



Recovery Emas dalam Sistem Au Tunggal dan Sistem Multilogam (Au/Cu) Menggunakan Adsorben Asam Askorbat Termodifikasi Magnetit

Maya Rahmayanti*

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta, Jl. Laksda Adisucipto, Catur Tunggal, Depok, Sleman, telp. (0274) 558254

*Corresponding author: cmaya.rahmayanti@uin-suka.ac.id

DOI: 10.20961/alchemy.16.2.36129.179-189

Received 28 November 2019, Accepted 30 March 2020, Published 01 September 2020

Kata kunci:

adsorpsi;
asam askorbat;
magnetit;
sistem multilogam;
sistem tunggal.

ABSTRAK. Limbah elektronik mengandung banyak logam yang bernilai guna antara lain tembaga (Cu), besi (Fe), timah (Sn), timbal (Pb), seng (Zn), emas (Au), dan perak (Ag). Di antara logam tersebut, logam yang memiliki nilai ekonomi tertinggi dan banyak disimpan sebagai investasi kekayaan dalam jangka panjang adalah emas (Au), namun jumlah kandungan emas dalam elektronik lebih kecil dibandingkan logam yang lain. Penelitian ini merupakan studi pendahuluan *recovery* emas dari limbah elektronik. Studi diawali dengan mempersiapkan asam askorbat termodifikasi magnetit ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$) dan digunakan sebagai adsorben Au dalam sampel simulasi. Sampel simulasi terdiri dari sistem Au tunggal (larutan HAuCl_4) dan sistem multilogam (Au/Cu). Pengaruh pH larutan HAuCl_4 terhadap kemampuan adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$, kinetika dan isoterm adsorpsi dipelajari pada sistem Au tunggal. Sementara itu, pengaruh keberadaan ion logam Cu terhadap kemampuan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ untuk *recovery* emas dipelajari dalam sistem multilogam (Au/Cu). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *batch*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ optimum pada pH 4 dan kesetimbangan adsorpsi tercapai pada jam ke-30. Model kinetika adsorpsi mengikuti model kinetika pseudo orde dua Ho dan model isoterm adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,09900 mol/g. Keberadaan ion logam Cu berpengaruh terhadap kemampuan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ dalam mengadsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ dalam sistem multilogam (Au/Cu).

Keywords:

adsorption; ascorbic acid; magnetite; multi-metal system; single system.

ABSTRACT. Gold Recovery in a Single Au and Multi-metal (Au/Cu) Systems Using Ascorbic Acid-Modified Magnetite Adsorbent. Electronic waste contains many valuable metals, including copper (Cu), iron (Fe), lead (Sn), lead (Pb), zinc (Zn), gold (Au), and silver (Ag). Among these metals, the metal that has the highest economic value and can be stored for a long-term wealth investment is gold (Au), but the amount of gold content in electronic devices is smaller than other metals. This research was a preliminary study of gold recovery from electronic waste. The study began by preparing magnetite-modified ascorbic acid ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$) and was used as an adsorbent agent of gold in a simulated sample. The simulation sample consisted of a single Au system (HAuCl_4 solution) and a multi-metal system (Au/Cu). The effect of pH of the HAuCl_4 solution on the ability of $[\text{AuCl}_4]^-$ adsorption, kinetic, and isotherm adsorptions were studied in a single Au system. Meanwhile, the effect of the Cu metal ions content on $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ capacity for gold recovery was studied in a multi-metal system. The method used in this research was the batch method. The results showed that optimum adsorption of $[\text{AuCl}_4]^-$ onto $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ at pH 4 and adsorption equilibrium was reached at 30 hours. The adsorption kinetics model followed the second-order pseudo-Ho kinetics model, and the adsorption isotherm model followed the Langmuir isotherm model with an adsorption capacity of 0.09900 mol/g. The presence of Cu metal ions affected the capacity of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AA}$ in the $[\text{AuCl}_4]^-$ adsorption in a multi-metal system (Au/Cu).

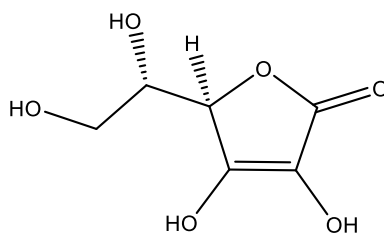
PENDAHULUAN

Emas (Au) merupakan logam yang paling banyak disimpan sebagai investasi kekayaan dalam jangka panjang. Saat ini, emas banyak diaplikasikan dalam peralatan elektronik, ilmu biologi, kedokteran, teknologi *aerospace*, serta aplikasi industri lainnya. Seiring dengan peningkatan permintaan terhadap logam emas dengan sumber yang tersedia semakin berkurang, maka diperlukan suatu upaya untuk *recovery* emas. Perolehan kembali emas dapat berasal dari sumber primer seperti *leach liquors* maupun sumber sekunder seperti komponen elektronik. Selain emas, logam yang bernilai guna yang dapat kita ambil dari limbah elektronik antara lain tembaga (Cu), besi (Fe), timah (Sn), timbal (Pb), seng (Zn), dan perak (Ag). Diantara logam tersebut, logam yang memiliki nilai ekonomi tertinggi dan banyak disimpan sebagai investasi kekayaan dalam jangka panjang adalah emas (Au), namun jumlah kandungan emas dalam elektronik lebih kecil dibandingkan yang logam yang

lain. Oleh karena itu diperlukan suatu metode yang selektif untuk mendapatkan kembali emas dari limbah elektronik.

Penelitian tentang *recovery* emas telah banyak dilakukan dengan berbagai metode. Santosa *et al.* (2019) menggunakan asam salisilat dan asam galat yang dimodifikasi dengan magnesium/aluminium hidrotalsit sebagai adsorben AuCl_4^- . Hasil penelitian menunjukkan bahwa asam galat termodifikasi hidrotalsit memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik dibandingkan asam salisilat termodifikasi hidrotalsit. Gugus aktif yang berperan dalam proses adsorpsi-reduksi Au pada penelitian ini adalah gugus $-\text{OH}$. Istiningrum *et al.* (2015) melakukan adsorpsi emas dari sistem Au/Cu menggunakan adsorben hybrid amonium-kuarter silika (HAKS) dan hybrid amonium-kuarter silika (HAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi Au (III) pada HAKS (7,09 mg/g) lebih rendah daripada HAS (63,25 mg/g). *Recovery* emas dalam penelitian ini hanya sampai kepada proses adsorpsi, tidak diikuti dengan proses reduksi. Sementara itu, Rahmayanti *et al.* (2016a) melaporkan mekanisme *recovery* emas dalam larutan berair menggunakan asam galat termodifikasi magnetit (mag-GA) yang disintesis menggunakan metode kopresipitasi terbalik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme *recovery* emas menggunakan partikel mag-GA terjadi melalui proses adsorpsi-desorpsi melalui pembentukan ikatan hidrogen yang diikuti dengan reduksi ion Au(III) menjadi Au(0), dan oksidasi gugus hidroksil dari asam galat. Asumsi ini didukung oleh spektrum FTIR, XRD kromatogram dan mikroskop foto-optik yang menunjukkan adanya Au(0) pada mag-GA setelah adsorpsi. Rahmayanti *et al.* (2016b) menunjukkan bahwa hasil *recovery* emas dari adsorben asam salisilat termodifikasi magnetit (Mag-SA) lebih rendah dibandingkan hasil *recovery* emas dari adsorben asam galat termodifikasi magnetit. Penelitian ini memperkuat hasil penelitian yang dilakukan oleh Rahmayanti *et al.* (2016a), yaitu gugus aktif yang berperan dalam proses adsorpsi-reduksi Au(III) menjadi Au (0) adalah gugus $-\text{OH}$ fenolat yang berada dalam senyawa organik/adsorben. Asam salisilat (SA) memiliki satu gugus $-\text{OH}$ fenolat, sedangkan asam galat (GA) memiliki tiga gugus $-\text{OH}$ sehingga kemampuan adsorpsi Au(III) pada mag-SA lebih kecil daripada mag-GA.

Berdasarkan keberhasilan penelitian sebelumnya tentang *recovery* emas menggunakan adsorben-reduktor dengan senyawa organik yang mengandung gugus $-\text{OH}$ fenolat satu (SA), tiga (GA), tujuan dari penelitian ini ialah *recovery* emas menggunakan senyawa dengan gugus $-\text{OH}$ fenolat yang lebih banyak (empat) yaitu asam askorbat (Gambar 1) untuk membuktikan apakah gugus $-\text{OH}$ fenolat memang berperan dalam proses adsorpsi-reduksi emas. Asam askorbat merupakan kristal putih kekuningan yang larut dalam air dan dikenal dengan nama vitamin C. Pemisahan emas yang telah direduksi menjadi Au(0) dari adsorben dapat dipermudah dengan cara pelapisan asam askorbat pada senyawa yang bersifat magnet yaitu magnetit (Fe_3O_4) yang selanjutnya dituliskan sebagai $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$.



Gambar 1. Struktur asam askorbat.

Magnetit banyak digunakan karena memiliki toksisitas rendah dan bersifat superparamagnetik (Jingjing *et al.*, 2011). Dengan adanya senyawa yang bersifat magnet dalam adsorben, Au(0) akan dapat dipisahkan dari adsorben melalui ekstraksi fasa padat menggunakan medan magnet luar, karena adsorben akan ditarik oleh medan magnet luar dan dapat digunakan kembali (*reuse*). Ekstraksi fasa padat memiliki kelebihan yaitu sederhana, membutuhkan sedikit pelarut atau tanpa pelarut, dan ramah lingkungan. Pada penelitian ini, pengaruh pH larutan HAuCl_4 terhadap kemampuan adsorpsi-reduksi $[\text{AuCl}_4]^-$, kinetika dan isoterm adsorpsi dipelajari pada sistem Au tunggal. Sementara itu, pengaruh keberadaan ion logam Cu terhadap selektivitas $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ untuk *recovery* emas dipelajari dalam sistem multilogam (Au/Cu).

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah akuabides, larutan HAuCl_4 dan bahan-bahan berkualitas analitik (*analytical grade*) buatan E. Merck seperti asam askorbat, besi(II) sulfat heptahidrat,

FeSO₄·7H₂O, besi(III) klorida heksahidrat, FeCl₃·6H₂O, natrium hidroksida, NaOH, CuCl₂, dan kertas saring Whatman 0,42 μm. Peralatan yang digunakan antara lain: seperangkat alat gelas, seperangkat alat sintesis, vakum, oven/furnace 4800 Thermolyne, neraca analitik BP 110 Sartorius, desikator, pH meter merek Orion 920A, *Fourier Transform InfraRed* (FTIR) Shimadzu-8201 PC, *X-Ray Diffraction* (XRD) model XD-3H, dan *Atomic Absorption Spectrometer* (AAS) Analytic Jena ContrAA 300.

Preparasi Magnetite (Fe₃O₄)

Prosedur penelitian ini mengacu pada penelitian Rahmayanti (2015) dengan sedikit modifikasi. Campuran larutan FeSO₄·7H₂O dan FeCl₃·6H₂O dengan perbandingan molar 1 : 2 M ditambahkan tetes demi tetes ke dalam larutan NaOH pH 13 sambil diaduk menggunakan stirer magnetik. Pengadukan dilakukan selama 60 menit. Hasil reaksi disaring dengan penyaring buchner dan dikeringkan di oven selama 12 jam pada temperatur 45 °C, selanjutnya dikarakterisasi menggunakan FTIR dan XRD.

Preparasi Asam Askorbat Termodifikasi Fe₃O₄ (Fe₃O₄-AA)

Magnetit ditambahkan pada larutan asam askorbat dengan perbandingan molar 1 : 3. Campuran diaduk selama 60 menit dengan temperatur 60 °C. Hasil reaksi dikarakterisasi menggunakan menggunakan FTIR dan XRD.

Pengaruh pH Larutan HAuCl₄ terhadap Kemampuan Adsorpsi-reduksi [AuCl₄]⁻ pada Adsorben Fe₃O₄-AA dalam Sistem Au Tunggal

Sebanyak 0,1 g Fe₃O₄-AA dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang sudah berisi larutan HAuCl₄ 25 ppm dengan variasi pH 1 – 9. Perubahan pH diatur dengan penambahan HCl atau NaOH. Campuran Fe₃O₄-AA dan larutan logam diaduk dengan pengaduk magnetik selama 24 jam pada suhu kamar. Campuran kemudian disaring menggunakan penyaring Buchner, konsentrasi HAuCl₄ dalam filtrat diukur dengan AAS. Residu yang merupakan campuran adsorben dan adsorbat diekstraksi menggunakan medan magnet luar untuk memisahkan adsorben dengan Au(0) yang terbentuk.

Penentuan Model Kinetika Adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada Adsorben Fe₃O₄-AA dalam Sistem Au Tunggal

Model kinetika adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada adsorben Fe₃O₄-AA dipelajari dengan menginteraksikan HAuCl₄ dengan adsorben Fe₃O₄-AA pada suhu kamar dengan variasi waktu 12, 24, 36, 48, dan 60 jam dan pH konstan (pH optimum). Campuran kemudian disaring menggunakan penyaring Buchner, konsentrasi HAuCl₄ dalam filtrat diukur dengan AAS. Model kinetika yang digunakan adalah orde satu semu Lagergren dan orde dua semu Ho.

Model kinetika Lagergren menjelaskan model kinetika adsorpsi seperti yang disajikan pada Persamaan (1).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

dimana q_e adalah jumlah adsorbat yang terserap pada kesetimbangan (mol/g) dan q_t jumlah adsorbat yang terserap pada waktu t (mol/g), k_1 adalah konstanta laju adsorpsi orde satu semu (1/min). Model kinetika orde satu semu dapat dipelajari dengan membuat grafik $\ln(q_e - q_t)$ versus t sehingga akan diperoleh harga k_1 dari -slope dan nilai q_e dihitung dari intersep.

Model kinetika orde dua semu (pseudo-orde dua) Ho dinyatakan dengan Persamaan (2).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

Dengan dibuat grafik antara t/q_t vs t , maka diketahui jumlah adsorbat yang terserap pada kesetimbangan (mg/g) atau q_e dari nilai $1/\text{slope}$ dan laju adsorpsi awal (h) dari nilai $1/\text{intersep}$. Jumlah adsorbat yang terserap pada waktu t (mg/g) disebut sebagai q_t , dan h diperoleh dari $h = kq_e^2$, dimana k merupakan konstanta laju adsorpsi (g/mg.menit) (Ho, 2006).

Penentuan Model Isoterm Adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada Adsorben Fe₃O₄-AA dalam Sistem Au Tunggal

Model isoterm adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada adsorben Fe₃O₄-AA dipelajari dengan menginteraksikan HAuCl₄ dengan adsorben Fe₃O₄-AA pada suhu kamar dengan variasi konsentrasi larutan Au(III) 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09 M, pH, dan waktu kontak optimum. Model isoterm adsorpsi yang digunakan untuk menjelaskan pola isoterm adsorpsi pada penelitian ini adalah isoterm Langmuir dan Freundlich.

Model Isoterm adsorpsi Langmuir dapat dinyatakan dengan Persamaan (3).

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (3)$$

Jumlah logam yang teradsorpsi pada keadaan kesetimbangan (mg/g) dinyatakan sebagai q_e , C_e adalah konsentrasi ion logam bebas dalam larutan pada keadaan kesetimbangan (mg/L), q_{\max} adalah kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g) dan K_L adalah konstanta Langmuir (L/mol) yang berhubungan dengan energi adsorpsi (Langmuir, 1916).

Model isoterm Freundlich dinyatakan dengan Persamaan 4.

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e \quad (4)$$

Jumlah spesies teradsorpsi per gram adsorben pada kesetimbangan (mg/g) disebut sebagai q_e . C_e adalah konsentrasi ion logam bebas dalam larutan pada keadaan ekuilibrium kapasitas (mg/g), dan K_F adalah konstanta Freundlich yang berhubungan dengan kapasitas adsorpsi dan $1/n$ adalah faktor heterogenitas (Freundlich, 1906).

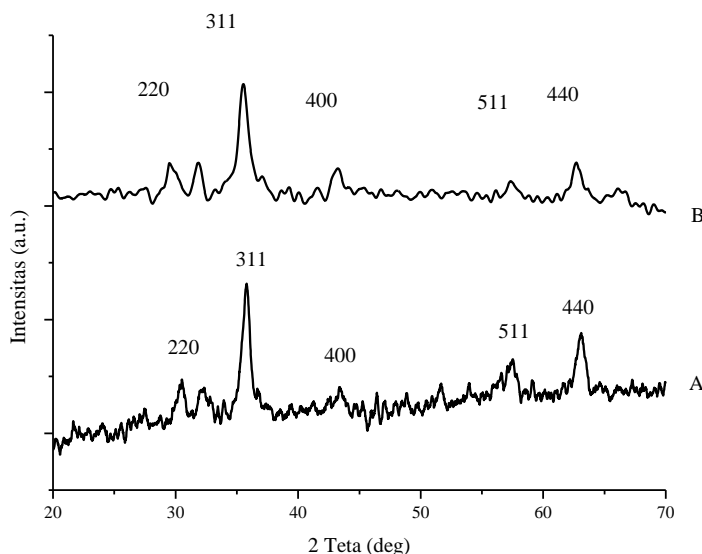
Pengaruh Keberadaan Ion Logam Cu Terhadap Selektivitas Fe_3O_4 -AA untuk *Recovery* Emas Dipelajari dalam Sistem Multilogam (Au/Cu)

Pada langkah ini adsorpsi dilakukan pada sistem (Au/Cu) dengan membuat perbandingan konsentrasi larutan Au tetap, sedangkan konsentrasi larutan logam Cu dibuat bervariasi. Proses adsorpsi dilakukan sama dengan adsorpsi sistem Au tunggal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Magnetit (Fe_3O_4)

Pada penelitian ini, sintesis Fe_3O_4 dilakukan melalui metode kopresipitasi terbalik dengan agen pengendap NaOH. Endapan hitam langsung terbentuk ketika campuran larutan $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (Fe^{3+}) dan larutan $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Fe^{2+}) ditambahkan tetes demi tetes ke dalam larutan NaOH pH 13. Hasil karakterisasi produk menggunakan XRD disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Difraktogram XRD (A). Fe_3O_4 standar dan (B). Fe_3O_4 hasil sintesis.

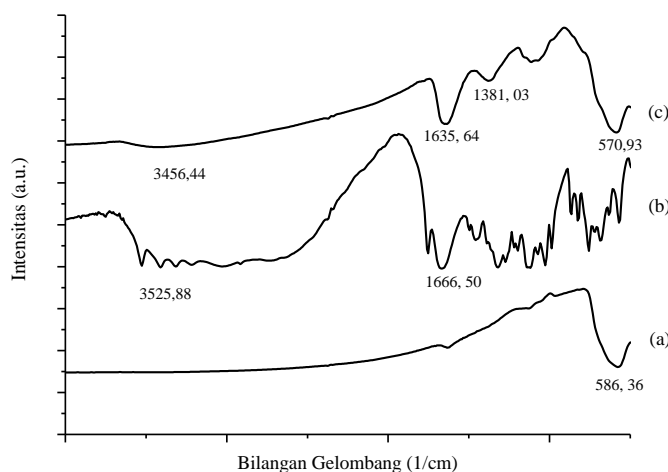
Difraktogram XRD (Gambar 2) menunjukkan puncak-puncak yang merepresentasikan senyawa Fe_3O_4 , yaitu pada posisi $2\theta = 30,11^\circ$, $35,60^\circ$, $43,08^\circ$, $53,41^\circ$, $57,28^\circ$, $62,98^\circ$, dan $73,92^\circ$. Refleksi tersebut dibandingkan dengan data refleksi pada *Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS-Internasional Centre for Diffraction Data)* (2001). Hasil komparasi menunjukkan bahwa refleksi tersebut merupakan ciri difraksi dari bidang kristal Fe_3O_4 yaitu 220 ($2\theta = 30$), 311 ($2\theta = 35$), 400 ($2\theta = 43$), 422 ($2\theta = 53$), 511 ($2\theta = 57$), 440 ($2\theta = 62$), dan 553 ($2\theta = 73$). Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa produk yang terbentuk memiliki jenis kristal Fe_3O_4 .

Ukuran kristal Fe_3O_4 hasil sintesis ditentukan dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer $D = K\lambda/(B\cos\theta)$, dimana D = ukuran rata-rata partikel (nm), K = konstanta dimensi kristal, B = lebar $\frac{1}{2}$ puncak difraktogram, θ = sudut difraksi, λ = panjang gelombang sinar-x (nm). Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh ukuran kristal pada kisaran 10,50 nm.

Asam Askorbat Termodifikasi Fe_3O_4 (Fe_3O_4 -AA)

Modifikasi asam askorbat (AA) dengan Fe_3O_4 dilakukan melalui metode dua tahap. Metode dua tahap merupakan sintesis Fe_3O_4 -AA dalam dua tahap, tahap pertama adalah sintesis Fe_3O_4 , tahap kedua adalah mereaksikan Fe_3O_4 dengan larutan AA. Perbandingan mol Fe_3O_4 dan AA yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 : 3. Metode ini mengacu pada penelitian Rahmayanti *et al.* (2015) yang memodifikasi asam galat dengan magnetit dengan hasil kristalinitas produk terbaik diperoleh melalui metode dua tahap.

Spektra FTIR Fe_3O_4 -AA disajikan pada Gambar 3(c). Dari gambar terlihat bahwa setelah AA dimodifikasi dengan Fe_3O_4 , muncul serapan lebar di daerah 570 cm^{-1} dengan intensitas yang kuat yang diduga berasal dari ikatan Fe-O yang merupakan ciri khas serapan Fe_3O_4 seperti yang disajikan pada Gambar 3(a). Terjadinya pergeseran serapan dari $586,36\text{ cm}^{-1}$ ke $570,93\text{ cm}^{-1}$ diduga disebabkan adanya interaksi antara gugus karbonil AA dengan permukaan Fe_3O_4 . Hal ini diperkuat dengan terjadinya pergeseran serapan yang diduga berasal dari gugus karbonil asam askorbat dari daerah $1666,50\text{ cm}^{-1}$ ke $1635,64\text{ cm}^{-1}$. Munculnya serapan dengan intensitas sedang pada daerah $1600 - 1450\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus C=C (dalam cincin aromatik). Keberadaan gugus C-O ditandai dengan munculnya serapan pada daerah $1320 - 1210\text{ cm}^{-1}$. Serapan lebar O-H karboksilat maupun O-H fenol muncul pada daerah $3400 - 2400\text{ cm}^{-1}$ namun dengan intensitas yang lebih lemah dibandingkan spektra FTIR AA sebelum modifikasi seperti yang disajikan pada Gambar 3(b). Hal ini diduga karena gugus -OH juga berinteraksi dengan permukaan Fe_3O_4 .

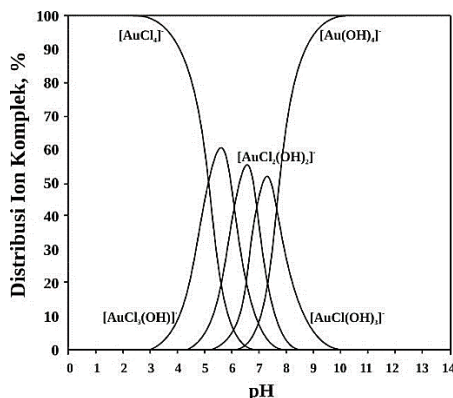


Gambar 3. Spektra FTIR (a) Fe_3O_4 dan (b) Asam askorbat (c) Fe_3O_4 -AA.

Modifikasi AA pada Fe_3O_4 melalui metode dua tahap dilakukan pada medium asam (pH 3 - 4). Pada kondisi ini permukaan Fe_3O_4 cenderung positif karena kondisi pH lebih kecil dari pH_{PZC} magnetit (6 - 6,8). Sementara itu, pK_a AA = 4,2 dan 11,6 (Moffat *et al.*, 2011), pada kondisi ini gugus fenolat asam baru terdeprotonasi menjadi $-\text{O}^-$. Artinya, saat AA dimodifikasi dengan Fe_3O_4 gugus fenolat dari AA belum terdeprotonasi, sehingga permukaan asam askorbat cenderung positif. Hal ini dikarenakan gugus karbonil dan fenolat terprotonasi menjadi $-\text{OH}_2^+$. Dengan demikian, sangat kecil kemungkinan dugaan interaksi antara AA dengan Fe_3O_4 melalui interaksi elektrostatis. Interaksi yang terjadi dapat melalui ikatan hidrogen seperti yang telah dilaporkan oleh Zhou *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa jika interaksi antara besi oksida dengan senyawa organik yang mengandung gugus fenolat dilakukan pada pH medium di bawah $\text{pH}_{\text{ZPC}}\text{Fe}_3\text{O}_4$ maka interaksi yang terjadi antara Fe_3O_4 dengan senyawa organik tersebut adalah melalui ikatan hidrogen, interaksi elektrostatis dan pertukaran ligan. Jika interaksi dilakukan pada $\text{pH} > \text{pH}_{\text{ZPC}}\text{Fe}_3\text{O}_4$, maka interaksi yang terjadi adalah ikatan hidrogen, dan pertukaran ligan, sedangkan interaksi elektrostatis tidak dimungkinkan terjadi pada kondisi ini. Pernyataan ini diperkuat dengan hasil penelitian yang disampaikan oleh Rahmayanti *et al.* (2016b).

Pengaruh pH Larutan HauCl_4 terhadap Kemampuan Adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam Sistem Au Tunggal

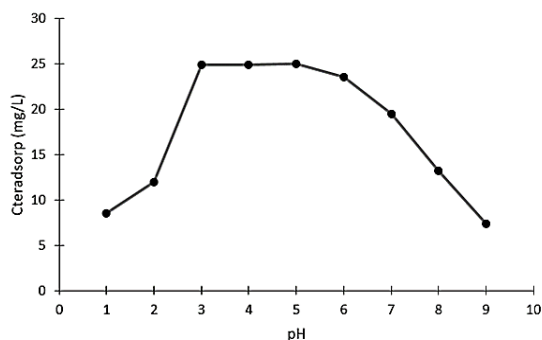
Parameter keasaman (pH) merupakan faktor yang penting dalam proses adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$. Hal ini dikarenakan perubahan keasaman dalam larutan menyebabkan perubahan spesies dari larutan logam Au seperti yang disajikan pada Gambar 4. Spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ berada dalam konsentrasi maksimum pada pH 3, dan semakin menurun dengan meningkatnya pH. Setelah pH 7 spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ sudah tidak ada dalam larutan (Paclawski *and* Fitzner, 2004). Selain itu perubahan keasaman dapat menyebabkan perubahan muatan permukaan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$.



Gambar 4. Hubungan % distribusi ion kompleks Au(III) dan pH dalam larutan berair pada konstanta konsentrasi ion klorida ($C_{\text{Cl}^-} = 0,6 \text{ M}$) dan temperatur $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Pawlawski *and* Fitzner, 2004).

Berdasarkan hasil penelitian yang disajikan pada Gambar 5, terlihat bahwa kemampuan adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam sistem Au tunggal dipengaruhi oleh pH larutan HauCl_4 awal. Kondisi adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ sangat baik dalam rentang pH 3 – 5. Sementara itu, pada rentang pH 1 – 2 dan 7 – 9, $[\text{AuCl}_4]^-$ tidak teradsorpsi dengan baik oleh $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$.

Perbedaan kemampuan adsorpsi tersebut dipengaruhi oleh muatan permukaan adsorben dan keberadaan spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ dalam berbagai rentang pH. Keberadaan gugus $-\text{OH}$ pada adsorben akan mempengaruhi muatan permukaan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ pada berbagai rentang pH. Ketika pH asam, permukaan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ adalah positif akibat gugus $-\text{OH}$ yang terprotonasi menjadi $-\text{OH}_2^+$, sehingga dimungkinkan terjadi interaksi antara $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ melalui ikatan dipol-ion. Hanya saja, hasil penelitian menunjukkan kemampuan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam mengadsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada rentang pH 1 – 2 dan 6 – 7 lebih rendah. Jika dilihat dari distribusi ion Au(III) dalam larutan berair, spesies $[\text{AuCl}_4]^-$ dalam kondisi maksimal pada rentang pH 1 – 3 dan mengalami penurunan pada $\text{pH} > 3$ dan semakin hilang pada pH 7, namun spesies Au(III) berubah menjadi spesies $[\text{AuCl}_3(\text{OH})]^-$ dan $[\text{AuCl}_2(\text{OH})_2]^-$ yang juga bermuatan negatif. Jika diduga interaksi antara $[\text{AuCl}_4]^-$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ hanya melalui ikatan dipol-ion, maka seharusnya adsorpsi yang terjadi pada pH asam (1 – 6) berlangsung baik karena $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dapat berinteraksi dengan spesies Au yang lain. Dengan demikian, ada dugaan interaksi lain selain ikatan dipol-ion yang terjadi antara $[\text{AuCl}_4]^-$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$.



Gambar 5. Adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam berbagai pH larutan HauCl_4 dalam sistem Au tunggal.

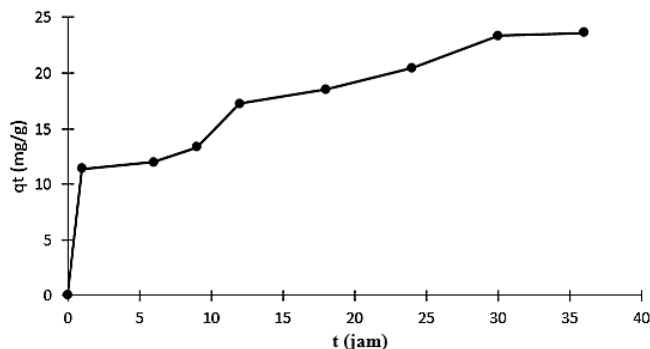
Adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ yang terjadi pada suasana basa ($\text{pH} > 7$) menunjukkan penurunan. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: muatan permukaan adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ pada kondisi basa ($\text{pH} > 7$) adalah

negatif yang disebabkan karena gugus $-OH$ yang terprotonasi menjadi $-O^-$, sedangkan spesies Au(III) pada kondisi ini berada dalam bentuk $[AuCl(OH)_3]^-$ dan $[Au(OH)_4]^-$. Hal inilah yang menyebabkan kemampuan Fe_3O_4-AA mengadsorpsi $[AuCl_4]^-$ sangat lemah dengan bertambahnya pH.

Dugaan lain model interaksi yang terjadi antara Fe_3O_4-AA dan $[AuCl_4]^-$ berdasarkan penjelasan di atas adalah melalui ikatan hidrogen antara H (dari $-OH_2^+$) dengan Cl dari $[AuCl_4]^-$. Interaksi melalui ikatan hidrogen antara gugus $-OH$ dan Cl dari $[AuCl_4]^-$ ini juga telah dilaporkan oleh Rahmayanti *et al.* (2016a) dan Santosa *et al.* (2011). Adanya ikatan hidrogen antara hidrogen gugus $-OH$ dan Cl dari $[AuCl_4]^-$ menyebabkan kemampuan adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Fe_3O_4-AA optimum pada rentang pH 3 – 5, dimana spesies $[AuCl_4]^-$ dan $[AuCl_3(OH)]^-$ dominan pada pH ini. Rendahnya adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Fe_3O_4-AA di pH 1 – 2 diduga disebabkan oleh ketidakstabilan Fe_3O_4-AA , ditandai dengan larutnya Fe_3O_4-AA ketika ditambahkan pada larutan $HAuCl_4$ dengan pH 1 dan 2.

Pengaruh Waktu Interaksi terhadap Kemampuan Adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Adsorben Fe_3O_4-AA dalam Sistem Au Tunggal

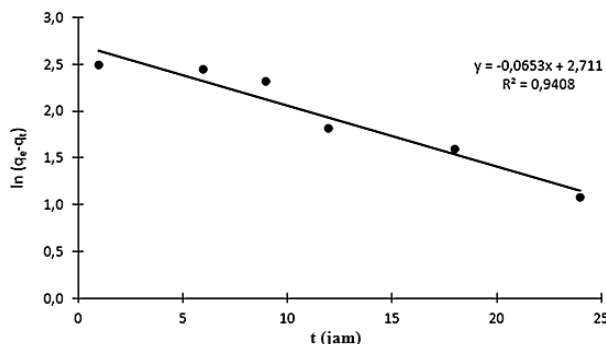
Hasil penelitian yang disajikan pada Gambar 6 menunjukkan pada 1 jam awal interaksi, adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Fe_3O_4-AA berlangsung cepat dan terus meningkat seiring dengan pertambahan waktu. Hal ini diduga karena pada waktu awal interaksi permukaan Fe_3O_4-AA masih banyak yang belum terisi atau kondisinya belum jenuh sehingga memudahkan adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Fe_3O_4-AA . Setelah jam ke-12 terlihat reaksi semakin lambat hingga kesetimbangan adsorpsi tercapai pada jam ke-30. Setelah kesetimbangan tercapai, tidak terjadi peningkatan atau penurunan yang signifikan terhadap proses adsorpsi. Hal ini disebabkan pada jam ke-30 permukaan Fe_3O_4-AA telah jenuh atau terisi penuh oleh $[AuCl_4]^-$ sehingga dengan penambahan waktu yang lebih lama tidak menunjukkan perubahan jumlah $[AuCl_4]^-$ yang teradsorpsi.



Gambar 6. Pengaruh waktu interaksi terhadap kemampuan adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada adsorben Fe_3O_4-AA dalam sistem Au tunggal.

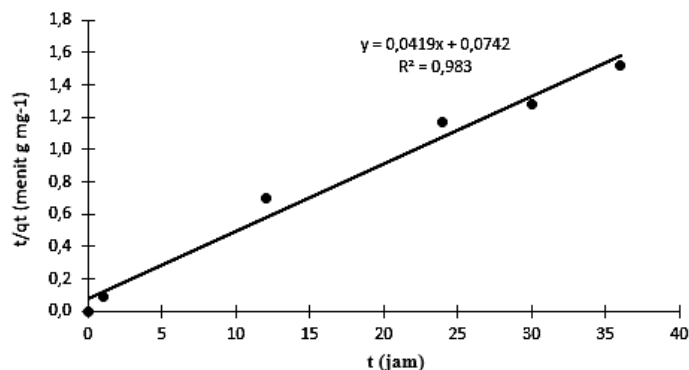
Model Kinetika Adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Adsorben Fe_3O_4-AA dalam Sistem Au Tunggal

Model kinetika Lagergren dipelajari dengan membuat grafik linier t terhadap $\ln(q_e - q_t)$. Dari grafik dapat ditentukan harga k (-slope) dan q_e (dihitung dari intersep). Grafik kinetika pseudo orde satu menurut Lagergren dari hasil penelitian ini disajikan pada Gambar 7. Dari grafik, untuk adsorpsi $[AuCl_4]^-$ pada Fe_3O_4-AA diperoleh nilai $R^2 = 0,940$, $k = 0,065 \text{ menit}^{-1}$ dan $q_e = 15,044 \text{ mg g}^{-1}$.



Gambar 7. Grafik kinetika pseudo orde satu menurut Lagergren.

Model kinetika adsorpsi orde dua semu (pseudo orde dua) yang diusulkan oleh Ho didasarkan terhadap kapasitas serapan pada fase padatan. Dari grafik antara (t/q_t) vs t yang disajikan pada Gambar 8, akan diperoleh harga q_e (terhitung, yang merupakan jumlah adsorbat yang terserap pada kesetimbangan) dan h (laju adsorpsi awal) yang dihasilkan dari persamaan $h = kq_e^2$, sehingga diperoleh nilai k (konstanta laju adsorpsi). Berdasarkan Gambar 8, diperoleh nilai $R^2 = 0,9830$, $q_e = 23,87 \text{ mg g}^{-1}$, $h = 13,477 \text{ mg g}^{-1} \text{ menit}^{-1}$, dan $k = 2,37 \times 10^{-2} \text{ g mg}^{-1} \text{ menit}^{-1}$.



Gambar 8. Grafik kinetika pseudo orde dua menurut Ho.

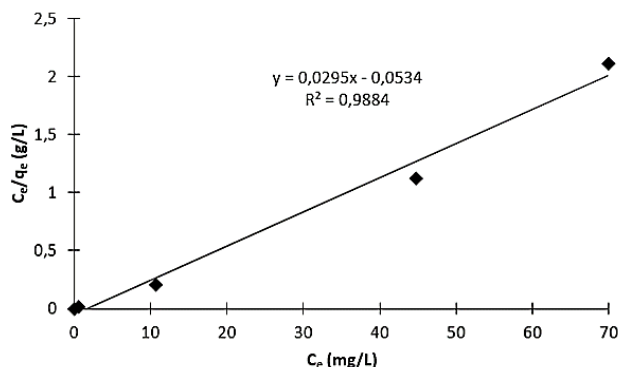
Jika dilihat dari kedua model kinetika adsorpsi yang pelajari, terlihat bahwa adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ mengikuti model kinetika Ho karena model kinetika Ho memberikan koefisien korelasi (R^2) yang lebih baik dibanding model kinetika Lagergren. Model kinetika Ho menunjukkan bahwa laju adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dipengaruhi oleh interaksi antara adsorben dan adsorbat dan diduga dipengaruhi oleh situs aktif dari adsorben (Vilela *et al.*, 2019).

Model Isoterm Adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada Adsorben $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam Sistem Au Tunggal

Kemampuan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam mengadsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ dan besarnya energi yang diperlukan untuk adsorpsi tiap satu mol $[\text{AuCl}_4]^-$ oleh $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dapat ditentukan dengan mengetahui nilai kapasitas adsorpsi, konstanta kesetimbangan adsorpsi, dan besarnya energi bebas adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ melalui model isoterm adsorpsi. Isoterm adsorpsi menggambarkan hubungan antara zat teradsorpsi dalam sejumlah tertentu berat adsorben dalam kondisi kesetimbangan dengan konsentrasi awal zat dalam larutan pada temperatur konstan. Model isoterm adsorpsi yang digunakan yaitu isoterm Freundlich dan isoterm Langmuir.

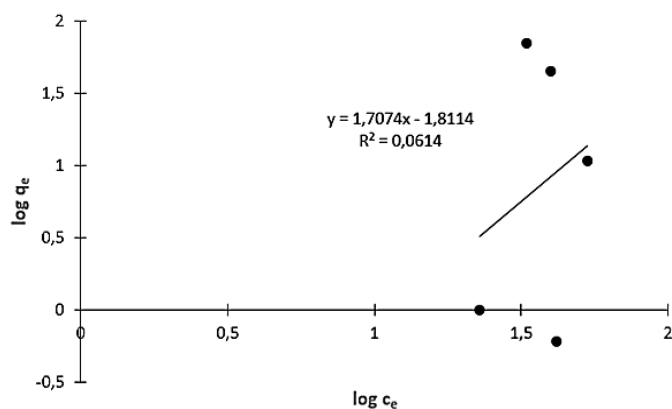
Isoterm Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi yang terjadi hanya merupakan adsorpsi satu lapis saja (*monolayer*). Apabila jumlah situs aktif pada permukaan adsorben telah tertutup oleh adsorbat, maka proses adsorpsi selanjutnya akan terhalangi. Persamaan isoterm Freundlich digunakan untuk menjelaskan proses adsorpsi non ideal pada permukaan yang heterogen. Heterogenitas dapat disebabkan oleh adanya perbedaan gugus fungsional pada permukaan adsorben.

Model isoterm adsorpsi Langmuir ditentukan dengan membuat grafik C_e/q_e versus C_e seperti yang disajikan pada Gambar 9. Berdasarkan grafik tersebut, untuk adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ diperoleh koefisien korelasi (R^2) = 0,9984, kapasitas adsorpsi sebesar 33,90 mg/g (0,0990 mol/g), konstanta kesetimbangan adsorpsi (K_L) = 187,29 L/mol dan energi adsorpsi ($E_{\text{ads}} = 12,79 \text{ kJ/mol}$).



Gambar 9. Hubungan Linier C_e/q_e (g L^{-1}) vs C_e (mg L^{-1}) dari pola Isoterm Langmuir.

Model isoterm Freundlich untuk adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ ditentukan dengan membuat grafik $\log q_e$ versus $\log C_e$ seperti yang disajikan pada Gambar 10. Berdasarkan gambar tersebut diperoleh koefisien korelasi (R^2) sangat kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ mengikuti model kinetika Langmuir.



Gambar 10. Hubungan Linier $\log C_e$ vs $\log q_e$ dari pola Isoterm Freundlich.

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya seperti yang disajikan pada Tabel 1, dapat diketahui bahwa kapasitas adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ lebih tinggi dibandingkan kapasitas adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AS}$ (asam salisilat) dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AG}$ (asam galat). Perbedaan hasil penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut: asam salisilat dan asam galat berturut-turut memiliki 1 dan 3 gugus $-\text{OH}$. Sementara asam askorbat memiliki 4 gugus $-\text{OH}$. Dugaan interaksi yang terjadi antara $[\text{AuCl}_4]^-$ dan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ adalah melalui ikatan hidrogen antara hidrogen gugus $-\text{OH}$ dan Cl dari $[\text{AuCl}_4]^-$. Dengan demikian jumlah gugus $-\text{OH}$ yang dimiliki adsorben akan mempengaruhi kemampuannya dalam mengadsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$. Semakin banyak gugus $-\text{OH}$ yang dimiliki adsorben maka kapasitas adsorpsi yang dimiliki akan semakin besar pula.

Tabel 1. Hasil penentuan isoterm adsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ pada berbagai adsorben.

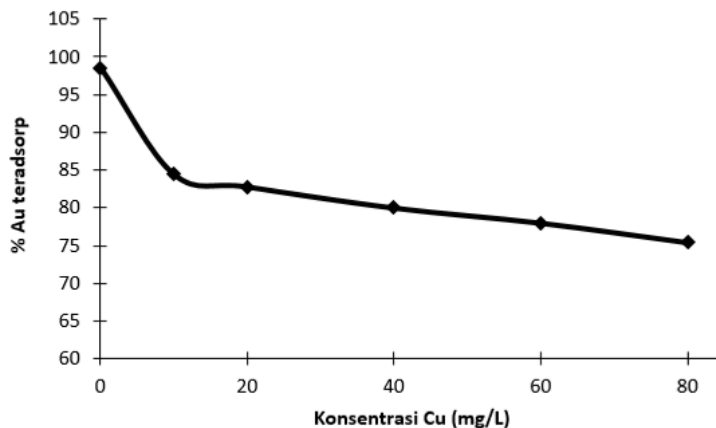
Adsorben	Parameter Langmuir				Keterangan
	q_{\max} (mol g^{-1})	K_L (L mol^{-1})	E_{ads} (kJ mol^{-1})	R^2	
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-asam askorbat}$	0,09900	187,29	12,790	0,9984	Hasil penelitian ini
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-asam salisilat}$	0,00047	82423,10	28,516	0,9910	Rahmayanti, <i>et al.</i> (2016b)
$\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-asam galat}$	0,00060	17851,06	24,660	0,9440	Rahmayanti, <i>et al.</i> (2016b)

Pengaruh Keberadaan Ion Logam Cu terhadap Selektivitas $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ untuk *Recovery* Emas Dipelajari dalam Sistem Multilogam (Au/Cu)

Berdasarkan Gambar 11, terlihat bahwa kemampuan adsorpsi $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ terhadap $[\text{AuCl}_4]^-$ semakin menurun dengan meningkatnya konsentrasi Cu tetapi tidak terlalu signifikan. Saat di dalam sistem terdapat larutan Cu 10 ppm, % Au teradsorpsi menurun sekitar 14%, namun setelah konsentrasi Cu dinaikkan menjadi 20 – 80 ppm, % Au teradsorpsi hanya mengalami penurunan sekitar 1 – 9%. Menurunnya kemampuan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dalam mengadsorpsi $[\text{AuCl}_4]^-$ dengan adanya ion Cu (II) di dalam larutan dapat dijelaskan sebagai berikut: dugaan interaksi yang terjadi antara $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dan $[\text{AuCl}_4]^-$ adalah 1). melalui ikatan dipol-ion antara gugus $-\text{OH}$ yang dimiliki $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ yang terprotonasi menjadi $-\text{OH}_2^+$ dengan ion $[\text{AuCl}_4]^-$ dan 2). Melalui ikatan hidrogen antara hidrogen gugus $-\text{OH}$ dan Cl dari $[\text{AuCl}_4]^-$. Keberadaan Cu (CuCl_2) di dalam sistem larutan berair yang terionisasi menjadi Cu^{2+} dan 2 Cl^- dapat mengganggu interaksi antara $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dan $[\text{AuCl}_4]^-$. Ion Cl^- dari CuCl_2 akan berkompetisi dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ untuk berikatan dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ baik melalui ikatan dipol-ion ataupun melalui ikatan hidrogen.

Penjelasan lain terkait kompetisi Au dan Cu dalam berinteraksi dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-AA}$ dapat dijelaskan melalui potensial redoks standar Au dan Cu. Berdasarkan penelitian Santosa *et al.* (2019), Rahmayanti (2016a dan 2016b), dugaan interaksi antara senyawa organik dengan $[\text{AuCl}_4]^-$ adalah melalui reaksi oksidasi gugus fenolat

senyawa organik yang diikuti reaksi reduksi Au(III) menjadi Au(0). Dengan demikian potensial redoks standar Au dan Cu akan mempengaruhi kemampuan adsorpsi logam tersebut pada Fe₃O₄-AA. Au(III)/Au(0) memiliki potensial redoks standar = 1,5 V. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan potensial redoks standar Cu(II)/Cu(0), yaitu 0,5 V (Alorro *et al.*, 2010). Dengan demikian keberadaan Cu akan mempengaruhi kemampuan Fe₃O₄-AA dalam mengadsorpsi [AuCl₄]⁻, namun tidak signifikan. Hal ini terlihat pada % penurunan pada saat konsentrasi Cu 20 – 80% hanya sebesar 1 – 9%.



Gambar 11. Adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada adsorben Fe₃O₄-AA dalam sistem multilogam (Au/Cu) dengan konsentrasi larutan Au tetap (25 ppm).

KESIMPULAN

Adsorben Fe₃O₄-AA dapat digunakan untuk mengambil kembali (*recovery*) emas [AuCl₄]⁻ baik dalam sistem Au tunggal maupun dalam sistem multilogam (Au/Cu). Sistem Au tunggal, adsorpsi [AuCl₄]⁻ pada Fe₃O₄/AA optimum pada pH 4 dan kesetimbangan adsorpsi tercapai pada jam ke-30. Model kinetika adsorpsi mengikuti model kinetika pseudo orde dua Ho dan model isoterm adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,09900 mol/g. Sistem multilogam (Au/Cu), keberadaan ion logam Cu berpengaruh terhadap kemampuan Fe₃O₄/AA dalam mengadsorpsi [AuCl₄]⁻.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada Laboratorium Kimia UIN Sunan Kalijaga atas layanan dan fasilitas yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alorro, RD., Hiroyoshi, N., Kijitani, H., Ito, M., and Tsunekawa, M., 2010. On the Use of Magnetite for Gold Recovery from Chloride Solution. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 31(4), 201-213. doi: 10.1080/08827508.2010.483359.
- Freundlich, H.M.F., 1906. Ueber die Adsorption in Loesungen (Adsorption in Solution). *Zeitschrift fuer Physikalische Chemie* 57, 385-470.
- Ho, Y., 2006. Review of Second-Order Models for Adsorption System. *Journal of Hazardous Materials* 36, 681-689. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.043.
- Istiningrum, R.B., Tiwow, C.D., Nuryono, and Narsito, 2015. Au(III) Selective Adsorption of Quaternary Ammonium-Silica Hybrid in Au/Cu System. *Procedia Chemistry* 17, 132-138. doi: 10.1016/j.proche.2015.12.126.
- Jingjing, W., Dengxi, L., Yuan, Y., and Yingchen, Z., 2011. Preparation of Fe₃O₄ Nanoparticles by Use of Catalytically Oxidized Liquids of Cyanide Tailings by NO_x and Research of Its Adsorption Properties. *Energy Procedia* 11,3389-3396. doi: 10.1016/j.egypro.2011.10.700.
- Langmuir, I. 1916. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. *Journal of the American Chemical Society* 38, 2221-2295. doi: 10.1021/ja02268a002.
- Moffat, A., David, M., and Widdop, B., 2011. *Clarke's Analysis of Drugs and Poisons, 4th edition*. Pharmaceutical Press, London.

- Paclawski, K., and Fitzner, K., 2004. Kinetic of Gold (III) Chloride Complex Reduction Using Sulfur (IV). *Metallurgical and Materials Transactions B* 35, 1071-1085. doi: 10.1007/s11663-004-0063-z.
- Rahmayanti, M., Santosa, S.J., and Sutarno. 2015. Sonochemical Co-precipitation Synthesis of Gallic Acid-modified Magnetite. *Advanced Materials Research* 1101, 286-289. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1101.286.
- Rahmayanti, M., Santosa, S.J., and Sutarno. 2016a. Mechanisms of Gold Recovery from Aqueous Solutions Using Gallic acid-modified Magnetite Particles Synthesized Via Reverse Co-precipitation Method. *International Journal of ChemTech Research* 9(4), 446-452.
- Rahmayanti, M., Santosa, S.J., and Sutarno. 2016b. Comparative Study on the Adsorption of $[\text{AuCl}_4]^-$ onto Salicylic Acid and Gallic Acid Modified Magnetite Particles. *Indonesian Journal of Chemistry* 16, 329-337. doi: 10.22146/ijc.21150.
- Santosa, S.J., Sudiono, S., Siswanta, D., Kunarti, E.S., and Dewi, S.R., 2011. Mechanism of AuCl_4^- Removal from Aqueous Solution by Means of Peat Soil Humin. *Adsorption Science and Technology* 29(8), 733-746. doi: 10.1260/0263-6174.29.8.733.
- Santosa, S.J, Fitriani, D., Aprilita, N.H., and Rusdiarso, B., 2019. Gallic and Salicylic Acid-Functionalized Mg/Al Hydrotalcite as Highly Effective Materials for Reductive Adsorption of AuCl_4^- . *Applied Surface Science* 507, 1-10. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.145115.
- Zhou, Y., Zhang, Y., Li, G., and Jiang, T., 2015. A Further study on Adsorption Interaction of Humic Acid on Natural Magnetite, Hematite and Quartz in Iron Ore Pelletizing Process: Effect of The Solution pH Value. *Powder Technology* 271, 155-166. doi: 10.1016/j.powtec.2014.10.045.
- Vilela, P.B., Matiasa, C.A., Dalaliberaa, A., Becegatoa, V.A., and Paulinoa, A.T., 2019. Polyacrylicacid-based and Chitosan-based Hydrogels for Adsorption of Cadmium: Equilibrium Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(5), 1-13. doi: 10.1016/j.jece.2019.103327.