

Kinetika Adsorpsi Mn dengan Memanfaatkan Bottom Ash Batubara pada Larutan Artifisial KMnO_4

Endang Supraptiah¹⁾, Aisyah Suci Ningsih²⁾, Hilwatulisan³⁾

^{1),2),3)} Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara Bukit Besar Palembang
Email : endang.supraptiah@polsri.ac.id

Abstrak. Eksplorasi batubara dengan cara penambangan akan menghasilkan limbah air tambang. Air limbah tambang sebagian besar terdiri dari air asam tambang dan lumpur. Air limbah tambang batubara mengandung residu, menyebabkan keasaman, dan mengandung kandungan besi dan mangan yang jika dibuang langsung ke lingkungan akan menyebabkan kerusakan lingkungan yaitu tercemarnya sungai-sungai disekitar daerah pertambangan. Salah satu pengolahan air asam tambang agar dapat memenuhi baku mutu air sungai yaitu dengan cara mengadsorpsi kandungan logam Mn yang terkandung dengan menggunakan bottom ash. Berbagai variabel digunakan dalam penelitian ini, antara lain variasi waktu adsorpsi (20 – 80 menit), dan jenis aktivator dengan merancang alat pengendap. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mempelajari kinetika adsorpsi yang terjadi pada proses pengurangan Mn yang nantinya dapat memberikan informasi bahwa bottom ash dapat diaplikasikan sebagai alternatif adsorben. Waktu yang cukup baik untuk melakukan penyerapan Mn adalah 80 menit, dalam berat adsorben 40 gram, dan pH 5. Model adsorpsi Bottom Ash batubara terhadap air asam tambang mengikuti model Isoterm adsorpsi Freundlich pada seluruh keadaan, nilai $K_f = 0,01964 \text{ mg/gr}$ dengan koefisien korelasi (R^2) 0,9646 untuk aktivator NaOH sedangkan untuk aktivator HCl didapatkan $K_f = 0,0081 \text{ mg/gr}$ dengan $R^2 = 0,9794$. Kinetika model pseudo orde satu sesuai untuk proses adsorpsi Mn dengan bottom ash aktivator HCl dan NaOH. Nilai konstanta kecepatan adsorpsi untuk Mn dengan bottom ash HCl dan NaOH untuk konsentrasi 3 ppm adalah $0,0169 \text{ menit}^{-1}$ dengan $R^2 = 0,8453$ dan $0,1066 \text{ menit}^{-1}$ dengan $R^2 = 0,7956$.

Kata kunci: adsorpsi, bottom ash, langmuir, isoterm freundlich

1. Pendahuluan

Sumatera Selatan merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki banyak industri, di antaranya industri pertambangan batubara. Batubara merupakan salah satu bahan pertambangan yang digunakan untuk PLTU. Proses pembakaran batubara untuk menghasilkan tenaga dalam industri akan menghasilkan sisa pembakaran yang disebut abu terbang (*fly ash*) serta abu dasar (*bottom ash*) yang apabila tidak dimanfaatkan dengan sebaik - baiknya akan dapat mengganggu kesehatan manusia dan lingkungan.

Abu dasar (*bottom ash*) adalah abu yang terbentuk di bawah tungku proses pembakarannya. Residu pembakaran batubara berupa padatan yaitu abu layang (*Fly Ash*) dan abu dasar (*Bottom Ash*), dimana dari limbah tersebut, sekitar 80-90% adalah abu layang dan 10-20% adalah abu bawah (Perera dan Trautman, 2006)[1]. Selama ini, abu bawah dimanfaatkan sebagai material urugan tanah karena memiliki heterogenitas yang tinggi (Álvarez-ayuso dkk., 2007)[2]. Bentuk pemanfaatan dari limbah *bottom ash* lainnya adalah menjadikannya adsorben. *Bottom ash* juga dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan zeolit sintetis untuk menyerap logam berat dan juga sebagai media filtrasi (Deperindag Bandung, 2006)[3]. Sebagai adsorben, *bottom ash* memiliki keuntungan yaitu harganya yang ekonomis dan baik digunakan dalam pengelolaan limbah gas ataupun cair, serta mampu menyerap logam-logam berat yang terkandung dalam limbah.

Adsorben adalah zat padat yang dapat menyerap partikel fluida dalam suatu proses Adsorpsi. Aktivasi adsorben adalah suatu perlakuan terhadap *bottom ash* yang bertujuan untuk memperbesar pori yaitu dengan cara memecahkan ikatan hidrokarbon atau mengoksidasi molekul-molekul permukaan sehingga *bottom ash* mengalami perubahan sifat, baik fisika maupun kimia, yaitu luas permukaannya bertambah besar dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan aktivator terbaik untuk *bottom ash* terhadap penyerapan logam berat dalam air limbah tambang sebagai adsorben dengan melihat reaksi kinetiknya.

Adsorpsi

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibedakan 2 jenis yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia (Treybal, 1980)[4].

1. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya *Van der Waals*. Gaya *Van der Waals* adalah gaya tarik-menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Pada adsorpsi fisika, adsorbat tidak terikat kuat pada adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan adsorben ke bagian permukaan adsorben lainnya dan pada permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat tersebut dapat digantikan oleh adsorbat lainnya. Adsorpsi fisika merupakan peristiwa reversibel sehingga jika kondisi operasinya diubah, maka akan membentuk kesetimbangan yang baru. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi ini dapat diputuskan dengan mudah yaitu dengan pemanasan pada temperatur sekitar 150 – 200 °C selama 2 – 3 jam.

2. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kimia antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk merupakan lapisan monolayer. Pada adsorpsi kimia yang penting adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan monolayer sehingga pendekatan yang digunakan adalah dengan menentukan kondisi reaksi. Adsorpsi kimia tidak bersifat reversibel dan umumnya terjadi pada suhu tinggi diatas suhu kritis adsorbat. Oleh karena itu, untuk melakukan proses desorpsi dibutuhkan energi yang lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat

Mekanisme Adsorpsi

Menurut Reynolds (1982)[5], mekanisme penyerapan adsorben terhadap zat terlarut terbagi menjadi 4 tahap diantaranya :

1. Transfer molekul-molekul zat terlarut yang teradsorpsi menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben.
2. Difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui lapisan film yang mengelilingi adsorben (*film diffusion process*).
3. Difusi zat terlarut teradsorpsi melalui kapiler atau pori dalam adsorben (*pore diffusion process*).
4. Adsorpsi zat terlarut yang teradsorpsi pada dinding pori atau permukaan adsorben

Kinetika Adsorpsi

Adsorpsi merupakan fenomena di mana sejumlah kuantitas gas atau larutan menetap pada suatu permukaan. Sebagai contoh kontak antara gas atau larutan pada suatu logam. Interaksi yang terjadi akan menyebabkan sifat permukaan logam mengalami perubahan. Gas atau larutan yang tertarik disebut adsorbat sedangkan permukaan logam disebut adsorben (McCash, 2001)[6]. Model isotherm adsorpsi yang umum digunakan ada dua macam yaitu isotherm Langmuir dan isotherm Freundlich.

a. Adsorpsi Isotherm Langmuir

Langmuir mengembangkan suatu Model kuantitatif untuk menjelaskan fenomena isotherm adsorpsi dengan pendekatan kinetika. Analog dari penurunan persamaan adsorpsi pada gas, Langmuir mengasumsikan bahwa pada permukaan adsorben terdapat situs-situs aktif yang proporsional dengan luas permukaan. Model ini berdasar pada beberapa asumsi, yaitu (Sembodo, 2006)[7] :

1. Permukaan adsorben bersifat homogen, sehingga energi adsorpsi konstan pada seluruh bagian.
2. Tiap atom teradsorpsi pada lokasi tertentu di permukaan adsorben.
3. Tiap bagian permukaan hanya dapat menampung satu molekul atau atom.

Penurunan persamaan isotherm adsorpsi Langmuir sistem cair-padat didasarkan pada kesetimbangan proses adsorpsi dan desorpsi adsorbat di permukaan padatan. Model persamaan Langmuir dinyatakan sebagai berikut:

$$q_c = \frac{Qb C_e}{1 + bC_e} \dots\dots\dots(1)$$

bentuk linear persamaan tersebut dinyatakan dalam:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_b} + \frac{C_e}{Q} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana q_e adalah jumlah adsorbat yang teradsorpsi per unit berat oleh adsorben (mg g^{-1}), C_e adalah konsentrasi adsorbat dalam keadaan setimbang (mg L^{-1}), sedangkan Q dan b adalah konstanta Langmuir. Nilai dari Q dan b dapat diperoleh dari intersep dan slope dari plot persamaan C_e/q_e versus C_e .

b. Adsorpsi Isotherm Freundlich

Isotherm Freundlich digunakan untuk model kinetika adsorpsi pada permukaan adsorben yang heterogen. Bentuk linear dari persamaan Freundlich dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \dots\dots\dots(3)$$

dimana K_F dan n adalah konstanta Freundlich. Bentuk linear dari persamaan Freundlich dinyatakan dalam persamaan :

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(4)$$

Konstanta K_F dan n merupakan kapasitas adsorpsi dan intensitas adsorpsi. Nilai K_F dan n diperoleh dari intersep dan slope dari plot grafik antara $\log q_e$ versus $\log C_e$.

Metodologi Penelitian

1. Persiapan Bahan Baku

- Perendaman bahan baku dengan air hangat.
- Pengayakan bahan baku

2. Proses Aktivasi

Proses aktivasi dibagi menjadi dua, yaitu aktivasi kimia (dengan *activating agent*) dan aktivasi fisika (tanpa *activating agent*). Pada penelitian ini, digunakan proses aktivasi kimia. Proses aktivasi pada penelitian ini menggunakan *activating agent* yaitu HCl sebagai asam kuat dan NaOH sebagai basa kuat dengan konsentrasi 0,5 M pada 500 ml. Menyiapkan 200 gr *bottom ash* yang telah di preparasi dan dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi larutan *activating agent*. Campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 180 menit atau hingga homogen. Setelah proses aktivasi selesai, campuran dibilas dengan aquadest hingga pHnya mencapai 7 (netral) dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 5 jam. Setelah itu *bottom ash* baru siap dipakai sebagai adsorben.

3. Proses Adsorpsi

- Mencampur air asam tambang dengan *bottom ash* dengan berat *bottom ash* 40 gr.
- Mendiamkan campuran air asam tambang dan *bottom ash* dengan waktu kontak 20 sampai 80 menit.
- Setelah terjadi sedimentasi, diambil sampel secara kontinyu dan dilakukan analisa dengan menggunakan Spektrofotometer AAS

2. Pembahasan

Penelitian adsorpsi ini menggunakan larutan artifisial KmnO_4 dan *Bottom Ash* batubara sebagai adsorben dilakukan dengan berbagai variasi penyerapan diantaranya variasi waktu (10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit), variasi aktivator yang digunakan untuk menentukan pengaruh variabel dan menentukan metode kesetimbangan adsorpsi. Proses penyerapan atau adsorpsi oleh suatu adsorben dipengaruhi banyak faktor dan juga memiliki pola isotherm adsorpsi tertentu yang spesifik

Tabel 1. Data hasil penelitian penyerapan *bottom ash* dengan aktivator HCl 0,5 M terhadap logam mangan (Mn)

Konsentrasi Larutan Artifisial	Waktu Kontak (Menit)	Kandungan Logam Mn (mg/l)
3 ppm	20	2,02
	40	2,01
	60	1,85
	80	1,65
4 ppm	20	3,23
	40	2,80
	60	2,38
	80	2,28
5 ppm	20	3,34
	40	3,67
	60	3,16
	80	2,93

Tabel 2. Data hasil penelitian penyerapan *bottom ash* dengan aktivator NaOH 0,5 M terhadap logam mangan (Mn)

Konsentrasi Larutan Artifisial	Waktu Kontak (Menit)	Kandungan Logam Mn (mg/l)
3 ppm	20	1,88
	40	1,71
	60	1,15
	80	1,14
4 ppm	20	2,91
	40	2,38
	60	2,38
	80	1,55
5 ppm	20	3,74
	40	2,46
	60	2,46
	80	1,80

Isoterm Langmuir dan Freundlich

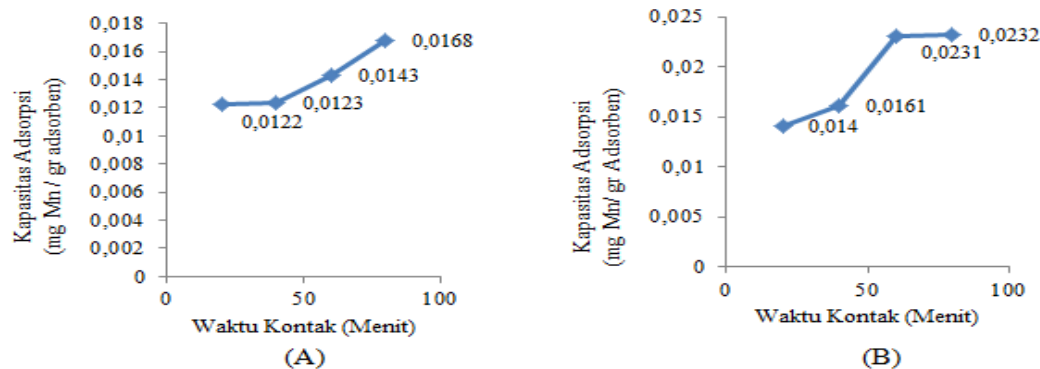
Dalam penelitian ini, diajukan model Isoterm Langmuir dan Freundlich. Hal ini dilakukan untuk melihat model Isoterm adsorpsi manakah yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Hubungan penurunan konsentrasi logam Mn dalam adsorben merupakan data percobaan yang digunakan untuk penentuan laju adsorpsi logam Mn. Data percobaan tersebut kemudian dihubungkan secara linear pada model isoterm adsorpsi, yaitu Langmuir dan Freundlich sehingga didapatkan konstanta laju adsorpsi (k). Model isoterm Langmuir dan Freundlich merupakan persamaan yang lazim digunakan untuk menggambarkan data adsorpsi dari suatu larutan. Tidak semua data percobaan dapat sesuai dengan penggunaan model isoterm adsorpsi Langmuir ataupun Freundlich karena masing-masing model memiliki asumsi tersendiri.

Regresi merupakan persamaan matematik yang menduga hubungan antara satu peubah bebas (dalam hal ini konsentrasi logam Mn dalam adsorben yang kemudian disebut q_e) dengan satu peubah tak bebas (dalam hal ini konsentrasi logam Mn dalam air asam tambang yang kemudian disebut c_e). Regresi hubungan antara q_e dengan c_e ditransformasikan mengikuti bentuk persamaan garis lurus (linear). Sementara itu, ukuran untuk melihat tingkat kesesuaian dengan data percobaan ditentukan berdasarkan koefisien determinasi (R^2) terbesar. Nilai parameter adsorpsi isotermal menggunakan model Langmuir dan Freundlich untuk masing masing perlakuan disajikan pada Tabel 3

Tabel 3. Kestimbangan Adsorpsi Langmuir dan Freundlich terhadap waktu adsorpsi Dengan Aktivator HCl 0,5 M dan NaOH 0,5 M

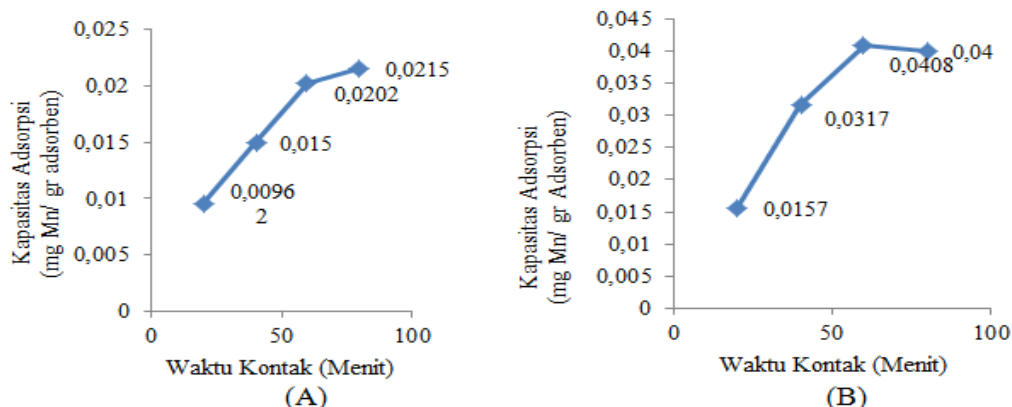
Parameter	Langmuir			Freundlich		
	K_L (L/mg)	Q_m (mg/gr)	R^2	K_f (mg/gr)	N	R^2
NaOH	-0,0669	-0,2785	0,9732	0,01964	0,8739	0,9646
HCl	-0,1693	-0,0443	0,9781	0,0081	0,6548	0,9794

Pengaruh Aktivasi *Bottom Ash* Terhadap Kapasitas Adsorpsi Logam Mangan (Mn) di Dalam Larutan Artifisial $KMnO_4$



Gambar 1. Kapasitas Adsorpsi Logam Mangan dengan *bottom ash* dalam Konsentrasi 3 ppm $KMnO_4$.
(A) Aktivator HCl (B) Aktivator NaOH

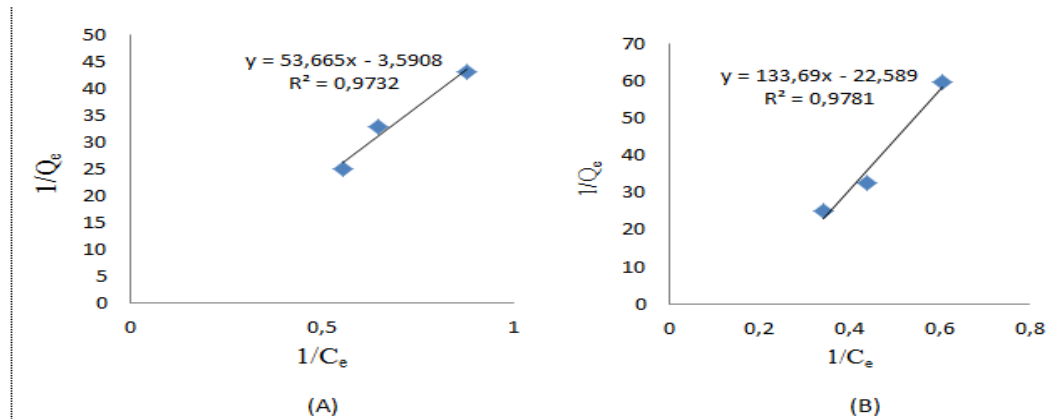
Adsorpsi terhadap logam mangan (Mn) dalam larutan artifisial 3 ppm terlihat jelas pada gambar 1 untuk *bottom ash* dengan aktivator HCl dan aktivator NaOH bahwa semakin lama waktu kontak *bottom ash* terhadap larutan artifisial $KMnO_4$ maka semakin banyak konsentrasi logam mangan (Mn) yang teradsorpsi baik dari aktivator HCl maupun NaOH. Grafik tersebut menunjukkan bahwa dengan aktivator NaOH dapat menyerap konsentrasi logam mangan (Mn) lebih besar dibanding aktivator HCl.



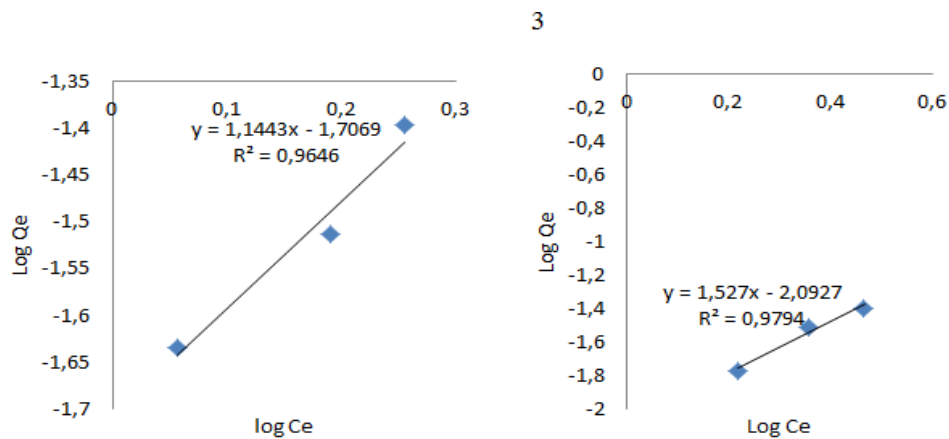
Gambar 2. Kapasitas Adsorpsi Logam Mangan dengan *bottom ash* dalam Konsentrasi 4 ppm $KMnO_4$.
(A) Aktivator HCl (B) Aktivator NaOH

Perbandingan adsorpsi mangan (Mn) pada gambar 2 terdapat perbedaan kapasitas adsorpsi terhadap aktivator HCl dan aktivator NaOH yang menunjukkan bahwa dengan menggunakan aktivator NaOH penyerapan logam mangan lebih besar dibandingkan aktivator HCl. Pada waktu 80 menit, adsorpsi dengan menggunakan aktivator HCl mampu menyerap logam mangan sebesar 0,0215 mg. Sedangkan adsorpsi dengan menggunakan aktivator NaOH mampu menyerap logam mangan sebesar 0,04 mg dalam konsentrasi artifisial 4 ppm. Konsentrasi artifisial sebesar 4 ppm sama terhadap konsentrasi air asam tambang.

Kesetimbangan Adsorpsi Langmuir dan Freundlich terhadap waktu adsorpsi



Gambar 3. Model Isoterm Langmuir untuk variasi waktu terhadap penurunan kadar logam Mn dengan variasi Aktivator (A) NaOH 0,5 M (B) HCl 0,5 M



Gambar 4. Model Isoterm Freundlich untuk variasi waktu terhadap penurunan kadar logam Mn dengan variasi Aktivator (A) NaOH 0,5 M (B) HCl 0,5 M

Dari gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa model isoterm Langmuir, Freundlich sama – sama menunjukkan korelasi yang sangat baik dengan data – data percobaan, ditandai dengan tingginya nilai koefisien determinasi. Untuk model Langmuir, Freundlich dengan R^2 adalah 0,9732, 0,9781 untuk aktivator NaOH dan 0,9646; 0,9794 untuk aktivator HCl. Jika mengacu pada tingginya koefisien determinasi pada kedua model tersebut, maka dapat dikatakan bahwa kesetimbangan adsorpsi Mn oleh *bottom ash* dapat direpresentasikan dengan baik oleh model isoterm Langmuir dan Freundlich.

Dari gambar 3a, dapat dilihat bahwa penurunan Mn dengan *bottom ash* yang diaktivasi dengan NaOH mempunyai harga koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9732 lebih besar 0,6. Hubungan tersebut signifikan dan linier, diperkirakan logam Mn teradsorpsi oleh adsoben. Dari persamaan garis lurus $y = 53,665x - 3,5908$. Harga konstanta Langmuir sebesar -0,0669 L/mg. Penurunan logam Mn yang diaktivasi dengan HCl juga mempunyai harga koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9781 lebih besar 0,6. Hubungan tersebut signifikan dan linier, diperkirakan logam Mn teradsorpsi oleh adsoben. Dari persamaan garis lurus $y = 133,69x - 22,589$. Harga konstanta Langmuir sebesar -0,1693 L/mg. Dari perbedaan keduanya dapat dilihat bahwa *Bottom ash* yang diaktivasi dengan HCl lebih baik dari *bottom ash* yang diaktivasi dengan dikarenakan harga dari koefisien determinasi (R^2) lebih besar.

Isoterm Freundlich sering digunakan dalam adsorpsi pada zat cair. Asumsi dari isoterm ini didasarkan bahwa ada permukaan heterogen dengan beberapa tipe pusat adsorpsi yang aktif. Isoterm Freundlich juga menjelaskan bahwa proses adsorpsi pada bagian permukaan adalah heterogen dimana tidak semua permukaan adsorben mempunyai daya adsorpsi.

Harga konstanta Freundlich sebesar 0,01964 mg/gram pada Mn (aktivator NaOH) mempunyai harga determinasi (R^2) sebesar 0,9646 lebih besar dari 0,6, sedangkan pada Mn (aktivator HCl) mempunyai harga determinasi (R^2) sebesar 0,9794 dengan Harga konstanta Freundlich sebesar 0,0081 mg/gram. Dari perbedaan keduanya dapat dilihat bahwa Mn (aktivator HCl) lebih baik dibandingkan Mn (aktivator NaOH), hal tersebut dibuktikan dengan nilai konstanta Freundlich serta harga dari koefisien determinasi (R^2). Pada penelitian ini, model Isoterm Freundlich lebih sesuai digunakan untuk penyerapan logam Mn dengan bottom ash yang diaktivasi oleh HCl dan NaOH, dilihat dari nilai konstanta Langmuir yang negatif, hal ini diperkirakan proses penyerapan yang terjadi tidak sempurna dan masih banyak adsorben yang tidak mampu menyerap logam Mn atau cenderung balik lagi.

Kinetika Adsorpsi

Adapun beberapa model kinetika adsorpsi yang diajukan sebagai berikut :

Model orde satu pseudo

$$\frac{dQ}{dt} = k(Q_s - Q) \dots\dots\dots(5)$$

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

Model orde dua pseudo

$$\frac{dQ}{dt} = k(Q_s - Q)^2 \dots\dots\dots(6)$$

Dimana k adalah konstanta kecepatan adsorpsi orde-2.

Tabel 4. Data konstanta Kecepatan Adsorpsi Orde Satu dan Orde Dua

Parameter		K_1 (menit^{-1})	R^2	K_2 ($\text{g.mmol}^{-1}\text{menit}^{-1}$)	R^2
HCl	3 ppm	0,0169	0,8453	4,5946	0,7745
	4 ppm	-0,0124	0,2026	17,895	0,8222
	5 ppm	-10^{-6}	10^{-9}	4,0904	0,4035
NaOH	3 ppm	0,1066	0,7956	189,6	0,7532
	4 ppm	0,0123	0,75	0,9291	0,75
	5 ppm	0,027	0,75	1,9994	0,75

Dari tabel 4 diketahui bahwa pada model *pseudo first order rate*, didapat k_1 terbesar pada bottom ash yang diaktivasi HCl yaitu $0,0169 \text{ min}^{-1}$, sedangkan yang diaktivasi NaOH yaitu $0,1066 \text{ min}^{-1}$. Pada nilai k_2 terbesar adalah $17,895 \text{ g.mmol}^{-1}\text{menit}^{-1}$ pada bottom ash yang diaktivasi HCl dan $189,6 \text{ g.mmol}^{-1}\text{menit}^{-1}$ pada bottom ash yang diaktivasi NaOH. Jika dilihat dari ralatnya (R^2) maka kinetika adsorpsi ini memenuhi kinetika adsorpsi orde satu pseudo, dikarenakan pada orde dua ralat yang didapatkan cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan model kinetika adsorpsi orde satu

3. Kesimpulan

1. Penyerapan logam Mn pada larutan artifisial KMnO_4 menggunakan adsorben *bottom ash* yang diaktivasi dengan NaOH 0,5 M didapatkan adsorpsi yang paling tinggi yaitu mampu menyerap logam mangan (Mn) dalam konsentrasi 5 ppm sebesar 51,87%.
2. Data percobaan memiliki tingkat kesesuaian terbaik dengan model isoterm Freundlich. Model isoterm Freundlich menunjukkan lapisan adsorbat yang terbentuk pada permukaan adsorben adalah multilayer dimana tidak semua permukaan adsorben mempunyai daya adsorpsi yang sama.
3. Kinetika model pseudo orde satu sesuai untuk proses adsorpsi Mn dengan bottom ash aktivator HCl dan NaOH. Nilai konstanta kecepatan adsorpsi untuk Mn dengan bottom ash HCl dan NaOH untuk konsentrasi 3 ppm adalah $0,0169 \text{ menit}^{-1}$ dengan $R^2 = 0,8453$ dan $0,1066 \text{ menit}^{-1}$ dengan $R^2 = 0,7956$

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Sriwijaya yang telah memberikan dana PNPB tahun anggaran 2018. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan - rekan yang telah membantu dalam proses penelitian ini

Daftar Pustaka

- [1] Perera, S. D. dan Trautman, L. R., 2006. Geopolymers With The Potential for Use as Refractory Castables. *Azojomo*, 2, 132-140.
- [2] Álvarez-ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Vázquez, E. and Barra M., 2007, Enviromental, Physical, and structural characterization of Geopolymer Matrixes Synthesisd from coal (co)combustion fly ashes, *Journal of Hazardous Material*, 154: 175-183.
- [3] Deperindag Bandung, 2006. Sosialisasi Program Terpadu Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Batubara Dalam Rangka Peningkatan Daya Saing Industri Tekstil. Dep. Perindustrian Bandung, 24- 2-2006, <http://www.disperindagbali.go.id/includes/lengkap.2.php>.
- [4] Treybal, Robert. E, 1980, Mass Transfer Operations, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company
- [5] Reynolds, Tom, D. 1982. Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. Wadsworth Inc: California
- [6] Mc.Cash. E.M., 2001, Surface Chemistry, Oxford : Oxford University Press
- [7] Sembodo, B.S.T., 2006, Model Kinetika Langmuir untuk Adsorpsi Timbal pada Abu Sekam Padi, *Ekulibrium*, 5 (1) : 28–33 Sembodo, B.S.T., 2006, Model Kinetika Langmuir untuk Adsorpsi Timbal pada Abu Sekam Padi, *Ekulibrium*, 5 (1) : 28–33 Sembodo, B.S.T., 2006, Model Kinetika Langmuir untuk Adsorpsi Timbal pada Abu Sekam Padi, *Ekulibrium*, 5 (1) : 28–33