

Synthesis of Rice Husk-Based Biocomposites Coated with Sodium Alginate and Their Use in Congo Red Dye Adsorption

Sintesis Biokomposit Berbahan Dasar Sekam Padi yang Dilapisi Natrium Alginat serta Aplikasinya dalam Adsorpsi Zat Warna Congo Red

Noventa Egi Saputra^a, Gani Purwiandono^{a,*}, Puji Lestari^b

^aProgram Studi Kimia, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang KM.14,5, Yogyakarta 55584, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

*Corresponding author: gani_purwiandono@uii.ac.id

Diterima: 05 November 2024, Direvisi: 21 November 2024, Diterbitkan: 09 Desember 2024

ABSTRACT

In this study, synthesis of a sodium alginate-coated rice husk-based biocomposite as a substitute adsorbent to lessen the negative impacts of congo red dye was conducted. A calcium chloride (CaCl₂) solution was used in the sonication and encapsulation processes to produce the biocomposite material. X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy were used to characterize the biocomposite material. Adsorption experiments showed that the optimum pH was 3 and the dye concentration was varied between 10 and 50 ppm and adsorbent mass between 0.05 and 1.5 grams. Adsorption kinetics followed the pseudo-second-order linear model, while the adsorption isotherm model matched the Freundlich model. According to these results, biocomposites of rice husk and sodium alginate have a potential to be an environmental-friendly way to manage the textile waste.

Keywords: Biocomposite, Congo red dye, sodium alginate, adsorption

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan biokomposit berbasis sekam padi yang dilapisi natrium alginat sebagai alternatif adsorben untuk mengurangi dampak negatif zat warna congo red. Material biokomposit disintesis melalui proses sonikasi dan enkapsulasi dengan larutan kalsium klorida (CaCl₂). Karakterisasi material biokomposit menggunakan Fourier Transform Infra-Red (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), dan X-Ray Diffraction (XRD). Uji adsorpsi menunjukkan bahwa kondisi optimal terjadi pada pH 3 dengan variasi massa adsorben sebesar 0,05 – 1,5 gram dan variasi konsentrasi zat warna antara 10 – 50 ppm. Model isoterm adsorpsi menunjukkan kesesuaian dengan model Freundlich, sedangkan kinetika adsorpsi mengikuti model orde kedua semu linear. Hasil ini mengindikasikan bahwa biokomposit sekam padi–natrium alginat berpotensi sebagai solusi yang ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah tekstil.

Kata kunci: Adsorpsi, Natrium alginat, Zat warna Congo red, Biokomposit

PENDAHULUAN

Peningkatan industri tekstil di Indonesia, sebagai salah satu produsen

utama bahan tekstil dunia, telah memberikan dampak signifikan terhadap perekonomian nasional (Sugeng,

Romasindah, and Saiful 2022). Namun, di sisi lain produksi tekstil menghasilkan limbah yang mencemari lingkungan, terutama dari zat warna sintetis seperti *congo red*. Zat ini bersifat karsinogenik dan sulit terdegradasi secara alami, sehingga menimbulkan ancaman bagi ekosistem perairan dan kesehatan manusia (Tkaczyk, Mitrowska, and Posyniak 2020). Zat warna *congo red* umumnya berwarna merah kecoklatan di udara terbuka dan berubah menjadi merah kekuningan dalam air yang dapat menyebabkan iritasi, mual, gangguan sistem pernapasan, dan bersifat karsinogenik (Haleem et al. 2024). Seiring dengan meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya menjaga keberlanjutan lingkungan, upaya mencari metode yang efisien dan ramah lingkungan untuk menghilangkan *congo red* dari air limbah menjadi sangat penting (Oladoye et al. 2022; Swan and Zaini 2019).

Salah satu metode yang menjanjikan dalam menghilangkan zat warna dari limbah adalah adsorpsi pada permukaan padatan berpori (Lan et al. 2022). Bahan alami yang melimpah dan tidak digunakan seperti sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai material dasar adsorben (Shukla 2020). Sekam padi memiliki kandungan selulosa tinggi yang membuatnya ideal untuk dijadikan sebagai biosorben (Abbas, Ali, and Abass 2020). Namun, sekam padi

dalam bentuk aslinya memiliki keterbatasan kapasitas adsorpsi, sehingga perlu dimodifikasi untuk meningkatkan kemampuan adsorpsinya (Chen et al. 2019). Pada penelitian ini, sekam padi dilapisi dengan natrium alginat untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dan stabilitasnya dalam air dengan gugus fungsi aktif yang dimiliki. Proses pelapisan dilakukan melalui sonikasi dan enkapsulasi menggunakan larutan kalsium klorida, yang menghasilkan biokomposit dengan struktur lebih stabil dan kapasitas adsorpsi lebih tinggi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Jurusan Kimia, Universitas Islam Indonesia dengan tahap sintesis, karakterisasi, dan uji adsorpsi dari biokomposit sekam padi–natrium alginat. Tahapan sintesis melibatkan pembuatan hidrogel natrium alginat yang dicampur dengan sekam padi, kemudian disonikasi untuk menghilangkan gelembung udara yang terjebak di dalam campuran. Sampel biokomposit yang telah disonikasi kemudian dienkapsulasi dengan larutan CaCl_2 0,5 M untuk membentuk bulatan adsorben (Purwiandono and Lestari 2023). Proses ini bertujuan agar partikel adsorben memiliki bentuk dan ukuran yang seragam sehingga memudahkan proses aplikasi pada zat warna *congo red*.

Sintesis Biokomposit

Sekam padi dibersihkan, dihaluskan, dan diayak hingga mencapai ukuran partikel sebesar 150 μm . Partikel sekam padi yang telah diayak kemudian diaktivasi menggunakan larutan HNO_3 untuk membersihkan permukaan partikel dari senyawa pengotor yang dapat menghambat adsorpsi. Setelah proses aktivasi, sekam padi dicampurkan dengan natrium alginat yang telah diubah menjadi hidrogel melalui pengadukan. Campuran ini kemudian disonikasi selama 45 menit pada temperatur ruang untuk membentuk suspensi yang stabil yang akhirnya dicampurkan dengan larutan CaCl_2 untuk menghasilkan biokomposit dengan bentuk bulatan.

Karakterisasi Biokomposit

Material biokomposit hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan teknik FTIR, SEM, dan XRD. Spektrum FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terdapat dalam biokomposit, SEM untuk mengamati struktur morfologi permukaan, dan XRD untuk menentukan struktur kristal dari material biokomposit.

Uji Adsorpsi Congo Red

Uji adsorpsi dilakukan untuk menilai kemampuan biokomposit dalam menyerap zat warna *congo red*. Parameter uji meliputi variasi pH (3 – 11), massa adsorben (0,05 – 1,5 gram), konsentrasi zat warna (10–50 ppm), dan waktu kontak (30–180

menit). Setiap pengujian dilakukan pada suhu ruang dengan menggunakan spektrofotometer UV – Vis untuk mengukur penurunan konsentrasi *congo red* setelah proses adsorpsi. Efisiensi adsorpsi dihitung berdasarkan persentase pengurangan konsentrasi zat warna, dan kapasitas adsorpsi ditentukan menggunakan persamaan isoterm adsorpsi.

PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan sintesis biokomposit dari sekam padi yang dilapisi natrium alginat dan aplikasinya dalam aktivitas adsorpsi zat warna *congo red*.

Karakterisasi Material Biokomposit

Karakterisasi kualitatif material biokomposit hasil sintesis dilakukan dengan FTIR, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil spektrum FTIR menunjukkan adanya puncak absorpsi yang relevan dengan gugus fungsi utama dalam material biokomposit. Puncak pada bilangan gelombang sekitar 3350 cm^{-1} menunjukkan keberadaan gugus O – H dengan vibrasi *stretching* yang khas pada senyawa selulosa dalam sekam padi serta natrium alginat, yang dapat berperan dalam proses adsorpsi melalui interaksi hidrogen (Mehta and Chopra 2023). Selanjutnya, puncak pada bilangan gelombang 1605 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi ikatan N – H (Lahiri et al. 2024). Kehadiran gugus nitro pada 1422 cm^{-1} dan gugus sulfoksida pada

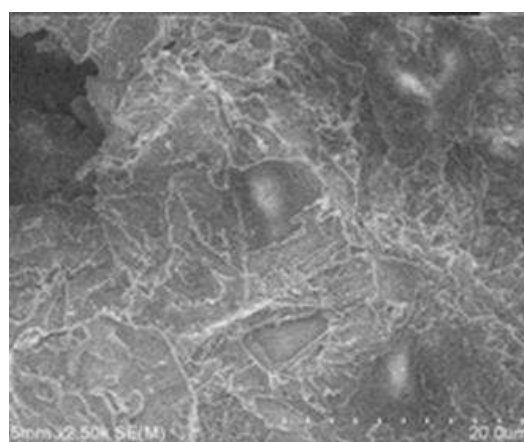
1030 cm^{-1} menandakan adanya senyawa organik yang kompleks dalam biokomposit (Gautam et al. 2022). Spektrum FTIR ini mengonfirmasi bahwa natrium alginat berhasil melapisi sekam padi, karena penampakan puncak khas dari kedua senyawa ini, yang mendukung kemampuan adsorpsi biokomposit dalam mengikat molekul *congo red* melalui berbagai interaksi kimia.

Tabel 1. Serapan vibrasi material biokomposit menggunakan FTIR

Gugus fungsi	Puncak serapan (cm^{-1})
O–H	3350
N–H	1605
–NO ₂	1422
–SO ₂	1030

Karakterisasi lanjutan permukaan biokomposit dilakukan dengan SEM untuk mengamati morfologi permukaan biokomposit, sebagaimana pada Gambar 1. Hasil SEM menunjukkan bahwa biokomposit memiliki struktur permukaan yang kasar dan berpori, dengan partikel-partikel yang terdistribusi secara merata. Permukaan yang berpori berperan penting dalam peningkatan kapasitas adsorpsi, karena menyediakan banyak area aktif untuk interaksi dengan molekul *congo red*. Pada Gambar 1 menunjukkan permukaan material memiliki banyak celah dan rongga yang mungkin terbentuk selama proses sonikasi dan enkapsulasi. Struktur pori tersebut memungkinkan penyerapan zat

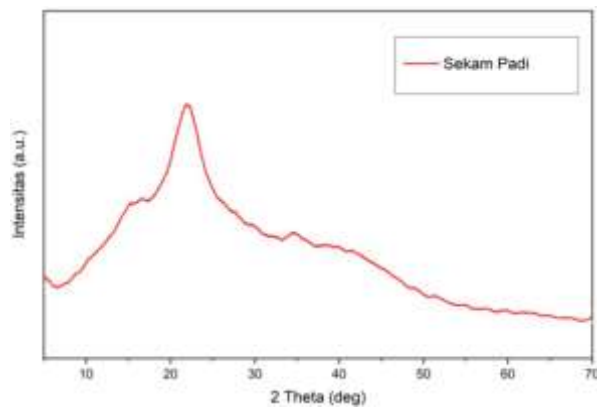
warna yang lebih efektif, karena *congo red* dapat dengan mudah menyusup ke dalam pori-pori dan terikat pada permukaan biokomposit. Hasil ini menunjukkan bahwa proses sintesis biokomposit dengan natrium alginat dan sekam padi telah berhasil menghasilkan material adsorben yang memiliki morfologi permukaan yang mendukung proses adsorpsi.



Gambar 1. Hasil SEM material biokomposit sekam padi–natrium alginat pada perbesaran 20 μm

Karakterisasi struktur kristal dari material biokomposit dilakukan dengan XRD yang menunjukkan bahwa biokomposit memiliki struktur amorf, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2, puncak difraksi yang lebar dan tidak tajam pada grafik XRD mengindikasikan struktur amorf atau tidak teratur pada material biokomposit. Struktur amorf tersebut bermanfaat dalam proses adsorpsi karena memungkinkan difusi molekul zat warna *congo red* ke dalam material tanpa hambatan dari struktur

kristal yang rigid. Puncak pada sudut 2θ sekitar $38,72^\circ$ menunjukkan karakteristik dari natrium alginat dan mengindikasikan bahwa natrium alginat berhasil dilapiskan pada permukaan material tanpa mengubah struktur dasar material (Işıklan, Geyik, and Güncüm 2024). Struktur amorf ini juga memungkinkan biokomposit untuk memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena menyediakan lebih banyak situs aktif untuk berinteraksi dengan zat warna.

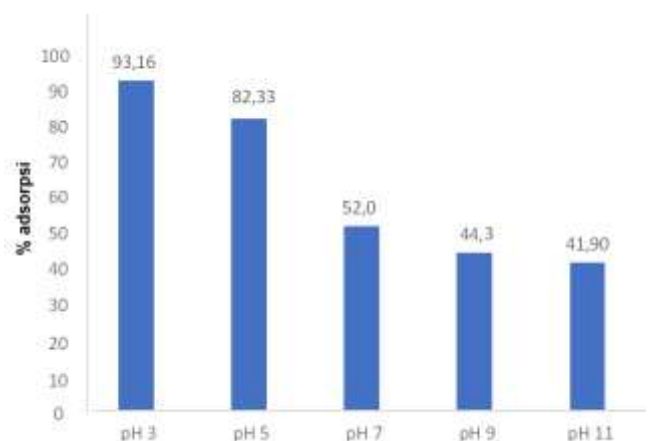


Gambar 2 Difraktogram hasil analisis XRD material biokomposit sekam padi–natrium alginat

Pengaruh Parameter Adsorpsi

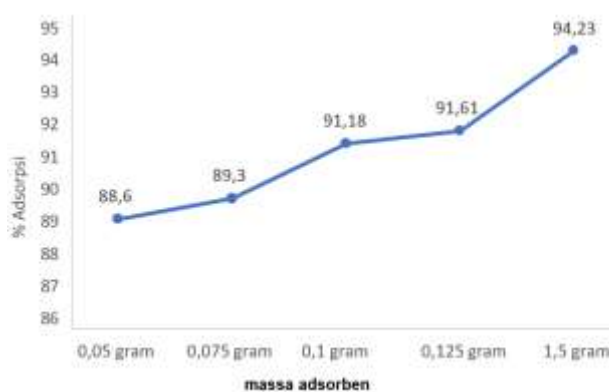
Aplikasi efektivitas adsorpsi biokomposit sekam padi–natrium alginat dilakukan melalui uji adsorpsi terhadap zat warna *congo red* pada variasi pH, massa adsorben, konsentrasi zat warna, dan waktu kontak. Uji ini bertujuan untuk mengetahui parameter optimum bagi biokomposit dalam mengadsorpsi zat warna *congo red*. Berdasarkan aplikasi variasi pH yang

ditunjukkan pada Gambar 3, diketahui bahwa pH optimum untuk adsorpsi *congo red* adalah pada pH 3. Hal ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa dalam kondisi asam, gugus-gugus fungsional yang terdapat pada biokomposit lebih mudah berinteraksi dengan molekul *congo red* yang memiliki sifat anionik (Lafi, Montasser, and Hafiane 2019). Pada pH 3, gugus $-OH$ pada biokomposit dapat berinteraksi dengan molekul *congo red*, memungkinkan proses adsorpsi berjalan lebih efektif. Data penurunan kapasitas adsorpsi pada pH yang lebih tinggi (basa) menunjukkan adanya pengaruh kompetitif dari ion OH^- dalam larutan, yang dapat menghambat interaksi antara biokomposit dan *congo red*. Kondisi asam yang optimal pada pH 3 memungkinkan protonasi gugus-gugus aktif pada biokomposit, sehingga interaksi dengan *congo red* meningkat.



Gambar 3 Data adsorpsi material biokompositi terhadap zat warna *congo red* pada variasi pH

Analisis uji variasi massa adsorben memberikan informasi mengenai kapasitas adsorpsi biokomposit. Pada Gambar 4 menunjukkan perbandingan persen adsorpsi pada variasi massa biokomposit sebagai adsorben. Dengan meningkatkan massa adsorben dari 0,05 – 1,5 gram, kapasitas adsorpsi menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya massa. Pada massa adsorben yang lebih tinggi, lebih banyak situs aktif yang tersedia untuk mengadsorpsi *congo red*, sehingga jumlah zat warna yang diserap meningkat. Namun, setelah mencapai massa tertentu yaitu 1,5 gram, peningkatan kapasitas adsorpsi mulai menurun dan mendekati batas jenuh dimana penambahan massa adsorben tidak lagi memberikan peningkatan signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi biokomposit mencapai titik jenuh pada massa tertentu dan penambahan lebih lanjut tidak akan meningkatkan efisiensi adsorpsi secara signifikan.



Gambar 4 Data adsorpsi material biokomposit terhadap zat warna *congo red* pada variasi massa adsorben

Tabel 2 menunjukkan analisis model isoterm adsorpsi dilakukan untuk menentukan jenis adsorpsi yang terjadi pada permukaan biokomposit. Berdasarkan hasil analisis, data adsorpsi lebih sesuai dengan model isoterm Freundlich dibandingkan dengan Langmuir yang menunjukkan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan heterogen dengan distribusi energi adsorpsi yang tidak merata. Model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan berpori dengan banyak situs aktif yang berbeda, yang sesuai dengan hasil karakterisasi SEM. Model ini juga mengindikasikan bahwa adsorpsi pada permukaan biokomposit dapat berlangsung dalam lapisan ganda yang memungkinkan lebih banyak molekul *congo red* untuk teradsorpsi pada permukaan material.

Tabel 2 Data hasil analisis pada berbagai model isoterm adsorpsi

Isoterm Adsorpsi	Parameter	Data hasil analisis
Langmuir	Q_m (mg/g)	25,773
	K_L	0,586989
	R^2	0,6376
Freundlich	n	1,783167
	K_f (mg/g)	8,990784
	R^2	0,7671

Bagian akhir dari aplikasi material biokomposit sekam padi–natrium alginat

adalah evaluasi laju kinetika reaksi adsorpsi pada model orde satu dan dua semu. Pada Tabel 3 menunjukkan bahwa menunjukkan bahwa laju adsorpsi mengikuti orde kedua semu yang dipengaruhi oleh interaksi kimia antara gugus aktif pada biokomposit dan molekul *congo red*. Model kinetika orde kedua semu juga menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi dipengaruhi oleh konsentrasi zat warna di larutan serta ketersediaan situs aktif pada permukaan adsorben. Dengan demikian, hasil ini mengonfirmasi bahwa mekanisme adsorpsi pada biokomposit sekam padi – natrium alginat melibatkan interaksi yang spesifik antara adsorben dan adsorbat, yang membuat proses ini berlangsung lebih efisien pada konsentrasi zat warna yang lebih tinggi.

Tabel 3 Data analisis model kinetika adsorpsi

Model kinetika	Parameter	Nilai
Orde satu semu	K_f	0,0051
	q_e	0,9588
	R^2	0,092
Orde dua semu	K_f	0,0052
	q_e	9,35
	R^2	0,9494

Material biokomposit berbahan dasar sekam padi dan natrium alginat memiliki potensi tinggi sebagai adsorben dalam pengolahan limbah zat warna. Struktur morfologi yang berpori dan sifat amorf dari

biokomposit memungkinkan adsorpsi yang efektif dengan kapasitas yang tinggi. Hasil uji adsorpsi menunjukkan bahwa biokomposit ini mampu mengurangi konsentrasi *congo red* dari larutan dalam kondisi optimum pada pH 3, dengan variasi massa adsorben, konsentrasi zat warna, dan waktu kontak yang sesuai. Model isoterm Freundlich dan kinetika orde kedua semu menunjukkan bahwa proses adsorpsi ini berlangsung pada permukaan heterogen dan melibatkan interaksi kimia yang spesifik, yang mendukung potensi biokomposit ini sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan efektif untuk pengolahan limbah tekstil.

KESIMPULAN

Biokomposit berbahan dasar sekam padi yang dilapisi natrium alginat menunjukkan potensi besar sebagai adsorben dalam pengolahan zat warna *congo red*. Biokomposit ini memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi pada pH 3 dengan performa adsorpsi mengikuti model isoterm Freundlich serta kinetika orde kedua semu. Pengembangan lebih lanjut dari material ini dapat mencakup penggunaan zat warna lain serta aplikasi pada limbah industri yang lebih kompleks untuk menguji daya tahan dan efektivitas jangka panjang dari biokomposit sekam padi–natrium alginat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, Mohammed Nsaif, Suad Turkey Ali, and Rajaa S Abass. 2020. "RICE HUSKS AS A BIOSORBENT AGENT FOR PB^{2+} IONS FROM CONTAMINATED AQUEOUS SOLUTIONS: A REVIEW." *Biochemical & Cellular Archives* 20(1).
- Chen, Si et al. 2019. "Study on the Adsorption of Dyestuffs with Different Properties by Sludge-Rice Husk Biochar: Adsorption Capacity, Isotherm, Kinetic, Thermodynamics and Mechanism." *Journal of Molecular Liquids* 285: 62–74.
- Gautam, Anshu, Poonam Rawat, R N Singh, and Norma Rosario Flores Holguin. 2022. "Synthesis, Spectroscopic and Evaluation of Anticancer Activity of New Hydrazone-Containing Dipyrromethane Using Experimental and Theoretical Approaches." *Journal of Molecular Structure* 1260: 132781.
- Haleem, Abdul et al. 2024. "In-Depth Photocatalytic Degradation Mechanism of the Extensively Used Dyes Malachite Green, Methylene Blue, Congo Red, and Rhodamine B via Covalent Organic Framework-Based Photocatalysts." *Water* 16(11): 1588.
- Işıklan, Nuran, Gülcan Geyik, and Enes Güncüm. 2024. "Alginate-Based Bio-Nanocomposite Reinforced with Poly (2-Hydroxypropyl Methacrylamide) and Magnetite Graphene Oxide for Delivery of Etoposide and Photothermal Therapy." *Materials Today Chemistry* 41: 102323.
- Lafi, Ridha, Imed Montasser, and Amor Hafiane. 2019. "Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solutions by Prepared Activated Carbon with Oxygen-Containing Functional Groups and Its Regeneration." *Adsorption Science & Technology* 37(1–2): 160–81.
- Lahiri, Pooja et al. 2024. "Fast Viral Diagnostics: FTIR-Based Identification, Strain-Typing, and Structural Characterization of SARS-CoV-2." *Analytical Chemistry* 96(37): 14749–58.
- Lan, Dawei et al. 2022. "Adsorptive Removal of Organic Dyes via Porous Materials for Wastewater Treatment in Recent Decades: A Review on Species, Mechanisms and Perspectives." *Chemosphere* 293: 133464.
- Mehta, Heena, and Lalita Chopra. 2023. "A Comprehensive Study on Extraction and Characterization of Cellulose from Rice Husk." In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing.
- Oladoye, Peter Olusakin, Mutiat Oyedolapo Bamigboye, Olutobi Daniel Ogunbiyi, and Mary Taiwo Akano. 2022. "Toxicity and Decontamination Strategies of Congo Red Dye." *Groundwater for Sustainable Development* 19: 100844.
- Purwiandono, Gani, and Puji Lestari. 2023. "Comparison of Two Biosorbent Beads for Methylene Blue Discoloration in Water." *Journal of Ecological Engineering* 24(8): 137–45.
- Shukla, S K. 2020. "Rice Husk Derived Adsorbents for Water Purification." *Green Materials for Wastewater Treatment*: 131–48.
- Sugeng, Adi Nur Rohman, Widya Romasindah, and S Saiful. 2022. "Regulatory and Policy Arrangement of The Textile Industry and National

- Textile Products for Clothing Resilience.” *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS) volume-6-issue-9*: 5–15.
- Swan, Ng Boon, and Muhammad Abbas Ahmad Zaini. 2019. “Adsorption of Malachite Green and Congo Red Dyes from Water: Recent Progress and Future Outlook.” *Ecological chemistry and engineering S* 26(1): 119–32.
- Tkaczyk, Angelika, Kamila Mitrowska, and Andrzej Posyniak. 2020. “Synthetic Organic Dyes as Contaminants of the Aquatic Environment and Their Implications for Ecosystems: A Review.” *Science of the total environment* 717: 137222.
- Abbas, Mohammed Nsaif, Suad Turkey Ali, and Rajaa S Abass. 2020. “RICE HUSKS AS A BIOSORBENT AGENT FOR PB2+ IONS FROM CONTAMINATED AQUEOUS SOLUTIONS: A REVIEW.” *Biochemical & Cellular Archives* 20(1).
- Chen, Si et al. 2019. “Study on the Adsorption of Dyestuffs with Different Properties by Sludge-Rice Husk Biochar: Adsorption Capacity, Isotherm, Kinetic, Thermodynamics and Mechanism.” *Journal of Molecular Liquids* 285: 62–74.
- Gautam, Anshu, Poonam Rawat, R N Singh, and Norma Rosario Flores Holguin. 2022. “Synthesis, Spectroscopic and Evaluation of Anticancer Activity of New Hydrazone-Containing Dipyrromethane Using Experimental and Theoretical Approaches.” *Journal of Molecular Structure* 1260: 132781.
- Haleem, Abdul et al. 2024. “In-Depth Photocatalytic Degradation Mechanism of the Extensively Used Dyes Malachite Green, Methylene Blue, Congo Red, and Rhodamine B via Covalent Organic Framework-Based Photocatalysts.” *Water* 16(11): 1588.
- Işıklan, Nuran, Gülcan Geyik, and Enes Güncüm. 2024. “Alginate-Based Bio-Nanocomposite Reinforced with Poly (2-Hydroxypropyl Methacrylamide) and Magnetite Graphene Oxide for Delivery of Etoposide and Photothermal Therapy.” *Materials Today Chemistry* 41: 102323.
- Lafi, Ridha, Imed Montasser, and Amor Hafiane. 2019. “Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solutions by Prepared Activated Carbon with Oxygen-Containing Functional Groups and Its Regeneration.” *Adsorption Science & Technology* 37(1–2): 160–81.
- Lahiri, Pooja et al. 2024. “Fast Viral Diagnostics: FTIR-Based Identification, Strain-Typing, and Structural Characterization of SARS-CoV-2.” *Analytical Chemistry* 96(37): 14749–58.
- Lan, Dawei et al. 2022. “Adsorptive Removal of Organic Dyes via Porous Materials for Wastewater Treatment in Recent Decades: A Review on Species, Mechanisms and Perspectives.” *Chemosphere* 293: 133464.
- Mehta, Heena, and Lalita Chopra. 2023. “A Comprehensive Study on Extraction and Characterization of Cellulose from Rice Husk.” In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing.
- Oladoye, Peter Olusakin, Mutiat Oyedolapo Bamigboye, Olutobi Daniel Ogunbiyi, and Mary Taiwo Akano. 2022. “Toxicity and Decontamination Strategies of Congo Red Dye.” *Groundwater for Sustainable Development* 19: 100844.
- Purwiandono, Gani, and Puji Lestari. 2023. “Comparison of Two Biosorbent Beads for Methylene Blue Discoloration in Water.” *Journal of*

- Ecological Engineering* 24(8): 137–45.
- Shukla, S K. 2020. “Rice Husk Derived Adsorbents for Water Purification.” *Green Materials for Wastewater Treatment*: 131–48.
- Sugeng, Adi Nur Rohman, Widya Romasindah, and S Saiful. 2022. “Regulatory and Policy Arrangement of The Textile Industry and National Textile Products for Clothing Resilience.” *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS) volume-6-issue-9*: 5–15.
- Swan, Ng Boon, and Muhammad Abbas Ahmad Zaini. 2019. “Adsorption of Malachite Green and Congo Red Dyes from Water: Recent Progress and Future Outlook.” *Ecological chemistry and engineering S* 26(1): 119–32.
- Tkaczyk, Angelika, Kamila Mitrowska, and Andrzej Posyniak. 2020. “Synthetic Organic Dyes as Contaminants of the Aquatic Environment and Their Implications for Ecosystems: A Review.” *Science of the total environment* 717: 137222.