkan sekam padi memiliki kandungan silika yang cukup tinggi di samping komponen selulosanya. Perbedaan ini menjadikan ketiganya menarik untuk dibandingkan dari sisi kandungan selulosa sebagai komponen utama biomassa (Jayakumar dkk., 2023; Sharma dkk., 2025).

Meskipun pemanfaatan biomassa lignoselulosa telah banyak diteliti, kajian yang secara khusus membandingkan kandungan selulosa alami dari beberapa biomassa pertanian masih relatif terbatas. Padahal, informasi ini penting sebagai dasar dalam menentukan potensi awal biomassa sebelum dilakukan proses modifikasi lebih lanjut untuk berbagai aplikasi material berbasis selulosa.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kandungan selulosa dari biomassa pertanian berupa tongkol jagung, sabut kelapa, dan sekam padi. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran ilmiah mengenai biomassa yang memiliki kandungan selulosa paling potensial serta menjadi dasar untuk pengembangan penelitian lanjutan berbasis material lignoselulosa.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk menentukan kandungan selulosa pada beberapa biomassa pertanian sebagai dasar evaluasi potensinya sebagai adsorben ramah lingkungan untuk remediasi perairan. Penelitian dilaksanakan pada Januari–Maret di Laboratorium Jurusan Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan meliputi neraca analitik, oven, hot plate, magnetic stirrer, blender, ayakan, gelas beker, gelas ukur, labu Erlenmeyer, corong Buchner, corong kaca, kertas saring, desikator, spatula, cawan porselen, serta peralatan gelas laboratorium lainnya.

Bahan yang digunakan terdiri atas biomassa pertanian berupa tongkol jagung (*Zea mays* L.), sabut kelapa (*Cocos nucifera* L.), dan sekam padi (*Oryza sativa* L.), natrium hidroksida (NaOH), hidrogen peroksida (H_2O_2), akuades, dan bahan kimia pendukung lainnya dengan kualitas pro analysis (p.a.).

Prosedur Penelitian

Sampel biomassa berupa tongkol jagung (*Zea mays* L.), sabut kelapa (*Cocos nucifera* L.), dan sekam padi (*Oryza sativa* L.) dicuci menggunakan air mengalir untuk menghilangkan kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan hingga mencapai berat konstan. Sampel yang telah kering dipotong menjadi ukuran lebih kecil, dihaluskan menggunakan blender, dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel yang homogen (Tsfaye dkk., 2025).

Isolasi selulosa dilakukan melalui proses delignifikasi menggunakan larutan NaOH untuk menghilangkan lignin dan sebagian hemiselulosa, kemudian dilanjutkan dengan proses bleaching menggunakan larutan H_2O_2 untuk memperoleh fraksi selulosa. Seluruh biomassa diperlakukan menggunakan prosedur yang sama (Mayta dkk., 2024; Tuljannah dkk., 2024).

Kandungan selulosa ditentukan menggunakan metode Chesson–Datta melalui analisis gravimetri. Persentase kandungan selulosa dihitung berdasarkan perubahan bobot residu setelah perlakuan kimia bertahap hingga diperoleh fraksi selulosa (Diez dkk., 2020).

Analisis Data

Data kandungan selulosa yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel dan diagram batang, kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk membandingkan kandungan selulosa pada setiap biomassa. Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi potensi biomassa pertanian sebagai adsorben ramah lingkungan dalam aplikasi remediasi perairan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kandungan selulosa dilakukan pada tiga jenis biomassa pertanian, yaitu sabut kelapa, tongkol jagung, dan sekam padi. Hasil penelitian menunjukkan adanya variasi kandungan selulosa antar biomassa yang diuji.

Tabel 1. Kandungan selulosa biomassa pertanian

No.	Jenis Biomassa	Kandungan Selulosa (%)	Keterangan
1.	Sabut kelapa	54,30	Tertinggi, serat padat dan kuat
2.	Tongkol jagung	36,48	Struktur lebih porous
3.	Sekam padi	22,44	Terendah, struktur kompak

Hasil menunjukkan bahwa sabut kelapa memiliki kandungan selulosa paling tinggi (54,30%), diikuti tongkol jagung (36,48%), dan sekam padi (22,44%). Perbedaan ini mengindikasikan bahwa setiap biomassa memiliki karakteristik anatomi, struktur jaringan, serta proporsi komponen lignoselulosa yang berbeda, yang secara langsung memengaruhi kandungan selulosa di dalamnya.

Perbedaan tersebut tidak bersifat kebetulan, melainkan berkaitan erat dengan fungsi biologis masing-masing bagian tanaman. Sabut kelapa merupakan bagian mesokarp yang berfungsi sebagai jaringan penguat mekanik buah kelapa. Dalam konteks anatomi tumbuhan, jaringan penguat umumnya tersusun atas serat selulosa dalam jumlah tinggi untuk memberikan kekuatan struktural dan ketahanan terhadap tekanan mekanik. Hal ini menjelaskan mengapa sabut kelapa menunjukkan kandungan selulosa paling dominan dibandingkan biomassa lainnya (Mergbi dkk., 2023; Sharma dkk., 2025).

Kandungan selulosa yang tinggi umumnya berkorelasi dengan meningkatnya jumlah situs aktif adsorpsi sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi penjerapan kontaminan (Tyagi, 2024). Tongkol jagung memiliki kandungan selulosa pada kategori sedang karena merupakan jaringan batang yang bersifat heterogen. Struktur ini terdiri atas campuran jaringan parenkim dan serat dengan tingkat kerapatan yang lebih rendah dibandingkan jaringan penguat utama. Akibatnya, distribusi selulosa menjadi lebih tersebar dan tidak terkonsentrasi, sehingga kandungan totalnya berada pada tingkat menengah.

Sementara itu, sekam padi memiliki kandungan selulosa paling rendah. Hal ini disebabkan oleh fungsinya sebagai jaringan pelindung biji yang memiliki struktur lebih kompak dan diperkuat oleh komponen anorganik seperti silika. Keberadaan komponen ini secara relatif menurunkan proporsi selulosa dalam struktur dinding sel, sehingga menghasilkan nilai kandungan yang lebih rendah dibandingkan dua biomassa lainnya (Jayakumar dkk., 2023).

Selain kandungan selulosa, luas permukaan spesifik dan porositas biomassa juga menjadi faktor penting yang memengaruhi kapasitas adsorpsi suatu material (Sharma dkk., 2025). Aktivasi kimia maupun fisika diketahui mampu meningkatkan karakteristik permukaan biomassa sehingga memperbesar kemampuan adsorpsi terhadap logam berat dan zat warna (Rofikoh dkk., 2023).

Untuk memperjelas perbedaan tersebut, karakteristik struktur biomassa dan keterkaitannya dengan kandungan selulosa dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan struktur biomassa dan kandungan selulosa

No.	Jenis Biomassa	Fungsi Biologis	Struktur Dominan	Dampak terhadap Selulosa
1.	Sabut kelapa	Penguat mekanik	Serat panjang padat	Akumulasi selulosa tinggi
2.	Tongkol jagung	Batang/jaringan campuran	Porous/heterogen	Distribusi selulosa sedang
3.	Sekam padi	Pelindung biji	Kompak + silika	Proporsi selulosa rendah

Jika ditinjau dari teori lignoselulosa, biomassa tersusun atas tiga komponen utama, yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Selulosa berperan sebagai komponen struktural utama yang memberikan kekuatan mekanik pada dinding sel tanaman. Dengan demikian, perbedaan kandungan selulosa antar biomassa mencerminkan variasi proporsi struktur biologis dalam masing-masing jaringan tanaman.

Selain aspek struktural, secara kimia selulosa merupakan polimer linear β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-glukosa yang memiliki gugus hidroksil (-OH) pada setiap unit monomer. Gugus hidroksil ini memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen intra dan intermolekul yang berperan dalam kestabilan struktur selulosa.

Semakin tinggi kandungan selulosa, semakin besar jumlah gugus hidroksil yang tersedia dalam biomassa, sehingga meningkatkan potensi interaksi permukaan secara kimia (Aslam dkk., 2023; El Mahdaoui et al., 2024).

Untuk memperjelas hubungan kuantitatif antar biomassa, dilakukan analisis selisih dan rasio kandungan selulosa dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Selisih dan rasio kandungan selulosa antar biomassa

No.	Perbandingan	Selisih (%)	Rasio
1.	Sabut Kelapa: Tongkol jagung	17,82	1,49 kali
2.	Sabut Kelapa: Sekam padi	31,86	2,41 kali
3.	Tongkol Jagung – Sekam padi	14,04	1,63 kali

Data tersebut menunjukkan bahwa sabut kelapa memiliki dominasi kandungan selulosa yang paling signifikan dibandingkan biomassa lainnya, baik secara absolut maupun relatif. Selisih terbesar terjadi antara sabut kelapa dan sekam padi, yang menunjukkan perbedaan struktur dan komposisi yang sangat kontras.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa biomassa dengan fungsi biologis sebagai jaringan penguat cenderung memiliki kandungan selulosa yang lebih tinggi dibandingkan biomassa pelindung atau jaringan campuran. Dengan demikian, sabut kelapa dapat dikategorikan sebagai biomassa paling potensial sebagai sumber selulosa alami dibandingkan tongkol jagung dan sekam padi.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Mergbi dkk. (2023) yang menyatakan bahwa biomassa lignoselulosa dengan struktur serat yang lebih kuat memiliki kandungan selulosa lebih tinggi. Hasil ini juga didukung oleh Sharma dkk. (2025) yang menegaskan bahwa variasi struktur jaringan tanaman berpengaruh signifikan terhadap komposisi selulosa. Selain itu, Jayakumar dkk. (2023) menjelaskan bahwa perbedaan fungsi biologis jaringan tanaman menjadi faktor utama yang menentukan distribusi komponen lignoselulosa, khususnya selulosa, dalam biomassa pertanian. Pengembangan adsorben berbasis biomassa dipandang sebagai salah satu teknologi ramah lingkungan yang memiliki prospek besar untuk mendukung pengolahan air secara berkelanjutan (El Mahdaoui dkk., 2024).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kandungan selulosa pada biomassa pertanian (sabut kelapa, tongkol jagung, dan sekam padi), dapat disimpulkan bahwa terdapat variasi kandungan selulosa yang menunjukkan karakteristik kimia biomassa yang berbeda-beda. Sabut kelapa memiliki kandungan selulosa paling tinggi (54,30%), diikuti tongkol jagung (36,48%), dan sekam padi (22,44%). Hal ini mengindikasikan bahwa jenis biomassa berpengaruh terhadap proporsi selulosa sebagai komponen utama lignoselulosa.

Secara umum, biomassa dengan struktur serat yang lebih padat cenderung memiliki kandungan selulosa lebih tinggi dibandingkan biomassa dengan struktur yang lebih kompak atau heterogen. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik biologis dan struktural biomassa merupakan faktor utama yang menentukan variasi kandungan selulosa.

Dengan demikian, sabut kelapa dapat digeneralisasikan sebagai biomassa yang paling potensial sebagai sumber selulosa dibandingkan tongkol jagung dan sekam padi berdasarkan hasil analisis yang dilakukan. Temuan ini memberikan gambaran awal mengenai pemilihan biomassa berbasis kandungan selulosa untuk pengembangan material berbasis selulosa di masa mendatang.

Sebagai rekomendasi, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan karakterisasi lebih lanjut terhadap sifat fisik dan kimia selulosa yang diperoleh, seperti kristalinitas, morfologi permukaan, serta derajat polimerisasi, agar potensi pemanfaatannya dapat dievaluasi secara lebih komprehensif dalam berbagai aplikasi material berbasis biomassa.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, M. Y., Ahmad, K. B., Mathew, T. S., Shamsudden, R., Muhammad, H. M., Haladu, M., & Adam, A. B. (2024). Heavy metal pollution in aquatic ecosystems: A review of toxic impacts and remediation strategies. *Kwaghe International Journal of Sciences and Technology*, 1(1), 416–427. <https://doi.org/10.58578/KIJST.v1i1.3621>
- Aniza, R., Chen, W.-H., Pétrissans, A., Hoang, A. T., Ashokkumar, V., & Pétrissans, M. (2023). A review of biowaste remediation and valorization for environmental sustainability: Artificial intelligence approach. *Environmental Pollution*, 322, 121363. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121363>
- Aslam, A. A., Hassan, S. U., Saeed, M. H., Kokab, O., Ali, Z., Nazir, M. S., & Siddiqi, W. (2023). Cellulose-based adsorbent materials for water remediation: Harnessing their potential in heavy metals and dyes removal. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138555>
- Díez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., & Tamminen, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). *Processes*, 8(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/pr8091048>
- El Mahdaoui, A., Radi, S., Elidrissi, A., Faustino, M. A. F., Neves, M. G. P. M. S., & Moura, N. M. M. (2024). Progress in the modification of cellulose-based adsorbents for the removal of toxic heavy metal ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113870. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113870>
- Jayakumar, M., Gindaba, G. T., Gebeyehu, K. B., Periyasamy, S., Jabesa, A., Baskar, G., John, B. I., & Pugazhendhi, A. (2023). Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 879, 163158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163158>
- Mayta, S., Huamani-Palomino, R. G., Córdova, B. M., Marín, N., Quintana, M., & Rivera, E. (2024). Extraction and characterization of cellulose from agricultural wastes of corn husk: Study on the effect of organosolv pretreatment and different bleaching agents.
- Mergbi, M., Galloni, M. G., Aboagye, D., Elimian, E., Su, P., & lainnya. (2023). Valorization of lignocellulosic biomass into sustainable materials for adsorption and photocatalytic applications in water and air remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 74544–74574. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27484-2>
- Rofikoh, V., Zaman, B., & Samadikun, B. P. (2023). The potential of commercial biomass-based activated carbon to remove heavy metals in wastewater – A review. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(1), 132–141. <https://doi.org/10.14710/jil.22.1.132-141>
- Sharma, K., Choudhary, P., Majeed, A., Guleria, S., Kumar, M., Rana, A., & Rajauria, G. (2025). Cellulose based membranes, hydrogels and aerogels for water treatment application. *Industrial Crops and Products*, 225(2), 120474. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120474>
- Tao, Y., Du, J., Cheng, Y., Lu, J., Min, D., & Wang, H. (2023). Advances in application of cellulose–MOF composites in aquatic environmental treatment: Remediation and regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 7744. <https://doi.org/10.3390/ijms24097744>
- Tesfaye, H., Gabriel, T., Joseph, N. M., & Gebre-Mariam, T. (2025). Comparative analysis of cellulose characteristics from three agricultural waste biomasses. *Journal of Natural Fibers*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2578610>

Tuljannah, N., Ahmad, A., Sondari, D., Septevani, A. A., Amanda, P., Hanifah, A. S., Karim, A., & Karim, H. (2024). Properties of hydrogel for adsorbent textile dye waste based cellulose-carboxymethyl sago starch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1388(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1388/1/012036>

Tuljannah, N., Sondari, D., Amanda, P., Hanifah, A. S., Ahmad, A., & Karim, H. (2024). Synthesis of a hydrogel from a combination of cellulose *Gracilaria verrucosa* and carboxymethyl sago starch using freeze-drying and oven-drying methods as a commercial textile dye adsorbent. *New Journal of Chemistry*, 49(5), 1686–1699. <https://doi.org/10.1039/D4NJ04071F>

Tyagi, U. (2024). Sustainable and low-cost biomass derived adsorbents for the removal of toxic contaminants from wastewater: Approaches and future perspective. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 308–325. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.010>

Xiao, W., Sun, R., Hu, S., Meng, C., Xie, B., Yi, M., & Wu, Y. (2023). Recent advances and future perspective on lignocellulose-based materials as adsorbents in diverse water treatment applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(Part 3), 126984. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126984>

Yadav, M., Singh, N., Annu, Khan, S. A., Raorane, C. J., & Shin, D. K. (2024). Recent advances in utilizing lignocellulosic biomass materials as adsorbents for textile dye removal: A comprehensive review. *Polymers*, 16(17), 2417. <https://doi.org/10.3390/polym16172417>