

P-ISSN: 2774-4574 ; E-ISSN: 363-4582  
TRILOGI, 6(3), Juli-Sep 2025 (47-55)  
©2025 Lembaga Penerbitan, Penelitian,  
dan Pengabdian kepada Masyarakat (LP3M)  
Universitas Nurul Jadid Paiton Probolinggo  
DOI: [10.33650/trilogi.v6i3.12486](https://doi.org/10.33650/trilogi.v6i3.12486)



## Studi Eksperimental dan Analisis Optimasi Adsorpsi Cu(II) Menggunakan Kulit Pinang dengan Variasi Massa, pH, dan Suhu

### Siti Halijah Sabollah

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia  
[sitihalijahsabollahmcom@gmail.com](mailto:sitihalijahsabollahmcom@gmail.com)

### Hajirum Tuheteru

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia  
[Rumtuheteru77@gmail.com](mailto:Rumtuheteru77@gmail.com)

### Ainul Alim Rahman

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia  
[ainul\\_alim\\_rahman@unimudasorong.ac.id](mailto:ainul_alim_rahman@unimudasorong.ac.id)

### Firmanullah Fadlil

Universitas Pendidikan Muhammadiyah Sorong, Indonesia  
[fadlilfirmanullah@gmail.com](mailto:fadlilfirmanullah@gmail.com)

### Abstract

The rapid growth of fisheries in Sorong city has led to severe marine pollution, especially elevated Cu II concentrations that exceed water-quality standards and threaten both ecosystems and human health. This study aimed to develop an eco-friendly adsorbent from agricultural waste, namely citric-acid-activated palm-shell powder, for the removal of Cu II from fishing-industry effluents. The palm-shell powder was activated by immersion in 0.1 M citric acid for 24 h, which introduced carboxyl groups, eliminated impurities, and increased porosity and surface functionality, thereby enhancing Cu II sorption capacity. A full-factorial experimental design was employed, testing three independent variables (adsorbent mass, solution pH, and temperature) each in triplicate, with a fixed contact time of 120 min, sample volume of 50 mL, and initial adsorbent pH 6. Optimal conditions were identified as 50 mg adsorbent (capacity = 8.354 mg L<sup>-1</sup>, removal efficiency = 54.14 %), pH 9 (capacity = 10.69 mg L<sup>-1</sup>, efficiency = 69.28 %), and 60 °C (capacity = 7.49 mg L<sup>-1</sup>, efficiency = 48.56 %). The citric-acid-activated palm-shell adsorbent demonstrated significant

CuII reduction in fishing-effluent water and presents a low-cost, locally available, and sustainable solution for the treatment of fisheries waste streams.

**Keywords:** Activation; Areca Nut; Cu; Effectiveness.

### Abstrak

Peningkatan aktivitas perikanan di Kota Sorong telah menyebabkan pencemaran laut yang signifikan, khususnya konsentrasi ion tembaga (CuII) yang melampaui baku mutu dan mengancam ekosistem serta kesehatan manusia. Penelitian ini mengembangkan adsorben berbasis limbah pertanian berupa serbuk kulit pinang yang diaktifkan dengan larutan asam sitrat 0,1 M selama 24 jam. Aktivasi menghasilkan penambahan gugus karboksilat, penghilangan impuritas, serta peningkatan porositas dan fungsi permukaan, sehingga meningkatkan kemampuan penjeratan ion CuII. Percobaan dirancang dengan desain faktorial penuh melibatkan tiga variabel utama (massa adsorben, pH, suhu) yang masing-masing diuji tiga kali pada waktu kontak 120 menit, volume sampel 50 mL, dan pH awal adsorben 6. Hasil menunjukkan kondisi optimal pada massa adsorben 50 mg (kapasitas 8,354 mg/L, efisiensi 54,14 %), pH 9 (kapasitas 10,69 mg/L, efisiensi 69,28 %), dan suhu 60 °C (kapasitas 7,49 mg/L, efisiensi 48,56 %). Serbuk kulit pinang aktif citrat terbukti menjadi adsorben ramah lingkungan yang dapat menurunkan konsentrasi CuII dalam air limbah perikanan secara signifikan. Potensi penerapan teknologi ini pada pengolahan limbah perikanan sangat besar, terutama untuk instalasi pengolahan air di pelabuhan, pasar ikan, dan fasilitas industri perikanan di Sorong. Dengan biaya bahan baku yang rendah, ketersediaan biomassa lokal, serta kemampuan mengurangi logam berat tanpa penggunaan bahan kimia mahal, adsorben ini dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan kualitas lingkungan perairan dan mendukung kebijakan pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular.

**Katakunci:** Aktivasi; Cu; Efektivitas; Pinang.

## 1 Pendahuluan

Aktivitas perikanan yang meningkat menyebabkan penurunan kualitas udara laut karena pembuangan limbah pengolahan ikan ke perairan. Pencemaran logam berat, khususnya Cu (> 0,05 mg/L), mengganggu metabolisme, merusak enzim, dan berpotensi masuk ke rantai makanan hingga manusia. Logam berat diklasifikasikan sebagai bahan beracun dan harus dikelola secara ketat agar tidak melampaui baku mutu yang ditetapkan berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 (Atok et al., 2024). Kondisi ini menjadi hambatan utama pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang menekankan pelestarian lingkungan.

Salah satu dampak signifikan dari kegiatan perikanan di Kota Sorong, Papua Barat Daya adalah menurunnya kualitas air laut akibat pembuangan limbah pengolahan ikan di Jembatan Puri. Sampah dan limbah cair yang masuk ke perairan meningkatkan konsentrasi Cu, melampaui batas baku mutu dan mengancam ekosistem laut serta kesehatan masyarakat setempat (Histiari & Yakin, 2021; (Atok et al., 2024 ).

Untuk mengatasi permasalahan ini karena dari hasil penelitian didapatkan bahwa konsentrasi Cu sudah melewati baku mutu yaitu sebesar 15,43 mg/L, diperlukan teknologi ramah lingkungan, khususnya metode adsorpsi dengan adsorben berbasis limbah pertanian yang mudah terdegradasi. Ketersediaan limbah pertanian yang melimpah menjadikannya alternatif menarik untuk produksi adsorben berskala besar (Manurung et al., 2025). Penggunaan sabut buah pinang sebagai adsorben organik telah terbukti efektif dalam penyerapan logam berat (Atok et al., 2024) dan (Rahman et al., 2024). Potensi limbah kulit pinang dapat dioptimalkan melalui aktivasi dengan asam sitrat, yang menambah gugus karboksilat, menghilangkan pengotor serta mineral, dan meningkatkan porositas serta fungsi permukaannya (Sembiring et al., 2020).

Tujuan penelitian ini adalah meningkatkan nilai limbah kulit pinang melalui proses aktivasi asam sitrat sehingga menghasilkan adsorben yang efektif menjerap ion Cu(II). Kebaruan terletak pada penggunaan asam sitrat sebagai agen aktivasi yang ramah lingkungan, variasi jumlah molar, dan prosedur aktivasi yang sistematis, pendekatan yang belum banyak dilaporkan pada kulit pinang. Hasilnya diharapkan dapat

memberikan solusi berkelanjutan bagi pengelolaan limbah pertanian sekaligus berkontribusi pada remediasi kontaminasi tembaga di perairan laut.

## 2 Metode

### Desain Faktorial Sederhana

Untuk menganalisis pengaruh utama dan interaksi antara tiga faktor kunci dalam proses adsorpsi ion tembaga, penelitian ini menerapkan desain faktorial penuh dengan:

**Tabel 1.** Desain Faktorial

Faktor	1	2	3	4
Massa Adsorben (A)	50 mg	100 mg	150 mg	200 mg
pH larutan (B)	5	6	7	9
Suhu (C)	29°C	40°C	60°C	100°C

- Setiap kombinasi variabel (total  $4 \times 4 \times 4 = 64$  perlakuan) diulang tiga kali (replikasi) untuk mengurangi variabilitas eksperimental
- Variabel kontrol tetap konstan, waktu kontak 120 menit, konsentrasi aktivator asam sitrat 0,1M, volume sampel 50 mL, serta pH adsorben 6 sebelum percobaan.

### Bahan dan Alat yang digunakan

**Tabel 2.** Bahan Penelitian

No	Bahan
1	Asam Nitrat ( $\text{HNO}_3$ )
2	Asam Sitrat ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ )
3	Air deionisasi (aqua-dest)
4	Amonium hidroksida ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )
5	Natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ )
6	Tembaga (II) sulfat pentahidrat ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

**Tabel 3.** Bahan Penelitian

No	Alat	Kegunaan dalam penelitian
1	Spektrofotometer (uv-vis)	Pengukuran konsentrasi Cu(II)
2	Oven listrik	Pengeringan serbuk kulit pinang
3	Ayakan 100 mesh	Penyaringan serbuk kulit pinang

4	Kertas saring	Menyaring larutan setelah adsorpsi
5	Kertas pH	Pemeriksaan pH larutan
6	Gelas kimia	Penampungan dan pencampuran bahan kimia
7	Labu semprotan	Sebagai tempat aqua-dest untuk membersihkan
8	Erlenmeyer (100 ml)	Wadah reaksi inkubasi
9	Pengaduk kaca (stir bar)	Pengaduk homogen
10	Corong	Transfer larutan dan filtrat antar wadah
11	Blender	Penghancur kulit buah pinang menjadi serbuk
12	Tabung reaksi	Penampung larutan yang akan di uji di spektro

### Keamanan Kerja Laboratorium

1. Semua peneliti wajib memakai Alat Pelindung Diri (APD) : jaslab, sarung tangan nitril, kacamata pelindung, dan masker N95 saat menangani asam sitrat 0,1 M, NaOH, serta larutan Cu.
2. Material Safety Data Sheet (MSDS) untuk setiap bahan kimia disimpan di lemari laboratorium dan dibaca sebelum penggunaan.
3. Fume hood digunakan saat menyiapkan larutan asam kuat ( $\text{HNO}_3$ ) dan proses pencucian adsorben untuk menghindari inhalasi uap berbahaya.
4. Stasiun Darurat (shower, tempat cuci mata, pemadam kebakaran  $\text{CO}_2$ ) berada dalam jarak  $< 5$  m dari area kerja dan diuji secara berkala.
5. Pengelolaan Limbah : Semua limbah cair ( $\text{HNO}_3$ , NaOH, larutan Cu) dikumpulkan dalam wadah berlabel khusus dan diproses oleh unit Pengolahan Limbah kampus sebelum dibuang sesuai peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014.

### Preparasi Kulit Pinang menjadi serbuk

Buah pinang basah 8 kg dari Salawati Tengah, Kabupaten Raja Ampat dipisah biji, dicuci, dijemur 4 hari menggunakan sinar matahari, dipotong, dihaluskan dengan blender, dan di ayak menggunakan saringan 100 mesh dan menghasilkan hanya 45 gram serbuk kulit karena teksturnya yang berserabut.

### Aktivasi Serbuk Kulit Pinang

Sebanyak 10 gram serbuk kulit pinang direndam dalam 40 mL asam sitrat 0,1 M selama 24 jam, diaduk homogen, dicuci hingga pH 6, disaring, lalu dikeringkan di oven 105°C. Proses aktivasi serbuk kulit pinang dilakukan dengan cara merendam 10 gram serbuk dalam 40 mL larutan asam sitrat 0,1 M selama 24 jam untuk memungkinkan interaksi optimal antara larutan aktivator dan permukaan serbuk. Selama perendaman, campuran diaduk secara homogen agar distribusi asam sitrat merata pada seluruh partikel. Setelah itu, serbuk dicuci berulang kali dengan air hingga pH mendekati netral (sekitar pH 6) guna menghilangkan sisa asam berlebih yang masih menempel. Tahap selanjutnya adalah penyaringan untuk memisahkan serbuk dari larutan, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C hingga diperoleh serbuk kering yang siap digunakan sebagai adsorben aktif. Proses ini bertujuan memperkaya permukaan serbuk dengan gugus fungsional karboksilat dari asam sitrat sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap ion logam.

### Uji Linearitas ( $R^2$ )

Uji linearitas dilakukan dengan menyiapkan larutan standar tembaga (Cu) dari larutan induk 100 mg/L yang kemudian diencerkan hingga memperoleh konsentrasi 1, 3, 5, 7, dan 9 mg/L. Setiap standar diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 200 nm, dengan tiga kali pengukuran per standar dan nilai rata-rata yang diambil untuk meningkatkan ketelitian.

Nilai absorbansi tersebut kemudian dipetakan terhadap konsentrasi dalam sebuah grafik kalibrasi, dan dilakukan regresi linier (least-squares) untuk memperoleh persamaan linear serta koefisien determinasi ( $R^2$ ). Uji linearitas dilakukan untuk menentukan hubungan kuantitatif antara konsentrasi ion tembaga (Cu) dan respons spektrofotometri. Larutan standar Cu disiapkan dari larutan induk 100 mg/L dan diencerkan secara bertahap sehingga diperoleh konsentrasi 1, 3, 5, 7, dan 9 mg/L. Setiap larutan standar diukur absorbansinya menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 200 nm, dengan pengulangan tiga kali untuk masing-masing konsentrasi, kemudian dihitung nilai rata-ratanya guna meningkatkan akurasi pengukuran. Nilai absorbansi rata-rata ini kemudian diplot terhadap konsentrasi masing-masing larutan standar untuk membentuk grafik kalibrasi. Selanjutnya, dilakukan analisis regresi

linier menggunakan metode *least-squares* untuk memperoleh persamaan linear yang merepresentasikan hubungan antara konsentrasi dan absorbansi, sekaligus menentukan koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang menunjukkan sejauh mana data absorbansi mengikuti model linier.

### Penentuan Massa Adsorben Maksimum

Massa adsorben maksimum ditentukan dengan menguji serbuk kulit pinang yang telah diaktivasi dalam massa 50, 100, 150, dan 200 mg, yang dimasukkan ke dalam 4 wadah Erlenmeyer 100 mL berisi 50 mL sampel Cu pada pH 6. Campuran diinkubasi selama 120 menit, disaring, dan konsentrasi Cu sisanya dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk mengevaluasi efisiensi adsorpsi. Prosedur ini dilakukan tiga kali (replikasi=3) untuk setiap massa adsorben, sehingga diperoleh data rata-rata efisiensi adsorpsi yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi dosis optimal serbuk kulit pinang sebagai adsorben.

### Penentuan pH Larutan Maksimum

Massa adsorben maksimum yang telah ditentukan digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi pengaruh pH terhadap proses adsorpsi. Serbuk pinang yang telah diaktivasi ditempatkan dalam 4 tabung Erlenmeyer 100 mL berisi 50 mL sampel, kemudian diaduk pada pH 5, 6, 7, dan 9 selama 120 menit. Setelah itu, campuran disaring dan konsentrasi Cu sisa dianalisis dengan spektrofotometer UV-Vis untuk menentukan pH optimum alam adsorpsi. Prosedur ini dilakukan tiga kali (replikasi=3) untuk setiap pH adsorben, sehingga diperoleh data rata-rata efisiensi adsorpsi yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi dosis optimal serbuk kulit pinang sebagai adsorben.

### Penentuan Suhu Larutan Maksimum

Massa dan pH adsorben maksimum yang telah ditentukan selanjutnya diuji pada empat tabung Erlenmeyer 100 mL berisi 50 mL larutan sampel dengan waktu kontak 120 menit pada suhu 29°C, 40°C, 60°C, dan 100°C. Setelah inkubasi, campuran disaring dan konsentrasi Cu yang tersisa diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis untuk menilai pengaruh suhu terhadap efisiensi adsorpsi. Prosedur ini dilakukan tiga kali (replikasi=3) untuk setiap suhu adsorben, sehingga diperoleh data rata-rata efisiensi adsorpsi yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi dosis optimal serbuk kulit pinang sebagai adsorben.

### 3 Hasil dan Diskusi

#### Preparasi Serbuk Kulit Pinang

Proses pengolahan kulit pinang basah dari Salawati Tengah, Kabupaten Raja Ampat menjadi adsorben aktif melalui tahapan pembersihan, penjemuran, penghalusan, pengayakan, aktivasi dengan asam sitrat selama 24 jam, serta pengeringan menghasilkan serbuk adsorben yang efektif dalam menyerap logam berat atau molekul pengotor dari larutan. Proses aktivasi dengan asam sitrat berperan penting dalam meningkatkan luas permukaan dan kerapatan pori-pori mikro pada struktur adsorben, yang pada gilirannya meningkatkan kapasitas penyerapan. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa limbah kulit pinang memiliki potensi besar sebagai biosorben alami (Rahman *et al.*, 2024), terbukti dari kemampuannya dalam menyerap ion logam seperti Cu(II). Serbuk adsorben siap digunakan dengan massa 0,05 g, 0,1 g, 0,15 g, dan 0,2 g (proporsi terhadap larutan 0,1%, 0,2%, 0,3%, dan 0,4%).



Gambar 1. Adsorben Serbuk Pinang

#### Pengaruh Massa Adsorben

Untuk membandingkan kinerja adsorben, rasio massa adsorben terhadap volume sampel (b:v) diubah menjadi persentase massa adsorben (% w/v), yakni 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, dan 0,4 % (berdasarkan massa adsorben 0,05 g, 0,10 g, 0,15 g, dan 0,20 g dalam 50 mL sampel). Hasil efisiensi adsorpsi untuk masing-masing rasio ditampilkan pada dalam tabel berikut.

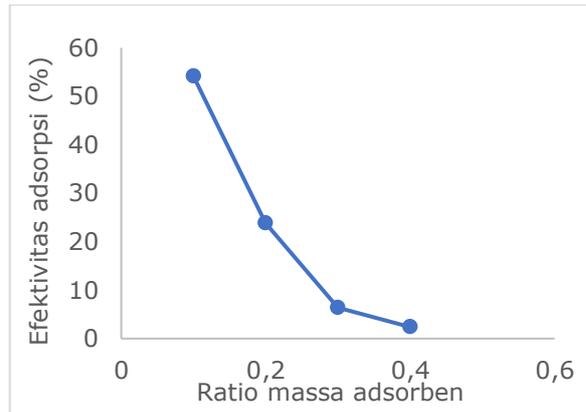
Tabel 1. Data Variasi Massa Adsorben

Ratio Massa Adsorben(%)	Kapasitas Cu terserap (mg/g)	Efektivitas adsorpsi (%)
0,1	8,354	54,14
0,2	1,836	28,80
0,3	0,330	6,43
0,4	0,092	2,39

Keterangan tabel: Rasio Massa Adsorben (%) merupakan persentase massa adsorben (gram) per volume sampel (100 mL).

- Kapasitas Cu terserap (mg/g) menunjukkan jumlah ion Cu(II) yang dapat diadsorpsi per gram adsorben pada kondisi keseimbangan.
- Efektivitas adsorpsi (%) dihitung dari penurunan konsentrasi Cu(II) dalam larutan dibandingkan konsentrasi awal.

Penelitian ini menguji rasio massa adsorben sampel (b:v) sebesar 0,1%, 0,2%, 0,3% dan 0,4%. Hasil efisiensi adsorpsi untuk masing-masing rasio ditampilkan dalam grafik, yang memperlihatkan peningkatan penurunan konsentrasi Cu(II) seiring naiknya rasio b:v.



Gambar 2. Grafik Massa Adsorben

Gambar 2. memperlihatkan bahwa efektivitas adsorpsi Cu meningkat ketika massa adsorben berkurang, analisis UV-VIS menunjukkan nilai maksimum tercapai pada massa 0,05 g dengan rasio b:v = 0,1 % (Rahman *et al.*, 2024). Penambahan massa adsorben yang lebih besar tidak serta-merta meningkatkan penyerapan karena kelebihan gugus fungsi pada permukaan serbuk kulit pinang dapat menyebabkan titik jenuh tercapai lebih cepat, sehingga ion Cu(II) tidak dapat terikat lebih lanjut. Pada massa 0,05 g jumlah situs aktif per satuan berat sudah optimal, sedangkan pada massa yang lebih tinggi terjadi tumpang-tindih partikel yang menurunkan ketersediaan gugus -OH/-COOH dan mempercepat pencapaian jenuh, sejalan dengan temuan (Munira *et al.*, 2021) yang menyatakan bahwa setelah permukaan jenuh tidak ada situs baru yang dapat membentuk lapisan adsorpsi kedua, sehingga ion Cu<sup>2+</sup> yang belum terikat kembali berdifusi keluar pori.

Serbuk kulit pinang yang diaktivasi dalam penelitian ini memiliki porositas dan luas permukaan sedikit berbeda dari arang yang dipakai oleh Munira *et al.*, sehingga efisiensi adsorpsi (54,14 % vs 53,22 %) mencerminkan variasi ukuran mikro- hingga mesopori serta distribusi gugus fungsional. Pada studi

(Rahman *et al.*, 2024) yang melaporkan removal sebesar 81,15 % dapat dijelaskan oleh tiga faktor utama:

1. Konsentrasi dan tipe aktivator yang lebih kuat, menghasilkan pembentukan pori-pori baru dan penambahan gugus -OH/-COOH secara signifikan
2. Prosedur pencucian dengan HCl yang lebih efektif membersihkan material penghalang dan membuka pori-pori secara lebih luas
3. Kondisi uji yang meliputi konsentrasi Cu awal yang lebih rendah dan pH 3–10, yang memberikan spekiasi ion  $\text{Cu}^{2+}$  paling cocok untuk kompleksasi dengan gugus karboksilat dan hidroksil.

Dengan demikian, perbedaan hasil antara ketiga penelitian bukanlah akibat satu variabel tunggal, melainkan konsekuensi kumulatif dari massa adsorben optimal, karakteristik porositas dan gugus fungsional yang ditentukan oleh jenis bahan baku serta intensitas aktivasi, efektivitas proses pencucian, dan kondisi operasional seperti konsentrasi ion target dan pH, yang secara bersamaan menentukan efisiensi adsorpsi  $\text{Cu}^{2+}$  pada air limbah.

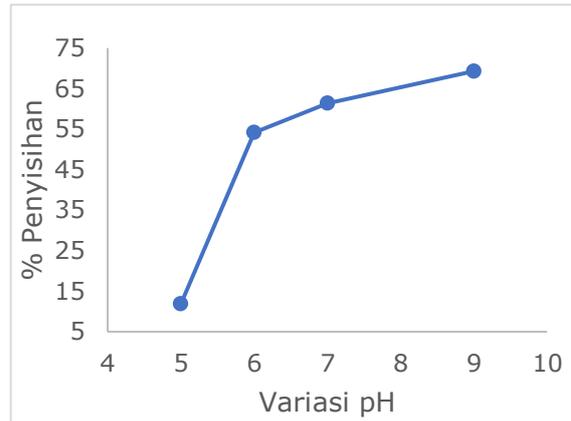
**Pengaruh pH Adsorben**

**Tabel 2.** Data Variasi pH

Variasi pH	Efektivitas Adsorpsi (mg/g)	Efisiensi Penyisihan (%)
5	1,827	11,84
6	8,354	54,14
7	9,4783	61,42
9	10,691	69,28

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa variasi pH memberikan pengaruh signifikan terhadap efektivitas adsorpsi maupun efisiensi penyisihan. Pada pH 5, kemampuan adsorpsi masih sangat rendah yaitu 1,827 mg/g dengan efisiensi hanya 11,84%, menunjukkan kondisi permukaan adsorben belum optimal dalam mengikat ion atau molekul target. Peningkatan pH hingga 6 menyebabkan lonjakan drastis pada efektivitas adsorpsi menjadi 8,354 mg/g dengan efisiensi 54,14%, menandakan mulai tercapainya kondisi yang lebih sesuai untuk interaksi antara adsorben dan adsorbat. Kondisi optimal tampak pada pH 9 dengan nilai efektivitas adsorpsi tertinggi 10,691 mg/g dan efisiensi penyisihan 69,28%, menunjukkan bahwa suasana yang lebih basa mendukung terbentuknya interaksi yang lebih kuat antara gugus aktif pada adsorben dengan partikel yang diadsorpsi. Hal ini menegaskan bahwa pH merupakan salah satu faktor kritis yang menentukan performa adsorpsi.

pH awal air limbah merupakan faktor utama yang menentukan mekanisme adsorpsi, kapasitas penyerapan ion logam, serta keseimbangan kimia antara adsorbat dan adsorben (Anggraini *et al.*, 2022). Pada percobaan kami, kenaikan pH dari 5 ke 9 secara signifikan meningkatkan kinerja adsorpsi: kapasitas adsorpsi naik dari 1,83 mg/g (efisiensi 11,84 %) pada pH 5 menjadi 10,69 mg/g (efisiensi 69,28 %) pada pH 9, dengan nilai tertinggi pada pH 9. Hal ini menunjukkan bahwa pH yang lebih basa memperkuat deprotonasi permukaan adsorben, meningkatkan interaksi elektro-statik dengan ion  $\text{Cu}^{2+}$ , dan pada  $\text{pH} > 8$  juga berkontribusi pada presipitasi  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , sehingga memperbaiki efisiensi penyisihan logam berat.



**Gambar 3.** Grafik Variasi pH

Pada pH 5 (asam) efisiensi adsorpsi  $\text{Cu}(\text{II})$  hanya 11,84% akibat persaingan ion  $\text{H}^+$  dan protonasi permukaan yang menimbulkan tolakan elektrostatis. Kenaikan pH 6 meningkatkan efisiensi menjadi 54,14% karena berkurangnya  $\text{H}^+$  serta deprotonasi permukaan yang memberi muatan negatif, memperkuat interaksi dengan  $\text{Cu}(\text{II})$ . Pada pH 7 (mendekati titik muatan nol) efisiensi naik menjadi 61,62% dengan kapasitas 12,391 mg/g, karena permukaan sangat negatif sehingga interaksi elektrostatis optimal, namun pada  $\text{pH} > 8$  juga dapat terjadi presipitasi  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , sehingga peningkatan efisiensi pada pH 9 mencerminkan gabungan mekanisme adsorpsi dan presipitasi.

Jika dibandingkan dengan literatur, (Munira *et al.*, 2021) melaporkan efisiensi 53,22 % pada variasi massa adsorben namun tidak menyebutkan pH, sehingga sulit untuk melakukan perbandingan langsung. Anggraini *et al.* (2022) menggunakan karbon aktif memperoleh penghilangan  $\text{Cu}^{2+}$  sebesar 98,33 %, sedangkan Rahman *et al.* (2024) menemukan pH optimum 8 dengan penghilangan 56,54 %. Meskipun efisiensi kulit pinang pada pH 9 (69,28 %) lebih rendah dibandingkan karbon aktif, keunggulannya

terletak pada sifatnya sebagai limbah lokal yang melimpah dan hampir tidak menimbulkan biaya. Kulit pinang mengandung selulosa tinggi, namun memiliki luas permukaan dan pori yang lebih kecil dibandingkan karbon aktif, sehingga kapasitas adsorpsinya terbatas. Peningkatan pH ke kondisi basa tetap meningkatkan kinerja adsorpsi karena deprotonasi permukaan meningkatkan muatan negatif dan memperkuat tarik-elektrostatik terhadap ion  $\text{Cu}^{2+}$ .

Dengan demikian, pemilihan kulit pinang sebagai media adsorpsi menawarkan manfaat ekonomi (bahan murah atau nol biaya), aspek lingkungan (pemanfaatan limbah pertanian lokal), dan kontribusi pada ekonomi sirkular, sekaligus memberikan kinerja yang kompetitif bila pH dioptimalkan. Pengaturan pH yang tepat menjadi strategi utama untuk memaksimalkan efisiensi adsorpsi  $\text{Cu(II)}$  menggunakan kulit pinang.

**Pengaruh Suhu Larutan Adsorben**



**Gambar 4.** Efektivitas Adsorpsi Variasi Suhu.

Berdasarkan grafik yang menggambarkan perbandingan konsentrasi ion  $\text{Cu(II)}$  sebelum dan sesudah proses adsorpsi, suhu terbukti menjadi faktor operasional yang sangat signifikan.

**Tabel 3.** Data Variasi Suhu

pH	Suhu (°C)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi Akhir (mg/L)
9	29	15,43	12,47
9	40	15,43	8,41
9	60	15,43	7,93
9	100	15,43	18

Pada suhu 29 °C, tingkat keberhasilan adsorpsi masih rendah, yaitu 19,12%. Peningkatan suhu menjadi 40 °C meningkatkan efektivitas secara drastis hingga 45,48%, dan pada 60 °C nilai

tersebut bertambah menjadi 48,56%. Kenaikan ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi mempercepat pergerakan ion logam dalam larutan sehingga interaksi ion  $\text{Cu(II)}$  dengan situs-situs aktif pada permukaan adsorben menjadi lebih intensif, sehingga memperkuat proses adsorpsi.

Namun, pada suhu 100 °C konsentrasi ion  $\text{Cu(II)}$  dalam fase cair meningkat kembali, menandakan terjadinya desorpsi sekaligus kerusakan struktural pada adsorben. Pada suhu tinggi, energi kinetik ion melebihi energi ikatan ion-adsorben, sehingga ikatan tersebut melemah dan ion-ion lepas ke fase cair. Fenomena desorpsi ini dipertegas oleh fakta bahwa energi aktivasi desorpsi lebih rendah dibandingkan energi aktivasi adsorpsi, menjadikan proses desorpsi lebih termodinamika-favorabel pada suhu tersebut (Nurdila & Asri, 2015) dan (Rengga et al., 2018).

Selain efek kinetik, suhu tinggi juga menyebabkan kerusakan struktural adsorben melalui tiga mekanisme utama (Kurniawan et al., 2022) :

1. Dehidroksilasi yang menghilangkan gugus -OH aktif pada permukaan.
2. Perubahan porositas yang mengakibatkan penyusutan atau kolaps jaringan pori, dan
3. Deformasi kimia yang merubah gugus fungsi kritis bagi adsorpsi

Analisis termodinamika memperlihatkan bahwa proses dehidroksilasi menyebabkan hilangnya gugus -OH aktif pada permukaan material sehingga menurunkan kemampuan interaksi dengan molekul target. Selain itu, perubahan porositas yang terjadi dapat memicu penyusutan bahkan kolapsnya jaringan pori, sehingga luas permukaan efektif berkurang secara signifikan. Bersamaan dengan itu, deformasi kimia yang merubah gugus fungsi kritis turut mengurangi kapasitas adsorpsi, sehingga kinerja material menjadi lebih rendah dalam proses pemisahan atau penjerapan.

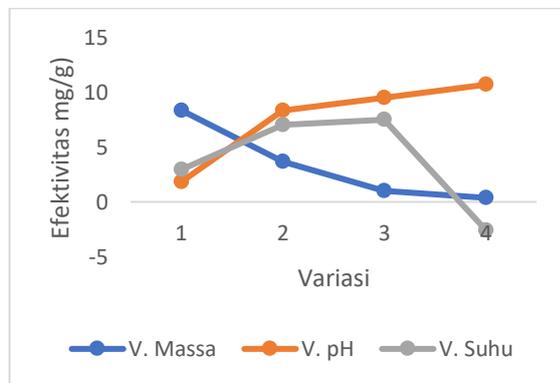
Analisis termodinamika memperlihatkan bahwa pada 60 °C nilai perubahan energi bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) negatif, menandakan proses adsorpsi bersifat spontan (Qudus et al., 2024), sedangkan nilai entalpi ( $\Delta H^\circ$ ) positif menunjukkan sifat endotermik yang memerlukan energi aktivasi. Peningkatan entropi ( $\Delta S^\circ$ ) mencerminkan peningkatan ketidakteraturan sistem selama adsorpsi (Wu Xinming et al., 2020). Oleh karena itu, suhu optimal sebesar 60 °C menjadi titik keseimbangan antara peningkatan kinetika adsorpsi, stabilitas struktural adsorben, dan

efisiensi termodinamika maksimum, memungkinkan pencapaian efisiensi penyisihan Cu(II) hingga 99,70% sebagaimana dilaporkan oleh Nurdila & Asri (2015).

Penurunan efisiensi yang lebih rendah pada penelitian ini dapat dijelaskan oleh perbedaan intensitas pengadukan studi sebelumnya menggunakan agitasi intensitas tinggi, sementara penelitian ini mengandalkan pengadukan manual, yang memengaruhi laju reaksi serta kemampuan adsorben untuk mempertahankan (Rengga et al., 2018)

Dengan demikian, pengendalian suhu serta intensitas pengadukan merupakan faktor operasional krusial dalam mengoptimalkan proses adsorpsi ion logam berat pada aplikasi pengolahan limbah. Memastikan suhu berada pada kisaran 60 °C dan menyediakan agitasi yang cukup kuat akan meminimalkan risiko desorpsi dan kerusakan struktural, serta memaksimalkan kapasitas adsorpsi.

#### Pembahasan Seluruh Variasi



**Gambar 4.** Efektivitas (mg/g)

Berdasarkan grafik efektivitas (mg/g) terhadap variasi yang ditunjukkan, terlihat bahwa setiap parameter massa adsorben (V. Massa), pH larutan (V. pH), dan suhu (V. Suhu) memberikan pengaruh unik dan signifikan terhadap efisiensi adsorpsi. Variasi massa adsorben (garis biru) menunjukkan tren penurunan efektivitas yang tajam, dari sekitar 8,35 mg/g pada Variasi 1 massa 50 mg hingga mendekati 0,36 mg/g pada Variasi 4, mengindikasikan bahwa penambahan massa adsorben yang berlebihan dapat menyebabkan saturasi situs aktif dan tumpang tindih partikel yang mengurangi efisiensi per gramnya, sejalan dengan temuan (Munira et al., 2021)

Sebaliknya, variasi pH (garis oranye) memperlihatkan peningkatan efektivitas yang stabil dan signifikan, dari sekitar 1,8 mg/g pada

Variasi 1 hingga 10,6 mg/g pada Variasi 4. Ini menunjukkan bahwa pH yang semakin tinggi mengoptimalkan deprotonasi gugus fungsional adsorben dan spesiasi ion Cu(II), mendukung kompleksasi yang kuat, seperti yang disebutkan oleh (Rahman et al., 2024).

Sementara itu, variasi suhu (garis abu-abu) menunjukkan pola yang lebih kompleks, efektivitas meningkat dari sekitar 2,9 mg/g pada Variasi 1 mencapai puncaknya sekitar 7,5 mg/g pada variasi 3, sebelum kemudian anjlok drastis ke nilai negatif (sekitar -2,5 mg/g) pada variasi 4. Pola ini menyiratkan bahwa suhu memiliki rentang optimal, di mana suhu terlalu tinggi dapat menyebabkan desorpsi atau kerusakan gugus fungsional. Dengan demikian, untuk mencapai efisiensi adsorpsi Cu(II) yang maksimal dari air limbah, diperlukan pemahaman mendalam tentang pengaturan massa adsorben yang optimal, kondisi pH ideal, dan kontrol suhu operasional dalam rentang yang menguntungkan.

## 4 Kesimpulan

Kesimpulannya, penelitian ini membuktikan bahwa serbuk kulit pinang yang diaktivasi dengan asam sitrat memiliki potensi tinggi sebagai adsorben ramah lingkungan dan ekonomis untuk penyisihan ion Cu(II) dari limbah cair, khususnya di industri perikanan Sorong. Kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 0,1 % (0,05 g), pH 9, dan suhu 60 °C dengan efisiensi penyisihan mencapai 69,28%, sementara peningkatan massa maupun suhu lebih tinggi menyebabkan kejenuhan dan desorpsi. Aktivasi dengan asam sitrat memperkaya permukaan dengan gugus karboksilat yang meningkatkan interaksi elektrostatis, serta analisis termodinamika menunjukkan proses berlangsung spontan dan endotermik pada suhu menengah. Meskipun penelitian ini masih terbatas pada skala batch kecil dan pengadukan manual, hasilnya memberikan dasar ilmiah serta benchmark penting bagi pengembangan adsorben berbasis biomassa lokal yang berkelanjutan dan aplikatif untuk pengolahan limbah perikanan di wilayah tropis.

## 5 Referensi

- Ainul Alim Rahman, Firmanullah Fadlil, Hajirum Tuheteru, & Siti Halijah Sabollah. (2024). Identifikasi Potensi Limbah Kulit Pinang Sebagai Adsorben Logam Berat Cu (II). *Jurnal. Hapus Tagmg. Ac. Identitas*, 5(2), 1–8.
- Angraini, N., Agustina, T. E., & Hadiah, F. (2022). Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan

- Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 345–355.  
<https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355>
- Atok, M. N. L., Suyasa, I. W. B., & Sibaran, J. (2024). Peningkatan Performance Arang Aktif Sabut Buah Pinang (*Areca Catechu L*) sebagai Adsorben Kation. *Jurnal Syntax Admiration*, 5(6), 2182–2195.  
<https://doi.org/10.46799/jsa.v5i6.1230>
- Histiari, A. R., & Yakin, K. (2021). KAJIAN PENGARUH AKTIVITAS INDUSTRI TERHADAP TINGKAT PENCEMARAN AIR LAUT DI KOTA SORONG. *Metode: Jurnal Teknik Industri*, 7(1), 18–30.  
<https://doi.org/10.33506/mt.v7i1.1647>
- Kurniawan, A., Fatimura, M., & Masriatini, R. (2022). PENGARUH VARIASI LAJU ALIR GAS ALAM TERHADAP ABSORBSI GAS CO<sub>2</sub> DAN WAKTU PEMBAKARAN GAS ALAM. 7.
- Manurung, M., Ratnayani, O., & Ciawi, Y. (2025). Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya. 02(01).
- Munira, M., Mustafiah, M., Darnengsih, D., Gusnawati, G., & Utami, H. H. (2021). Pemanfaatan Limbah Arang Plastik Sebagai Adsorben Surfaktan Anionik dalam Air Limbah Laundry. *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(1), 59–63.  
<https://doi.org/10.33536/jcpe.v6i1.963>
- Nurdila, F. A., & Asri, N. S. (2015). Adsorpsi Logam Tembaga (Cu), Besi (Fe), dan Nikel (Ni) dalam Limbah Cair Buatan Menggunakan Nanopartikel Cobalt Ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). 55.
- Qudus, N., Sugiyarto, B., Kristianto, A., Pangestu, I. S., Erliana, S. R., Ubay, I. N., & Afidah, A. D. (2024). FILTER AIR HUJAN DARI ADSORBEN ALAMI ENCENG GONDOK (*Eichhornia Crassipes*). *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, 4, 1–21.
- Rengga, W. D. P., Triwibowo, B., Nurazizah, N., & Nur, U. (2018). Kesetimbangan dan kinetika adsorpsi larutan logam timbal menggunakan protein keratin dari bulu ayam pedaging (*gallus domesticus*). 10.
- Sembiring, Rinawati, Panggabean, & Ruth Donda Eleonora. (2020). Pendidikan Kesehatan Tentang Deteksi Dini Kanker Cerviks Di Klinik Mariana. . . *JURNAL PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT (KESEHATAN)*, 2(1), 1–5.
- Simbolon, L. A., Widarti, B. N., & Sarwono, E. (2022). PEMANFAATAN SABUT KELAPA SEBAGAI BIOADSORBEN UNTUK PENURUNAN KONSENTRASI BESI (FE) DAN KROMIUM (CR) AIR LINDI DENGAN VARIASI WAKTU KONTAK DAN KECEPATAN PENGADUKAN MENGGUNAKAN SISTEM BATCH. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 6(1), 12.  
<https://doi.org/10.30872/jtlunmul.v6i1.7107>
- Wu Xinming, Huang B, Wang Q, & Wang Y. (2020). High energy density of two-dimensional MXene/NiCo-LDHs interstratification assembly electrode: Understanding the role of interlayer ions and hydration. *Chemical Engineering Journal*, 380, 122456.