

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran air akibat aktivitas manusia telah menjadi permasalahan global yang memengaruhi berbagai sektor, termasuk kesehatan, ekosistem, dan perekonomian. Beragam jenis polutan seperti logam berat dan limbah industri semakin mencemari sumber daya air di banyak negara. Salah satu sumber pencemaran air yang signifikan berasal dari limbah industri tekstil yang mengandung bahan kimia berbahaya seperti zat pewarna dan garam, yang merusak kualitas air serta ekosistem perairan (Chen et al., 2019). Zat pewarna tekstil umumnya bersifat kompleks, sulit terurai secara biologis, dan dapat bertahan lama di lingkungan, mencemari sumber air dengan warna mencolok yang menurunkan kualitas estetika dan menyebabkan kerusakan lingkungan jangka panjang (Aragaw, 2024). Di antara zat pewarna yang sering terdeteksi dalam limbah tekstil adalah metilen biru (MB), yaitu zat pewarna kationik yang digunakan dalam berbagai industri seperti tekstil, kulit, dan kosmetik. MB juga bersifat stabil secara kimia, sehingga sulit terurai di lingkungan alami, serta berdampak signifikan terhadap terganggunya proses biologis dan penurunan kualitas air secara keseluruhan (Duan et al., 2025).

Untuk mengatasi permasalahan ini, metode adsorpsi dianggap sebagai solusi yang menjanjikan karena kesederhanaannya, biaya yang rendah, dan efisiensi tinggi dalam menghilangkan zat pewarna. Adsorpsi merupakan salah satu teknik paling efektif dan ramah lingkungan untuk mengeliminasi zat pewarna sintetis seperti MB dari air limbah. Proses ini melibatkan penempelan molekul polutan (adsorbat) pada permukaan suatu bahan padat (adsorben), seperti karbon aktif (AC) yang berasal dari kulit durian (Andrade et al., 2025), (Pan et al., 2025). Kulit durian yang diaktivasi secara kimia menghasilkan karbon dengan luas permukaan yang besar dan porositas tinggi, sehingga mampu menghilangkan MB secara efisien bahkan pada konsentrasi rendah (Munonde et al., 2025). Pendekatan ini juga mendukung keberlanjutan dengan memanfaatkan sumber biomassa terbarukan (Njewa & Shikuku, 2023). Dibandingkan dengan metode seperti fotokatalisis, adsorpsi menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi dan menghindari pembentukan produk samping yang berbahaya (Ouni et al., 2024).

Karbon Aktif Kulit Durian (DPAC) semakin mendapatkan perhatian sebagai bahan karbon dengan potensi tinggi karena sifat fisikokimia yang unik dan kandungan lignoselulosa yang tinggi. Dibandingkan dengan bahan lainnya, kulit durian mengandung 60,50% selulosa, 13,30% hemiselulosa, dan 15,50% lignin, merupakan karbon yang sangat baik untuk aplikasi pengolahan air (Aragaw, 2024), (Tambun et al., 2024). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa AC dapat diproduksi dari kulit durian melalui aktivasi kimia dengan hidrokoksida (KOH) dan pemanasan pada suhu tinggi. Karbon ini menunjukkan potensi besar untuk adsorpsi pewarna, dengan efisiensi adsorpsi MB mencapai hingga 98,98%. Selain AC, bahan alami lainnya



dengan potensi besar untuk pemurnian air adalah eceng gondok. Meskipun dikenal sebagai gulma perairan invasif di perairan tropis dan subtropis, eceng gondok mengandung serat yang sangat berpori yang secara efektif menyerap berbagai polutan, termasuk logam berat, nutrisi, dan zat organik (Kusuma et al., 2024). Salah satu keunggulannya adalah kemampuannya untuk menyerap kontaminan langsung dari air tanpa memerlukan perlakuan lebih lanjut seperti pirolisis. Menurut penelitian terbaru, efisiensi penghilangan MB oleh eceng gondok dapat mencapai hingga 99% dalam waktu kurang dari lima menit, menjadikannya agen fitoremediasi yang sangat cepat dan efisien (Obayomi et al., 2023).

Meskipun banyak penelitian telah membahas potensi AC dalam pengolahan air limbah, di sini kami memperluas penelitian dengan mengadopsi pendekatan baru yang menggabungkan DPAC dan eceng gondok sebagai agen fitoremediasi dalam proses adsorpsi melalui tujuh siklus untuk penghilangan pewarna MB. Selain itu, proses adsorpsi dipantau secara real-time menggunakan sistem *Internet of Things* (IoT). Struktur kristal, gugus fungsi, dan morfologi permukaan bahan dianalisis menggunakan XRD, FT-IR, dan SEM. Selain itu, morfologi permukaan pasca-adsorpsi juga dianalisis untuk menilai dampak paparan polutan terhadap struktur bahan. Oleh karena itu, strategi terintegrasi ini menawarkan solusi inovatif dan berkelanjutan untuk penghilangan MB secara iteratif, memberikan kinerja adsorpsi yang lebih baik, aplikasi yang lebih luas, dan kontribusi berarti dalam manajemen air limbah berbasis biomassa.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Meningkatkan kapasitas dan efisiensi adsorpsi MB oleh karbon aktif kulit durian (DPAC) dengan variasi massa dan penggunaan berulang.
2. Menganalisis perubahan struktur, morfologi, dan gugus fungsional DPAC sebelum dan sesudah adsorpsi menggunakan XRD, SEM, dan FTIR.
3. Mengkaji efektivitas kombinasi DPAC dan fitoremediasi eceng gondok dalam menghilangkan MB dari air tercemar.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi ramah lingkungan dalam bidang pengolahan air limbah, khususnya melalui pemanfaatan biomassa limbah kulit durian sebagai bahan dasar karbon aktif. Temuan ini memperdalam pemahaman terkait peran struktur pori dan gugus fungsional dalam proses adsorpsi terhadap zat pewarna seperti MB. Selain



metode fitoremediasi menggunakan eceng gondok serta berbasis IoT menjadi model yang potensial untuk diaplikasikan dsorpsi berkelanjutan di masa mendatang.

tis

ian ini berpotensi untuk diimplementasikan sebagai solusi am pengolahan limbah cair, baik dari skala rumah tangga stri. Pendekatan gabungan antara adsorpsi menggunakan

DPAC dan fitoremediasi dengan eceng gondok terbukti dapat meningkatkan efektivitas penghilangan polutan tanpa menggunakan bahan kimia berbahaya. Metode ini bersifat adaptif dan dapat diterapkan secara luas karena kemudahan bahan baku, proses operasional yang sederhana, dan skalabilitas yang fleksibel.

3. Manfaat Ekonomi dan Lingkungan

Studi ini menawarkan pendekatan yang lebih ekonomis dan berwawasan lingkungan untuk menangani limbah cair, dengan memanfaatkan limbah pertanian seperti kulit durian sebagai bahan aktif adsorben. Pemanfaatan sumber daya lokal ini membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis, sekaligus mendukung pengurangan limbah organik dan penerapan prinsip ekonomi sirkular. Selain menekan biaya operasional pengolahan limbah, penggunaan bahan alami ini juga menciptakan peluang ekonomi baru berbasis pengolahan limbah dan turut menjaga kualitas lingkungan perairan.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober hingga Desember 2024, di Laboratorium Fisika Material Dan Energi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar.

2.2 Bahan dan Alat

2.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Metilen biru
2. Kulit durian (*Durio Zibethinus*)
3. *Aquadest*
4. Kalium Hidroksida (99%)
5. Asam klorida (37%)
6. Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*)

2.2.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. *Furnace*
2. Oven
3. *Blender*
4. Cawan petri
5. Ayakan 200 *mesh*
6. Gelas kimia
7. Gelas ukur
8. Corong
9. Kertas saring *whatman 42*
10. Cawan kursibel
11. Spatula
12. Timbangan digital
13. *Magnetic Stirrer*
14. Arduino Uno R3
15. NodeMCU ESP8266
16. Sensor kekeruhan



2C
0
ransfrom Infrared)
action)
Electron Microscope)

-Vis

2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Bahan

Kulit durian diperoleh dari Olympic, Makassar, Sulawesi Selatan. KOH (99%) dan MB didapatkan dari Sumber Rejeki, Makassar. Asam klorida (HCl, 37%) dan akuades diperoleh dari Intraco, Makassar. Eceng gondok diperoleh di danau Universitas Hasanuddin, Makassar, Sulawesi Selatan. Informasi lebih lengkap dapat dilihat pada **Tabel 1**.

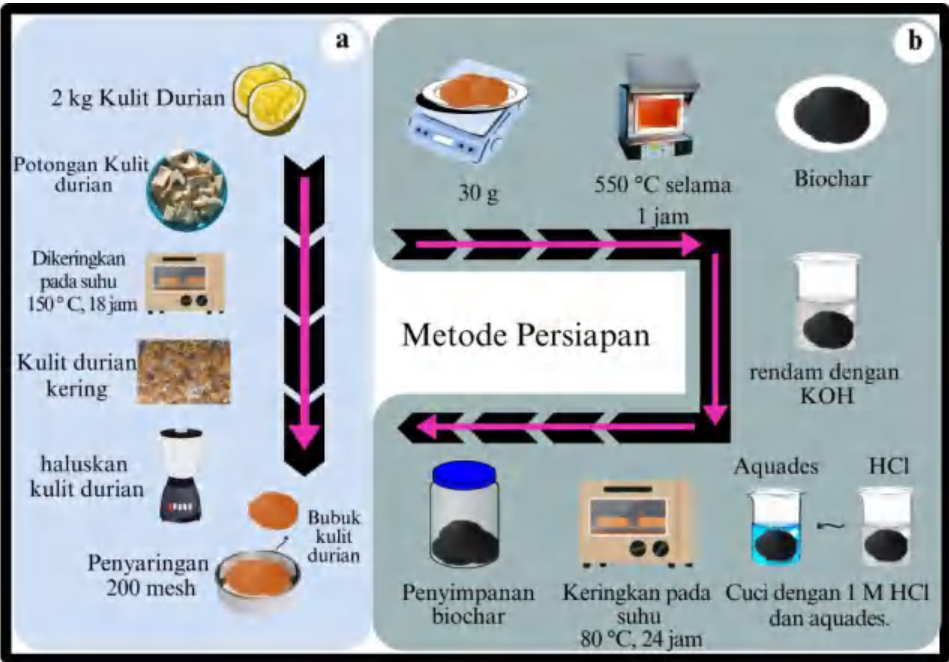
Tabel 1. Daftar bahan yang digunakan berdasarkan merek, kemurnian atau massa, dan kodenya.

Bahan/Kimia	Diperoleh	Kemurnian/ Massa	Kode
Kulit Durian	Olympic	2 kg	-
Kalium Hidroksida (KOH)	Sumber Rejeki	99.9%	105033
Asam Klorida (HCL)	Intraco	37%	100314
Aquades	Intraco	6.5 L	-
Metilen Biru	Sumber Rejeki	99.9%	-
Eceng Gondok	Makassar, Sulawesi Selatan	1 kg	-
Aluminium foil	Sumber Rejeki	8 M x 45 Cm	-

2.3.2 Preparasi Kulit Durian

Gambar 1 (a), sebanyak 2 kg kulit durian dipotong menjadi bagian-bagian kecil untuk memastikan pemotongan yang merata dimensi (2 x 2 x 1) cm. Potongan-potongan tersebut kemudian dicuci secara menyeluruh guna menghilangkan kotoran, debu, dan kontaminan lain yang menempel pada permukaan kulit durian. Setelah itu, potongan kulit durian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 18 jam untuk mengurangi kadar air hingga benar-benar kering. Setelah proses pengeringan selesai, kulit durian dihancurkan menggunakan *blender* berkecepatan tinggi hingga menjadi bubuk halus, kemudian diayak menggunakan ayakan 200 mesh partikel yang seragam.





Gambar 1. Metode preparasi (a) kulit durian, (b) karbon aktif.

Langkah selanjutnya ditunjukkan pada **Gambar 1 (b)**, yaitu memasukkan 30 g bubuk halus kulit durian ke dalam wadah tahan panas dan memanaskannya di dalam *furnace* pada suhu 550 °C selama 1 jam. Proses pemanasan dengan suhu tinggi ini bertujuan untuk mengubah bubuk kulit durian menjadi biochar, yaitu karbon yang memiliki efisiensi adsorpsi tinggi. Biochar yang dihasilkan kemudian direndam dalam larutan KOH dengan perbandingan 1:2 g (biochar/KOH) untuk meningkatkan porositas dan luas permukaan, serta meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Campuran biochar dan KOH dibiarkan pada suhu kamar semalaman (~8 jam) agar proses impregnasi berlangsung optimal. Setelah itu, biochar dicuci berulang kali dengan larutan HCl 1 M dan air suling untuk menghilangkan sisa residu dan menetralkan biochar hingga mencapai pH antara 6,7 – 7. Langkah terakhir adalah mengeringkan biochar aktif pada suhu 80 °C selama 24 jam untuk memastikan semua kadar air telah hilang. Biochar aktif yang telah dikeringkan kemudian disimpan dalam wadah tertutup rapat agar terlindung dari udara dan kelembapan lingkungan, sehingga siap digunakan sesuai kebutuhan. Dalam penelitian ini, material yang digunakan dianalisis berdasarkan detail yang disajikan pada **Tabel 2**.



duksi sampel.	
ole ID	Note
AC	Sebelum digunakan
C-MB	Setelah digunakan

2.4 Pengamatan dan Pengukuran

2.4.1 X-Ray Diffraction (XRD)

Untuk mengidentifikasi fasa dan menentukan struktur kristal material, dilakukan karakterisasi menggunakan XRD SHIMADZU XRD 7000. Untuk menghitung ukuran rata-rata material, digunakan persamaan *Scherrer* sebagai berikut: (Heryanto, Tahir, et al., 2024), (Heryanto, Mutmainna, et al., 2024).

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

D adalah ukuran kristalit, k adalah konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang radiasi sinar-X (untuk Cu = 0,154 nm), θ adalah sudut difraksi, dan β adalah FWHM (Full Width Half Maximum). Regangan mikro, ε , yang diakibatkan oleh cacat kristal, distorsi, dan ketidaksesuaian kisi, dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut: (Lim & Yam, 2025), (Diputra et al., 2025).

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (2)$$

2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

FTIR tipe IRPrestige-21, Shimadzu Corp, digunakan untuk menganalisis gugus fungsi yang ada dalam sampel, pada rentang gelombang 550 cm⁻¹ sampai dengan 4000 cm⁻¹.

2.4.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM (Hitachi TM4000 Plus II) digunakan untuk karakterisasi struktur mikro dari sampel.

2.4.4 UV-Vis Spectroscopy

Pengujian UV-Vis *Spectroscopy* (UV-Vis Shimadzu 1800) bertujuan untuk mengetahui kemampuan sampel dalam mengadsorpsi polutan MB. Untuk menentukan efisiensi adsorpsi dan kinerja kapasitas adsorpsi, dihitung menggunakan persamaan : (Xing et al., 2024)

$$D (\%) = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \quad (3)$$

$$Q = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (4)$$

efisiensi penyerapan, sedangkan C_o dan C_e menunjukkan akhir dalam g/mL. V menunjukkan volume larutan (L), m adalah dan Q menunjukkan kapasitas penyerapan (mg/g).

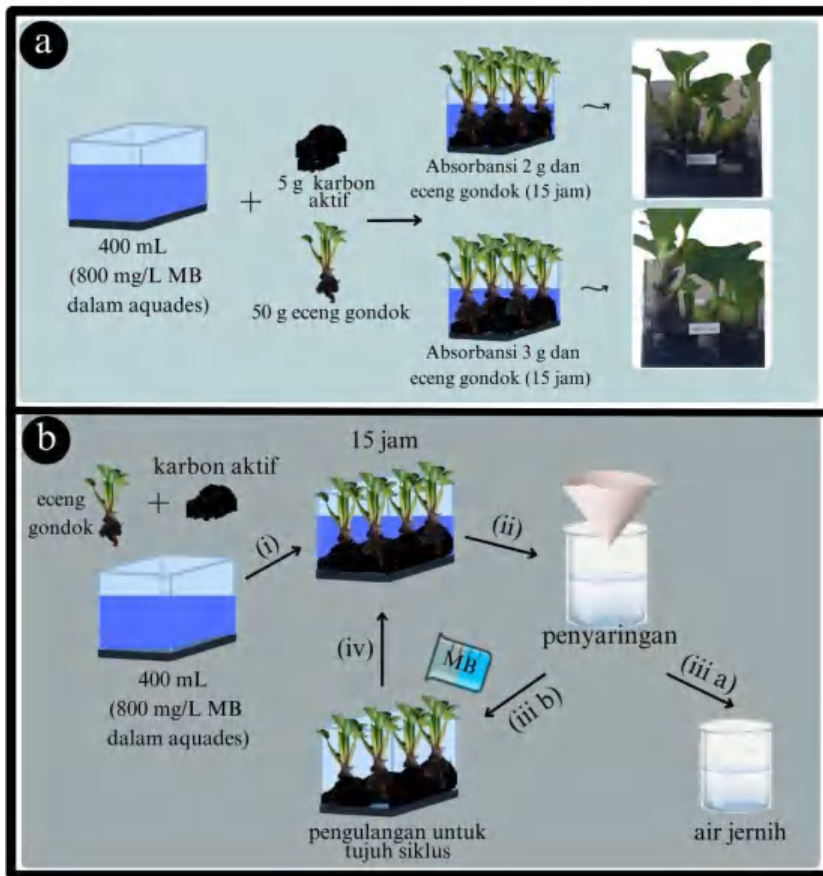


2.5 Uji Adsorpsi

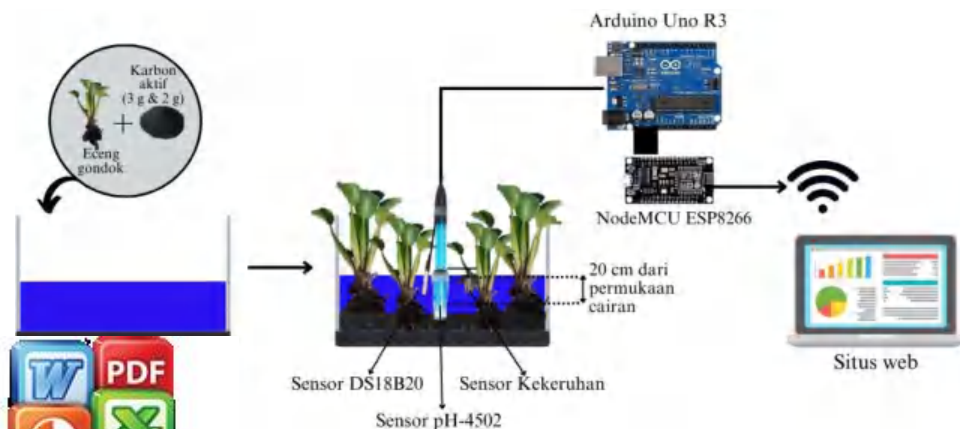
Sebagai polutan, 400 mL MB (800 mg/L) digunakan sebagai larutan, dan kemudian dimasukkan ke dalam 2 wadah bening untuk persiapan proses pemurnian. Pada **Gambar 2 (a)**, masing-masing wadah diisi dengan DPAC dengan variasi massa 2 g dan 3 g untuk membandingkan keefektifannya dalam mengadsorpsi zat warna. Tanaman eceng gondok ditambahkan ke dalam masing-masing larutan campuran tersebut sebagai agen fitoremediasi alami dan digunakan untuk mempercepat proses pemurnian melalui mekanisme penyerapan pada akar dan jaringan tanaman. Larutan tersebut kemudian dibiarkan selama 15 jam untuk memberikan waktu yang cukup untuk proses adsorpsi oleh AC dan eceng gondok.

Metode siklus yang ditunjukkan pada **Gambar 2 (b)** mengilustrasikan mekanisme degradasi menggunakan kombinasi AC dan eceng gondok. Tahap pertama (i) dimulai dengan mencampurkan 400 mL larutan MB dengan akar eceng gondok dan AC. Campuran yang dihasilkan dibiarkan bereaksi selama 15 jam untuk memungkinkan terjadinya interaksi antara MB, AC, dan akar eceng gondok dalam proses degradasi. Setelah waktu kontak selesai, tahap kedua (ii) melibatkan penyaringan larutan dengan menggunakan kertas saring untuk memisahkan partikel tersuspensi, AC, dan akar eceng gondok. Setelah penyaringan, air terdegradasi yang telah menjadi jernih dikategorikan sebagai air olahan (iii a). Pada tahap (iii b), setelah satu siklus selesai, larutan MB yang baru ditambahkan kembali ke dalam wadah untuk melanjutkan proses adsorpsi. Siklus terakhir (iv) kemudian diulang hingga tujuh siklus, untuk mengevaluasi kinerja degradasi dan stabilitasnya.





Gambar 2. (a) Adsorpsi MB dengan fitoremediasi, (b) siklus pengulangan



Gambar 3. Uji adsorpsi menggunakan IoT menunjukkan sistem IoT yang digunakan untuk memantau proses dengan pemantauan secara berkala. Alat pemantau dipasang 20 cm dari permukaan cairan untuk memperoleh data yang akurat.

Sistem pemantauan berbasis IoT ini digunakan untuk mengamati perubahan variabel secara *real time*. Sensor-sensor yang digunakan dalam sistem ini meliputi sensor suhu DS18B20 untuk mengukur perubahan suhu dalam larutan selama proses berlangsung, sensor pH-4502C untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan larutan MB selama proses adsorpsi dan fitoremediasi, serta sensor kekeruhan untuk mengukur tingkat kekeruhan air yang mencerminkan jumlah partikel tersuspensi dalam larutan. Arduino Uno R3 berfungsi sebagai pengontrol utama untuk membaca data dari sensor-sensor tersebut, sedangkan NodeMCU ESP8266 berperan sebagai mikrokontroler dengan modul Wi-Fi yang mengirimkan data sensor ke situs web untuk pemantauan jarak jauh. Data yang diperoleh dikirimkan ke situs pemantauan melalui jaringan IoT untuk dianalisis lebih lanjut (Heryanto, 2025).

2.6.1 Pelaksanaan Penelitian

