

APLIKASI KULIT PISANG KEPOK DAN KULIT PISANG AMBON SEBAGAI KARBON AKTIF PADA ADSORPSI DAN DESORPSI ION KROMIUM HEKSAVALEN (Cr^{6+})

D. Rahmadhani* dan S. Y. Prabawati

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga, Yogyakarta, Indonesia

**Email: devirahma593@gmail.com*

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk mengadsorpsi dan mendesorpsi ion kromium heksavalen (Cr^{6+}) menggunakan agen penyerap berupa karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon. Adsorpsi ion Cr^{6+} menggunakan karbon aktif dari bahan alam merupakan metode alternatif untuk menurunkan kandungan logam berat dengan efisiensi penyerapan yang tinggi. Karbon aktif kulit pisang diaktivasi melalui aktivasi kimia menggunakan aktivator HCl 2 M. Adanya proses aktivasi kimia diharapkan mampu meningkatkan kemampuan karbon aktif kulit pisang dalam menyerap ion logam berat Cr^{6+} . Aplikasi karbon aktif kulit pisang kepok dan ambon untuk menyerap ion Cr^{6+} dilakukan dengan mengaduk sampel karbon aktif pada berbagai waktu dan konsentrasi larutan Cr^{6+} . Hasil karakterisasi FT-IR karbon aktif kulit pisang setelah teraktivasi menunjukkan adanya pergeseran bilangan gelombang sehingga terjadi penurunan intensitas serapan pada gugus -OH. Adsorpsi ion Cr^{6+} pada pH 2 memberikan waktu stabil 75 menit mengikuti model kinetika PSO dengan laju reaksi 0,05713 mg/g.min dan 0,04079 mg/g.min. Adsorpsi isoterm mengikuti model Langmuir dengan kapasitas adsorpsi 0,7036 dan 0,6387 mg/g dan energi adsorpsi 26,67 dan 23,55 kJ/mol untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon. Berdasarkan hasil desorpsi yang dilakukan, dugaan mekanisme interaksi yang terjadi antara adsorbat ion Cr^{6+} dengan gugus aktif pada karbon aktif kulit pisang melibatkan interaksi kimia melalui pembentukan ikatan hidrogen dan ikatan kompleks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah organik dari kulit pisang kepok dan kulit pisang ambon berpotensi sebagai karbon aktif untuk mengurangi keberadaan ion logam berat Cr^{6+} . Bahan alam dari limbah organik kulit pisang kepok dan kulit pisang ambon dinilai cukup efektif untuk mengurangi kadar ion Cr^{6+} dan mudah diregenerasi melalui proses desorpsi.

Kata kunci: adsorpsi, desorpsi, kromium heksavalen (Cr^{6+}), kulit pisang, karbon aktif

ABSTRACT

Research has been carried out to adsorb and desorb hexavalent chromium ions (Cr^{6+}) using adsorbent agents in the form of activated carbon from kepok and ambon banana peels. Adsorption of Cr^{6+} using activated carbon from natural materials is an alternative method for reducing heavy metals with high absorption efficiency. Banana-peel carbon is activated through chemical activation using a 2 M HCl activator. The chemical activation process is expected to increase the ability of the banana-peel charcoal to absorb heavy metal ions of Cr^{6+} . The activated carbon was applied from kepok and ambon banana peels to absorb Cr^{6+} by stirring the activated carbon at various times and concentrations of the Cr^{6+} solution. The results of the FT-IR characterization of banana-peel activated carbon after activation showed a shift in the wave number resulting in a decrease in the absorption intensity of the -OH group. Adsorption of Cr^{6+} at pH 2 gave a stable time of 75 minutes following the PSO kinetics model with reaction rates of 0.05713 mg/g.min and 0.04079 mg/g.min. Isotherms adsorption followed the Langmuir model with adsorption capacities of 0.7036 and 0.6387 mg/g and adsorption energies of 26.67 and 23.55 kJ/mol for kepok banana-peel activated carbon and ambon banana-peel activated carbon, respectively. Based on the results of the desorption, the suspected mechanism of the interaction between the Cr^{6+} ion adsorbate and the active groups in banana-peel activated carbon involved chemical interactions through the formation of hydrogen bonds and complex bonds. The results showed that organic waste from kepok banana peels and ambon banana peels has the potential as activated carbon to reduce the presence of heavy metal ions Cr^{6+} . Natural materials from organic waste kepok and ambon banana peels are considered quite effective in lowering Cr^{6+} ion levels and are easily regenerated through the desorption process.

Keywords: adsorption, desorption, hexavalent chromium (Cr^{6+}), banana peels, activated carbon

PENDAHULUAN

Logam berat merupakan polutan utama di lingkungan perairan yang menyebabkan kerusakan ekologis. Pencemaran logam berat seperti Pb^{2+} , Cu^{2+} , dan Cr^{6+} di perairan sulit terdegradasi sehingga berpotensi mudah terakumulasi dalam tubuh organisme akuatik. Salah satu polutan logam berat yang berpotensi merusak kualitas air dan organisme akuatik adalah ion logam kromium heksavalen (Cr^{6+}). Beberapa penelitian menyatakan bahwa adanya zat polutan ion Cr^{6+} pada sungai mengakibatkan ikan mengalami kerusakan jaringan pernafasan akibat masuknya logam kromium secara terus menerus pada insang (Prabawati, *et al.* 2012; Irianti, *et al.* 2017).

Uraian dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah ion logam berat Cr^{6+} berpotensi merusak kualitas air dan organisme akuatik. Untuk itu diperlukan berbagai upaya untuk menurunkan kadar logam berat akibat pembuangan limbah industri. Dalam beberapa tahun terakhir, metode adsorpsi mendapat perhatian lebih sebagai salah satu alternatif dalam mengurangi kadar ion logam berat, terutama pada konsentrasi ion logam sedang hingga rendah (Adhani, *et al.* 2017; Irianti, *et al.* 2017; Jawad, *et al.* 2016).

Metode adsorpsi dilakukan menggunakan agen penyerap berupa karbon aktif. Salah satu keterbaruan dari metode adsorpsi adalah karbon aktif yang digunakan dapat dikembangkan dari bahan alam. Keuntungan utama menggunakan karbon aktif dari bahan alam adalah lebih sederhana, relatif murah dan dinilai cukup efektif karena mudah diregenerasi melalui proses desorpsi. Proses desorpsi dapat menjelaskan mekanisme interaksi yang terjadi selama proses adsorpsi yaitu interaksi antara ion logam berat dengan gugus aktif pada permukaan karbon aktif (Fuadah, *et al.* 2019; Jawad, *et al.* 2016).

Salah satu material alami yang berpotensi untuk dikembangkan sebagai karbon aktif adalah kulit pisang kepok dan ambon. Kekhasan struktur kimia pada kulit pisang adalah mengandung gugus fungsi hidroksil, karboksil, dan amina yang menyusun kerangka selulosa dan berperan sebagai gugus aktif dalam mengikat ion logam berat (Mohadi, *et al.* 2014; Anhwange, *et al.* 2009; Hastuti, *et al.* 2018). Penelitian Asih, *et al.* (2014) dan Tuhuloula, *et al.* (2013) melaporkan bahwa kulit pisang kepok mengandung 37,52%

selulosa dan 10,96% pektin, sedangkan pada kulit pisang ambon mengandung 23,20% selulosa dan 14,90% pektin.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif kulit pisang kepok efektif digunakan sebagai agen penyerap untuk menyerap ion logam berat Cr^{6+} . Salah satu penelitian Sherly & Cahyaningrum (2014) menggunakan agen penyerap berupa karbon aktif kulit pisang kepok teraktivasi H_2SO_4 dinilai mampu menyerap ion Cr^{6+} sebesar 0,197 mg/g. Hasil penelitian ini mampu menjelaskan bahwa bahan alam dari kulit pisang kepok sangat memungkinkan untuk dikembangkan sebagai agen penyerap dalam menyerap ion logam berat.

Untuk meningkatkan kemampuan limbah kulit pisang dalam menyerap ion Cr^{6+} , ada beberapa faktor yang perlu ditinjau, salah satunya dengan melakukan aktivasi karbon kulit pisang menggunakan aktivator asam. Aktivator asam khususnya aktivator HCl lebih mampu melarutkan pengotor sehingga pori-pori karbon aktif lebih terbuka dan proses penyerapan dapat berlangsung lebih optimal (Huda, *et al.*, 2020). Pemilihan pH lingkungan juga mempengaruhi kemampuan karbon aktif dalam menyerap ion logam berat. Chairunnisa & Nasra (2022) menjelaskan bahwa adsorpsi ion Cr^{6+} mencapai daya serap optimum pada pH 2 kemudian menurun dengan meningkatnya pH larutan. Hal ini dikarenakan pada pH rendah permukaan karbon aktif menjadi bermuatan positif atau terprotonasi sehingga sangat mendukung penyerapan ion Cr^{6+} dalam bentuk anion $HCrO_4^-$ dengan membentuk ikatan yang cukup kuat.

Berdasarkan data yang dipaparkan di atas, maka diperoleh bahwa karbon aktif kulit pisang kepok efektif digunakan sebagai agen penyerap untuk menyerap ion logam berat Cr^{6+} . Salah satu penelitian Sherly & Cahyaningrum (2014) menggunakan agen penyerap berupa karbon aktif kulit pisang kepok teraktivasi H_2SO_4 dinilai mampu menyerap ion Cr^{6+} sebesar 0,197 mg/g. Hasil penelitian ini mampu menjelaskan bahwa bahan alam berupa kulit pisang kepok sangat memungkinkan untuk dikembangkan sebagai agen penyerap dalam menyerap ion logam berat.

Berdasarkan uraian di atas, perlu dilakukan penelitian tentang limbah kulit pisang kepok dan kulit pisang ambon teraktivasi HCl sebagai penyerap ion logam Cr^{6+} yang merupakan bahan pencemar yang cukup

berbahaya di lingkungan. Kebaharuan penelitian ini terletak pada proses desorpsi ion logam Cr^{6+} . Desorpsi dilakukan untuk melihat mekanisme interaksi yang terjadi antara adsorbat ion Cr^{6+} dengan gugus aktif dalam kulit pisang.

MATERI DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan adalah kulit pisang kepok dan kulit pisang ambon yang diambil dari limbah Warung Kopi Joglo Musuk (Kabupaten Bantul). Bahan kimia yang digunakan antara lain akuades, akuabides, asam nitrat (HNO_3 p.a), asam klorida (HCl p.a), kalium nitrat (KNO_3 p.a), dinatrium asam etilenadiaminatetraasetat (Na_2EDTA teknis), dan serbuk kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ p.a).

Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain seperangkat peralatan gelas laboratorium, Buchner, kertas saring, corong gelas, blender, neraca analitik, mortar alu, *hotplate*, *magnetic stirrer*, desikator, pH meter, oven, *furnace*, *Spektrophotometer Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR Shimadzu Prestige-21), dan *Spektrophotometer Scanning Electron Microscope* (SEM, JSM-6510LA), dan *Atomic Absorption Spektrophotometer* (AAS, GBC Australia, dilakukan di Laboratorium Kimia Analitik UGM).

Cara Kerja

Persiapan sampel kulit pisang

Limbah kulit pisang kepok dan ambon yang telah diambil dari lokasi terlebih dahulu dibersihkan dengan akuades. Limbah kulit pisang yang sudah bersih dikeringkan dibawah sinar matahari selanjutnya di oven pada suhu 105°C selama 2 jam untuk mendehidrasi kulit pisang secara maksimal. Selanjutnya limbah kulit pisang yang telah kering dikarbonisasi menggunakan *furnace* pada suhu 400°C selama 3 jam hingga diperoleh karbon kulit pisang dalam bentuk arang.

Aktivasi karbon kulit pisang dengan HCl

Masing-masing karbon kulit pisang dalam bentuk arang dimasukkan ke dalam gelas beaker berisi larutan HCl 2 M sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Aktivasi

dilakukan dalam keadaan tertutupi oleh aluminium foil selama 24 jam kemudian disaring dan diperoleh residu berupa pasta karbon aktif kulit pisang. Residu yang diperoleh kemudian dicuci dengan akuades hingga diperoleh pH netral lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 90 menit. Setelah kering, karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon yang telah teraktivasi HCl disimpan dalam desikator untuk mencegah kontaminasi.

Karakterisasi spektra inframerah karbon aktif kulit pisang

Sebanyak 0,5 g sampel karbon kulit pisang kepok sebelum dan setelah aktivasi disimpan dalam wadah kedap udara. Kemudian masing-masing sampel dianalisis dengan spektrofotometer IR menggunakan metode pelet KBr untuk mendeteksi gugus fungsi utama atau situs aktif yang terdapat pada permukaan karbon kulit pisang ambon dan kepok sebelum teraktivasi HCl. Diulangi perlakuan yang sama untuk sampel karbon kulit pisang ambon dan kepok setelah teraktivasi HCl.

Pembuatan larutan uji ion Cr^{6+}

Larutan uji ion Cr^{6+} terlebih dahulu dibuat menggunakan larutan baku Cr^{6+} 1.000 ppm. Pembuatan larutan baku Cr^{6+} dilakukan dengan menimbang serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sebanyak 2,80 g kemudian dilarutkan ke dalam akuades dalam labu ukur 1.000 mL dengan penambahan sedikit demi sedikit HCl 37%. Selanjutnya 50 mL larutan baku dipipet ke dalam labu berukuran 500 mL dengan penambahan akuades hingga diperoleh larutan standar Cr^{6+} 100 ppm. Kemudian untuk membuat larutan uji Cr^{6+} 20 ppm, sebanyak 100 mL larutan standar Cr^{6+} 100 ppm diencerkan ke dalam labu ukur 500 mL. Diulangi perlakuan yang sama pada labu ukur 500 mL untuk membuat larutan uji Cr^{6+} pada variasi konsentrasi 4, 8, 12, dan 16 ppm. Seluruh larutan uji ion Cr^{6+} kemudian diatur pada pH 2 dengan menambahkan HCl encer atau NaOH encer.

Adsorpsi ion Cr^{6+}

Penentuan kestabilan waktu kontak adsorpsi dan kinetika adsorpsi ion Cr^{6+}

Masing-masing sampel karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon yang telah teraktivasi HCl sebanyak 0,5 g dimasukkan ke dalam Erlenmeyer. Kemudian

ditambahkann 25 mL larutan uji Cr⁶⁺ 20 ppm pada pH 2 dan diaduk dengan magnetic stirrer selama variasi waktu 15, 30, 45, 60, 75, dan 120 menit. Selanjutnya disaring dengan kertas saring dan filtratnya diambil untuk dianalisis konsentrasi Cr⁶⁺ setelah adsorpsi menggunakan instrumen AAS. Banyaknya ion Cr⁶⁺ yang terserap setiap gramnya dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Q_e = \frac{(C_1 - C_2)}{m} \times V \quad (1)$$

Q_e = adsorbat yang teradsorpsi oleh agen penyerap (mg/g)

C₁ = konsentrasi adsorbat sebelum adsorpsi (mg/L)

C₂ = konsentrasi adsorbat setelah adsorpsi (mg/L)

m = massa karbon aktif (gram)

V = volume adsorbat (L)

Kemampuan adsorpsi karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon terhadap ion Cr⁶⁺ untuk mencapai waktu stabil diperoleh dengan membuat kurva antara daya serap ion Cr⁶⁺ (Q_e) terhadap waktu kontak (menit). Selanjutnya penentuan kinetika reaksi dan laju adsorpsi terhadap pengaruh variasi waktu kontak dapat diketahui berdasarkan pendekatan kinetika *Pseudo First Order* (PFO) dan *Pseudo Second Order* (PSO). Model kinetika tersebut digunakan untuk menentukan laju reaksi dengan membandingkan nilai koefisien determinasi (R²) dari masing-masing model yang digunakan. Model kinetika yang sesuai ditandai dengan nilai R² yang mendekati satu (Arvianto, *et al.* 2019; Muniroh & Rahmayanti, 2019). Persamaan kinetika model PFO dan PSO masing-masing dinyatakan melalui persamaan 2 dan 3 berikut:

$$\frac{\ln(Q_0 - Q_e)}{Q_e} = \frac{k_1 t}{Q_e} + K \quad (2)$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (3)$$

Q₀ = Jumlah adsorbat sebelum adsorpsi (mg/g)

Q_e = Jumlah adsorbat setelah adsorpsi (mg/g)

t = Waktu (menit)

k₁ = Konstanta laju reaksi adsorpsi PFO (min⁻¹)

k₂ = Konstanta laju reaksi adsorpsi PSO (min⁻¹)

K = Konstanta kesetimbangan adsorpsi (L/mg)

Q_e = Jumlah adsorbat yang teradsorpsi (mg/g)

Q_t = Jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada waktu t (mg/g)

Penentuan laju reaksi (h) pada satuan g/mg.menit dapat diperoleh berdasarkan grafik model PSO melalui rumus sebagai berikut:

$$h = k_2 \cdot Q_e^2 \quad (4)$$

h = Laju adsorpsi (g/mg.menit)

k₂ = Konstanta laju reaksi adsorpsi PSO (min⁻¹)

Q_e = Jumlah adsorbat yang teradsorpsi (mg/g)

Penentuan kapasitas adsorpsi ion Cr⁶⁺

Masing-masing karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon yang telah teraktivasi HCl dimasukkan ke dalam Erlenmeyer sebanyak 0,5 g. Kemudian ke dalam Erlenmeyer ditambahkan 25 mL larutan uji Cr⁶⁺ dengan variasi konsentrasi 4, 8, 12, 16, dan 20 ppm pada pH 2 lalu diaduk dengan magnetic stirrer pada waktu stabil yang didapat. Selanjutnya disaring dengan kertas saring dan filtratnya diambil untuk dianalisis konsentrasi Cr⁶⁺ setelah adsorpsi menggunakan instrumen AAS. Penentuan kapasitas adsorpsi dapat diketahui berdasarkan pendekatan isoterm adsorpsi Freundlich dan Langmuir. Persamaan model isoterm Freundlich dan Langmuir masing-masing dinyatakan melalui persamaan 5 dan 6 berikut:

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_{max} K_l} + \frac{C_e}{Q_{max}} \quad (6)$$

Q_e = jumlah adsorbat yang teradsorpsi (mg/g)

C_e = konsentrasi adsorbat (mg/L)

K_f = konstanta Freundlich (L/mg)

n = konstanta empiris

Q_{max} = kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g)

K_l = konstanta Langmuir (L/mg)

Grafik isoterm Langmuir yang menunjukkan nilai R² lebih besar dapat menjelaskan kapasitas adsorpsi suatu larutan logam. Penentuan kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) dapat diperoleh berdasarkan grafik model isoterm Langmuir dengan memplot nilai m terhadap 1/m pada persamaan garis grafik isoterm Langmuir y=mx+c (Yustinah, *et al.*, 2020). Model isoterm Freundlich dan Langmuir dapat menggambarkan energi adsorpsi (E_{ads}) melalui rumus sebagai berikut:

$$E_{ads} = -\Delta G = RT \ln(K_{ads}) \quad (7)$$

E_{Ads} = energi ketika adsorpsi (kJ/mol)
 R = tetapan gas ideal (8,314 J/mol^oK)
 T = temperatur adsorpsi (°K)
 K_{ads} = tetapan kesetimbangan selama adsorpsi (L/mol)

Model isoterm Langmuir menjelaskan bahwa besarnya energi adsorpsi (E_{Ads}) yang dihasilkan bernilai di atas 20 kJ/mol. Sebaliknya jika energi adsorpsi (E_{Ads}) menunjukkan nilai kurang dari 20 kJ/mol maka adsorpsi menunjukkan model isoterm Freundlich (Anshar, *et al.* 2015; Prabawati, *et al.* 2023; Prabawati S Y, *et al.* 2023).

Desorpsi sekuensial (berjenjang)

Masing-masing sampel karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon yang teraktivasi HCl sebanyak 0,5 g dimasukkan ke dalam Erlenmeyer kemudian ditambahkan 25 mL larutan uji Cr⁶⁺ 20 ppm pada pH 2 dan diaduk dengan magnetik *stirrer*. Setelah 60 menit, disaring dan filtratnya diambil untuk dilakukan pengujian konsentrasi Cr⁶⁺ setelah adsorpsi, sedangkan residunya dicuci menggunakan akuabides kemudian dikeringkan dan disimpan dalam desikator. Residu yang telah kering didesorpsi secara berjenjang menggunakan akuabides, HNO₃, KNO₃, dan Na₂EDTA. Masing-masing residu karbon aktif kulit pisang kepok dan ambon dimasukkan ke dalam Erlenmeyer berisi 25 mL akuabides dan diaduk selama 60 menit lalu disaring. Filtrat yang diperoleh dianalisis menggunakan AAS, sedangkan residunya direndam kembali dengan 25 mL KNO₃ 1 M dan diaduk selama 30 menit lalu disaring diperoleh filtrat yang diuji menggunakan AAS. Residunya direndam dan diaduk kembali dalam 25 mL HNO₃ 0,5 M selama 90 menit lalu disaring. Filtrat yang diperoleh diuji menggunakan AAS, sedangkan residunya direndam dan diaduk dalam 25 mL Na₂EDTA 0,1 M selama 17 jam lalu disaring. Filtrat yang diperoleh diuji menggunakan AAS untuk diketahui konsentrasi Cr⁶⁺ setelah terdesorpsi. Banyaknya ion Cr⁶⁺ yang terlepas menggunakan keempat agen pendesorpsi tersebut dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\% \text{Desorpsi} = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100\% \quad (8)$$

Nilai C_1 menunjukkan konsentrasi adsorbat sebelum desorpsi (mg/L) sedangkan nilai C_2 menunjukkan konsentrasi adsorbat setelah desorpsi (mg/L) (Mohadi, *et al.*, 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persiapan Sampel Kulit Pisang

Pencucian kulit pisang menggunakan akuades bertujuan untuk melarutkan dan meminimalisasi zat pengotor pada kulit pisang. Limbah kulit pisang kemudian dikeringkan dengan cara dijemur di bawah sinar matahari dan dilanjutkan dengan oven pada suhu 105°C. Pengeringan kulit pisang bertujuan untuk mempercepat proses penguapan air sehingga molekul air yang terperangkap dalam kulit pisang dapat berkurang secara maksimal hingga diperoleh kulit pisang yang kering (Hafizi-Atabak, *et al.*, 2013).

Kulit pisang yang telah kering kemudian dikarbonisasi terbuka atau dilakukan pengarang menggunakan furnace pada suhu 400°C selama 90 menit untuk memaksimalkan degradasi material organik dalam kulit pisang. Karbonisasi merupakan proses pembakaran tidak sempurna dari bahan organik dalam kulit pisang dengan jumlah oksigen yang sangat terbatas sehingga menghasilkan karbon dalam bentuk arang. Suhu karbonisasi umumnya dilakukan pada rentang 300-800°C, jika suhu karbonisasi kurang dari 300°C maka proses yang dihasilkan tidak maksimal. Tetapi bila suhu melebihi 800C, maka pori-pori karbon yang dihasilkan akan berubah menjadi abu (Jubilate, *et al.*, 2016).

Selama proses karbonisasi atau proses pengarang berlangsung, bahan organik yang menyusun struktur kulit pisang seperti selulosa akan didegradasi menjadi senyawa karbon dalam bentuk arang. Reaksi umum pembentukan karbon atau karbonisasi diawali dengan reaksi penguraian selulosa dan lignin kemudian dilanjutkan dengan reaksi pembentukan karbon. Gugus aktif pada selulosa dan lignin dalam kulit pisang didominasi oleh gugus -OH dan -COOH. Namun, pada suhu tinggi selama proses karbonisasi, keberadaan gugus fungsi tersebut akan menguap sehingga hanya tersisa karbon. Kehadiran karbon ini diduga sebagai penyusun struktur kerangka arang kulit pisang yang dihasilkan. Proses karbonisasi ini meninggalkan material padat berupa karbon dalam bentuk arang dengan pori-

pori yang masih tertutupi oleh zat pengotor dan abu hasil proses karbonisasi (Maryono, *et al.* 2013; Masriatini, 2017).

Aktivasi Karbon Kulit Pisang dengan HCl

Beberapa penelitian telah menjelaskan bahwa proses aktivasi suatu agen penyerap dapat meningkatkan daya serap selama proses adsorpsi. Salah satunya dapat meningkatkan luas permukaan dan keasaman permukaan suatu agen penyerap sehingga kapasitas adsorpsi akan meningkat. Aktivasi dapat dilakukan secara kimia maupun fisika. Aktivasi fisika merupakan tahapan untuk mengaktifkan permukaan karbon dengan bantuan panas dan gas pengoksidasi. Sedangkan aktivasi kimia dilakukan melalui proses pemutusan rantai karbon dengan bantuan zat aktivator dari bahan-bahan kimia. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, aktivasi kimia memiliki keunggulan karena adanya proses pemutusan rantai karbon pada senyawa-senyawa organik dengan bantuan bahan-bahan kimia sehingga luas permukaan yang diperoleh cukup tinggi. Selain itu waktu yang diperlukan untuk melakukan proses aktivasi kimia lebih cepat karena proses karbonasi dan aktivasi dapat berjalan bersamaan (Verayana, *et al.* 2018; Purwiandono & Ibrahim, 2022).

Aktivasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah aktivasi secara kimia menggunakan aktivator HCl. Aktivasi kimia menggunakan asam klorida diharapkan mampu melarutkan pengotor pada permukaan karbon kulit pisang sehingga pori-pori menjadi terbuka. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Oko *et al.* (2021) bahwa aktivator HCl mampu melarutkan pengotor lebih maksimal daripada aktivator asam lainnya. Selain itu, aktivator HCl juga mampu mengikat mineral yang menempel pada permukaan karbon setelah proses karbonisasi. Dengan demikian, karbon berupa arang kulit pisang perlu diaktivasi untuk menghilangkan pengotor dan mineral yang menempel menutupi pori-pori karbon sehingga pori-pori akan lebih banyak terbuka dan adsorbat ion logam Cr^{6+} lebih mudah terserap dalam pori-pori karbon aktif kulit pisang (Rahmansyah, *et al.*, 2017).

Aktivator asam berfungsi sebagai zat pengaktif dalam mengaktifkan permukaan karbon, dimana aktivator akan masuk ke dalam pori karbon dan membuka permukaan karbon

yang masih tertutup. Selama proses aktivasi, kation mineral yang menutupi permukaan karbon kulit pisang tergantikan dengan ion H^+ dari aktivator HCl sehingga permukaan karbon yang semula tertutup akan lebih terbuka. Hal ini dapat terjadi melalui mekanisme pertukaran ion sehingga kation mineral dalam permukaan karbon kulit pisang mudah tergantikan oleh ion H^+ (Ramadhani, *et al.* 2020; Oko *et al.* (2021). Dugaan mekanisme interaksi selama proses aktivasi kimia ditampilkan dalam Gambar 1.

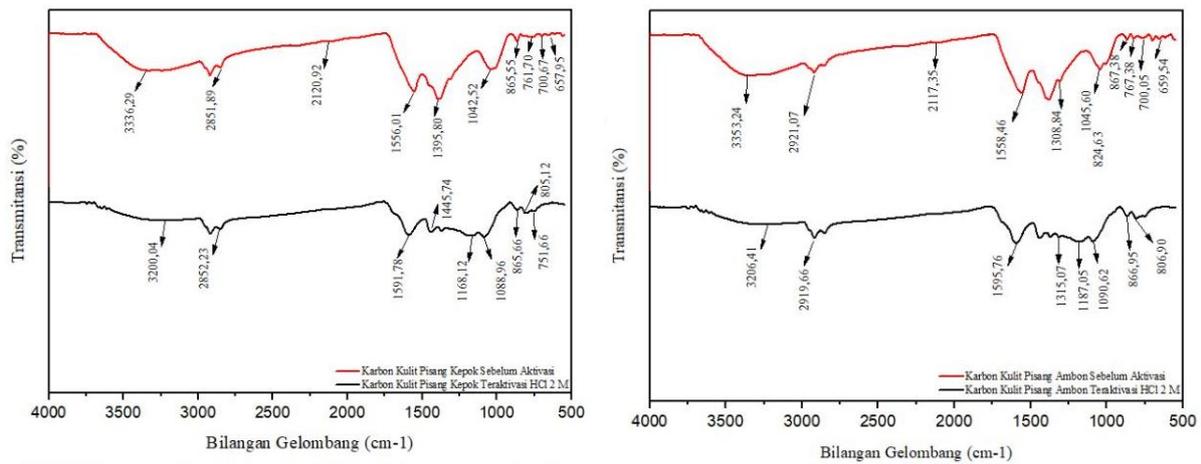


Gambar 1. Dugaan mekanisme interaksi selama aktivasi kimia

Aktivasi kimia dilakukan dengan merendam sampel karbon berupa arang kulit pisang hasil karbonisasi ke dalam larutan aktivator HCl. Selanjutnya dinetralkan dengan cara dicuci menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa ion Cl^- yang menempel pada permukaan karbon aktif. Pengeringan dan pemanasan menggunakan oven bertujuan untuk menghilangkan kandungan air yang tersisa pada karbon kulit pisang. Selama pemanasan berlangsung, zat pengotor yang menempel dalam permukaan arang menjadi lebih mudah terlepas sehingga pori-pori lebih terbuka dan kapasitas penyerapan akan meningkat (Verayana, *et al.* 2018; Ramadhani, *et al.* 2020).

Karakterisasi Spektra Inframerah Karbon Aktif Kulit Pisang

Permukaan karbon kulit pisang kepek dan karbon kulit pisang ambon sebelum dan setelah aktivasi masing-masing dilakukan pengujian karakterisasi gugus fungsionalnya menggunakan spektrofotometer FTIR. Berdasarkan hasil karakterisasi FTIR yang telah dilakukan, terlihat adanya pergeseran bilangan gelombang sehingga terjadi penurunan intensitas serapan pada spektra karbon kulit pisang sebelum dan setelah teraktivasi menggunakan aktivator asam yaitu HCl. Hasil karakterisasi yang didapat ditampilkan pada Gambar 2.

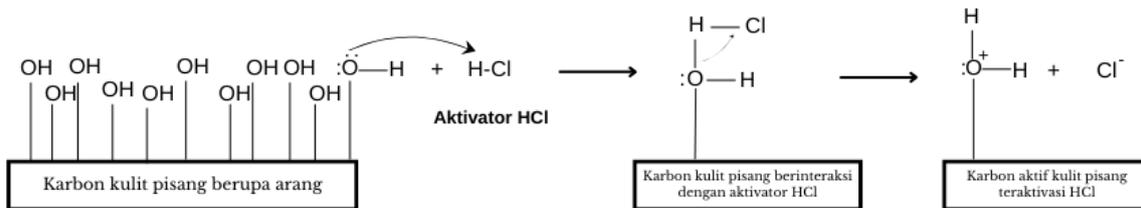


Gambar 2. Spektra FTIR karbon kulit pisang kepok dan karbon kulit pisang ambon sebelum dan setelah teraktivasi HCl

Gambar 2 menunjukkan adanya pergeseran bilangan gelombang dari spektra FTIR kulit pisang kepok dan ambon sebelum maupun sesudah aktivasi menggunakan aktivator HCl 2 M. Pada spektra karbon kulit pisang kepok, terlihat keberadaan gugus fungsi hidroksil ($-\text{OH}$) pada bilangan gelombang $3336,29 \text{ cm}^{-1}$ yang ditandai dengan pita tajam dan melebar. Setelah proses aktivasi, keberadaan gugus fungsi tersebut mengalami penurunan intensitas serapan menjadi $3200,04 \text{ cm}^{-1}$. Hal yang serupa juga terjadi pada spektra karbon kulit pisang ambon yang mengalami penurunan intensitas serapan gugus fungsi $-\text{OH}$

dari $3353,24 \text{ cm}^{-1}$ menjadi $3206,41 \text{ cm}^{-1}$ setelah teaktivasi HCl.

Perubahan intensitas serapan sebelum dan setelah teraktivasi HCl disebabkan karena adanya pengaruh aktivator asam yang dapat melarutkan pengotor $-\text{OH}$ sehingga dapat mengurangi kuantitas gugus fungsi $-\text{OH}$ pada permukaan karbon kulit pisang. Aktivasi dengan asam menyebabkan gugus $-\text{OH}$ terprotonasi menghasilkan gugus fungsi asam OH_2^+ sehingga permukaan karbon aktif kulit pisang cenderung bermuatan positif. Ilustrasi mekanisme reaksi protonasi disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi mekanisme reaksi protonasi gugus $-\text{OH}$ menjadi OH_2^+ pada permukaan karbon kulit pisang

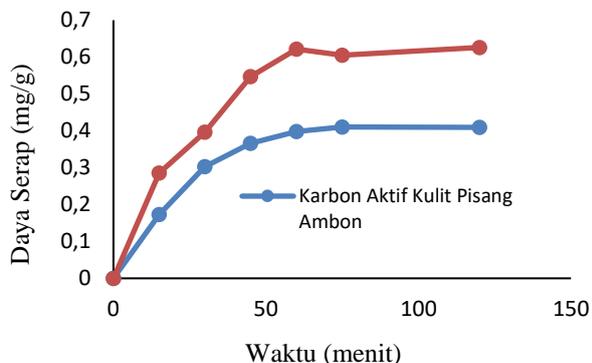
Serapan tajam karbon kulit pisang kepok dan karbon kulit pisang ambon sebelum dan setelah aktivasi menunjukkan adanya pembentukan senyawa C-H aromatik. Hal tersebut tampak pada serapan karbon kulit pisang sebelum aktivasi yang menunjukkan gugus aromatik $\text{C}=\text{C}$ pada bilangan gelombang menjadi $1591,78 \text{ cm}^{-1}$ dan $1595,76 \text{ cm}^{-1}$. Hal ini sesuai dengan penelitian Handika *et al.* (2017) bahwa

karbon yang telah teraktivasi dapat meningkatkan pembentukan senyawa aromatik.

Penentuan Kestabilan Waktu Kontak Adsorpsi dan Kinetika Adsorpsi Ion Cr^{6+}

Penentuan waktu kontak adsorpsi ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang teraktivasi HCl dilakukan pada kondisi larutan adsorbat bersifat asam (pH 2) dengan beberapa variasi waktu kontak yaitu 15, 30, 45, 60, 75, dan 120 menit. Waktu kontak adsorpsi digunakan untuk

menentukan kestabilan waktu pengadukan selama proses adsorpsi berlangsung. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan daya serap karbon aktif kulit pisang dalam menyerap adsorbat ion Cr^{6+} hingga batas maksimalnya. Pengaruh waktu adsorpsi ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang dalam berbagai variasi waktu disajikan pada Gambar 4.



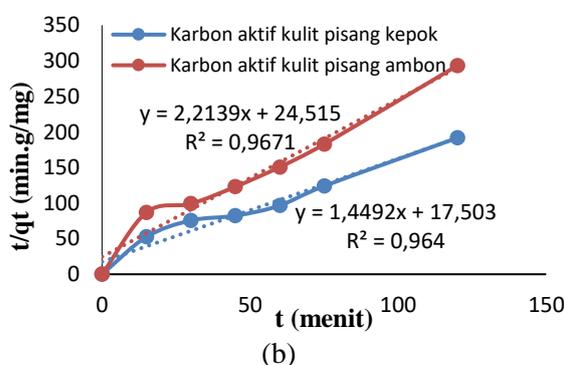
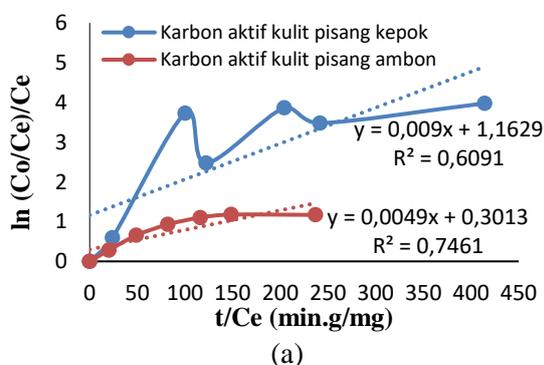
Gambar 4. Grafik jumlah adsorbat ion Cr^{6+} yang terserap oleh karbon aktif kulit pisang kepek dan karbon aktif kulit pisang ambon pada variasi waktu kontak adsorpsi

Berdasarkan Gambar 4 di atas, dapat dilihat bahwa secara umum daya serap ion Cr^{6+} mengalami peningkatan diawal waktu adsorpsi 15 hingga 60 menit. Setelah waktu interaksi 60 menit, daya serap ion Cr^{6+} cenderung stabil dan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan hingga waktu interaksi 120 menit. Dengan demikian, waktu kontak yang diperlukan untuk adsorpsi maksimum ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang kepek dan karbon aktif kulit pisang ambon menunjukkan hasil yang relatif stabil hingga batas maksimalnya pada waktu 75 menit. Hal ini diduga karena sisi aktif dari karbon aktif kulit pisang sudah mencapai

keadaan stabil untuk berinteraksi dengan ion Cr^{6+} sehingga adanya penambahan waktu kontak dimungkinkan tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah ion Cr^{6+} yang terserap (Prabawati, *et al.* 2012; Setyawan & Khunur, 2013; Zian, *et al.* 2016; Prabawati S Y, *et al.* 2023).

Tahapan proses adsorpsi secara garis besar merupakan proses perpindahan ion Cr^{6+} dari dalam cairan menuju ke permukaan karbon aktif dilanjutkan proses penyerapan ion Cr^{6+} ke permukaan karbon aktif. Artinya, proses adsorpsi ion Cr^{6+} merupakan proses kesetimbangan yang terjadi melalui tahapan perpindahan ion Cr^{6+} ke permukaan karbon aktif dan tahapan penyerapan ion Cr^{6+} ke permukaan karbon aktif. Kesetimbangan proses adsorpsi memiliki laju adsorpsi yang dapat ditentukan melalui pendekatan model kinetika, yaitu *Pseudo First Order* (PFO) dan *Pseudo Second Order* (PSO). Model kinetika adsorpsi yang sesuai ditandai dengan nilai R^2 yang mendekati satu (Arvianto, *et al.* 2019; Rahmayanti, *et al.* 2020). Hasil studi kinetika adsorpsi dalam berbagai variasi waktu disajikan pada Gambar 5.

Model PFO menjelaskan bahwa laju adsorpsi melibatkan proses difusi pada permukaan karbon aktif yang terjadi dalam konsentrasi awal tinggi pada gugus fungsi yang lebih sedikit. Orde satu menunjukkan adsorpsi terjadi secara fisika dengan melibatkan gaya Van der Waals. Model PSO mengasumsikan bahwa kapasitas adsorpsi suatu karbon aktif terjadi dari konsentrasi adsorbat yang rendah. Kinetika orde dua menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi secara kimia melalui penggunaan bersama elektron antara karbon aktif kulit pisang dan ion Cr^{6+} (Muniroh & Rahmayanti, 2019).



Gambar 5. Grafik model studi kinetika adsorpsi (a) PFO dan (b) PSO oleh karbon aktif kulit pisang kepek dan karbon aktif kulit pisang ambon

Tabel 1. Data Parameter hitung model kinetika adsorpsi PFO dan PSO

Karbon Aktif	PFO			PSO			
	R ²	k ₁ (min ⁻¹)	K (L/mg)	R ²	k ₂ (min ⁻¹)	h (mg/g.min)	q _e (mg/g)
Kulit Pisang Kepok	0,6091	-0,009	1,1629	0,9640	0,1200	0,05713	0,6900
Kulit Pisang Ambon	0,7461	-0,005	0,3013	0,9671	0,1999	0,04079	0,4517

Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 1, terlihat bahwa nilai konstanta laju adsorpsi (k) dan koefisien determinasi (R²) untuk adsorpsi ion Cr⁶⁺ pada model kinetika PSO lebih tinggi dibandingkan model kinetika PFO. Dengan demikian, adsorpsi ion Cr⁶⁺ pada karbon aktif kulit pisang mengikuti model kinetika PSO. Model Kinetika orde dua (PSO) menunjukkan bahwa proses adsorpsi terjadi secara kimia melalui penggunaan bersama electron pada situs aktif karbon aktif kulit pisang dan ion Cr⁶⁺. Artinya, laju adsorpsi ion Cr⁶⁺ pada karbon aktif kulit pisang menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi terjadi dari nilai konsentrasi adsorbat awal yang rendah (Muniroh & Rahmayanti, 2019).

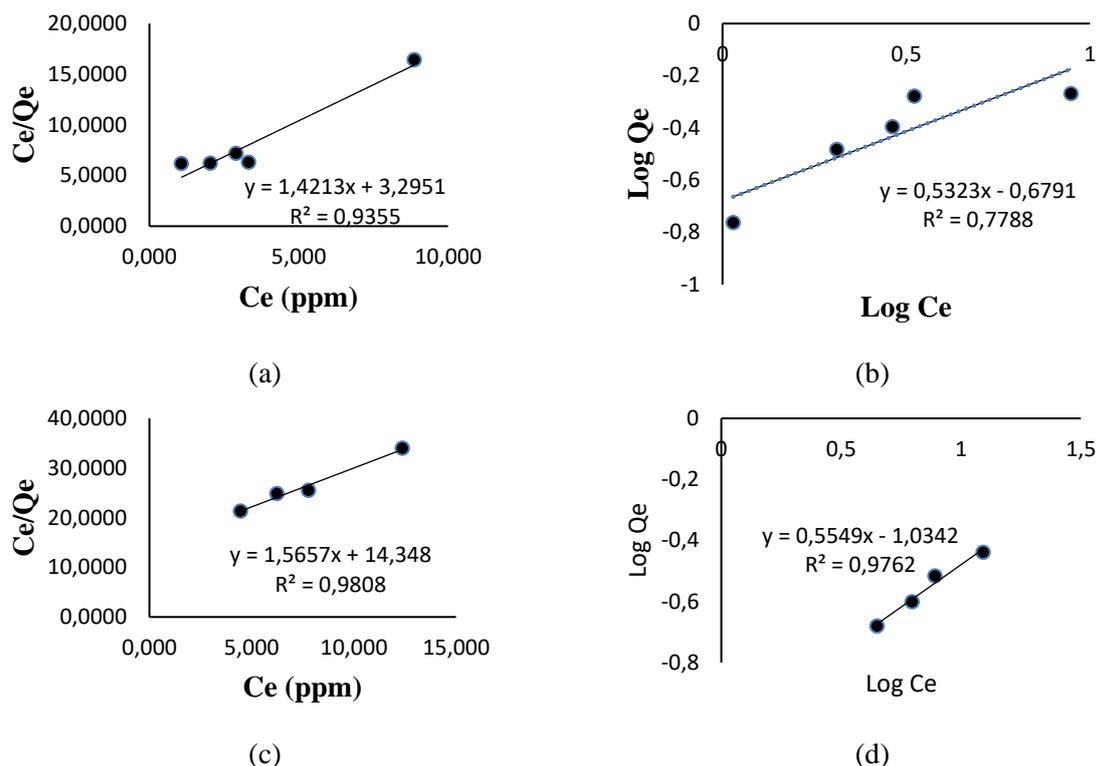
Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi ion Cr⁶⁺ menggunakan karbon aktif kulit pisang kepok dan ambon terjadi lebih efektif menggunakan model persamaan orde dua. Nilai koefisien determinasi orde kedua lebih baik dibandingkan dengan nilai determinasi orde satu. Hasil pengamatan pada Tabel 1 menunjukkan nilai konstanta laju adsorpsi (K₂) masing-masing menghasilkan nilai postif sebesar 0,1200 dan 0,1999 min⁻¹. Dengan demikian, model kinetika orde dua dapat menjelaskan bahwa penyerapan ion Cr⁶⁺ lebih efisien.

Berdasarkan parameter hitung yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan laju adsorpsi awal (h) ion Cr⁶⁺ oleh karbon aktif kulit pisang kepok dan ambon masing-masing adalah 0,05713 dan 0,04079 mg/g.min. Laju ini dipengaruhi oleh energi ikatan yang terjadi selama proses adsorpsi hingga mencapai waktu reaksi adsorpsi yang stabil. Parameter konstanta laju adsorpsi untuk model kinetika PSO (k₂) pada adsorpsi ion Cr⁶⁺ oleh karbon aktif kulit pisang kepok dan ambon masing-masing sebesar 0,1200 dan 0,1999 min⁻¹.

Penentuan Kapasitas Adsorpsi Ion Cr⁶⁺

Adsorpsi ion Cr⁶⁺ dilakukan pada pH 2 dengan waktu kontak adsorpsi 75 menit pada variasi konsentrasi larutan ion Cr⁶⁺ 4, 8, 12, 16, dan 20 ppm. Penelitian dilakukan menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich untuk menjelaskan mekanisme adsorpsi ion Cr⁶⁺. Isotrem Langmuir menjelaskan mekanisme adsorpsi terjadi melalui adsorpsi kimia dimana gugus aktif pada karbon aktif kulit pisang akan berinteraksi dengan adsorbat ion Cr⁶⁺ membentuk ikatan kimia yang kuat melalui ikatan hidrogen. Sedangkan Isotherm Freundlich menggambarkan mekanisme adsorpsi secara fisika dimana adsorbat ion Cr⁶⁺ terserap ke dalam pori-pori karbon aktif kulit pisang melalui proses pemerangkapan atau ikatan Van der Waals (Yustinah, *et al.* 2020; Hastuti, *et al.* 2018). Hasil studi isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich dalam berbagai variasi konsentrasi disajikan pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6 ditunjukkan bahwa adsorpsi ion Cr⁶⁺ oleh karbon aktif kulit pisang mengikuti persamaan Langmuir dengan nilai koefisien determinasi (R²) sebesar 0,9355 dan 0,9808 untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon. Sehingga dapat diasumsikan bahwa situs aktif pada permukaan karbon aktif kulit pisang bersifat homogen yang berarti bahwa adsorbat ion Cr⁶⁺ menempati satu situs aktif dan tidak ada adsorpsi lebih lanjut yang dapat dilakukan pada situs tersebut. Artinya, setiap situs aktif pada permukaan karbon aktif hanya dapat mengadsorpsi satu molekul adsorbat sehingga pada saat adsorpsi maksimum hanya terbentuk lapisan tunggal (*monolayer*). Lapisan *monolayer* mengakibatkan ikatan antara situs aktif karbon aktif kulit pisang dengan adsorbat ion Cr⁶⁺ cukup kuat melalui pembentukan ikatan kimia (Prabawati, *et al.* 2020; Rangabhashiyam, *et al.* 2014; Prabawati S Y, *et al.* 2023).



Gambar 6. Grafik model isoterm adsorpsi (a) Langmuir (b) Freundlich oleh karbon aktif kulit pisang kepok (c) Langmuir (d) Freundlich oleh karbon aktif kulit pisang ambon

Tabel 2. Data Parameter hitung model isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich

Karbon Aktif	Isoterm Langmuir			Isoterm Freundlich			
	R ²	Q _{max} (mg/g)	K _L (L/mol)	R ²	n	K _F (L/mg)	E _{Ads} (kJ/mol)
Kulit Pisang Kepok	0,9355	0,7036	126800,57	0,7788	1,88	0,2094	26,67
Kulit Pisang Ambon	0,9808	0,6387	32082,13	0,9762	1,80	0,0924	23,55

Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat bahwa untuk kedua jenis karbon aktif yang digunakan, kapasitas adsorpsi karbon aktif kulit pisang kepok lebih besar daripada karbon aktif kulit pisang ambon. Nilai kapasitas adsorpsi maksimum (Q_{max}) untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon masing-masing sebesar 0,7036 dan 0,6387 mg/g. Hal ini kemungkinan disebabkan karena kandungan selulosa dalam bahan baku kulit pisang kepok dengan jumlah yang lebih besar daripada kulit pisang ambon sehingga material organik yang terdegradasi menjadi material karbon jumlahnya lebih banyak yang akan berpengaruh selama proses adsorpsi ion Cr⁶⁺.

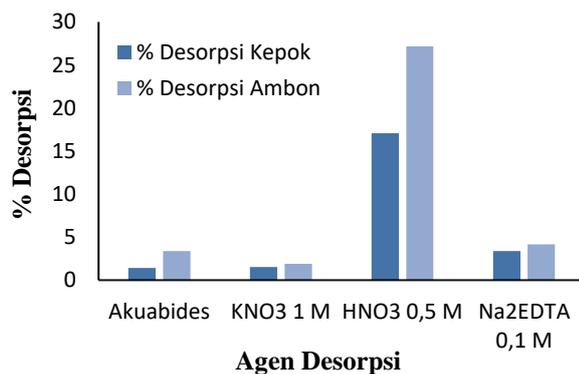
Kapasitas adsorpsi oleh kedua jenis karbon aktif menunjukkan hasil yang cukup baik. Hal tersebut kemungkinan disebabkan karena adsorbat ion Cr⁶⁺ merupakan asam keras yang mudah berinteraksi dengan basa keras dari gugus aktif karbon aktif kulit pisang yaitu gugus OH₂⁺. Fenomena tersebut sesuai dengan teori HSAB, dimana asam keras akan mudah berinteraksi kuat dengan basa keras membentuk ikatan kovalen koordinasi.

Hasil parameter hitung model isoterm Langmuir dan Freundlich yang disajikan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai konstanta adsorpsi Langmuir (K_L) sebesar 126800,57 dan 32082,13 L/mol. Nilai tersebut digunakan untuk menghitung energi adsorpsi (E_{Ads}). Energi adsorpsi ion Cr⁶⁺ masing-masing sebesar

26,67 dan 23,55 kJ/mol untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon. Hasil tersebut membuktikan bahwa adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan besarnya energi adsorpsi (E_{Ads}) menunjukkan nilai lebih dari 20 kJ/mol. Nilai energi adsorpsi tersebut menggambarkan energi interaksi antara adsorbat dengan situs aktif selama proses adsorpsi kimia berlangsung. Ikatan adsorbat dengan situs aktif tersebut cukup kuat sehingga adsorpsi kimia melibatkan energi untuk melepaskan kembali adsorbat yang terserap dalam situs aktif.

Desorpsi Sekuensial (Berjenjang)

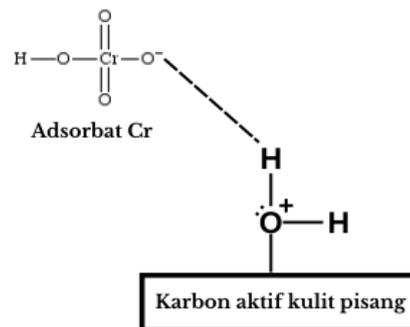
Pada penelitian ini dipelajari kemampuan desorpsi ion Cr^{6+} yang telah terserap dalam agen penyerap karbon aktif kulit pisang. Desorpsi sekuensial dilakukan untuk mengetahui jenis interaksi yang terjadi antara adsorbat ion Cr^{6+} dengan gugus aktif pada permukaan karbon aktif kulit pisang selama proses adsorpsi. Desorpsi sekuensial dilakukan secara bertahap menggunakan berbagai pelarut seperti aquades, KNO_3 , HNO_3 , dan Na_2EDTA . Tahapan desorpsi yang pertama dilakukan menggunakan aquades untuk mengetahui adanya ikatan Van der Waals melalui proses pemerangkapan yang terjadi antara ion Cr^{6+} dengan pori-pori karbon aktif kulit pisang. Hasil desorpsi yang diperoleh disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Persentase desorpsi adsorbat ion Cr^{6+} pada karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon

Gambar 7 di atas menunjukkan hasil persen desorpsi terbesar oleh agen pendesorpsi HNO_3 dan Na_2EDTA . Berdasarkan Gambar 7, didapatkan banyaknya ion Cr^{6+} yang dapat didesorpsi dengan HNO_3 sebesar 17,09% dan 27,18% untuk karbon aktif kulit pisang kepok

dan karbon aktif kulit pisang ambon. Desorpsi menggunakan pelarut HNO_3 dilakukan untuk menjelaskan adanya ikatan hidrogen yang terjadi antara ion Cr^{6+} dengan permukaan karbon aktif kulit pisang. Ikatan yang terjadi melalui ikatan hidrogen merupakan ikatan yang kuat sehingga perlu menggunakan pelarut asam berupa HNO_3 untuk melepaskan ion Cr^{6+} dari permukaan karbon aktif kulit pisang. Hal ini dikarenakan pelarut HNO_3 merupakan larutan elektrolit yang bertindak sebagai pengganggu interaksi antara karbon aktif dan adsorbat ion Cr^{6+} dengan cara melepaskan ion H^+ dan NO_3^- kemudian berkompetisi dengan adsorbat ion Cr^{6+} yang terjerap dalam situs aktif karbon kulit pisang. Ion H^+ tersebut akan mengganggu interaksi antara anion HCrO_4^- dengan situs aktif pada karbon kulit pisang, dimana ion H^+ lebih kuat berinteraksi dengan anion HCrO_4^- sehingga ion Cr^{6+} dapat terlepas kembali ke dalam larutan (Karim *et al.*, 2017). Dugaan mekanisme interaksi kimia melalui ikatan hidrogen selama proses adsorpsi ion Cr^{6+} disajikan dalam Gambar 8.

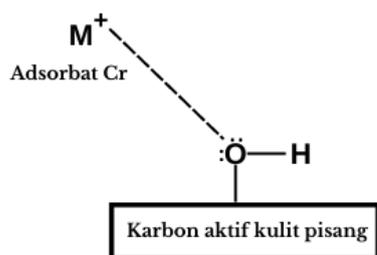


Gambar 8. Dugaan mekanisme interaksi kimia melalui pembentukan ikatan hidrogen antara adsorbat ion Cr^{6+} dengan situs aktif pada karbon aktif kulit pisang

Berdasarkan hasil desorpsi yang dilakukan menggunakan pelarut Na_2EDTA , jumlah ion Cr^{6+} yang terdesorpsi 3,39% pada karbon aktif kulit pisang kepok dan 4,15% pada karbon aktif kulit pisang ambon. Desorpsi menggunakan pelarut Na_2EDTA bertujuan untuk mengetahui adanya pembentukan ikatan kompleks antara ion Cr^{6+} dengan karbon aktif kulit pisang. Pelarut Na_2EDTA dapat mengkelat beberapa logam, untuk logam Cr, pelarut Na_2EDTA hanya dapat mengkelat ion Cr^{3+} sehingga ion Cr^{6+} dalam larutan tereduksi menjadi ion Cr^{3+} (Effendy, 2007).

Pembentukan kompleks merupakan ikatan yang kuat sehingga proses pelepasannya tidak mudah sehingga menghasilkan persen desorpsi yang cukup rendah dibandingkan menggunakan pelarut HNO_3 . Konsentrasi desorpsi menggunakan pelarut Na_2EDTA yang kecil mengindikasikan bahwa ikatan kimia yang terbentuk antara ion Cr^{6+} dengan situs aktif pada karbon aktif kulit pisang mempunyai ikatan yang sangat kuat. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian isoterm adsorpsi ion Cr^{6+} yang mengikuti model isoterm Langmuir dimana ikatan antara adsorbat ion Cr^{6+} dengan situs aktif pada karbon aktif kulit pisang cukup kuat.

Mekanisme pembentukan ikatan kompleks merupakan hasil penggunaan bersama pasangan elektron bebas. Dimana senyawa kompleks yang terbentuk merupakan gabungan dari ion Cr^{3+} yang berfungsi sebagai atom pusat dan gugus fungsi $-\text{OH}$ pada karbon aktif kulit pisang yang bertindak sebagai pendonor electron (Taihuttu, *et al.* 2018; Mohadi, *et al.* 2014). Hasil tersebut sesuai dengan teori HSAB, dimana ion Cr^{3+} merupakan asam keras yang mudah berinteraksi membentuk senyawa kompleks dengan basa keras dari gugus $-\text{OH}$ pada karbon aktif kulit pisang. Dugaan mekanisme interaksi kimia melalui pembentukan ikatan kompleks selama proses adsorpsi ion Cr^{3+} disajikan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Dugaan mekanisme interaksi kimia melalui pembentukan ikatan kompleks antara adsorbat ion Cr^{3+} dengan gugus $-\text{OH}$ dari karbon aktif kulit pisang

Berdasarkan hasil desorpsi yang telah dilakukan didapatkan bahwa jumlah ion Cr^{6+} yang dapat didesorpsi paling banyak menggunakan pelarut HNO_3 dan Na_2EDTA , sedangkan desorpsi dengan pelarut akuabides dan KNO_3 relatif sedikit. Persentase desorpsi ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang ambon lebih besar daripada desorpsi ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang kepok. Hal ini dimungkinkan karena energi ikatan adsorpsi

pada karbon aktif kulit pisang ambon lebih kecil sehingga ion Cr^{6+} lebih mudah dilepas melalui proses desorpsi. Hasil penelitian yang diperoleh mengindikasikan bahwa interaksi antara ion Cr^{6+} dengan karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon lebih banyak melalui ikatan hidrogen dan pembentukan kompleks.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa karbon kulit pisang kepok dan karbon kulit pisang ambon teraktivasi HCl berpotensi digunakan sebagai agen penyerap ion logam berat, khususnya ion Cr^{6+} . Analisa FTIR menunjukkan bahwa permukaan karbon aktif kulit pisang cenderung terprotonasi menjadi OH_2^+ . Aktivasi dengan asam menyebabkan spektra gugus $-\text{OH}$ mengalami penurunan intensitas serapan sehingga gugus $-\text{OH}$ cenderung bermuatan positif menjadi gugus OH_2^+ . Adsorpsi ion Cr^{6+} pada karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon mencapai kestabilan pada waktu kontak adsorpsi 75 menit. Kinetika adsorpsi ion Cr^{6+} mengikuti model kinetika *Pseudo Second Order* (PSO) dan memberikan laju reaksi sebesar 0,05713 mg/g.min untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan 0,04079 mg/g.min untuk karbon aktif kulit pisang ambon. Kemampuan adsorpsi ion Cr^{6+} oleh karbon aktif kulit pisang mengikuti model isoterm Langmuir dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,7036 mg/g dan 0,6387 mg/g untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon. Energi adsorpsi (E_{Ads}) untuk karbon aktif kulit pisang kepok dan karbon aktif kulit pisang ambon masing-masing adalah 26,67 kJ/mol dan 23,55 kJ/mol sehingga dikategorikan sebagai adsorpsi kimia. Hasil desorpsi sekuensial menunjukkan interaksi antara ion Cr^{6+} dengan karbon aktif kulit pisang dominan terjadi melalui ikatan hidrogen dan pembentukan kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhani, R., and Husaini. 2017. *Logam Berat Sekitar Manusia*. Banjarbaru: Lambung Mangkurat University Press.
- Anhwange, B., Ugye, J. T. and Nyiatagher, T. D. 2009. Chemical Composition of Musa Sepientum (Banana) Peels. *Journal of*

- Environmental, Agricultural and Food Chemistry*. 8(6): 437–42.
- Anshar, A. M., Santosa, S. J. and Sudiono, S. 2015. Kapasitas dan Energi Adsorpsi Humin Terhadap Eosin. *Al Kimia*. 3(2): 1–14.
- Arvianto, R. I., Mauludi, K., Damayanti, A. K. and Pradipta, M. F. 2019. Studi Kinetika Adsorpsi Emas Menggunakan Kulit Mangga (*Mangifera Indica*) Termodifikasi Asam Sulfat. *Chimica et Natura Acta*. 7 (1): 1-5.
- Asih, S., Sutikno, and Rizal, S. 2014. Produksi Bioetanol Dari Kulit Pisang Melalui Hidrolisis Asam Sulfat. *Jurnal Teknologi Dan Industri Hasil Pertanian*. 19(3): 274–88.
- Chairunnisa and Nasra, E. 2022. Pengaruh PH Dan Konsentrasi Ion Logam Cr (VI) Terhadap Penyerapan Karbon Aktif Kulit Durian. *Chemistry Journal*. 11(1): 45–50.
- Effendy. 2007. *Perspektif Baru Kimia Koordinasi Jilid I*. Malang: Bayumedia Publishing.
- Fuadah, S. R., and Rahmayanti, M. 2019. Adsorpsi-Desorpsi Zat Warna Naftol Blue Black Menggunakan Adsorben Humin Hasil Isolasi Tanah Gambut Riau, Sumatera. *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*. 4(2): 59–67.
- Hafizi-Atabak, H. R., Ghanbari-Tuedeshki, H., Shafaroudi, A., Akbari, M., Safaei-Ghomi, J. and Shariaty-Niassar, M. 2013. Production of Activated Carbon from Cellulose Wastes. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 47(1): 13–25.
- Handika, G., Maulina, S. and Mentari. V. A. 2017. Karakteristik Karbon Aktif Dari Pemanfaatan Limbah Tanaman Kelapa Sawit Dengan Penambahan Aktivator Natrium Karbonat (Na₂CO₃) dan Natrium Klorida (NaCl). *Jurnal Teknik Kimia*. 6(4): 41–44.
- Hastuti, B., Totiana, F. and Winiasih, R. 2018. The Role of Pectin in Pb Binding by Carrot Peel Biosorbents: Isoterm Adsorption Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 349(1): 1–4.
- Huda, S., Rita, D. R. and Kurniasari, L. 2020. Karakterisasi Karbon Aktif Dari Bambu Ori (*Bambusa Arundinacea*) Yang Diaktivasi Menggunakan Asam Klorida (HCl). *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*. 5(1): 22–27.
- Irianti, T. T., Kuswandi, Nuranto S., and Budiyatni, A. 2017. *Logam Berat Dan Kesehatan*. Yogyakarta: UGM Press.
- Jawad, A. H. et al. 2016. Adsorption of methylene blue onto activated carbon developed from biomass waste by H₂SO₄ activation: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 57(52): 25194–25206.
- Jubilate, F., Zaharah, T. A. and Syahbanu, I. 2016. Pengaruh Aktivasi Arang Dari Limbah Kulit Pisang Kepok Sebagai Adsorben Besi(II) Pada Air Tanah. *Jurnal JKK*. 5(4): 14–21.
- Karim, Bennani, A., Mounir, B., Hachkar, M., Bakasse, M., and Yaacoubi, A. 2017. Adsorption/Desorption Behavior of Cationic Dyes on Moroccan Clay: Equilibrium and Mechanism. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8(3): 1082–96.
- Maryono, S., and Rahmawati. 2013. Pembuatan Dan Analisis Mutu Briket Arang Tempurung Kelapa Ditinjau Dari Kadar Kanji. *Jurnal Chemica*. 14(1): 74–83.
- Masriatini, Rully. 2017. Pembuatan Karbon Aktif Dari Kulit Pisang. *Jurnal Redoks*. 2(1): 53–57.
- Mohadi, R., Hidayati, N. and Lesbani, A. 2014. Adsorption Desorption of Chromium (III) Ion on Cellulose from Wood Powder. *International Journal of Science and Engineering*. 7(1): 77–80.
- Syarifatul, M. and Rahmayanti, M. 2019. Kinetika Adsorpsi Kromium (VI) Yang Terkandung Dalam Limbah Batik Pada Asam Humat Termodifikasi Magnetit (AH-Fe-3O₄). *Integrated Lab Journal* 07(02): 42–46.
- Oko, S., Kurniawan, A., and Ega, S. B. P. 2021. Pengaruh Suhu Dan Konsentrasi Aktivator HCl Terhadap Karakteristik Karbon Aktif Dari Ampas Kopi. *JuniMetana: Media Komunikasi Rekayasa Proses dan Teknologi Tepat Guna*. 17(1): 15–21.
- Prabawati S. Y., Aji, D. P. and Rahmadhani, D. 2023. Limbah Kulit Buah Salak Teraktivasi Asam Klorida Sebagai Arang Aktif Logam Berat Timbal Pb (II) Dan Kromium Cr (VI). *Journal of Chemistry*. 18(1): 1–13.

- Prabawati, S. Y., Jumina, Santosa, S. J., Mustofa, and Ohto, K. 2012. Study on The Adsorption Properties of Novel Calix[6]Arene Polymers for Heavy Metal Cations. *Indonesian Journal of Chemistry*. 12(1): 28–34.
- Prabawati, S. Y., Mufidati, A., Djuwita, T. R., and Ngaini, S. N. 2020. Grinding Technique on Synthesis of Calixarene and Its Derivatives. *EKSAKTA: Journal of Sciences and Data Analysis*. 1(2): 117–23.
- Prabawati, S. Y., Widiakongko, P. D., and Taqwim, M. A. 2023. Activated Charcoal from Coffee Dregs Waste as an Alternative Biosorbent of Cu(II) and Ag(I). *Indonesian Journal of Chemistry* 23(4): 1120-1128.
- Purwiandono, G, and Ibrahim, S. 2022. Adsorption of Cu(II) Using Salacca's Peel Activated by HNO₃. *IJCR (Indonesian Journal of Chemical Research)*. 7(1): 1–7.
- Rahmansyah, A., Ismuyanto, B. dan Dwi. A. S. Saptati, N. H. 2017. Pembuatan Karbon Aktif Berbasis Kulit Pisang Dengan Variasi Suhu Karbonisasi. *Brawijaya Physics Student Journal*. 4(1): 1–7.
- Ramadhani, L. F., Nurjannah, I. M., Yulistiani, R. and Saputro, E. A. 2020. Teknologi Aktivasi Fisika Pada Pembuatan Karbon Aktif Dari Limbah Tempurung Kelapa. *Jurnal Teknik Kimia*. 26(2): 42–53.
- Rangabhashiyam, S, Anu, N., Nandagopal, M. S. G., and Selvaraju, N. 2014. Relevance of Isotherm Models in Biosorption of Pollutants by Agricultural Byproducts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2(1): 394–414.
- Setyawan Frida Luthvita and Mohammad Misbah Khunur. 2013. Pengaruh pH dan Lama Kontak Pada Adsorpsi Ca²⁺ Menggunakan Adsorben Kitin Terfosforilasi dari Limbah Cangkang Bekicot (*Achatina Fulica*). *Kimia Student Journal*. 1(2): 201–7.
- Sherly, A., and Cahyaningrum, S. E. 2014. Aktivasi Kulit Pisang Kepok (*Musa Acuminata* L.) Dengan H₂SO₄ dan Aplikasinya sebagai Adsorben Ion Logam Cr(VI). *Journal of Chemistry*. 3(1): 22–25.
- Taihuttu, B., Kayadoe, V., and Mariwy, A. 2018. Studi Kinetika Adsorpsi Ion Fe (III) Menggunakan Limbah Ampas Sagu. *Molluca Journal of Chemistry Education*. 9(1): 9–17.
- Tuhuloula, A., Budiarti, L. and Fitriana, E. N. 2013. Karakterisasi Pektin dengan Memanfaatkan Limbah Kulit Pisang Menggunakan Metode Ekstraksi. *Konversi*. 2(1): 21–27.
- Verayana, M. P., and Iyabu, H. 2018. Pengaruh Aktivator HCl dan H₃PO₄ terhadap Karakteristik (Morfologi Pori) Arang Aktif Tempurung Kelapa serta Uji Adsorpsi pada Logam Timbal (Pb). *Jurnal Entropi*. 13 (1): 67–75.
- Yustinah, H., Aprilia, M., and Syamsudin, A. B. 2020. Kesetimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Tanah Diatomit Secara Batch. *Konversi*. 9(12): 17–28.
- Zian, I. U., and Harmami. 2016. Pengaruh Waktu Kontak Pada Adsorpsi Remazol Violet 5R Menggunakan Adsorben Nata de Coco. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*. 5(2): 2337–3520.