

OPTIMASI KECEPATAN PENGADUKAN PADA BIOSORPSI METHYL ORANGE MENGGUNAKAN KULIT LENGKENG TERMODIFIKASI PUTIH TELUR ITIK

Optimization of Agitation Speed in Methyl Orange Biosorption Using Longan Peel Modified with Duck Egg White

Putri Aulia Pratiwi & Desy Kurniawati

Universitas Negeri Padang

desy.chem@gmail.com

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Jun 26, 2026	Jul 24, 2026	Aug 5, 2026	Aug 10, 2026

Abstract

Although various lignocellulosic biomasses have been developed as biosorbents for dye removal, the use of longan peel modified with duck egg white for Methyl Orange biosorption, particularly in relation to the effect of agitation speed, remains limited. This study aimed to determine the optimum agitation speed for Methyl Orange biosorption using longan peel modified with duck egg white in a batch system. The study employed a quantitative approach with a laboratory experimental design. The characteristics of the biosorbent were analyzed using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, while the Methyl Orange concentration was determined using a UV-Vis spectrophotometer. The results showed that agitation speed affected biosorption performance. The optimum condition was achieved at 200 rpm, with the highest adsorption capacity of 66.47 mg/g. FTIR analysis confirmed the successful modification of the biosorbent through the addition of protein functional groups to the longan peel surface. The FTIR spectrum after biosorption also showed the presence of sulfonate (S=O) groups, indicating the adsorption of Methyl Orange. These findings demonstrate that protein modification and an appropriate agitation

speed can enhance the performance of lignocellulosic biomass-based biosorbents in adsorbing anionic dyes. This study contributes to the development of potentially environmentally friendly and low-cost biosorbents for wastewater treatment and provides a basis for optimizing the biosorption process. Future research should investigate adsorption kinetics and isotherms, biosorbent regeneration, and its application to actual industrial wastewater.

Keywords: Biosorption; Agitation Speed; Longan Peel; Methyl Orange; Duck Egg White

Abstrak: Meskipun berbagai biomassa lignoselulosa telah dikembangkan sebagai biosorben untuk menghilangkan zat warna, pemanfaatan kulit lengkung termodifikasi putih telur itik untuk biosorpsi *Methyl Orange*, khususnya ditinjau dari pengaruh kecepatan pengadukan, masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menentukan kecepatan pengadukan optimum pada biosorpsi *Methyl Orange* menggunakan kulit lengkung termodifikasi putih telur itik dalam sistem *batch*. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen laboratorium. Karakteristik biosorben dianalisis menggunakan spektroskopi inframerah transformasi Fourier (FTIR), sedangkan konsentrasi *Methyl Orange* ditentukan menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan memengaruhi kinerja biosorpsi. Kondisi optimum diperoleh pada kecepatan 200 rpm dengan kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 66,47 mg/g. Analisis FTIR mengonfirmasi keberhasilan modifikasi biosorben melalui penambahan gugus fungsi protein pada permukaan kulit lengkung. Spektrum FTIR setelah biosorpsi juga menunjukkan keberadaan gugus sulfonat (S=O) yang mengindikasikan terjadinya adsorpsi *Methyl Orange*. Temuan ini menunjukkan bahwa modifikasi protein dan pengaturan kecepatan pengadukan yang tepat dapat mendukung peningkatan kinerja biosorben berbasis biomassa lignoselulosa dalam menyerap zat warna anionik. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan biosorben yang berpotensi ramah lingkungan dan berbiaya rendah untuk pengolahan limbah cair serta menyediakan dasar bagi optimasi proses biosorpsi. Penelitian selanjutnya perlu mengkaji kinetika dan isoterm adsorpsi, regenerasi biosorben, serta penerapannya pada limbah industri nyata.

Kata Kunci: Biosorpsi; Kecepatan Pengadukan; Kulit Lengkung; *Methyl Orange*; Putih Telur Itik

PENDAHULUAN

Perkembangan industri, khususnya industri tekstil, menyebabkan meningkatnya limbah cair yang mengandung zat warna sintetis. Sekitar 10–15% zat warna pada proses pencelupan dan finishing tidak berikatan dengan serat tekstil sehingga terbuang ke badan perairan (Franco et al., 2026). Sebagian besar zat warna memiliki struktur aromatik kompleks yang sulit terdegradasi secara biologis sehingga dapat bertahan lama di lingkungan, menurunkan kualitas air, serta membahayakan organisme akuatik dan kesehatan manusia (Mnyango et al., 2025). Salah satu zat warna yang banyak digunakan adalah Methyl Orange, yaitu zat warna azo yang memiliki stabilitas kimia tinggi sehingga berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik (Islam et al., 2025).

Methyl Orange merupakan zat warna anionik golongan azo yang banyak dimanfaatkan dalam industri tekstil dan sebagai indikator asam–basa (Dehmani et al., 2026). Gugus azo ($-N=N-$) menyebabkan zat warna ini sulit terdegradasi dan persisten di lingkungan perairan (Yu et al., 2025). Selain menghambat penetrasi cahaya dan fotosintesis organisme akuatik, Methyl Orange juga berpotensi menghasilkan senyawa toksik serta memiliki sifat mutagenik, teratogenik, dan karsinogenik sehingga diperlukan metode pengolahan yang efektif sebelum limbah dibuang ke lingkungan (Khan et al., 2022).

Berbagai metode telah dikembangkan untuk menghilangkan zat warna dari limbah cair, seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, pengolahan biologis, dan adsorpsi (Yu et al., 2025). Di antara metode tersebut, adsorpsi banyak digunakan karena sederhana, efisien, mudah dioperasikan, dan berbiaya relatif rendah (Islam et al., 2025). Biosorpsi berbasis biomassa lignoselulosa terus berkembang sebagai alternatif yang efektif karena bahan bakunya melimpah, murah, dapat diperbarui, serta memiliki berbagai gugus fungsi yang berperan dalam proses adsorpsi (Yadav et al., 2024). Berbagai limbah pertanian telah dimanfaatkan sebagai biosorben, seperti kulit lengkung (Darma Ramadhani & Kurniawati, 2021a), kulit singkong (Irawati et al., 2018), kulit pisang, kulit jeruk, kulit delima, kulit manggis, kulit kenari (Tsoutsas et al., 2024).

Kulit lengkung (*Dimocarpus longan* L.) merupakan salah satu biomassa yang berpotensi dikembangkan sebagai biosorben. Material ini telah digunakan untuk mengadsorpsi zat warna kationik (Mohadi et al., 2022), menyisihkan zat warna tekstil dari limbah sintetis (Rattanavijit et al., 2022), serta sebagai karbon aktif untuk mengadsorpsi zat warna anionik Reactive Black 5 (Hoa et al., 2025).

Namun, biomassa lignoselulosa umumnya bermuatan negatif di dalam larutan sehingga kurang efektif mengadsorpsi senyawa anionik (Kamaru et al., 2016; Sambang et al., 2023). Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi, biomassa dapat dimodifikasi menggunakan bahan berbasis protein. Putih telur mengandung gugus amino, karboksil, dan hidroksil yang dapat meningkatkan interaksi adsorben dengan polutan (Wang et al., 2023). Modifikasi menggunakan putih telur juga terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi terhadap zat warna maupun ion logam (Putra et al., 2024; Yolanda & Kurniawati, 2026; Zein et al., 2023).

Meskipun berbagai biomassa telah dikembangkan untuk menghilangkan Methyl Orange, pemanfaatan kulit lengkung termodifikasi putih telur itik masih jarang dilaporkan.

Selain jenis adsorben, kecepatan pengadukan juga memengaruhi kinerja adsorpsi pada sistem *batch* (Abbas & Trari, 2024; Malbenia John et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menentukan kecepatan pengadukan optimum pada biosorpsi Methyl Orange menggunakan kulit lengkung termodifikasi putih telur itik dalam sistem *batch*. Penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan biosorben berbasis limbah biomassa yang efektif dan ramah lingkungan.

METODE

1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium menggunakan sistem *batch*. Penelitian dilakukan untuk menganalisis pengaruh kecepatan pengadukan terhadap kemampuan kulit lengkung termodifikasi putih telur itik dalam menyerap zat warna Methyl Orange dari larutan serta menentukan kecepatan pengadukan optimum. Variabel bebas penelitian adalah kecepatan pengadukan, sedangkan variabel respons meliputi kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan. Massa biosorben, konsentrasi awal, volume larutan, pH, suhu, dan waktu kontak dikendalikan pada kondisi yang sama.

2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas, blender, ayakan BS410, neraca analitik (ABS 220-4), pH meter (ATC), shaker (VRN-480), oven, *magnetic stirrer* (MR Hei Standard), *hot plate*, instrumen *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) (Perkin Elmer), serta *spektrofotometer UV-Vis* (Agilent 8435, model G1103A). Sementara itu, bahan yang digunakan meliputi limbah kulit kelengkeng yang diperoleh dari pasar, putih telur itik, akuades, larutan stok Methyl Orange dengan konsentrasi 1000 mg/L, asam nitrat (HNO_3), natrium hidroksida (NaOH), kalium klorida (KCl), dan etanol p.a.

3. Preparasi Kulit Lengkeng

Kulit kelengkeng dibersihkan untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel, kemudian dipotong menjadi bagian-bagian kecil dan dikeringkan pada suhu ruang. Setelah proses pengeringan, sampel dihaluskan menggunakan blender dan diayak hingga diperoleh serbuk berukuran seragam. Serbuk kulit kelengkeng selanjutnya diaktivasi menggunakan larutan HNO_3 0,01 M selama 2 jam. Setelah proses aktivasi selesai, sampel disaring, dicuci dengan akuades hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu ruang.

4. Modifikasi dengan Putih Telur Itik

Putih telur itik dipisahkan dari kuning telurnya, kemudian dikeringkan pada suhu ruang hingga menjadi padatan. Padatan yang diperoleh dihaluskan dan diayak menjadi serbuk. Serbuk putih telur itik selanjutnya dicampurkan dengan serbuk kulit kelengkeng pada perbandingan massa 1:1 menggunakan etanol *pro analysis* (p.a.) sebagai media pencampur. Campuran disonikasi selama 15 menit, kemudian disaring dan dikeringkan pada suhu ruang hingga diperoleh biosorben termodifikasi (Yolanda & Kurniawati, 2026)

5. Karakterisasi Biosorben

Karakterisasi dilakukan pada empat sampel, yaitu kulit lengkung sebelum modifikasi (KL), Putih telur itik (PTI), kulit lengkung setelah modifikasi dengan putih telur itik (KL-PTI), dan biosorben setelah adsorpsi Methyl Orange (KLPTI-MO). Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi akibat modifikasi dan interaksi dengan zat warna, sedangkan konsentrasi Methyl Orange dianalisis menggunakan *spektrofotometer UV-Vis*.

6. Prosedur adsorpsi

Sebanyak 25 mL larutan Methyl Orange dengan konsentrasi awal 550 mg/L pada pH 2 dimasukkan ke dalam erlenmeyer berkapasitas 250 mL. Selanjutnya, ditambahkan 0,2 g biosorben berukuran partikel 63 μm , kemudian campuran dikontakkan selama 60 menit menggunakan shaker dengan variasi kecepatan pengadukan 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm. Setelah proses pengontakan selesai, campuran disaring, kemudian filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 506 nm.

7. Analisis Data

Kapasitas adsorpsi Methyl Orange yang sudah diserap dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{W} \quad (1)$$

sedangkan efisiensi penyisihan dihitung dengan persamaan:

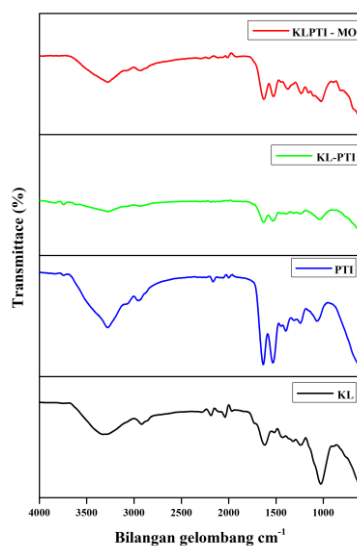
$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

C_0 merupakan konsentrasi awal larutan (mg/L), C_e merupakan konsentrasi akhir larutan setelah proses adsorpsi (mg/L), V adalah volume larutan yang digunakan (L), dan W merupakan massa adsorben yang digunakan (g)

HASIL

1. Karakterisasi Biosorben.

Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada putih telur itik, kulit kelengkeng sebelum dan sesudah modifikasi, serta biosorben setelah proses pengontakan. Spektrum FTIR dari keempat sampel tersebut disajikan pada Tabel 1.



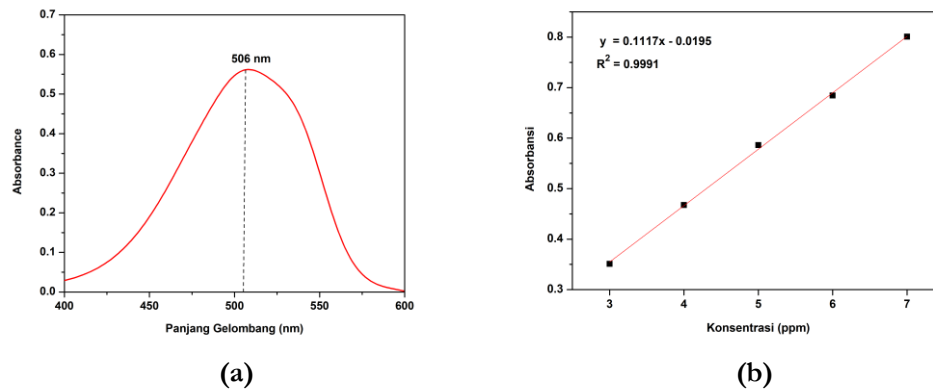
Gambar 1. Spektrum FTIR KL, PTI, KL-PTI, KLPTI-MO.

Tabel 1. Hasil FTIR KL, PTI, KL-PTI, KLPTI-MO.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)			
	KL	PTI	KL-PTI	KL-PTI-MO
O–H stretching /N–H	3286,03	3278,13	3276,65	3277,67
C–H	2923,36	2957,07	2929,80	2931,32
C=C aromatic / C=O	1616,83	1634,82	1629,39	1628,00
N–H bending	-	1532,72	1532,69	1526,84
C–N	1235,35	1242,99	1240,77	1232,17
S=O	-	-	-	1156,15
C–O	1023,38	1066,95	1037,82	1024,94

1. Panjang Gelombang dan Kurva Standar

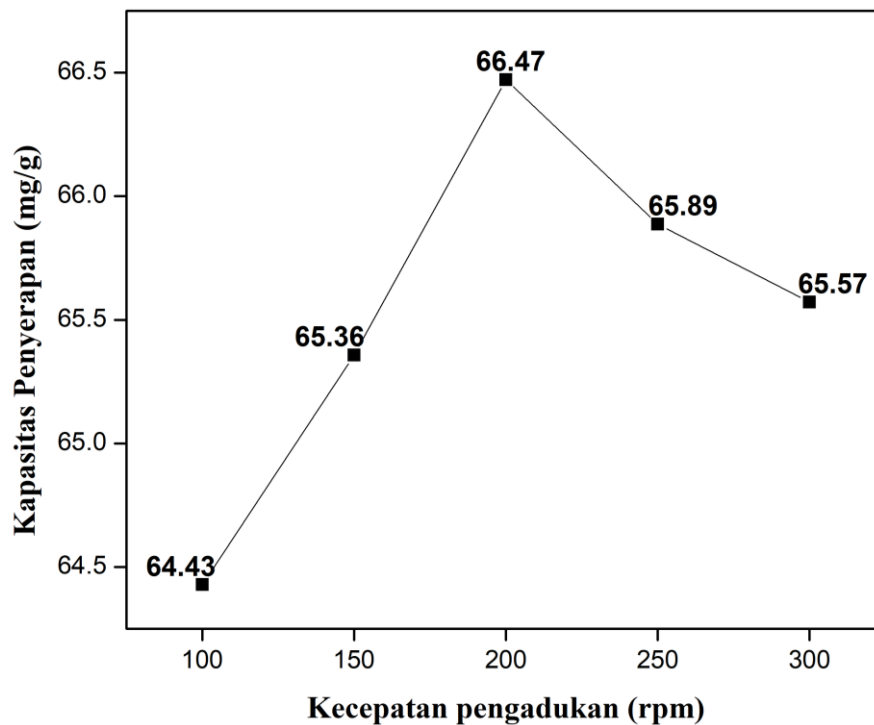
Penentuan konsentrasi Methyl Orange dilakukan melalui kurva standar yang dibuat pada panjang gelombang maksimum sebesar 506 nm. Kurva pada Gambar 1 memperlihatkan korelasi linier antara konsentrasi dan absorbansi, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung konsentrasi kesetimbangan (C_e), kapasitas adsorpsi, dan efisiensi penyisihan.



Gambar 2. Panjang Gelombang Maksimum Methyl Orange (a) Kurva Standar Methyl Orange (b)

2. Kecepatan Pengadukan

Kapasitas adsorpsi yang diperoleh pada variasi kecepatan pengadukan 100, 150, 200, 250, dan 300 rpm berturut-turut sebesar 64,43; 65,36; 66,47; 65,89; dan 65,57 mg/g. Nilai kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada 200 rpm, yaitu 66,47 mg/g.



Gambar 3. Pengaruh Kecepatan Pengadukan.

PEMBAHASAN

1. Karakterisasi Biosorben.

Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan keberadaan berbagai gugus fungsi pada sampel kulit lengkung (KL), putih telur itik (PTI), komposit kulit lengkung termodifikasi putih telur itik (KL-PTI), dan biosorben KL-PTI setelah mengadsorpsi zat warna Methyl Orange (KL-PTI-MO), yang menunjukkan adanya perubahan struktur kimia selama proses modifikasi dan adsorpsi. Spektrum FTIR KL menunjukkan karakteristik biomassa lignoselulosa yang ditandai dengan pita serapan pada $3286,03\text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan vibrasi regangan gugus hidroksil (O–H). Selain itu, pita pada $1023,38\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi regangan C–O yang berasal dari struktur polisakarida seperti selulosa dan hemiselulosa. Pita serapan pada $1616,83\text{ cm}^{-1}$ dikaitkan dengan vibrasi regangan C=C aromatik yang merupakan bagian dari komponen penyusun biomassa. Keberadaan gugus hidroksil dan gugus beroksigen pada biomassa berperan penting sebagai situs aktif yang memungkinkan terjadinya interaksi dengan molekul adsorbat melalui ikatan hidrogen maupun gaya antarmolekul lainnya (Chollakup et al., 2021).

Spektrum FTIR PTI menunjukkan karakteristik khas material berbasis protein yang ditandai oleh keberadaan gugus-gugus penyusun rantai peptida. Pita pada $3278,13\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi regangan N–H yang dapat bertumpang tindih dengan gugus O–H, sedangkan pita pada $1634,82\text{ cm}^{-1}$ dikaitkan dengan vibrasi regangan C=O yang berasal dari ikatan peptida protein. Selain itu, pita pada $1532,72\text{ cm}^{-1}$ dan $1242,99\text{ cm}^{-1}$ masing-masing menunjukkan vibrasi N–H bending dan C–N stretching. Keberadaan gugus-gugus tersebut menunjukkan bahwa protein putih telur itik memiliki gugus aktif yang bersifat polar sehingga berpotensi meningkatkan jumlah situs interaksi pada permukaan biosorben (Yan et al., 2022).

Setelah proses modifikasi menggunakan putih telur itik, spektrum FTIR KL-PTI menunjukkan beberapa perubahan dibandingkan material penyusunnya. Pita pada daerah O–H/N–H mengalami pergeseran dari $3286,03\text{ cm}^{-1}$ menjadi $3276,65\text{ cm}^{-1}$, sedangkan pita N–H bending tetap teramati pada $1532,69\text{ cm}^{-1}$. Pergeseran tersebut mengindikasikan adanya perubahan lingkungan kimia akibat interaksi antara gugus hidroksil pada biomassa dan gugus polar pada protein. Keberadaan pita N–H bending pada material hasil modifikasi juga menunjukkan bahwa gugus fungsi protein telah terimobilisasi pada permukaan kulit lengkung. Interaksi antara protein dan biomassa diperkirakan terjadi melalui ikatan hidrogen

dan interaksi antargugus polar sehingga menghasilkan material dengan karakteristik permukaan yang berbeda dari bahan awal (Li et al., 2023).

Setelah proses adsorpsi Methyl Orange, spektrum FTIR KL-PTI-MO menunjukkan perubahan pada beberapa pita serapan. Pita N–H bending bergeser dari $1532,69\text{ cm}^{-1}$ menjadi $1526,84\text{ cm}^{-1}$, sedangkan pita C–N stretching bergeser dari $1240,77\text{ cm}^{-1}$ menjadi $1232,17\text{ cm}^{-1}$. Pergeseran tersebut menunjukkan adanya keterlibatan gugus aktif biosorben dalam proses adsorpsi. Selain itu, muncul pita baru pada $1156,15\text{ cm}^{-1}$ yang dikaitkan dengan vibrasi regangan gugus sulfonat (S=O) dari Methyl Orange. Kemunculan pita tersebut mengindikasikan bahwa molekul Methyl Orange telah teradsorpsi pada permukaan KL-PTI. Gugus sulfonat merupakan gugus khas pada zat warna azo anionik sehingga sering digunakan sebagai indikator keberhasilan adsorpsi pada material berbasis biomassa (Wu et al., 2021).

Perubahan spektrum FTIR setelah adsorpsi menunjukkan bahwa gugus hidroksil (O–H), amina (N–H), karbonil (C=O), serta gugus beroksigen lainnya berperan dalam proses pengikatan Methyl Orange. Gugus amina dari protein diperkirakan berinteraksi dengan gugus sulfonat pada Methyl Orange melalui interaksi elektrostatik, sedangkan gugus hidroksil dapat berkontribusi dalam pembentukan ikatan hidrogen. Selain itu, struktur aromatik yang terdapat pada biomassa memungkinkan terjadinya interaksi π – π dengan cincin aromatik Methyl Orange. Hasil FTIR menunjukkan bahwa modifikasi menggunakan putih telur itik berhasil memperkaya gugus aktif pada permukaan kulit lengkung sehingga meningkatkan potensinya sebagai biosorben untuk adsorpsi zat warna anionik (Ma et al., 2022).

2. Panjang Gelombang dan Kurva Standar

Berdasarkan Gambar 1(a), hasil pemindaian spektrum UV-Vis menunjukkan bahwa Methyl Orange memiliki panjang gelombang maksimum (λ_{maks}) sebesar 506 nm. Panjang gelombang maksimum merupakan panjang gelombang yang menghasilkan absorbansi tertinggi sehingga dipilih sebagai kondisi optimum dalam analisis spektrofotometri UV-Vis karena memberikan sensitivitas dan ketelitian yang lebih baik. Nilai λ_{maks} sebesar 506 nm menunjukkan bahwa Methyl Orange berada pada bentuk terprotonasi (azonium) yang umumnya terbentuk pada suasana asam. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan bahwa bentuk asam Methyl Orange memiliki serapan maksimum pada kisaran 506–508 nm, sedangkan pada kondisi basa λ_{maks} bergeser ke sekitar 464–470 nm akibat perubahan struktur molekul dan sistem konjugasi kromofor (Kostjukov, 2026).

Setelah panjang gelombang maksimum Methyl Orange ditetapkan pada 506 nm, tahap selanjutnya adalah penyusunan kurva kalibrasi menggunakan larutan standar pada rentang konsentrasi 3–7 ppm. Hubungan antara konsentrasi dan nilai absorbansi menghasilkan persamaan regresi $y = 0,1117x - 0,0195$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9991. Nilai R^2 yang mendekati satu menunjukkan bahwa respons absorbansi memiliki hubungan linear yang sangat kuat terhadap peningkatan konsentrasi Methyl Orange. Linearitas yang tinggi tersebut mengindikasikan bahwa metode spektrofotometri UV-Vis memenuhi prinsip Hukum Beer–Lambert, yaitu absorbansi meningkat secara proporsional seiring bertambahnya konsentrasi analit pada rentang pengukuran tertentu. Dengan demikian, kurva kalibrasi yang diperoleh memiliki tingkat keandalan yang baik dan dapat digunakan sebagai dasar dalam penentuan konsentrasi Methyl Orange pada sampel uji (Delgado, 2022; Mayerhöfer et al., 2020).

3. Kecepatan Pengadukan

Berdasarkan Gambar 2, peningkatan kecepatan pengadukan dari 100 rpm hingga 200 rpm meningkatkan kapasitas penyerapan dari 64,43 mg/g menjadi 66,47 mg/g. Namun, pada kecepatan 250 rpm dan 300 rpm kapasitas penyerapan menurun menjadi 65,89 mg/g dan 65,57 mg/g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kecepatan pengadukan optimum pada penelitian ini adalah 200 rpm.

Peningkatan kapasitas penyerapan hingga 200 rpm terjadi karena pengadukan mampu mempercepat perpindahan massa antara adsorbat dan biosorben. Kecepatan pengadukan yang semakin tinggi akan memperkecil ketebalan lapisan batas di sekitar permukaan biosorben sehingga hambatan difusi eksternal berkurang. Akibatnya, molekul adsorbat lebih mudah mencapai gugus fungsi aktif pada permukaan biosorben, sehingga kapasitas adsorpsi meningkat (Osman et al., 2023).

Penurunan kapasitas penyerapan pada kecepatan 250–300 rpm menunjukkan bahwa pengadukan yang terlalu tinggi tidak selalu meningkatkan proses biosorpsi. Pengadukan berlebih dapat menyebabkan interaksi antara adsorbat dan biosorben menjadi kurang stabil. Selain itu, pengadukan dalam kecepatan tinggi dapat memicu terjadinya desorpsi atau pelepasan kembali adsorbat dari permukaan biosorben sehingga kapasitas penyerapan menurun (Gajendiran et al., 2023).

Hasil penelitian ini juga didukung oleh penelitian (Darma Ramadhani & Kurniawati, 2021) yang melaporkan bahwa biosorpsi metilen biru menggunakan limbah kulit lengkung

menunjukkan kondisi optimum pada 200 rpm. Dengan demikian, kecepatan pengadukan 200 rpm merupakan kondisi optimum karena mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan perpindahan massa dan kestabilan interaksi adsorbat–biosorben, sehingga menghasilkan kapasitas penyerapan tertinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa modifikasi kulit lengkung menggunakan putih telur itik berhasil meningkatkan gugus fungsi aktif pada permukaan biosorben sehingga mampu meningkatkan adsorpsi Methyl Orange. Kecepatan pengadukan optimum diperoleh pada 200 rpm, yang memberikan kapasitas adsorpsi tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa modifikasi biomassa dan pengaturan kecepatan pengadukan berperan penting dalam meningkatkan efektivitas biosorpsi zat warna anionik.

Temuan penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan biosorben berbasis limbah biomassa yang ramah lingkungan sebagai alternatif pengolahan limbah zat warna. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji parameter adsorpsi lainnya, seperti pH, waktu kontak, kinetika, isoterm, dan regenerasi biosorben, serta mengeksplorasi biomassa lignoselulosa lain yang dimodifikasi untuk memperoleh biosorben dengan kapasitas adsorpsi dan stabilitas yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, M., & Trari, M. (2024). Adsorption behavior of methylene blue onto activated coconut shells: Kinetic, thermodynamic, mechanism and regeneration of the adsorbent. *Dose-Response*, 22(4), Article 15593258241290708. <https://doi.org/10.1177/15593258241290708>
- Chollakup, R., Kongtud, W., Sukatta, U., Premchookiat, M., Piriyaatits, K., Nimitkeatkai, H., & Jarerat, A. (2021). Eco-friendly rice straw paper coated with longan (*Dimocarpus longan*) peel extract as bio-based and antibacterial packaging. *Polymers*, 13(18), Article 3096. <https://doi.org/10.3390/polym13183096>
- Dehmani, Y., El-Kordy, A., Georgin, J., Franco, D. S. P., Ba Mohammed, B., Schaefer, S., Dehbi, A., Tijani, N., Lamhasni, T., & Abouarnadasse, S. (2026). Synthesis and characterization of novel chitosan–clay coated iron oxide nanoparticles for optimized adsorption and mechanistic study of methyl orange in industrial wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 347, Article 150568. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150568>
- Delgado, R. (2022). Misuse of Beer–Lambert law and other calibration curves. *Royal Society Open Science*, 9(2), Article 211103. <https://doi.org/10.1098/rsos.211103>

- Franco, L. C., Nishi, L., Scaliante, M. H. N. O., & Cusioli, L. F. (2026). Treatments for textile wastewater: Perspectives from studies using supercritical water and biomass-based activated carbon—A review. *Processes*, 14(6), Article 885. <https://doi.org/10.3390/pr14060885>
- Gajendiran, V., Deivasigamani, P., Sivamani, S., & Sivakumar, P. M. (2023). A review on cassava residues as adsorbents for removal of organic and inorganic contaminants in water and wastewater. *Journal of Chemistry*, 2023, Article 7891518. <https://doi.org/10.1155/2023/7891518>
- Hoa, N. T. H., Quynh, N. T., Nguyen, V. D., Nguyen, T. N., Huy, B. Q., Thanh, N. T., Loan, H. T., Hoa, N. T. Q., & Nghia, N. T. (2025). Adsorptive removal of Reactive Black 5 by longan peel-derived activated carbon: Kinetics, isotherms, thermodynamics, and modeling. *Water*, 17(11), Article 1678. <https://doi.org/10.3390/w17111678>
- Irawati, H., Aprilita, N. H., & Sugiharto, E. (2018). Adsorpsi Zat Warna Kristal Violet Menggunakan Limbah Kulit Singkong (*Manihot esculenta*). *Berkala MIPA*, 25(1), 17–31. <https://journal.ugm.ac.id/bimipa/article/view/17940>
- Islam, M. M., Aidid, A. R., Mohshin, J. N., Mondal, H., Ganguli, S., & Chakraborty, A. K. (2025). A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. *Cleaner Chemical Engineering*, 11, Article 100165. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165>
- Kamaru, A. A., Sani, N. S., & Malek, N. A. N. N. (2016). Raw and surfactant-modified pineapple leaf as adsorbent for removal of methylene blue and methyl orange from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 57(40), 18836–18850. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1095122>
- Khan, A. U., Zahoor, M., Rehman, M. U., Shah, A. B., Zekker, I., Khan, F. A., Ullah, R., Albadrani, G. M., Bayram, R., & Mohamed, H. R. H. (2022). Biological mineralization of methyl orange by *Pseudomonas aeruginosa*. *Water*, 14(10), Article 1551. <https://doi.org/10.3390/w14101551>
- Kostjukov, V. (2026). Excitation of three forms of methyl orange dye in aqueous solution: A comparative theoretical analysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 478, Article 117205. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2026.117205>
- Li, M., Hou, X., Lin, L., Jiang, F., Qiao, D., & Xie, F. (2023). Legume protein/polysaccharide food hydrogels: Preparation methods, improvement strategies and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 243, Article 125217. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125217>
- Ma, J., Hou, L., Li, P., Zhang, S., & Zheng, X. (2022). Modified fruit pericarp as an effective biosorbent for removing azo dye from aqueous solution: Study of adsorption properties and mechanisms. *Environmental Engineering Research*, 27(2), Article 200634. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.634>
- Malbenia John, M., Benettayeb, A., Belkacem, M., Ruvimbo Mitchel, C., Hadj Brahim, M., Benettayeb, I., Haddou, B., Al-Farraj, S., Alkahtane, A. A., Ghosh, S., Chia, C. H., Sillanpää, M., Baigenzhenov, O., & Hosseini-Bandegharai, A. (2024). An overview on the key advantages and limitations of batch and dynamic modes of biosorption of metal ions. *Chemosphere*, 357, Article 142051. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142051>

- Mayerhöfer, T. G., Pahlow, S., & Popp, J. (2020). The Bouguer–Beer–Lambert law: Shining light on the obscure. *ChemPhysChem*, 21(18), 2029–2046. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000464>
- Mnyango, J. I., Nyoni, B., Phiri, C., Fouda-Mbanga, B. G., Amusat, S. O., Maringa, A., Yalala-Ndlovu, B., Hlabano-Moyo, B., Tywabi-Ngeva, Z., & Hlangothi, S. P. (2025). Sustainable wastewater treatment: Mechanistic, environmental, and economic insights into biochar for synthetic dye removal. *Next Materials*, 9, Article 100974. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100974>
- Mohadi, R., Normah, N., Fitri, E. S., & Palapa, N. R. (2022). Unique adsorption properties of cationic dyes malachite green and Rhodamine B on longan (*Dimocarpus longan*) peel. *Science and Technology Indonesia*, 7(1), 115–125. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.1.115-125>
- Osman, A. I., Abd El-Monaem, E. M., Elgarahy, A. M., Aniagor, C. O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M. I., López-Maldonado, E. A., Ihara, I., Yap, P.-S., Rooney, D. W., & Eltaweil, A. S. (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>
- Putra, A., Fauzia, S., Deswati, D., Arief, S., & Zein, R. (2024). The potential of duck egg white as a modifier for activated rice straw to enhance Cr(VI) ions adsorption in an aqueous solution. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.02.002>
- Ramadhani, E. D., & Kurniawati, D. (2021). Effect of contact time and agitation speed on the adsorption process of methylene blue dyes using longan shell (*Euphoria longan* L.) as biosorbent. *American Journal of Sciences and Engineering Research*, 4(6), 143–149. <https://iarjournals.com/upload/46143149.pdf>
- Rattanavijit, U., Chaipetch, W., Salae, N., & Khaekta, P. (2022). Adsorption of fabric dye from synthetic wastewater by using agricultural waste as biosorbent. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, 6(1), 39–50. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JVIA/article/view/253303>
- Sambang, L. M., Kenne Dedzo, G., Rigolet, S., & Ngameni, E. (2023). Solvent-free functionalization of sawdust with quaternary ammonium groups: Application to the biosorption of two anionic dyes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, Article 101068. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101068>
- Tsoutsas, E. K., Tolkou, A. K., Kyzas, G. Z., & Katsoyiannis, I. A. (2024). An update on agricultural wastes used as natural adsorbents or coagulants in single or combined systems for the removal of dyes from wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(3), Article 178. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06979-9>
- Wang, Y., Li, Y., Yang, Y., Jiang, B., Li, D., Liu, C., & Feng, Z. (2023). A novel adsorbent driven from salted egg white for efficient removal of cationic organic dyes from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 372, Article 121210. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121210>
- Wu, L., Liu, X., Lv, G., Zhu, R., Tian, L., Liu, M., Li, Y., Rao, W., Liu, T., & Liao, L. (2021). Study on the adsorption properties of methyl orange by natural one-dimensional nano-mineral materials with different structures. *Scientific Reports*, 11(1), Article 10640. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90235-1>

- 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), Article 2417. <https://doi.org/10.3390/polym16172417>
- Yan, Y., Hang, F., Wei, T., Xie, C., & Niu, D. (2022). Modification of ovalbumin by Maillard reaction: Effect of heating temperature and different monosaccharides. *Frontiers in Nutrition*, 9, Article 914416. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.914416>
- Yolanda, A. T., & Kurniawati, D. (2026). Pengaruh Kecepatan Pengadukan pada Biosorpsi Direct Blue 86 oleh Kulit Kelengkeng Termodifikasi. *MASALIQ: Jurnal Pendidikan dan Sains*, 6(3), 1190–1203. <https://ejournal.yasin-alsys.org/masaliq/article/view/9912>
- Yu, B., Guo, M., Dong, H., Pei, J., Wan, X., & Xiang, S. (2025). MgAl layered double oxide: A promising adsorbent for effective methyl orange removal from wastewater. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(12), Article 102274. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102274>
- Zein, R., Hevira, L., Zilfa, Rahmayeni, Fauzia, S., & Ighalo, J. O. (2023). The improvement of indigo carmine dye adsorption by *Terminalia catappa* shell modified with broiler egg white. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 13795–13812. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02290-3>