

KINETIKA DAN TERMODINAMIKA ADSORBSI Cu^{2+} DENGAN ADSORBEN KARBON AKTIF ARANG BATU BARA

Denny Vitasari¹, Puspita Adi Lystanto², Kusmiyati³, Ahmad M Fuadi⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl A Yani Tromol Pos 1 Pabelan Surakarta 57102
E-mail: denny.vitasari@gmail.com

Abstrak

Limbah cair industri bisa mengandung logam berat seperti Cu^{2+} yang berbahaya bagi lingkungan jika dibuang tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu. Metode yang digunakan untuk mengurangi kandungan logam berat dalam limbah cair sudah banyak dilakukan, salah satu diantaranya adalah metode adsorpsi, yaitu memisahkan komponen tertentu dari fluida ke permukaan zat padat. Adsorpsi merupakan metode yang mudah, akan tetapi kebanyakan adsorben yang digunakan harganya mahal, sehingga perlu adanya alternatif adsorben yang murah.

Penelitian ini memanfaatkan karbon aktif arang batubara (KAAB) sebagai adsorbennya. Arang batubara merupakan limbah hasil pembakaran dalam industri, yang berpotensi mengandung logam berat berbahaya, sehingga berbahaya bagi lingkungan. Pengaktifan arang batubara dilakukan dengan merendamnya dalam peroxide kemudian dibakar dalam furnace. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter proses (konsentrasi, pH dan waktu proses) terhadap proses adsorpsi logam berat, dengan pendekatan model isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich, dan untuk mengetahui kinetika adsorpsi logam berat oleh KAAB. Pelaksanaan penelitian dengan batch, yaitu mengkontakkan 10 gram KAAB dengan 400 ml limbah sintesis. Pengujian kadar logam berat menggunakan AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa KAAB dapat digunakan untuk mengurangi kandungan logam berat Cu^{2+} . Adsorpsi KAAB mengikuti model Isoterm adsorpsi Langmuir pada pH netral dengan error $3,57.10^{-5}$, sedangkan pH asam mengikuti model isoterm adsorpsi Freundlich dengan error $3,48.10^{-5}$. Kinetika model pseudo-second-order rate sesuai untuk proses adsorpsi pH 7 dengan kesalahan relatif (R^2) sebesar 0,1772 dan model pseudo-first-order rate sesuai untuk pH 4 dengan harga kesalahan relatif (R^2) sebesar 0,9467.

Kata kunci : Cu^{2+} , KAAB, Adsorpsi

Pendahuluan

Limbah cair industri adalah limbah cair yang dihasilkan oleh berbagai kegiatan di suatu industri. Sifat-sifat air limbah industri relatif bervariasi tergantung bahan baku yang digunakan, pemakaian air dalam proses, dan bahan aditif yang digunakan selama proses produksi. Beberapa limbah cair industri mengandung logam berat seperti Cu yang terbawa karena proses produksi.

Metode penghilangan logam berat dari limbah cair industri diantaranya adalah chemical precipitation, ion-exchange, adsorpsi dan reverse osmosis. Akan tetapi kebanyakan dari proses pengolahan limbah cair industri membutuhkan modal dan biaya operasional yang mahal. Pada umumnya logam berat tidak cukup bernilai, ketika harus dipisahkan dengan selektifitas khusus seperti ion-exchange. Langkah untuk mengatasi itu salah satunya dengan proses penjerapan (adsorption). Penggunaan adsorben yang murah dan ramah lingkungan untuk memurnikan air dari logam berat perlu dilakukan agar biaya proses adsorpsi dapat ditekan (Hui, 2005).

Arang batubara (bottom ash) berasal dari material buangan sisa pembakaran batubara dari PLTU maupun industri. Arang batubara merupakan material buangan yang tidak diinginkan, biasanya arang batubara tersebut hanya dibuang di tanah. Akhir-akhir ini diketahui bahwa arang batubara (bottom ash) dapat digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan berbagai macam logam berat dari limbah cair. Arang batubara (bottom ash) adalah material buangan yang berasal dari sisa pembakaran batubara untuk pembangkit listrik. Ketersediaan bahan baku arang batubara cukup melimpah dan merupakan material lokal yang murah. (Gupta et al., 1998).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh parameter proses seperti konsentrasi Logam Cu^{2+} , pH awal cairan limbah dan waktu proses terhadap proses adsorpsi logam Cu^{2+} dan menentukan persamaan kinetika dan kesetimbangan adsorpsi logam Cu^{2+} dari limbah cair industri dengan menggunakan adsorben karbon aktif arang batubara (KAAB).

Adsorpsi adalah proses pemisahan komponen tertentu dari suatu fluida berpindah ke permukaan zat padat yang menyerap (adsorben) (Mc. Cabe, dkk, 2005). Isoterm adsorpsi adalah hubungan kesetimbangan antara

konsentrasi dalam fase fluida dan konsentrasi di dalam partikel adsorben pada suhu tertentu (Mc. Cabe, dkk, 2005). Model isoterm adsorpsi Langmuir dan Freudlich umum digunakan pada adsorpsi cairan dengan konsentrasi rendah.

Model Langmuir dibuat berdasarkan asumsi bahwa *binding sites* terdistribusi secara homogen di seluruh permukaan adsorben, di mana adsorpsi terjadi pada satu lapisan (*single layer*).

$$Q_e = \frac{bQ_0C_e}{1 + bC_e} \tag{1}$$

di mana Q_0 (mg g^{-1}) dan b (mg^{-1}) adalah konstanta yang berkaitan dengan kapasitas adsorpsi dan kecepatan adsorpsi, Q_e adalah jumlah zat teradsorpsi tiap unit massa adsorben (mg g^{-1}) pada kesetimbangan, C_e (mg l^{-1}) konsentrasi kesetimbangan zat teradsorpsi di fase cair.

Isoterm Freundlich sering digunakan untuk menggambarkan adsorpsi senyawa organik dan inorganik dalam larutan. Asumsi dari isoterm ini didasarkan bahwa ada permukaan heterogen dengan beberapa tipe pusat adsorpsi yang aktif.

$$Q_e = KC_e^{1/n} \tag{2}$$

K dan $1/n$ adalah konstanta Freundlich berkaitan dengan kapasitas dan afinitas adsorpsi (Hui et al, 2005). Kesetimbangan atau termodinamika hanya memberikan data mengenai keadaan akhir suatu proses. Untuk mengetahui perubahan adsorpsi terhadap waktu maka perlu dipelajari kinetika adsorpsi. Model yang cukup sederhana untuk menggambarkan kinetika adsorpsi adalah model *pseudo-first-order rate* dan model *pseudo-second-order rate* (Azizian, 2004).

Model *pseudo-first-order rate*

$$\frac{dQ}{dt} = k_1(Q_e - Q) \tag{3}$$

di mana Q dan Q_e adalah jumlah zat teradsorpsi tiap unit massa adsorben (mmol g^{-1}) pada saat t dan pada kesetimbangan, k_1 adalah konstanta kecepatan adsorpsi orde-1 (menit^{-1}).

Model *pseudo-second-order rate*

$$\frac{dQ}{dt} = k_2(Q_e - Q)^2 \tag{4}$$

di mana k_2 adalah konstanta kecepatan adsorpsi orde-2.

AAS merupakan suatu alat yang teknik analisisnya berdasarkan absorpsi radiasi elektromagnetik oleh atom-atom yang tidak tereksitasi. Spectrophotometer memiliki beberapa kelebihan dalam analisis logam berat, karena analisisnya sering tidak memerlukan pemisahan pendahuluan dimana suatu unsur dapat ditentukan walaupun ada unsur lainnya, dan spectrophotometer cukup peka untuk mengukur kadar logam dalam jumlah mikro (Dewi, 2009).

Arang batubara (bottom ash) mempunyai kandungan utama silica, iron, alumina, magnesium dan SO_3 , sedangkan konsentrasi komponen lainnya sedikit (Dincer et al.,2006).

Tabel 1 Komposisi Arang Batubara

Major element	Arang batubara (wt.%)	Minor element	Arang batubara (wt.%)
SiO ₂	32,35	Cd	<0,005
Fe ₂ O ₃	7,28	Cu	<0,02
Al ₂ O ₃	12	Cr	0,04
TiO ₂	0,55	Ni	0,04
CaO	9,83	Pb	<0,02
MgO	4,54	Sb	<0,02
SO ₃	7,53	Zn	0,1
Na ₂ O	3,14	Ba	0,13
K ₂ O	1,83		
Loss on ignition	20,5		

Metode Penelitian

Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah eksperimental dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia UMS. Arang batubara sebelum digunakan diaktifasi terlebih dahulu. Arang batubara diayak dengan ukuran ayakan

60 mesh dengan *Sieve Shaker* (AG-515 MBT), lalu dimasukkan ke dalam gelas beker dan ditambahkan 250 ml H₂O₂ 0,2 N diaduk dan didiamkan selama 60 menit. Kemudian dicuci dengan aquades demineralisasi, setelah itu dikeringkan dalam oven (*WTB binder*) pada suhu 140 °C selama 15 menit. Kemudian dimasukkan di dalam furnace (*Thermolyne 48000*) pada suhu 500°C selama 15 menit.

Pembuatan limbah sintetis dengan menggunakan senyawa kimia CuSO₄.5H₂O. Mengambil CuSO₄.5H₂O sebanyak 0,0078; 0,0117; 0,0157; 0,0196 gram dilarutkan dalam aquades demineralisasi sebanyak 500 ml pada pH netral dan pH asam, untuk membuat limbah sintesis dengan konsentrasi 4, 6, 8, dan 10 ppm.

Untuk pembuatan kurva standar dengan mengambil CuSO₄.5H₂O sebanyak 0,0196 gram dilarutkan dalam 500 ml Aquades demineralisasi untuk membuat larutan Cu²⁺ 10 ppm. Kemudian dilakukan pengenceran untuk mendapatkan konsentrasi 8, 6, 4, 1, dan 0,5 ppm.

Proses adsorpsi dilakukan dengan cara *batch*. Proses adsorpsi dimulai dengan mengambil 10 gram KAAB yang sudah diaktifkan dimasukkan ke dalam gelas beker, kemudian ditambahkan 400 ml limbah sintesis variasi konsentrasi (4, 8, dan 10 ppm) pada pH netral dan variasi konsentrasi (4, 6, dan 8 ppm) pada pH asam. Kemudian diaduk menggunakan stirrer pada kecepatan 700 rpm dan diambil sampel pada menit ke 0; 1; 2; 3; 4; 5; dan 10, kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring (*Whatman 42*).

Analisis hasil dalam penelitian ini menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrophotometer*) AA-6650 Shimadzu. Setelah melakukan analisis, akan didapatkan nilai konsentrasi logam berat. Model isoterm adsorpsi dapat diketahui dengan pendekatan isoterm adsorpsi Langmuir dan Freundlich, sedangkan kinetika adsorpsi diketahui dengan pendekatan model *pseudo-first-order rate* dan *pseudo-second-order rate*.

Hasil dan Pembahasan

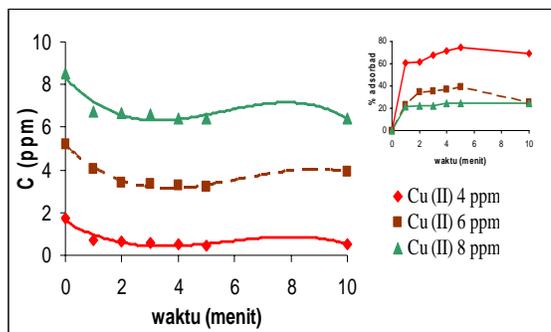
Penelitian adsorpsi ini menggunakan limbah sintesis berupa CuSO₄.5H₂O dan KAAB (Karbon Aktif Arang Batubara) sebagai adsorben dilakukan dengan berbagai variasi diantaranya variasi konsentrasi (4 ppm, 6 ppm, 8 ppm, dan 10 ppm), variasi pH (4 dan 7), dan variasi waktu (1, 2, 3, 4, 5, dan 10 menit) yang digunakan untuk mengetahui saat terjadinya kesetimbangan.

Penurunan Konsentrasi Logam Cu²⁺ Adsorpsi Pada pH asam (pH 4)

Tabel 2. Perbandingan Konsentrasi Cu²⁺ Awal (C₀) dengan Konsentrasi Cu²⁺ Setelah Adsorpsi (C)

Awal	Konsentrasi Cu ²⁺ (ppm)					
	1	2	3	4	5	10
1,7193	0,6808	0,6611	0,5545	0,4859	0,4361	0,5356
5,2089	4,0156	3,3959	3,3459	3,2659	3,1759	3,9040
8,5258	6,7136	6,6561	6,6159	6,4259	6,4161	6,4259

Tabel 2 menunjukkan hubungan antara Konsentrasi Cu²⁺ sebelum diadsorpsi (C₀) dengan setelah diadsorpsi (C). Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi logam berat Cu²⁺ semakin berkurang dengan bertambahnya waktu. Pada konsentrasi awal 1,7193 ppm dapat diadsorpsi maksimal menjadi 0,4361 ppm, 5,2089 ppm menjadi 3,1759 ppm, dan 8,5258 ppm menjadi 6,4161 ppm pada menit ke-5. Sedangkan pada menit berikutnya KAAB sudah dalam kondisi jenuh sehingga tidak dapat mengadsorpsi lagi.



Gambar 1. Grafik Hubungan Waktu Adsorpsi dengan Konsentrasi Cu²⁺ Setelah Adsorpsi (C)

Dari Gambar 1 tersebut dapat diketahui bahwa semakin lama waktu adsorpsi maka konsentrasi Cu²⁺ yang dapat diadsorpsi oleh KAAB semakin banyak. Hal ini juga dapat dilihat pada grafik di sudut kanan, bahwa jumlah

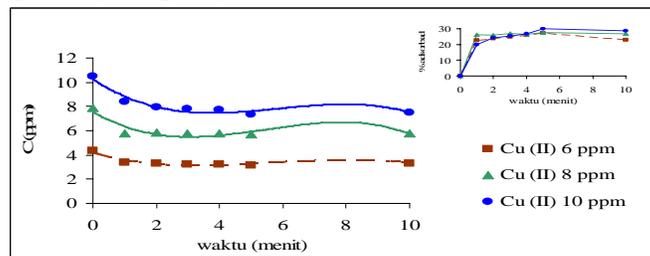
logam berat Cu^{2+} (%) yang dapat diadsorpsi semakin bertambah dengan semakin lamanya waktu adsorpsi. Pada konsentrasi Cu^{2+} 4 ppm dapat diserap oleh KAAB sebanyak 74,63%, 6 ppm (39,029%), dan 8 ppm (24, 74%).

Adsorpsi Pada pH Netral (pH 7)

Tabel 3. Perbandingan Konsentrasi Cu^{2+} Awal (C_0) dengan Konsentrasi Cu^{2+} Setelah Adsorpsi (C)
Konsentrasi Cu^{2+} (ppm)

Awal	1	2	3	4	5	10
4,3266	3,3524	3,3024	3,2524	3,2024	3,1524	3,3315
7,8548	5,8016	5,8233	5,7440	5,7780	5,6941	5,7625
10,5051	8,4096	7,9438	7,8265	7,6886	7,3597	7,5052

Tabel 3 menunjukkan hubungan antara Konsentrasi Cu^{2+} sebelum diadsorpsi (C_0) dengan setelah diadsorpsi (C). Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa konsentrasi logam berat Cu^{2+} semakin berkurang dengan bertambahnya waktu. Pada konsentrasi awal 4,3266 ppm menjadi 3,1524 ppm, 7,8548 ppm menjadi 5,6941 ppm, dan 10,5051 ppm menjadi 7,3597 pada menit ke-5. Sedangkan pada menit berikutnya KAAB sudah dalam kondisi jenuh sehingga tidak dapat mengadsorpsi lagi.



Gambar 2. Grafik Hubungan Waktu Adsorpsi dengan Konsentrasi Cu^{2+} setelah Adsorpsi (C)

Dari Gambar 2 tersebut dapat diketahui bahwa semakin lama waktu adsorpsi maka konsentrasi Cu^{2+} yang dapat diadsorpsi oleh KAAB semakin banyak. Hal ini juga dapat dilihat pada grafik di sudut kanan, bahwa jumlah logam berat Cu^{2+} (%) yang dapat diadsorpsi semakin bertambah dengan semakin lamanya waktu adsorpsi. Pada konsentrasi Cu^{2+} 6 ppm dapat diserap oleh KAAB sebanyak 27,13%, 8 ppm (27, 50%), dan 10 ppm (29,94%).

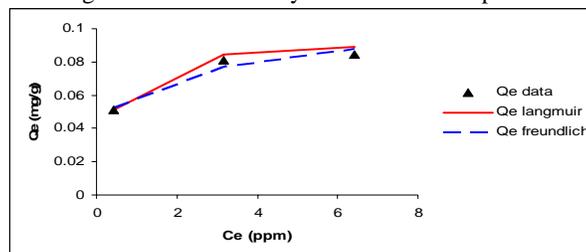
Isoterm Adsorpsi

Isoterm Adsorpsi Pada pH 4

Tabel 4. Perbandingan Konsentrasi Logam Berat Cu^{2+} (C_e) dengan Konsentrasi Solut yang Teradsorpsi (Q_e data dan Q_e hitung (Langmuir dan Freundlich))

C_e , ppm	Q_e data	Q_e hitung		Error (Q_e data-hitung) ²	
		Langmuir	Freundlich	Langmuir	Freundlich
0,4361	0,051328	0,05119	0,052105	1,80E-08	6,04E-07
3,1759	0,08132	0,08463	0,076756	1,10E-05	2,08E-05
6,4161	0,084388	0,08932	0,088044	2,44E-05	1,34E-05
Total				3,54E-05	3,48E-05

Dari Tabel 4 diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi logam berat Cu^{2+} maka konsentrasi solut yang teradsorpsi juga akan semakin tinggi. Nilai error antara Q_e data dengan Q_e hitung dengan pendekatan isoterm Langmuir sebesar $3,54 \cdot 10^{-5}$ sedangkan dengan pendekatan isoterm Freundlich sebesar $3,48 \cdot 10^{-5}$. Isoterm adsorpsi yang sesuai untuk percobaan ini dengan error lebih kecil yaitu isoterm adsorpsi Freundlich.



Gambar 3. Grafik Hubungan Konsentrasi Logam Berat Cu^{2+} Setelah Adsorpsi (C_e) dengan Konsentrasi Solut yang Teradsorpsi (Q_e data dan Q_e hitung (Langmuir dan Freundlich))

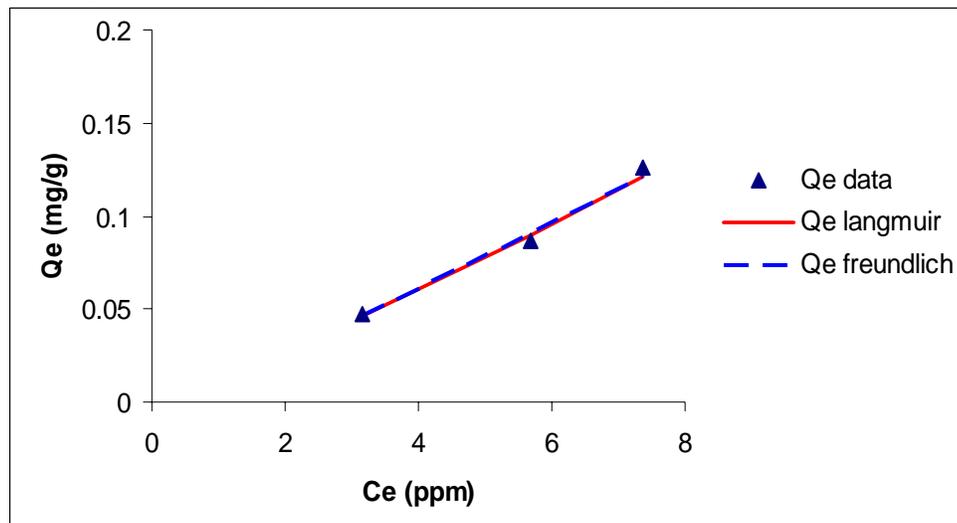
Gambar 3 menunjukkan bahwa Q_e Freundlich lebih mendekati Q_e data dari pada Q_e Langmuir ini menunjukkan bahwa isoterm adsorpsi Freundlich yang sesuai untuk data penelitian ini.

Isoterm Adsorpsi Pada pH 7

Tabel 5. Perbandingan Konsentrasi Logam Berat Cu^{2+} (C_e) dengan Konsentrasi Solut yang Teradsorpsi (Q_e data dan Q_e hitung (Langmuir dan Freundlich))

C_e , ppm	Q_e data	Q_e hitung		Error (Q_e data-hitung) ²	
		Langmuir	Freundlich	Langmuir	Freundlich
3,1524	0,04697	0,046765081	0,046275585	4,12E-08	4,79E-07
5,6941	0,08643	0,089690419	0,090767703	1,06E-05	1,88E-05
7,3597	0,12582	0,120818573	0,121590715	2,50E-05	1,79E-05
Total				3,57E-05	3,72E-05

Dari tabel 5 diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi logam berat Cu^{2+} maka konsentrasi solut yang teradsorpsi juga akan semakin tinggi. Nilai error antara Q_e data dengan Q_e hitung dengan pendekatan isoterm Langmuir sebesar $3,57.10^{-5}$ sedangkan dengan pendekatan isoterm Freundlich sebesar $3,72.10^{-5}$. Isoterm adsorpsi yang sesuai untuk percobaan ini dengan error lebih kecil yaitu isoterm adsorpsi Langmuir.



Gambar 4. Grafik Hubungan Konsentrasi Logam Berat Cu^{2+} Setelah Adsorpsi (C_e) dengan Konsentrasi Solut yang Teradsorpsi (Q_e data dan Q_e hitung (Langmuir dan Freundlich))

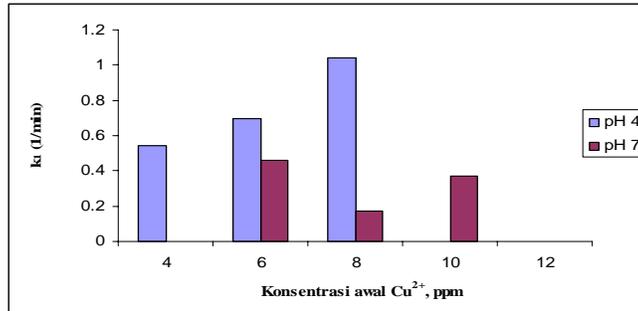
Gambar 4 menunjukkan bahwa Q_e Langmuir lebih mendekati Q_e data dari pada Q_e Freundlich, ini menunjukkan bahwa isoterm adsorpsi Langmuir yang sesuai untuk data penelitian ini.

Kinetika Adsorpsi

Tabel 6. Data Konstanta Kecepatan Adsorpsi Orde-1 (k_1) dan Orde-2 (k_2) Pada Variasi Konsentrasi Logam Berat (C_e).

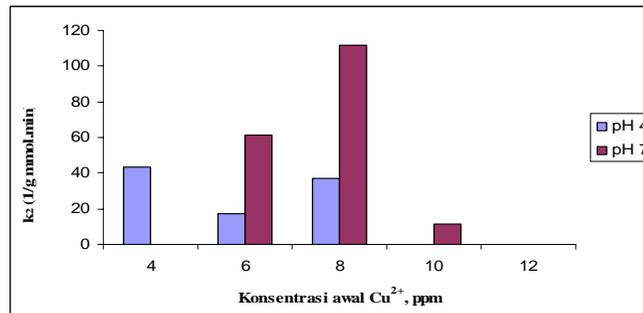
Konsentrasi Awal (C_e) (ppm)	k_1 (min^{-1})		k_2 ($g\ mmol^{-1}\ min^{-1}$)	
	pH 4	pH 7	pH 4	pH 7
4	0.5418959		43.68592256	
6	0.6959666	0.4564546	17.06717866	61.0486425
8	1.0423378	0.1695008	36.96220628	111.783907
10		0.370783		11.5740876

Dari Tabel 6 diketahui bahwa pada model *pseudo-first-order rate*, didapat nilai k_1 terbesar pada konsentrasi 8 ppm yaitu $1,0423378\ min^{-1}$ pada pH 4 dan $0,4564546\ min^{-1}$ pH 7 pada konsentrasi 6 ppm. Sedangkan pada model *pseudo-second-order rate*, didapat nilai k_2 terbesar adalah $43,68592256\ g\ mmol^{-1}\ min^{-1}$ pada pH 4 dan $111,783907\ g\ mmol^{-1}\ min^{-1}$ pada pH 7.



Gambar 5 Hubungan Konsentrasi Awal Cu²⁺ dengan Konstanta Kecepatan Adsorpsi Orde-1 (k_1)

Gambar 5 menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi logam berat Cu²⁺ (C_0) dengan konstanta kecepatan adsorpsi (k_1) pada model *pseudo-first-order rate*. Harga kesalahan relatif (R^2) sebesar 0,9467 (pada pH 4) dan 0,1355 (pada pH 7).



Gambar 6. Hubungan Konsentrasi Awal Cu²⁺ dengan Konstanta Kecepatan Adsorpsi Orde-2 (k_2)

Pada model *pseudo-second-order rate* (orde 2), harga kesalahan relatif (R^2) sebesar 0,0661 (pada pH 4) dan 0,1772 (pada pH 7). Sehingga untuk keadaan asam (pH 4) model *pseudo-first-order rate* lebih sesuai, sedangkan untuk keadaan netral (pH 7) model *pseudo-second-order rate* yang lebih sesuai pada penelitian ini.

Kesimpulan

1. Semakin tinggi konsentrasi logam berat Cu²⁺ maka akan semakin tinggi juga konsentrasi solut pada adsorben (Q) dan pada penelitian ini kesetimbangan terjadi pada menit ke-5.
2. Isoterm adsorpsi Langmuir merupakan model isoterm adsorpsi yang sesuai untuk percobaan adsorpsi logam berat Cu²⁺ dengan KAAB pada pH 7 sedangkan pada pH 4 sesuai dengan model isoterm adsorpsi Freundlich.
3. Kinetika model *pseudo-second-order rate* (k_2) lebih sesuai untuk proses adsorpsi pada pH 7 sedangkan model *pseudo-first-order rate* (k_1) sesuai untuk proses adsorpsi pada pH 4
4. Variasi pH pada penelitian ini mempengaruhi sifat dari KAAB, pada pH asam permukaan KAAB berfungsi sebagai penukar kation, sedangkan pada pH basa berfungsi sebagai penukar anion.
5. Karbon Aktif Arang Batubara (KAAB) dapat digunakan sebagai adsorben pengolahan limbah cair.

Daftar Pustaka

- Azizian, Saeid., (2004), *Kinetic models of sorption: a theoretical analysis*, Journal of Colloid and Interface Science, 276(1): 47-52..
- Cimino, G., Passerini, A., and Toscano, T., 2000, " *Removal of Toxic Cations and Cr (VI) From Aqueous Solution by Hazelnut Shell*", Wat. Res., 34, 2955-2962.
- Dewi, Kunti Sri Panca I, G., A., "Kemampuan Adsorpsi Batu Pasir yang Dilapisi Besi Oksida (Fe₂O₃) untuk menurunkan kadar Pb dalam Larutan", Jurnal Bumi Lestari, Volume 9 No. 2: 254-262.
<http://ejournal.unud.ac.id/abstrak/254.pdf>
- Dincer, Ali Riza., Gunes, Yalcin., Karakaya, Nusret. 2007. "Coal-Based Bottom Ash (CBBA) Waste Material as Adsorbent for Removal of Textile Dye-stuffs from Aqueous Solution", 141:529-535.

- Djajadiningrat, 1994, "*Pengendalian Pencemaran Limbah Industri*", ITB Press, Bandung.
- Gupta V.K., D. mohan, S. Sharma, M. Sharma, 2000, "*Removal of Basic Dyes (Rhodamineb and Methylene Blue) from Aqueous Solutions Using Bagase Fly Ash*", Sep. Science Technology, 35:2097-2113.
- Hui, K.S.,Chao,C.Y.H., Kot, S.C., 2005, "Removal of Mixed Heavy Metal Ions in Wastewater by Zeolite 4A and Residual Products from Recycled Coal Fly Ash", Journal of Hazardous Materials, B127:89-101.
- Mc. Cabe, W. Smith,J., Harriot,P. 2005. "*Unit Operation of Chemical Engineering*", 7th ed, Mc Graw-Hill, inc. New York.
- Shim, Young-Sook., Kim, Young-Keun.,Kong, Sung-Ho., Rhee, Seung-Whee., Lee, Woo-Keun., 2003, "The Adsorption Characteristics of Heavy Metals by Various Particle Sizes of MSWI Bottom Ash", Waste Management, 23:851-857
- Yang, R. T. 2003, "*Adsorbents: fundamentals and Applications*", John Wiley & Sons, Inc. 86-88
- Zou, Wehua., Han, Rungping., Chen, Zongzhang., Jinghua, Zahng., Shi, Jie.,2006, "Kinetic Study of Adsorption of Cu(II) and Pb(II) from Aqueous Solutions Using Manganese Oxide Coated Zeolite in Batch Mode, 279:238-2