

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ekosistem, yang mencakup air, udara, dan tanah, semakin mengalami degradasi akibat pencemaran lingkungan (Mkilima et al., 2024a), terutama aktivitas industri nikel (Kadhim & Abbar, 2023). Kelangkaan air telah menjadi isu global yang serius, disebabkan oleh tingginya permintaan yang melebihi kapasitas yang tersedia, sehingga mengakibatkan dampak terhadap miliaran individu di seluruh dunia, dengan jumlah yang terkena dampak mencapai 773. 817 orang pada tahun 2022 (Mustapa et al., 2023). Mengingat pentingnya peninjauan secara berkala untuk mendeteksi potensi pencemaran, upaya menjaga kualitas air perlu terus ditingkatkan (Mkilima et al., 2024b). Sejak awal abad ke-20, industri nikel telah menjadi sumber utama pencemaran logam berat yang memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan organisme hidup (Sivaranjanee et al., 2022). Aktivitas industri nikel menghasilkan limbah padat dan cair dalam jumlah besar, termasuk slag, yang dapat menimbulkan dampak lingkungan yang merugikan (Opiso et al., 2023). Slag nikel, sebagai limbah dari peleburan bijih nikel bermagnesium tinggi, mengandung 22,27% SiO_2 , 26,93% MgO , 6,19% Al_2O_3 , 4,20% Fe_2O_3 , dan 8,77% CaO (L'Ecuyer-Sauvageau et al., 2019).

Oleh karena itu, salah satu metode yang efektif dalam pengolahan polutan adalah metode adsorpsi, yang terbukti efisien dalam mengolah polutan organik maupun anorganik. Metode adsorpsi dikenal luas dalam konteks pemurnian air limbah akibat dari efisiensi operasional yang tinggi serta keberagaman jenis adsorben yang tersedia. Adsorben berbasis biomassa telah dimanfaatkan secara efektif untuk menghilangkan karat, kerak hitam, dan senyawa logam, dengan efektivitas adsorben tersebut menjadi faktor penting dalam proses adsorpsi. Berbagai jenis bahan lignoselulosa telah diteliti dalam upaya menghilangkan polutan melalui mekanisme adsorpsi, hal ini disebabkan karena bio-adsorben memiliki keunggulan dari segi efisiensi biaya, ketersediaan bahan baku yang melimpah, serta memberikan dampak lingkungan yang lebih minimal dibandingkan dengan adsorben berbasis bahan kimia komersial. Kulit buah, khususnya kulit pisang, telah terbukti efektif dalam penelitian sebagai agen untuk menghilangkan kontaminan dari air limbah, menunjukkan potensi yang signifikan dalam mengadsorpsi logam berat, berkat ketersediaannya yang melimpah dan daya serap yang tinggi (Neolaka et al., 2024).

Kulit pisang merupakan produk limbah yang berpotensi untuk dimanfaatkan karena memiliki kandungan selulosa dan mineral sebagai konstituen utama serta karboksil, hidroksil, dan amida yang berkontribusi pada proses (Musa et al., 2024). Komposisi kulit pisang (*Musa × paradisiaca*) meliputi 1,6% abu, 21,2% serat, 1,23% protein, 2,01% lemak, 22,6% protein, 31% selulosa, yang membuatnya menjadi bahan baku yang ideal untuk pembuatan karbon aktif (Yanti et al., 2023). Karbon aktif banyak digunakan sebagai adsorben karena memiliki luas permukaan yang besar dan



struktur pori yang tersusun dengan baik, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi (Y. Shi et al., 2025). Selanjutnya, sodium alginat adalah polimer anionik alami yang diekstrak dari rumput laut coklat dan dapat berkelekat dengan ion divalen seperti Ca^{2+} membentuk hidrogel (Aksu Demirezen et al., 2023). Sodium alginat semakin mendapat perhatian dalam pengolahan air limbah karena biayanya yang terjangkau dan sifat adsorpsinya yang sangat baik. (Yaacoubi et al., 2024). Kombinasi karbon aktif dan sodium alginat dalam bentuk *beads* dapat meningkatkan kestabilan mekanik serta mengurangi permasalahan terkait suspensi pada proses pengolahan air secara berkelanjutan (Gaur et al., 2024).

Adsorben berbasis biomassa, seperti karbon aktif dari kulit pisang dan sodium alginat, efektif dalam menghilangkan polutan dari air limbah. Untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan, kombinasi dengan fitoremediasi menggunakan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) menjadi solusi yang menjanjikan, karena tanaman ini mampu menyerap unsur beracun dari air melalui mekanisme fitoremediasi (Flafel et al., 2024). Fitoremediasi sendiri merupakan teknik yang memanfaatkan tanaman untuk menyerap, menstabilkan, atau mendegradasi polutan, termasuk logam berat seperti Cd, Pb, Cu, Cr, Zn, Sn, dan Ag, dengan demikian, keberadaan adsorben ini berpotensi meningkatkan kualitas ekosistem perairan melalui penurunan nilai kebutuhan oksigen biokimia dan kebutuhan oksigen kimiawi (LIU et al., 2025). Eceng gondok memiliki daya tahan tinggi terhadap kondisi lingkungan yang tercemar dan telah banyak digunakan dalam rehabilitasi lahan basah, pengolahan limbah industri, serta dekontaminasi lokasi pertambangan (Garcés-Gómez et al., 2024; Liang et al., 2024).

Beberapa penelitian telah meneliti penggunaan SA dan AC sebagai bahan adsorben untuk meningkatkan efisiensi penyerapan (Liang et al., 2024; Yaacoubi et al., 2024). Dalam konteks ini, diperkenalkan komposit antara sodium alginate dan kulit pisang menggunakan metode gelas ionotropik sebagai teknik yang efektif, ramah lingkungan, dan ekonomis yang berpotensi meningkatkan efisiensi adsorpsi, mengontrol ukuran butiran (*beads*), dan meminimalkan kebutuhan akan pelarut beracun. Selain itu, penggabungan komposit BPAC-SA *beads* dengan strategi fitoremediasi dan pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan proses evaluasi dapat menimbulkan diskusi baru dalam bidang pengolahan air.

1.2 Tujuan Penelitian

1. Membandingkan pengaruh variasi sodium alginate dan komposit sodium alginate-karbon aktif kulit pisang terhadap sifat adsorpsi material.
2. Menganalisis karakteristik, kimia, dan morfologi adsorben menggunakan FTIR,



efisiensi adsorpsi dan kapasitas SA *beads* dan BPAC-SA *beads* untuk menyerap polutan (Ni^{2+}) dari slag nikel.

efisiensi dan manfaat pada efek penggunaan adsorben yang dikombinasikan dengan fitoremediasi melalui eceng gondok untuk meningkatkan keberlanjutan

1.3 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam bidang remediasi lingkungan dengan mengkaji mekanisme adsorpsi dari adsorben berbasis biomassa, khususnya kombinasi sodium alginat dan karbon aktif yang berasal dari kulit pisang. Kajian ini memperluas pemahaman mengenai interaksi antara sodium alginat dan karbon aktif dalam material komposit yang berperan penting dalam meningkatkan stabilitas mekanik serta efisiensi proses adsorpsi. Selain itu, penerapan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) dalam studi ini menunjukkan efektivitasnya sebagai pendekatan modern yang dapat dijadikan acuan bagi penelitian di masa mendatang. Temuan dalam penelitian ini mendukung pengembangan metode pengolahan air limbah yang lebih ramah lingkungan dan efisien, khususnya dalam proses penghilangan ion logam berat Ni^{2+} dari limbah slag nikel.

2. Manfaat Praktis

Integrasi proses adsorpsi dan fitoremediasi diharapkan dapat meningkatkan efektivitas penghilangan logam berat dari air limbah. Eceng gondok, sebagai agen fitoremediasi, memiliki kemampuan mengakumulasi polutan, sementara material adsorben yang digunakan dapat mempercepat dan meningkatkan kapasitas penyerapan logam berat. Kombinasi kedua proses ini diharapkan menghasilkan sinergi yang mengoptimalkan kinerja pengolahan.

3. Manfaat Ekonomi dan Lingkungan

Penelitian ini menghadirkan pendekatan yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan dalam pengolahan air limbah industri dibandingkan metode konvensional berbasis bahan kimia. Pemanfaatan bahan alami seperti kulit pisang dan sodium alginat sebagai adsorben berperan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan sintesis yang umumnya mahal dan sulit terdegradasi. Selain itu, penggunaan limbah pertanian sebagai bahan baku adsorben sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yang tidak hanya membantu mengurangi jumlah limbah organik, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru dalam pengembangan industri berbasis limbah. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan sekaligus efisiensi biaya dalam proses pengolahan limbah industri.



BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 hingga Desember 2024, di Laboratorium Fisika Material Dan Energi, Departemen Fisika, FMIPA, Unhas.

2.2. Bahan dan Alat

2.2.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Kulit pisang (*Musa x paradiasca*)
2. Slag Nikel
3. Sodium Alginat ($\text{NaC}_6\text{H}_7\text{O}_6$)
4. Asam Klorida (HCl)
5. Sodium Hidroksida (NaOH)
6. *Aquadest*
7. Kalsium Klorida (CaCl_2)
8. Eceng gondok (*Eichhornia crassipes*)

2.2.2. Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Timbangan digital
 2. *Magnetic Stirrer*
 3. Gelas kimia
 4. Gelas ukur
 5. Corong
 6. Spatula
 7. *Furnace*
 8. *Oven*
 9. *Burret tetes*
 10. Cawan petri
 11. Cawan kursibel
 12. Ayakan 100 *mesh*
 13. Kertas saring *Whatman 42*
 14. Sensor kekeruhan
- ansfrom Infrared)
action)
Vis



2.3. Metode Penelitian.

2.3.1 Preparasi karbon aktif kulit pisang (BPAC)

Kulit pisang (3 kg) dicuci dengan akuades, dengan ukuran diperkecil menjadi potongan-potongan kecil ($\sim 4 \text{ cm}^2$) dengan cara dipotong dan dikeringkan selama 72 jam di bawah sinar matahari. Kemudian, selama 24 jam pada suhu 75°C menggunakan oven. Sampel dihaluskan menggunakan *blender* setelah dimasukkan ke dalam oven dan kemudian diayak dengan ayakan $100 \mu\text{m}$ untuk mendapatkan serbuk halus. Sampel direndam dalam larutan NaOH 0,2 M dalam 100 mL akuades selama 90 menit untuk menghilangkan pengotor, diikuti dengan pembilasan dengan akuades untuk menghilangkan sisa NaOH. Selanjutnya, sampel ditempatkan dalam wadah dan dikarbonisasi selama 2 jam pada suhu 400°C menggunakan *furnace* untuk mendapatkan *biochar* yang paling berpori. Sampel kemudian diaktivasi menggunakan larutan HCl 37% (1M) dalam 100 mL akuades. Selanjutnya, sampel diaduk selama 2 jam dan dimasukkan ke dalam oven selama 24 jam pada suhu 105°C . Proses preparasi sampel diilustrasikan pada **Gambar 1(a)**.

2.3.2 Preparasi komposit *beads*

- **Sintesis *beads* sodium alginat**

SA (2 g) ditambahkan ke dalam 100 mL akuades dan diaduk secara merata, dan Kalsium klorida (CaCl_2 (2%)) disiapkan secara terpisah. Kemudian SA dimasukkan setetes demi setetes, dengan sintesis pengikatan silang yang dilakukan dengan penambahan tetes demi tetes campuran larutan (SA) melalui *dropper buffet* ke dalam larutan CaCl_2 2% v/v. Reaksi cepat antara ion Ca^{2+} dan SA di permukaan menyebabkan tetesan mengeras menjadi bentuk bulatan di dalam larutan. SA yang terbentuk didiamkan selama 60 menit (waktu pematangan), diisolasi, dicuci, dan dikeringkan pada suhu kamar (*beads* tidak dikeringkan dengan oven untuk mencegah penutupan pori-pori, sehingga mengurangi porositasnya). Preparasi diilustrasikan pada **Gambar 1(b)**.

- **Sintesis *beads* sodium alginat yang menggabungkan karbon aktif kulit pisang (BPAC)**

Kulit pisang, yang dibuat menjadi karbon aktif (BPAC), digunakan untuk membuat adsorben karena porositasnya yang tinggi. Pertama, SA (2 g) dicampur ke dalam 100 mL akuades hingga homogen. Setelah itu, 1 g BPAC ditambahkan dan diaduk selama 4 jam dengan kecepatan 400 rpm. Selanjutnya, ikatan silang disintesis

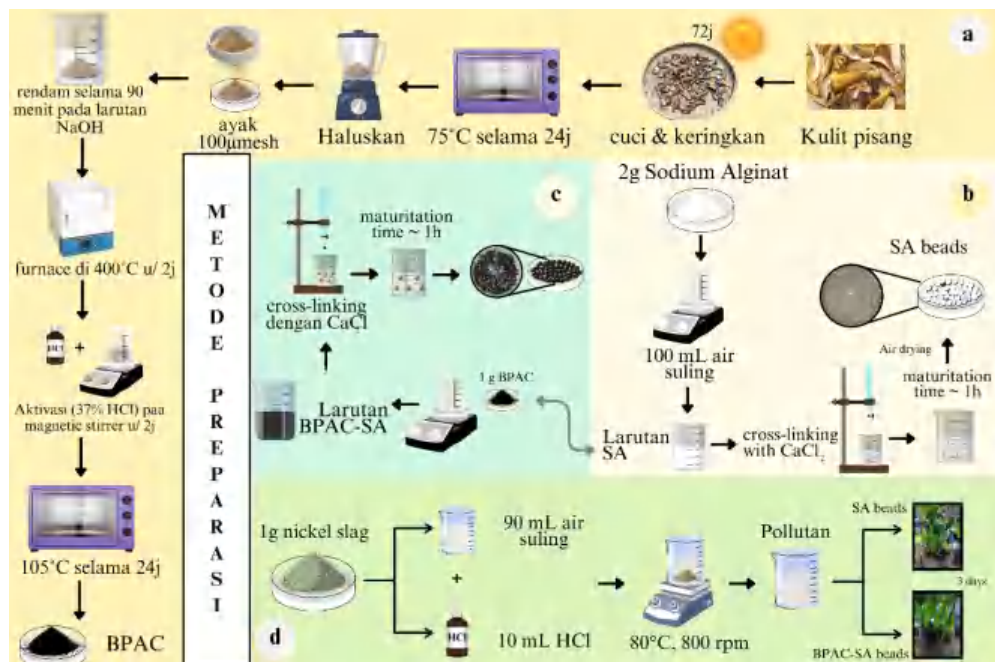


ikan campuran larutan (BPAC/SA) melalui *dropper buffet* ke 2% v/v. Reaksi cepat antara ion Ca^{2+} dan SA di permukaan n mengeras menjadi bentuk bulatan di dalam larutan. Dengan *beads* yang terbentuk didiamkan selama 60 menit (waktu rkan, dicuci, dan dikeringkan pada suhu kamar. *beads* tidak ven untuk mencegah penutupan pori, sehingga mengurangi Preparasi diilustrasikan pada **Gambar 1(c)** dan kami

mengidentifikasi bahan berdasarkan **Tabel 1** berdasarkan kebutuhan dalam proses produksi:

Tabel 1. Sumber produksi sampel

ID sample	AC (g)	SA (g)
BPAC	7 (Kulit pisang)	0
SA beads	0	2 (Sodium alginat)
BPAC – SA beads	2 (Kulit pisang)	4 (Sodium alginat)

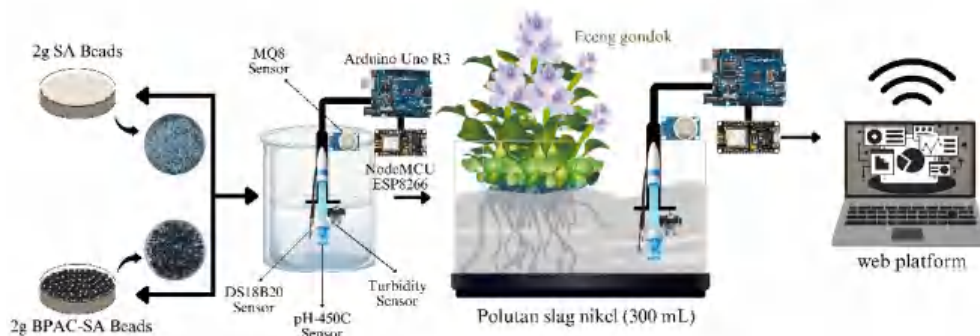


Gambar 1. Preparasi (a) karbon aktif pisang, (b) sintesis sodium alginat *beads*, (c) sintesis sodium alginat yang digabungkan dengan karbon aktif kulit pisang (BPAC) *beads*, dan (d) pembuatan polutan

2.3.3 Pembuatan polutan

Metode ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh SA *beads* dan BPAC-SA *beads* terhadap polutan (slag nikel) sebanyak 100 mL. Pertama, 1,0 g slag nikel dilarutkan ke dalam 10 mL HCl dan 90 mL akuades dengan kecepatan 800 rpm pada u, SA *beads* dan BPAC-SA *beads* dilarutkan ke dalam polutan. Masukkan ke dalam wadah yang berisi polutan dan sampel untuk polutan. Sebelumnya, pastikan untuk memasukkan 200 mL air suling. Tunggu hingga ~3 hari (66 jam). Tahapan pembuatan slag dan BPAC-SA beads dapat dilihat pada **Gambar 1(d)**.





Gambar 2. Monitoring analisis adsorpsi dengan menggunakan IoT

Gambar 2 mengilustrasikan penerapan IoT pada analisis adsorpsi sampel SA beads dan BPAC – SA beads terhadap polutan slag nikel. Aplikasi IoT dirancang untuk menganalisis pengolahan limbah slag nikel (300 mL) menggunakan kombinasi adsorpsi dan fitoremediasi. Adsorben yang mengandung 2 g sodium alginat beads (SA beads) dan karbon-sodium alginat beads (BPAC – SA beads) dimasukkan ke dalam larutan slag nikel. Parameter larutan seperti suhu (Sensor DS18B20), pH (Sensor pH-450C), dan kekeruhan (Sensor Turbidity) dimonitor menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 yang terhubung ke NodeMCU ESP8266 untuk transmisi data ke platform web. Selanjutnya, eceng gondok digunakan untuk proses fitoremediasi. Sistem ini mengintegrasikan pemantauan secara real-time melalui web, sehingga memberikan solusi yang efektif dan terintegrasi untuk pengolahan air limbah secara digital.

2.4. Pengamatan dan Pengukuran

2.4.1. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Spektrum FTIR (IR Prestige-21 Shimadzu) digunakan untuk menganalisis spektrum dalam sampel. Spektrogram FTIR direkam dalam rentang $700\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang ada dalam sampel. Pada spektroskopi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi berdasarkan vibrasi ikatan antar atom. Teorinya didasarkan pada model osilator harmonik, dengan dua atom mengalami vibrasi seperti massa yang dihubungkan pegas. Karena memenuhi Hukum Hooke, frekuensi fundamental vibrasi dua atom yang terikat secara kimia dapat diperkirakan dan pergeserannya menunjukkan interaksi, seperti dan ion logam Ni^{2+} . Berikut persamaan Hooke yang (ddiqui et al., 2023):

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (1)$$



Frekuensi getaran adalah ν , konstanta gaya klasik adalah k , dan penurunan massa kedua atom adalah μ .

2.4.2. X-ray diffraction (XRD)

XRD (SHIMADZU XRD 7000) dapat digunakan untuk melihat fase amorf yang terbentuk dari sampel, sifat struktur sampel, dan menentukan porositas. Untuk menghitung ukuran rata-rata material, digunakan persamaan Scherrer berikut (Heryanto, 2025):

$$D = k \frac{\lambda}{\beta \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

D adalah ukuran kristalit, k adalah konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang radiasi sinar-X, θ adalah sudut difraksi, dan β adalah FWHM (Full Width Half Maximum). Jarak antar bidang ' d ' antara indeks bidang Miller yang sesuai, h , k , dan l dievaluasi menurut hukum Bragg, seperti yang diwakili dalam (**Persamaan 2**) (Jagadeesh et al., 2024; Shaikh et al., 2024):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3)$$

λ adalah panjang gelombang sinar-X, n adalah nilai bilangan bulat, d adalah nilai jarak antar planar, dan θ mengindikasikan sudut difraksi.

Regangan mikro atau regangan kisi internal ' ε ' akibat ketidaksempurnaan atau distorsi kristal dapat dihitung dengan menggunakan (**Persamaan 3**) sebagai berikut (Alam et al., 2025; Franca et al., 2024; Shaikh et al., 2024):

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

β adalah lebar penuh pada setengah maksimum (FWHM) puncak difraksi, dan θ adalah sudut puncak difraksi Bragg.

2.4.3. SEM (Scanning Electron Microscopy)

SEM (HITACHI TM4000Plus II) digunakan untuk memeriksa morfologi permukaan sampel.



scopy

adzu UV-1800) digunakan untuk menentukan konsentrasi ion rutan berdasarkan kemampuan sampel dalam mengadsorpsi osorbansi pada panjang gelombang tertentu. Oleh karena itu, pasitas adsorpsi (qe) (mg/g) dan efisiensi penyerapan ($R\%$)

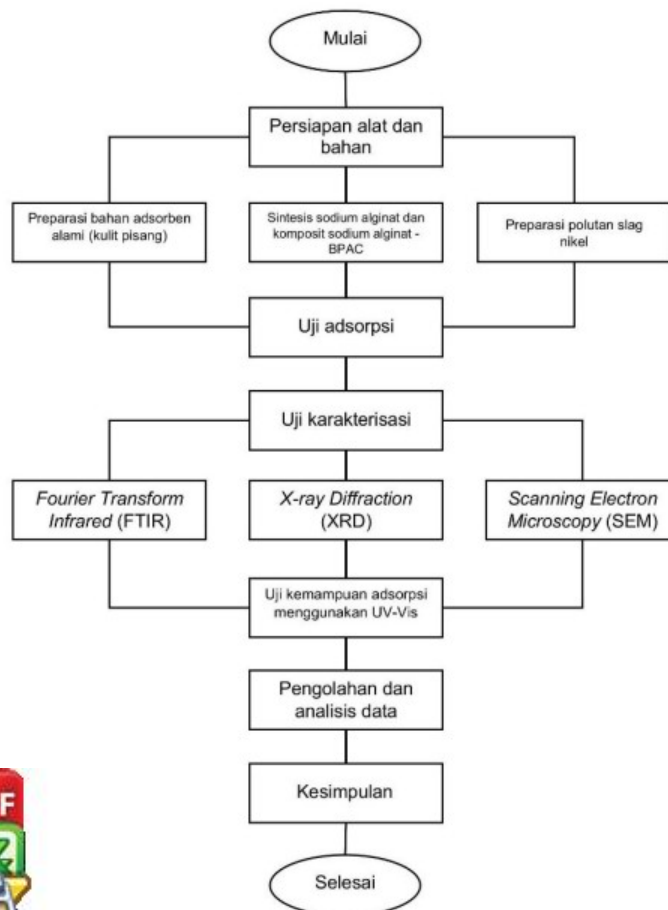
dapat dilihat pada persamaan berikut (Chen et al., 2025; Neolaka et al., 2024; Yaacoubi et al., 2024):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (4)$$

$$R\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (5)$$

C_0 (mg/L) mewakili konsentrasi awal polutan; C_e (mg/L) mewakili konsentrasi kesetimbangan polutan; V (mL) mewakili volume larutan dan m (mg) mewakili berat adsorben.

2.5 Pelaksanaan penelitian



Gambar 3. Bagan alir penelitian

