

Analisis Statistik Pengaruh Dosis dan Waktu Kontak Adsorpsi dalam Menurunkan Kandungan Logam Berat Cu Menggunakan Nanokristal Selulosa-Magnetik Nanopartikel

Putri Anjarwati¹, Novi Eka Mayangsari^{1*}, Tarikh Azis Ramadani²

¹Program Studi Teknik Pengolahan Limbah, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya 60111

²Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya 60111

*E-mail : noviekam@ppns.ac.id

Abstrak

Pencemaran logam berat Cu akibat aktivitas industri merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang signifikan dan membutuhkan penanganan yang tepat. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa adsorben dan waktu kontak terhadap efisiensi adsorpsi ion Cu menggunakan adsorben nanokristal selulosa@Fe₃O₄ melalui pendekatan statistik *One Way ANOVA*. Proses adsorpsi dilakukan dalam larutan Cu berkonsentrasi 100 ppm dengan variasi massa adsorben sebesar 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; dan 0,25 gram serta waktu kontak selama 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Efisiensi adsorpsi tertinggi diperoleh pada waktu kontak 100 menit dan massa adsorben 0,20 gram. Hasil analisis statistik menggunakan perangkat lunak SPSS menunjukkan bahwa nilai signifikansi untuk variasi massa adsorben adalah 0,023, dan untuk variasi waktu kontak adalah 0,002. Karena nilai *p value* lebih kecil dari taraf signifikansi ($\alpha = 0,05$), maka disimpulkan bahwa kedua parameter tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi adsorpsi ion Cu. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian parameter operasional sangat penting dalam optimalisasi kinerja adsorpsi menggunakan nanomaterial berbasis selulosa magnetik untuk aplikasi pengolahan limbah logam berat.

Keywords: Adsorpsi, Nanokristal selulosa@Fe₃O₄, Logam berat Cu, *One Way ANOVA*, Efisiensi removal

1. PENDAHULUAN

Pencemaran air oleh logam berat Cu yang dihasilkan dari aktivitas industri seperti pelapisan logam, pertambangan, dan manufaktur kimia, memberikan dampak toksik terhadap organisme akuatik dan kesehatan manusia. Oleh sebab itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah cair yang efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk menurunkan kadar Cu (Fu & Wang, 2011). Adsorpsi muncul sebagai metode unggulan dalam pengolahan limbah logam berat, karena kemudahan operasional, efisiensi tinggi, serta potensi regenerasi adsorben. Nanokristal selulosa dari biomassa lignoselulosa, ketika dimodifikasi dengan partikel magnetik Fe₃O₄ (selulosa@Fe₃O₄), mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi serta memudahkan proses pemisahan pasca-adsorpsi (Li *et al.*, 2021).

Delignifikasi merupakan tahapan kunci dalam menyiapkan nanokristal selulosa yang efektif. *Deep Eutectic Solvent* (DES), sebagai pelarut hijau yang ramah lingkungan, dapat dioptimalkan untuk mengekstraksi lignin dari biomassa. Proses ini semakin efektif ketika dikombinasikan dengan gelombang ultrasonik, karena efek kavitasasi mempercepat penetrasi pelarut dan membuka struktur pori dari dinding sel biomassa (Tang *et al.*, 2022). Efisiensi adsorpsi sangat dipengaruhi oleh parameter seperti massa adsorben dan waktu kontak. Massa adsorben memengaruhi jumlah situs aktif pada permukaan adsorben, sedangkan waktu kontak menentukan sejauh mana kesetimbangan tercapai antara ion Cu dan adsorben dalam larutan. Pada penelitian ini, massa adsorben divariasikan sebesar 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; dan 0,25 gram, sedangkan waktu kontak ditetapkan selama 20, 40, 60, 80, dan 100 menit. Penentuan kondisi optimum dilakukan untuk memperoleh efisiensi adsorpsi tertinggi.

Uji statistik *One Way ANOVA* digunakan untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh masing-masing parameter terhadap efisiensi adsorpsi. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa variasi massa adsorben dan waktu kontak memberikan dampak nyata terhadap performa sistem adsorpsi (Montgomery, 2020).

2. METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter proses terhadap efisiensi adsorpsi ion Cu menggunakan adsorben nanokristal selulosa@Fe₃O₄. Parameter operasional yang divariasikan meliputi massa adsorben (0,05; 0,1; 0,15; dan 0,2 g), waktu kontak (20, 40, 60, 80, dan 100 menit). Analisis data dilakukan menggunakan metode statistik *one-way ANOVA* untuk menentukan pengaruh signifikan dari masing-masing parameter terhadap efisiensi adsorpsi. Uji ini dilakukan dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Sebelum dilakukan analisis ANOVA, data diuji menggunakan uji normalitas dan uji homogenitas varians sebagai syarat prapengujian. Uji normalitas dilakukan untuk memastikan distribusi data bersifat normal menggunakan metode *Shapiro-Wilk*, sedangkan uji homogenitas varians dilakukan untuk memastikan bahwa data antar kelompok memiliki varians

yang seragam menggunakan uji *Levene*.

2.1 Uji Normalitas

Uji normalitas merupakan salah satu uji statistik yang digunakan untuk menentukan apakah suatu kumpulan data mengikuti distribusi normal atau tidak. Distribusi normal merupakan syarat utama dalam berbagai analisis statistik parametrik, seperti analisis varians (ANOVA), regresi linear, dan uji *t*. Dengan demikian, pengujian normalitas sangat penting untuk memastikan validitas penggunaan metode statistik yang berbasis distribusi normal.

Menurut Ghozali (2016), data yang berdistribusi normal akan membentuk kurva simetris menyerupai lonceng (*bell-shaped curve*) dengan nilai mean, median, dan modus yang sama. Ketika distribusi data menyimpang dari bentuk ini, maka asumsi normalitas tidak terpenuhi dan dapat memengaruhi hasil analisis statistik parametrik. Salah satu metode yang umum digunakan untuk menguji normalitas data adalah **uji Shapiro-Wilk**. Metode ini dianggap lebih sensitif dan akurat, khususnya untuk jumlah sampel kecil hingga sedang ($n < 50$). Uji ini menghitung kesesuaian antara nilai yang diamati dengan nilai yang diharapkan jika data mengikuti distribusi normal. Nilai signifikansi (*p-value*) yang diperoleh akan dibandingkan dengan tingkat signifikansi (α), biasanya 0,05.

- Jika $p\text{-value} > 0,05 \rightarrow$ data dianggap berdistribusi normal
 - Jika $p\text{-value} \leq 0,05 \rightarrow$ data dianggap tidak berdistribusi normal
- Asumsi normalitas perlu dipenuhi agar analisis parametrik, seperti *one-way* ANOVA, dapat memberikan hasil yang valid dan dapat diinterpretasikan secara statistik (Hair *et al.*, 2010)

2.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas varians merupakan salah satu pengujian prasyarat dalam analisis statistik parametrik, seperti analisis varians (ANOVA), yang digunakan untuk menentukan apakah data dari beberapa kelompok memiliki varians yang sama atau tidak. Homogenitas varians sangat penting untuk menjamin bahwa perbandingan antar kelompok dilakukan secara adil dan hasil uji statistik dapat diinterpretasikan secara valid.

Menurut Ghozali (2016), uji homogenitas diperlukan untuk menghindari kesalahan pengambilan keputusan statistik karena variabilitas data yang tidak seragam antar kelompok perlakuan. Jika varians antar kelompok tidak homogen, maka dapat menyebabkan hasil analisis menjadi bias. Salah satu metode yang paling umum digunakan untuk menguji homogenitas varians adalah uji *Levene*. Uji ini digunakan karena relatif tidak sensitif terhadap penyimpangan data dari distribusi normal. *Levene's Test* mengukur perbedaan varians antara dua atau lebih kelompok dengan membandingkan deviasi nilai masing-masing kelompok dari median atau rata-rata. Kriteria pengambilan keputusan pada uji Levene adalah sebagai berikut:

- Jika $p\text{-value} > 0,05 \rightarrow$ data memiliki varians homogen (asumsi terpenuhi)
 - Jika $p\text{-value} \leq 0,05 \rightarrow$ data memiliki varians tidak homogen (asumsi tidak terpenuhi)
- Jika asumsi homogenitas tidak terpenuhi, maka alternatif metode seperti Welch ANOVA atau transformasi data perlu dilakukan untuk memastikan validitas analisis lanjutan.

2.3 Uji One Way Annova

One-way ANOVA merupakan metode statistik yang digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata dari tiga kelompok atau lebih dalam satu variabel bebas. Peneliti menggunakan analisis ini ketika ingin mengetahui pengaruh suatu perlakuan atau variasi terhadap satu variabel terikat yang berskala kuantitatif (Ghozali, 2016).

Analisis ANOVA membandingkan variasi antar kelompok dengan variasi dalam kelompok untuk menentukan apakah perbedaan rata-rata yang diamati terjadi secara kebetulan atau karena pengaruh perlakuan. Nilai *F* yang dihasilkan akan menunjukkan rasio antara varians antar kelompok terhadap varians dalam kelompok. Semakin besar nilai *F*, maka semakin besar kemungkinan adanya perbedaan nyata antar kelompok (Montgomery, 2013). *One-way* ANOVA memiliki beberapa asumsi penting, yaitu:

1. Data dalam setiap kelompok berdistribusi normal.
 2. Varians antar kelompok bersifat homogen.
 3. Observasi dilakukan secara independen.
- Pengambilan keputusan didasarkan pada nilai *p-value* dengan tingkat signifikansi α (umumnya 0,05). Jika $p\text{-value} < 0,05$, maka terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar kelompok perlakuan. Sebaliknya, jika $p\text{-value} \geq 0,05$, maka tidak terdapat perbedaan signifikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Uji Statistika

Uji statistik dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa adsorben terhadap efisiensi penyisihan. Analisis dilakukan dengan menggunakan uji ANOVA satu arah (*One-Way Analysis of Variance*). Sebelum

melaksanakan uji ANOVA, dilakukan uji normalitas dan homogenitas untuk memastikan bahwa data memiliki distribusi normal dan varians yang homogen.

3.3.1 Pengaruh Massa Adsorben

Tabel 3.1 Hasil Uji Normalitas Massa Adsorben

Massa Adsorben (gram)	Uji Kolmogorov - Smirnov		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
0,05	0,775	Sig.> α	Data berdistribusi normal
0,1	0,923	Sig.> α	Data berdistribusi normal
0,15	0,908	Sig.> α	Data berdistribusi normal
0,2	0,772	Sig.> α	Data berdistribusi normal
0,25	0,791	Sig.> α	Data berdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 3.1 hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh nilai signifikansi (*p-value*) pada masing-masing variasi massa adsorben lebih besar dari 0,05, yaitu 0,775 untuk massa 0,05 g; 0,923 untuk 0,1 g; 0,908 untuk 0,15 g; 0,772 untuk 0,2 g; dan 0,791 untuk 0,25 g. Nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara distribusi data dan distribusi normal teoritis. Dengan demikian, data pada setiap kelompok massa adsorben dapat dikatakan berdistribusi normal, sehingga memenuhi salah satu asumsi penting untuk dapat dianalisis menggunakan uji ANOVA.

Tabel 3.2 Hasil Uji Homogenitas

Variabel	Uji Levene		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Massa Adsorben	0,987	Sig.> α	Data berdistribusi normal

Berdasarkan Tabel 3.2 Hasil uji Levene pada data variasi massa adsorben menunjukkan bahwa nilai signifikansi (*p-value*) adalah 0,987. Nilai ini lebih besar dari batas signifikansi 0,05, yang berarti tidak terdapat perbedaan varians yang signifikan antar kelompok. Dengan demikian, data dinyatakan memiliki varians yang homogen, sehingga memenuhi salah satu asumsi dasar penggunaan uji ANOVA. Hasil ini menguatkan bahwa metode statistik parametrik dapat digunakan secara valid untuk menganalisis pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi proses adsorpsi ion Cu^{2+} .

Tabel 3.3 Hasil Uji One Way Anova

Variabel	Uji One Way Anova		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Massa Adsorben	0,023	Sig.< α	H_0 = ditolak H_1 = diterima

Berdasarkan Tabel 3.2 Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai signifikansi (*p-value*) sebesar 0,023, yang lebih kecil dari $\alpha = 0,05$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan rata-rata efisiensi adsorpsi yang signifikan antar kelompok perlakuan massa adsorben. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa massa adsorben berpengaruh nyata terhadap efisiensi proses adsorpsi ion Cu^{2+} . Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan massa adsorben memberikan respons yang berbeda terhadap performa penyisihan logam berat dalam sistem adsorpsi yang diuji.

3.3.1 Pengaruh Waktu Kontak

Tabel 3.4 Hasil Uji Normalitas Waktu Kontak

Waktu Kontak (menit)	Uji Kolmogorov - Smirnov		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
20	0,130	Sig.> α	Data berdistribusi normal
40	0,670	Sig.> α	Data berdistribusi normal
60	0,817	Sig.> α	Data berdistribusi normal
80	0,159	Sig.> α	Data berdistribusi normal
100	0,220	Sig.> α	Data berdistribusi normal

Tabel 3.4 menunjukkan bahwa pada variasi waktu kontak 20, 40, 60, 80, dan 100 menit, hasil uji normalitas Kolmogorov-Smirnov menunjukkan nilai signifikansi berturut-turut sebesar 0,130; 0,670; 0,817; 0,159; dan 0,220. Seluruh nilai *p-value* tersebut berada di atas ambang signifikansi 0,05, yang menunjukkan bahwa data pada setiap kelompok waktu kontak mengikuti distribusi normal. Hasil ini menunjukkan bahwa syarat distribusi normal sebagai prasyarat analisis statistik parametrik telah terpenuhi, sehingga data layak untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan uji ANOVA.

3.3.2 Hasil Uji Homogenitas

Tabel 3.3 Hasil Uji Homogenitas

Variabel	Uji Levene		
	Nilai Sig. (<i>p value</i>)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Waktu Kontak	0,520	Sig.> α	Data berdistribusi normal

Tabel 3.5 menunjukkan hasil uji homogenitas varians dengan metode Levene pada variasi waktu kontak menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,520, yang lebih besar dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa data memiliki varians yang homogen antar kelompok waktu kontak. Homogenitas ini memenuhi salah satu asumsi dasar analisis varians (ANOVA), sehingga data dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan metode statistik parametrik

3.3.2 Hasil Uji One Way Annova

Tabel 3.3 Hasil Uji One Way Annova

Variabel	Uji One Way Annova		
	Nilai Sig. (p value)	$\alpha = 0,05$	Keputusan
Waktu Kontak	0,002	Sig. < α	H ₀ = ditolak H ₁ = diterima

Tabel 3.6 menunjukkan hasil uji One-Way ANOVA terhadap variasi waktu kontak menunjukkan nilai signifikansi (*p-value*) sebesar 0,002, yang lebih kecil dari taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Nilai ini mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada efisiensi adsorpsi logam Cu²⁺ antara kelompok waktu kontak yang diuji. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa waktu kontak berpengaruh nyata terhadap efektivitas proses adsorpsi menggunakan adsorben nanokristal selulosa@Fe₃O₄. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak mampu meningkatkan interaksi antara ion Cu²⁺ dan permukaan aktif adsorben, sehingga efisiensi penyisihan logam berat meningkat secara signifikan.

4. KESIMPULAN

Uji ANOVA menunjukkan bahwa massa adsorben dan waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penyisihan Cu ($p < 0,05$). Efisiensi tertinggi tercapai pada massa 0,2 gram (91,45%) dan waktu kontak 100 menit (86,4%). Peningkatan massa dan waktu kontak meningkatkan interaksi antara ion logam dan situs aktif adsorben

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ezeh, V. C., & Anusobi, O. J. (2017). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on biosorption of Pb²⁺ using modified corn cob biomass. *Applied Water Science*, 7(6), 3123–3133. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0466-1>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). *Removal Of Heavy Metal Ions From Wastewaters: A Review*. *Journal Of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Hu, X., Zhang, W., Li, Q., & Wang, Y. (2024). *Efficient removal of heavy metals using modified biosorbents: Optimization, kinetics and mechanism*. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 11234–11245. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29641-2>
- Ji, Q., Yu, X., Yagoub, A. E. A., Chen, L., Abiola, O., & Zhou, C. (2021). *Ultrasonics Sonochemistry Synergism Of Sweeping Frequency Ultrasound And Deep Eutectic Solvents Pretreatment For Fractionation Of Sugarcane Bagasse And Enhancing Enzymatic Hydrolysis*. 73
- Li, Y., Zhang, H., Peng, J., Li, J., & Ma, Y. (2021). *Magnetic Cellulose Nanobiocomposites For Cu(II), Cd(II) And Pb(II) Ions Removal: Kinetics, Thermodynamics And Analytical Evaluation*. *Nanotechnology For Environmental Engineering*, 6(42). <https://doi.org/10.1007/S41204-021-00117-4>
- Montgomery, D.C. (2020). *Design And Analysis Of Experiments* (10th Ed.). John Wiley & Sons.
- Tang, X., Li, H., Zuo, S., & Zhang, Y. (2022). *Ultrasound-Assisted Deep Eutectic Solvent Pretreatment To Enhance Lignin Removal And Cellulose Digestibility From Corn Stover*. *Molecules*, 27(1), 238. <https://doi.org/10.3390/Molecules27010238>
- Wang, X., Zhang, S., Zhao, Y., & Zhang, J. (2022). *Adsorption of heavy metal ions by functionalized biochar: Kinetics, isotherms and thermodynamics*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106919. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106919>
- Zhang, C. W., Xia, S. Q., & Ma, P. S. (2016). Facile Pretreatment Of Lignocellulosic Biomass Using Deep Eutectic Solvents. *Bioresource Technology*, 219(July), 1–5. <https://doi.org/10.1016/J.Biortech.2016.07.026>