

Pemanfaatan Adsorben Dari Cangkang Telur Ayam Broiler untuk Menurunkan Kadar Cu Pada Limbah Elektroplating

Aiman Najib Ilham*, Hanif Surya Priyatama, Srie Muljani, Caecilia Pujiastuti,
Dyah Suci Perwitasari

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email : 220310100@student.upnjatim.ac.id

Diterima: 17 Juli 2026

Disetujui: 24 Juli 2026

Abstract

Electroplating wastewater contains heavy metals such as copper (Cu) which are toxic and hazardous to the environment and human health. This study aims to utilize broiler chicken eggshells as an alternative, economical, and environmentally friendly adsorbent to reduce Cu levels in electroplating wastewater. The eggshells were activated using 0.1 M HCl for 24 hours, then dried at 100°C. The adsorption process was conducted with variations in adsorbent mass (2, 4, 6, 8, and 10 grams) and contact time (20, 40, and 60 minutes) at a solution volume of 20 mL with an initial Cu concentration of 958.03 mg/L. Cu concentration was analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The results showed that adsorption efficiency increased with increasing adsorbent mass and contact time. The optimum conditions were achieved at an adsorbent mass of 6 grams and a contact time of 60 minutes, with a recovery percentage of 99.5764% and a final Cu concentration of 4.058 mg/L. The Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.8911$) fitted the adsorption data better than the Freundlich model ($R^2 = 0.846$), indicating that adsorption occurred on a homogeneous surface with monolayer formation. The optimum adsorbent-to-solution ratio was 1 : 3.33 (g/mL). This study proves that acid-activated chicken eggshells have the potential to serve as an effective and efficient adsorbent for electroplating wastewater treatment.

Keywords: *adsorbent, chicken egg shell, electroplating, heavy metal, contact time*

Abstrak

Limbah elektroplating mengandung logam berat seperti tembaga (Cu) yang bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan serta kesehatan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan cangkang telur ayam broiler sebagai adsorben alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan dalam menurunkan kadar Cu pada limbah elektroplating. Cangkang telur diaktivasi menggunakan HCl 0,1 M selama 24 jam, kemudian dikeringkan pada suhu 100°C. Proses adsorpsi dilakukan dengan variasi massa adsorben (2, 4, 6, 8, dan 10 gram) dan waktu kontak (20, 40, dan 60 menit) pada volume larutan 20 mL dengan konsentrasi awal Cu 958,03 mg/L. Analisis kadar Cu menggunakan *Spektroskopi Serapan Atom* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi meningkat seiring bertambahnya massa adsorben dan waktu kontak. Kondisi optimum dicapai pada massa adsorben 6 gram dan waktu kontak 60 menit dengan persentase recovery sebesar 99,5764% dan kadar akhir Cu 4,058 mg/L. Model isoterm Langmuir ($R^2 = 0,8911$) lebih sesuai dibandingkan Freundlich ($R^2 = 0,846$) dalam menggambarkan proses adsorpsi, yang mengindikasikan adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan pembentukan monolayer. Rasio optimum adsorben terhadap larutan adalah 1 : 3,33 (gram/mL). Penelitian ini membuktikan bahwa cangkang telur ayam teraktivasi asam berpotensi sebagai adsorben yang efektif dan efisien untuk pengolahan limbah elektroplating.

Kata Kunci: *adsorben, cangkang telur ayam, elektropalting, logam berat, waktu kontak*

1. Pendahuluan

Air bersih merupakan kebutuhan utama bagi kehidupan manusia. Namun, ketidakseimbangan antara ketersediaan air bersih dan pertumbuhan penduduk yang pesat telah menyebabkan distribusi yang tidak merata, sehingga mendorong masyarakat untuk mencari sumber alternatif seperti air sungai. Air sungai sebagai alternatif air bersih seringkali ditemukan mengandung logam berat seperti besi (Fe), kromium (Cr), seng (Zn), dan lainnya. Kandungan logam berat sering ditemukan di sungai karena banyaknya limbah logam atau industri logam yang membuang limbahnya ke sungai [1]. Salah satu industri rumahan yang mengandung logam berat adalah elektroplating. Pencemaran logam berat seperti tembaga (Cu) dan kromium (Cr) dalam air limbah elektroplating merupakan masalah lingkungan yang serius karena bersifat toksik, karsinogenik, dan dapat terakumulasi dalam organisme yang terpapar [2]. Pencemaran logam berat

dalam air limbah elektroplating menimbulkan ancaman lingkungan yang serius karena sifatnya yang toksik, karsinogenik, dan bioakumulatif, yang dapat menyebabkan masalah kesehatan serius seperti kerusakan hati dan ginjal, serta gangguan sistem saraf [3]. Biaya pengolahan limbah konvensional yang tinggi seringkali mengakibatkan pembuangan limbah yang tidak diolah secara ilegal, sehingga menimbulkan kebutuhan mendesak akan metode pengolahan yang lebih efisien dan ekonomis.

Adsorpsi merupakan fenomena yang menjanjikan untuk menghilangkan polutan, di mana molekul-molekul diserap ke permukaan material padat. Adsorpsi dapat dibagi menjadi mekanisme fisik (gaya Van der Waals) dan kimia (pertukaran elektron). Meskipun adsorben berpori sangat efektif, produksi material konvensional seperti karbon aktif memakan waktu, mahal, dan seringkali merusak lingkungan [4]. Oleh karena itu, para peneliti sedang menyelidiki alternatif yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan, khususnya bio-adsorben yang berasal dari limbah pertanian dan rumah tangga.

Cangkang telur ayam broiler merupakan salah satu bahan limbah organik yang melimpah dan memiliki potensi signifikan. Pada tahun 2023, produksi telur di Indonesia mencapai 6,1 juta ton, dengan cangkang telur menyumbang sekitar 11% dari total berat telur, menghasilkan sekitar 610 ribu ton limbah cangkang. Tingkat konsumsi yang tinggi merupakan faktor penyebab limbah telur ayam menumpuk dan tidak dimanfaatkan. Meskipun tidak berbahaya bagi lingkungan dan mudah terurai secara alami, limbah ini tidak memiliki nilai ekonomi. Limbah telur ayam memiliki potensi menarik untuk digunakan sebagai adsorben dan juga dapat mencegah penghambatan mikroorganisme MBR, hal ini didukung oleh banyaknya pori-pori pada limbah telur ayam [5]. Meskipun tidak berbahaya dan mudah terurai secara alami, limbah ini umumnya tidak memiliki nilai ekonomi. Secara struktural, cangkang telur mengandung 10.000–20.000 pori, berukuran 0,01–0,07 μm , dan terutama terdiri dari 98,41% CaCO_3 , bersama dengan MgCO_3 dan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ [6]. Selain itu, gugus fungsionalnya—termasuk karboksil, amina, dan sulfat—memungkinkan mereka untuk mengikat ion logam berat secara efektif [7]. Mekanisme adsorpsi melibatkan pertukaran ion, di mana ion Ca^{2+} dari permukaan cangkang telur dilepaskan ke dalam larutan sementara ion Cu^{2+} terikat dan mengendap [8].

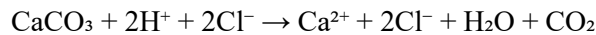
Beberapa penelitian telah mengeksplorasi adsorben alternatif untuk remediasi logam berat. Misalnya, karbon aktif eceng gondok menghilangkan Cr dengan efisiensi 90,4% dalam air limbah sintetis dan 81,2% dalam air limbah nyata [9]. Ragi roti (*Saccharomyces cerevisiae*) menunjukkan efisiensi penghilangan sebesar 54,7% [10]. Secara khusus mengenai cangkang telur, penelitian sebelumnya menunjukkan efektivitasnya yang tinggi, mencapai pengurangan kadar Fe sebesar 99,65% dalam air sumur di bawah kondisi yang dioptimalkan [11]. Terlepas dari temuan ini, studi rinci yang berfokus pada optimasi massa adsorben dan waktu kontak untuk penghilangan Cu dari limbah elektroplating aktual, dan perbandingannya dengan standar kualitas yang telah ditetapkan, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan cangkang telur ayam broiler yang diaktivasi asam sebagai bio-adsorben untuk mengurangi konsentrasi Cu dalam air limbah elektroplating. Tujuan spesifiknya adalah untuk menentukan efektivitas dan efisiensi adsorben cangkang telur, dan untuk mengidentifikasi massa adsorben dan waktu kontak optimal yang dibutuhkan untuk memaksimalkan persentase pemulihan Cu, sehingga menawarkan solusi praktis dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah industri yang mengandung logam berat.

2. Metode Penelitian

Bahan baku utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah cangkang telur ayam broiler yang diperoleh dari pedagang makanan lokal. Aktivator kimia yang digunakan adalah Asam Klorida (HCl) dengan konsentrasi 0,1 M. Sampel air limbah dikumpulkan dari industri pelapisan listrik, dengan konsentrasi tembaga (Cu) awal sebesar 958,03 mg/L yang ditentukan melalui analisis pendahuluan. Air suling (aquades) digunakan selama proses pencucian dan pengenceran. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi oven (untuk pengeringan), pengaduk magnetik (untuk pengadukan selama adsorpsi), timbangan analitik (untuk pengukuran massa), gelas beker, labu Erlenmeyer, arloji glass, labu volumetrik, pipet ukur, pipet tetes, dan kertas saring untuk pemisahan padat-cair. Analisis konsentrasi tembaga dilakukan menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (AAS) di Laboratorium Energi dan Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Cangkang telur ayam broiler dicuci bersih untuk menghilangkan membran dan kotoran yang menempel. Cangkang telur yang bersih kemudian direndam dalam air panas selama 15 menit, diikuti dengan pengeringan di bawah sinar matahari hingga benar-benar kering. Cangkang telur yang kering dihancurkan menggunakan mortar dan alu, kemudian digiling dan diayak menggunakan saringan 100 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel yang seragam. Bubuk yang telah diayak kemudian dipanaskan dalam oven pada suhu 100°C selama 30 menit [8]. Bubuk cangkang telur yang telah disiapkan direndam dalam 300 mL larutan HCl 0,1 M selama 24 jam pada suhu ruang (25°C) untuk mengaktifkan adsorben. Setelah

periode perendaman, campuran disaring dan adsorben dibilas berulang kali dengan air suling hingga pH mencapai netral (pH = 7). Adsorben yang telah dinetralkan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 30 menit. Reaksi aktivasi terjadi sebagai berikut [8]:



Ketika HCl dilarutkan dalam larutan berair, ia terdisosiasi sepenuhnya menjadi ion-ion penyusunnya, sehingga memudahkan pembentukan pori-pori pada permukaan cangkang telur [8]. Percobaan adsorpsi dilakukan dalam sistem batch. Massa adsorben aktif tertentu (2, 4, 6, 8, atau 10 gram) ditambahkan ke dalam gelas beker yang berisi 20 mL air limbah elektroplating. Campuran diaduk menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan terkontrol untuk waktu kontak yang bervariasi (20, 30, 40, 50, atau 60 menit). Setelah waktu kontak yang ditentukan, suspensi disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan adsorben dari filtrat. Filtrat yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi Cu yang tersisa.

Metode Analitik

Konsentrasi tembaga dalam sampel air limbah, baik sebelum maupun setelah adsorpsi, ditentukan menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (AAS). Metode analitik ini mendeteksi dan mengukur konsentrasi unsur logam berdasarkan penyerapan cahaya oleh atom bebas dalam keadaan gas, sehingga memberikan kuantifikasi yang akurat terhadap kadar Cu residual dalam sampel yang telah diolah.

Analisis Data dan Perhitungan

Kinerja adsorpsi dievaluasi menggunakan perhitungan berikut:

- a. Perhitungan $1/C_e$:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{\text{Cu Concentration} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)}$$

- b. Perhitungan $1/q_e$:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{\left((C_o - C_e) \times \frac{V}{m} \right)}$$

Di mana:

C_o = Konsentrasi Cu awal (mg/L)

C_e = Konsentrasi Cu kesetimbangan (mg/L)

V = Volume larutan (L)

m = Massa adsorben (gram)

- c. Perhitungan $\log C_e$:

$$\log C_e = \log \text{Cu Concentration} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)$$

- d. Perhitungan $\log q_e$:

$$\log q_e = \log \left((C_o - C_e) \times \frac{V}{m} \right)$$

- e. Perhitungan Persentase Pemulihan:

$$\% \text{recovery} = \left(C_o - \frac{C_e}{C_o} \right) \times 100$$

Persentase pemulihan mewakili proporsi Cu yang berhasil diserap oleh adsorben, yang menunjukkan efisiensi proses adsorpsi.

Model Isoterm Adsorpsi

Untuk memahami mekanisme adsorpsi, data eksperimental dianalisis menggunakan dua model isoterm umum: isoterm Langmuir dan Freundlich. Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan situs aktif yang identik, terbatas pada pembentukan lapisan tunggal, tanpa interaksi lateral antara molekul yang teradsorpsi. Bentuk liniernya dinyatakan sebagai $1/q_e = 1/(q_m \times K_L) \times 1/C_e + 1/q_m$, di mana q_e adalah jumlah Cu yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g), q_m adalah kapasitas adsorpsi lapisan tunggal maksimum (mg/g), K_L adalah konstanta afinitas Langmuir (L/mg), dan C_e adalah konsentrasi Cu kesetimbangan (mg/L). Sebaliknya, model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dan memungkinkan pembentukan lapisan ganda, dengan persamaan liniernya diberikan sebagai $\log q_e = \log K_F + (1/n) \log C_e$, di mana K_F adalah konstanta Freundlich yang menunjukkan kapasitas adsorpsi dan n adalah konstanta Freundlich yang menunjukkan intensitas adsorpsi.

Parameter isoterm untuk kedua model ditentukan melalui analisis regresi linier dari data eksperimental. Dengan membandingkan kesesuaiannya, model yang paling sesuai diidentifikasi untuk menggambarkan perilaku adsorpsi Cu pada adsorben berbasis cangkang telur dengan sebaik-baiknya.

3. Hasil dan Diskusi

Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Adsorpsi Cu

Kinerja adsorpsi cangkang telur ayam broiler yang telah diaktifkan dievaluasi melalui analisis AAS (*Spektroskopi Serapan Atom*). AAS digunakan untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi tembaga (Cu) dalam air limbah elektroplating setelah adsorpsi, berdasarkan penyerapan cahaya oleh atom bebas. Hasil eksperimen disajikan pada **Tabel 1**.

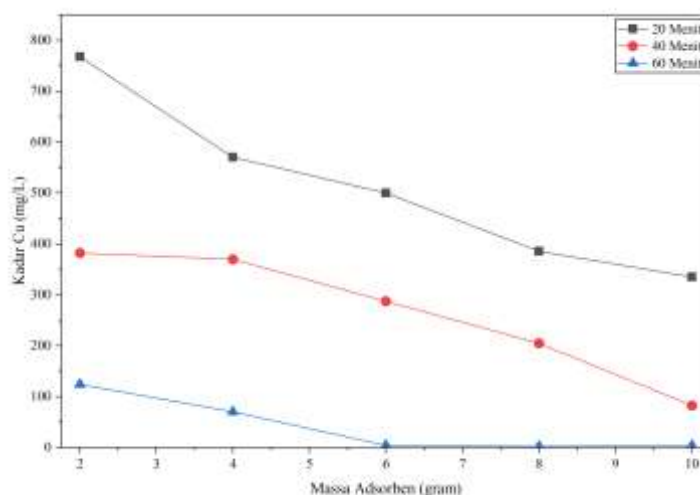
Tabel 1. Pengaruh Massa Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Kandungan Logam Cu

No	Waktu Kontak (menit)	Massa Adsorben (gram)	Cu Awal (mg/L)	Final Cu (mg/L)	% Pemulihan
1	20	2	958.3	767,8	19.8564
2	20	4	958.3	570.5	40.4507
3	20	6	958.3	500.2	47.7887
4	20	8	958.3	385.6	59.7507
5	20	10	958.3	335.1	65.0220
6	40	2	958.3	382.3	60.0952
7	40	4	958.3	369,8	61.4000
8	40	6	958.3	287.4	70.0009
9	40	8	958.3	204.8	78.6228
10	40	10	958.3	82,43	91.3959
11	60	2	958.3	124	87.0568
12	60	4	958.3	70.12	92.6808
13	60	6	958.3	4.058	99,5764
14	60	8	958.3	2.116	99.7791
15	60	10	958.3	3.981	99,5845

Tabel 1 menyajikan hasil pengukuran konsentrasi Cu residual (mg/L) dalam air limbah setelah proses adsorpsi menggunakan cangkang telur, dengan dua variabel independen yang diuji: waktu kontak (20, 40, dan 60 menit) dan massa adsorben (2, 4, 6, 8, dan 10 gram), dengan total 15 perlakuan. Dari nilai-nilai ini, dihitung dua parameter turunan: konsentrasi Cu (%) yang mewakili proporsi Cu yang tersisa dalam larutan relatif terhadap konsentrasi awal, dan % Pemulihan yang mewakili proporsi Cu yang berhasil diadsorpsi oleh adsorben. Dapat diamati bahwa persentase pemulihan Cu meningkat secara konsisten dengan peningkatan waktu kontak, di semua variasi massa adsorben yang diuji. Pada massa adsorben 2 gram, misalnya, persentase pemulihan meningkat dari 19,86% pada 20 menit menjadi 60,10% pada 40 menit, dan mencapai 87,06% pada 60 menit. Pola peningkatan ini tidak linier tetapi lebih tajam dalam rentang 20-40 menit dibandingkan dengan rentang 40-60 menit untuk beberapa variasi massa.

Secara umum, teori adsorpsi menyatakan bahwa proses adsorpsi dipengaruhi oleh dua faktor utama: waktu kontak dan massa adsorben [12]. Mengenai waktu kontak, peningkatan persentase pemulihan Cu seiring waktu konsisten [13], yang menyatakan bahwa peningkatan efisiensi adsorpsi pada tahap awal disebabkan oleh banyaknya ion logam yang dapat menempati situs aktif adsorben yang masih kosong, hingga kondisi kesetimbangan tercapai. Pada menit-menit awal kontak, hampir semua situs adsorben masih kosong sehingga interaksi antara adsorbat dan adsorben terjadi sangat efektif [12]. Namun, semakin lama waktu kontak, adsorpsi akan mencapai titik maksimum sebelum melambat karena permukaan adsorben mulai jenuh dengan adsorbat.

Mengenai massa adsorben, peningkatan massa adsorben akan memberikan lebih banyak luas permukaan sebagai situs adsorpsi, sehingga jumlah adsorbat yang dapat teradsorpsi juga meningkat. Hal ini konsisten dengan pola yang diamati di seluruh variasi waktu kontak dalam penelitian ini. Namun, penambahan massa adsorben yang melebihi titik tertentu, adsorpsi justru dapat menurun, yang disebabkan oleh ketidakjenuhan pada situs adsorpsi dan agregasi partikel yang menyebabkan penurunan luas permukaan efektif total [12]. Agregasi ini juga dapat memicu desorpsi adsorbat yang sebelumnya terikat lemah pada permukaan adsorben. Pola serupa juga terlihat pada waktu kontak 60 menit, di mana peningkatan pemulihan mulai melambat setelah massa adsorben melebihi 6 gram, dan bahkan sedikit menurun pada 10 gram.



Gambar 1. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Adsorpsi Cu

Berdasarkan **Gambar 1**, hubungan antara massa adsorben dan konsentrasi Cu residual pada tiga variasi waktu kontak (20, 40, dan 60 menit) dapat diamati. Kurva 20 menit menunjukkan konsentrasi Cu residual tertinggi di antara ketiga kurva tersebut, dimulai dari 767,8 mg/L pada massa adsorben 2 gram, kemudian menurun menjadi 570,5 mg/L pada 4 gram, 500,2 mg/L pada 6 gram, 385,6 mg/L pada 8 gram, dan mencapai 335,1 mg/L pada 10 gram. Penurunan pada kurva ini relatif bertahap dan hampir linier pada setiap interval penambahan massa.

Kurva waktu kontak 40 menit berada di posisi tengah, dengan konsentrasi Cu residual menurun dari 382,3 mg/L (2 gram) menjadi 369,8 mg/L (4 gram), penurunan yang relatif kecil pada interval ini. Kemudian menurun lebih tajam menjadi 287,4 mg/L (6 gram), 204,8 mg/L (8 gram), dan 82,43 mg/L (10 gram). Pola ini menunjukkan bahwa laju penurunan konsentrasi Cu sebenarnya lebih cepat pada penambahan massa di atas 6 gram, berbeda dengan kurva 20 menit yang memiliki laju yang relatif konstan. Kurva waktu kontak 60 menit berada di bagian bawah dan menunjukkan penurunan paling drastis, dari 124 mg/L (2 gram) menjadi 70,12 mg/L (4 gram), kemudian menurun tajam menjadi 4,058 mg/L (6 gram), 2,116 mg/L (8 gram), dan sedikit meningkat kembali menjadi 3,981 mg/L (10 gram). Titik terendah kurva ini berada pada 8 gram, bukan di ujung kanan grafik (10 gram).

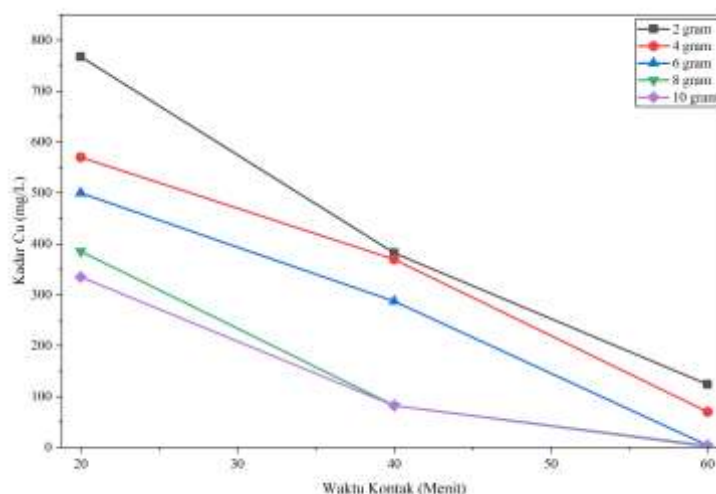
Pola penurunan konsentrasi Cu residual dengan peningkatan massa adsorben konsisten dengan prinsip dasar adsorpsi, yaitu penambahan massa adsorben yang lebih besar akan mengadsorpsi lebih banyak logam karena penambahan massa adsorben meningkatkan luas permukaan yang tersedia untuk adsorbat yang akan diadsorpsi [14]. Prinsip serupa ada pada adsorpsi kadmium dan merkuri menggunakan karbon aktif kulit jeruk, di mana peningkatan massa adsorben terbukti memberikan lebih banyak luas permukaan sebagai situs adsorpsi [12]. Namun, hubungan ini tidak selalu berlaku secara linier tanpa batas, seperti yang terlihat pada kurva 60 menit. Penurunan efisiensi adsorpsi pada penambahan massa adsorben tertentu dikaitkan dengan ketidakjenuhan pada situs adsorpsi dan agregasi partikel adsorben yang mengurangi luas permukaan total, di mana agregasi ini juga berpotensi menyebabkan pelepasan (desorpsi) adsorbat yang terikat lemah pada permukaan [12].

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Adsorpsi Cu

Penurunan konsentrasi Cu residual dengan meningkatnya waktu kontak konsisten dengan teori bahwa laju adsorpsi tinggi pada awalnya karena banyak situs aktif yang tersedia, kemudian melambat mendekati titik jenuh ketika situs aktif terisi penuh [15]. Tumpang tindih kurva pada 4, 6, 8, dan 10 gram pada 40-60 menit menunjukkan bahwa pada massa adsorben ≥ 6 gram, jumlah situs aktif jauh melebihi jumlah ion Cu^{2+} dalam larutan, sehingga kesetimbangan tercapai lebih cepat dan perbedaan hasil antar massa menjadi tidak signifikan setelah waktu kontak cukup.

Berdasarkan hasil pengujian variasi massa adsorben dan waktu pada volume larutan Cu^{2+} 20 mL dengan konsentrasi awal 958,03 mg/L, kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 6 gram dan waktu kontak 60 menit, dengan persentase pemulihan 99,5764% (konsentrasi akhir $\text{Cu}^{2+} = 4,058$ mg/L). Kondisi ini dipilih sebagai titik referensi karena penambahan massa adsorben lebih lanjut pada waktu kontak yang sama (8 dan 10 gram) tidak lagi memberikan peningkatan pemulihan yang signifikan, sehingga 6 gram

dianggap sebagai jumlah adsorben yang paling efisien untuk mencapai penghilangan Cu^{2+} optimal dalam kondisi ini.

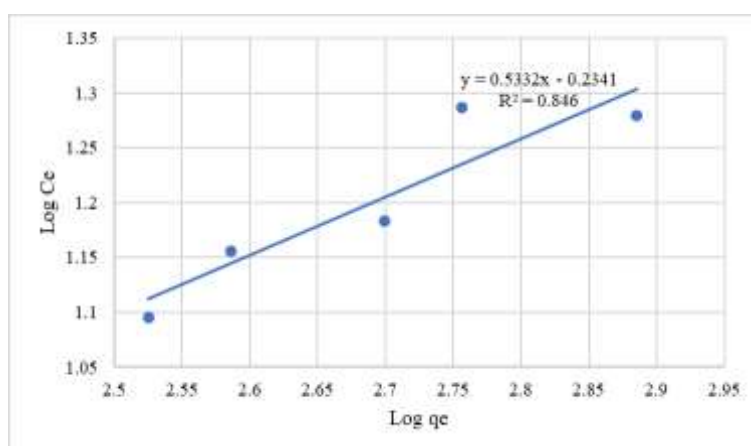


Gambar 2. Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Adsorpsi Cu

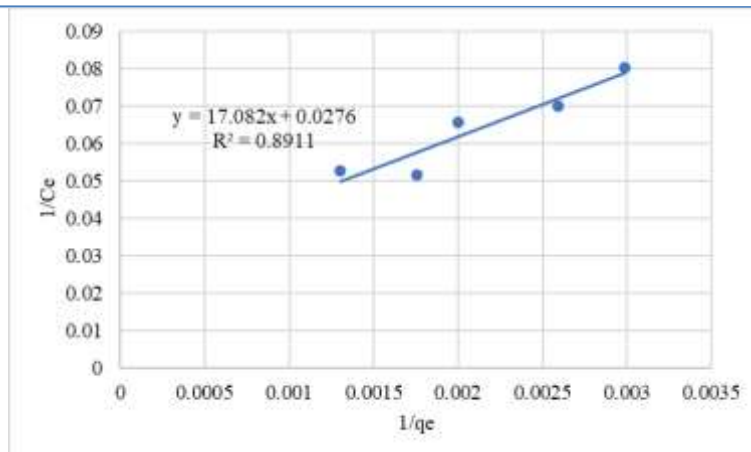
Berdasarkan titik kondisi optimum ini, perbandingan dilakukan secara proporsional dalam bentuk rasio 6 : 20, yang kemudian disederhanakan menjadi 3 : 10. Untuk mempermudah interpretasi dan penerapan pada desain proses pada skala yang berbeda, rasio tersebut dinormalisasi berdasarkan 1 gram adsorben, menghasilkan rasio 1 : 3,33, yang berarti bahwa setiap 1 gram adsorben cangkang telur ayam dapat mengolah sekitar 3,33 mL larutan air limbah untuk mencapai efisiensi adsorpsi yang mendekati kondisi optimum yang diperoleh dalam penelitian ini.

Isoterm Adsorpsi

Gambar 3 menyajikan plot linier dari model Freundlich dalam bentuk $\log Q_e$ versus $\log C_e$. Persamaan liniernya adalah $y = 0,5332x + 0,1372$, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,846. Dalam model ini, nilai kemiringan (0,5332) mewakili $1/n$, parameter intensitas adsorpsi yang menunjukkan heterogenitas permukaan. Karena nilai $1/n$ berada di antara 0 dan 1, proses adsorpsi dianggap menguntungkan. Sementara itu, intersep (0,1372) sesuai dengan $\log K_f$, di mana K_f adalah konstanta Freundlich yang terkait dengan kapasitas adsorpsi. Model Freundlich adalah persamaan empiris yang mengasumsikan adsorpsi terjadi pada permukaan heterogen dengan beragam situs aktif dan energi pengikatan yang menurun secara eksponensial seiring dengan peningkatan cakupan permukaan.



Gambar 3. Adsorpsi Isoterm Freundlich



Gambar 4. Adsorpsi Isoterm Langmuir

Berdasarkan **Gambar 4**, linearisasi model Langmuir dalam bentuk $1/q_e$ vs $1/C_e$ ditunjukkan. Persamaan linearnya adalah $y = 13,666x + 0,0221$ dengan $R^2 = 0,8911$, yang jauh lebih tinggi daripada model Freundlich ($R^2 = 0,846$). Pada plot ini, kemiringan (13,666) sama dengan $1/(q_m \times K_i)$ dan intersep (0,0221) sama dengan $1/q_m$, di mana q_m adalah kapasitas adsorpsi monolayer maksimum dan K_i adalah konstanta afinitas Langmuir. Model Langmuir dibangun berdasarkan asumsi bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dengan situs aktif yang identik, dan tidak ada interaksi lateral antara molekul adsorbat yang teradsorpsi. Model ini juga mengasumsikan bahwa adsorpsi terbatas pada pembentukan lapisan tunggal (monolayer).

Perbedaan yang sangat kecil antara kedua model terletak pada nilai R^2 . Model Freundlich memiliki $R^2 = 0,846$, sedangkan model Langmuir memiliki $R^2 = 0,8911$. Dalam literatur, nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik dengan data eksperimental. Berdasarkan kriteria ini, model Langmuir secara signifikan lebih baik dalam menggambarkan data adsorpsi dibandingkan dengan model Freundlich dalam sistem yang dipelajari. Temuan ini menunjukkan bahwa permukaan adsorben bersifat homogen, sehingga molekul dalam larutan tidak bersaing atau berinteraksi satu sama lain saat menempel. Ini menunjukkan bahwa air limbah bersifat homogen dalam hal ukuran dan muatan. Meskipun model Langmuir memberikan kesesuaian yang lebih baik, nilai R^2 sebesar 0,8911 masih belum terlalu tinggi, menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi mungkin melibatkan interaksi yang lebih kompleks atau terdapat beberapa heterogenitas pada permukaan adsorben meskipun model Langmuir lebih sesuai.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan-kesimpulan berikut dapat ditarik: Berdasarkan data dari percobaan adsorpsi logam Cu pada air limbah elektroplating menggunakan cangkang telur ayam, terlihat bahwa proses adsorpsi berjalan efisien dan mencapai persentase pemulihan sebesar 99%. Berdasarkan analisis data dari variasi massa adsorben dan waktu kontak untuk penghilangan Cu^{2+} dari larutan 20 mL dengan konsentrasi awal 958,03 mg/L, dapat disimpulkan bahwa kondisi adsorpsi yang paling efektif dan efisien dicapai pada massa adsorben 6 gram dan waktu kontak 60 menit, dengan persentase pemulihan sebesar 99,5764%. Kondisi ini dipilih karena penambahan massa adsorben lebih lanjut (8 dan 10 gram) pada waktu kontak yang sama tidak memberikan peningkatan pemulihan yang signifikan. Dari kondisi optimum ini, rasio massa adsorben, waktu kontak, dan volume larutan adalah 1 : 10 : 3,33, yang berarti bahwa setiap 1 gram adsorben cangkang telur ayam efektif untuk mengolah sekitar 3,33 mL larutan air limbah dengan waktu kontak sekitar 10 menit di bawah karakteristik limbah yang serupa.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada penguji penelitian dan kepada Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS Surabaya atas penyediaan fasilitas analisis AAS dan kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.

6. Referensi

- [1] Riyanto, Agus. "Fitoremediasi Kayu Apu, Eceng gondok, dan Bambu air untuk menurunkan kadar BOD air limbah pabrik tahu." *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat* 12.02 (2023): 162-170.

- [2] M. Jaishankar dkk., "Toksistasitas, mekanisme dan efek kesehatan beberapa logam berat," Toksikologi Interdisipliner, vol. 7, no. 2, hlm. 60–72, 2014, doi: 10.2478/intox-2014-0009.
- [3] PB Tchounwou dkk., Toksikologi Molekuler, Klinis dan Lingkungan Volume 3: Toksikologi Lingkungan, 2012, doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4.
- [4] M. Alaqarbeh, P. Al, dan HB Abdullah, "Fenomena Adsorpsi: Definisi, Mekanisme, dan Jenis Adsorpsi: Tinjauan Singkat," RHazes: Kimia Hijau dan Terapan, vol. 13, hlm. 43–51, Sep. 2021, doi: 10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283.
- [5] M. Pettinato dkk., "Cangkang Telur: Adsorben hijau untuk penghilangan logam berat dalam sistem MBR," Ekotoksikologi dan Keamanan Lingkungan, vol. 121, hlm. 57–62, 2015, doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.05.046.
- [6] S. Oko, A. Kurniawan, dan D. Angreni, "Pengaruh Massa Adsorben Blending CaO Dari Cangkang Telur dan Karbon Teraktivasi untuk Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue," Metana, vol. 18, tidak. 2, hal. 99–104, 2022, doi: 10.14710/metana.v18i2.49376.
- [7] ESY Yusmartini et al., "Cangkang Telur sebagai Adsorben untuk Adsorpsi Logam Timbal (Pb) dan Besi (Fe)," AJARCDE (Asian Journal of Applied Research for Community Development and Empowerment), vol. 8, no. 1, hlm. 1–5, 2024, doi: 10.29165/ajarcde.v8i1.349.
- [8] IN Amanah et al., "Pengaruh Jenis Asam Pada Aktivasi Cangkang Telur Sebagai Adsorben Logam Cu Pada Air Kolong," dalam Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat, hal. 117–122, 2022.
- [9] Z. Worku, S. Tibebu, JF Nure, S. Tibebu, W. Moyo, AD Ambaye, dan TTI Nkambule, "Adsorpsi kromium dari air limbah elektroplating menggunakan karbon aktif yang dikembangkan dari eceng gondok," BMC Chemistry, vol. 17, hal. 85, Juli 2023, doi: 10.1186/s13065-023-00993-4.
- [10] S. Elystia, RR Pratiwi, dan SR Muria, "Biosorpsi Kromium (Cr) Pada Limbah Cair Industri Elektroplating Menggunakan Biomassa Ragi Roti (*Saccharomyces cerevisiae*)," J. Dampak, vol. 15, tidak. 1, hal. 1–6, 2018, doi: 10.25077/dampak.15.1.1-6.2018.
- [11] VN Amalia, S. Oktorina, dan RDN Setyowati, "Efisiensi Penyerapan Logam Besi (Fe) Menggunakan Adsorben Cangkang Telur Ayam Dengan Sistem Batch," J. Teknol. Ilmu Teknologi, jilid. 14, tidak. 2, hal. 91–96, 2022, doi: 10.34151/technoscientia.v14i2.3590.
- [12] NAF Anwar, I. Meicahayanti, dan DE Rahayu, "Pengaruh Variasi Waktu Kontak dan Massa Adsorben Kulit Jeruk Siam (*Citrus nobilis*) terhadap Penyisihan Kadmium (Cd) dan Merkuri (Hg)," Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL, vol. 6, tidak. 1, hal. 35–43, 2022.
- [13] JB Manuhutu, "Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif dari Kulit Jagung dalam Menurunkan Kadar Logam Fe," Molucca Journal of Chemistry and Education (MJoCE), vol. 14, tidak. 1, hlm. 60–69, 2024.
- [14] Yustinah et al., "Adsorpsi Logam Berat dengan Cangkang Telur," Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia, vol. 5, No. 1, hal. 45–53, 2020.
- [15] F. Hasfita dkk., "Pengaruh Waktu dan Mekanisme Adsorpsi Logam Cu²⁺ Menggunakan Biosorbent Sampah Daun Akasia," dalam Prosiding Seminar Nasional Teknologi Kimia (SNTK), hal. 1–7, 2024, doi: 10.29103/sntk.v4.2024.