

**Pemanfaatan Abu Bawah Batubara (*Bottom Ash*) Teraktivasi Sebagai
Adsorben Ion Logam Cd^{2+}**

Ratih Kusuma W, Handoko Darmokoesoemo, Aning Purwaningsih

Program Studi S1 Kimia, Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Airlangga

Email: ratieh.wardanie@gmail.com

Abstract

Through this research, it has been done the use of activated bottom ash as an adsorbent of metal ion Cd^{2+} . This study attempts to find out the capability of NaOH to activate the bottom ash, determine adsorption equalization model for the waste of activated bottom ash in adsorbing heavy metal Cd^{2+} , determine the value of adsorption capacity for the waste of activated bottom ash in adsorbing heavy metal Cd^{2+} . Analysis of adsorption type, adsorption kinetic and adsorption thermodynamic of metal ion Cd^{2+} were used for characterizing the adsorption of metal ion Cd^{2+} on an activated bottom ash. In order to upgrade the absorption capability of bottom ash, the bottom ash was activated using NaOH 3M. There was an improvement of absorption capability of activated bottom ash than it was before. It was 40,81% before an activation, and 72,47% after activation. Based on the result of adsorption process, it was found that optimal contact time and optimal concentrate of adsorption process metal ion Cd^{2+} on activated bottom ash were 160 minutes and 55 ppm. The adsorption type of metal ion Cd^{2+} by activated bottom ash is Freundlich isotherm adsorption. The appropriate kinetic was second reaction period with the k value is $4 \times 10^{-4} \text{L.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$. The absorption process of metal ion Cd^{2+} on activated bottom has had endotherm reaction of which ΔH_{ads} value was $+12,5134 \text{ kJ.mol}^{-1}$ and it was physic reaction for it had ΔH_{ads} value which was less than $20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$. The value of adsorption Gibbs energy (ΔG_{ads}) decreases, it shows that the reaction of metal ion Cd^{2+} adsorption happened spontaneously and the value of adsorption entropy energy is positive and it gets bigger as the increase of its temperature.

Key word: Activating bottom ash, Cd²⁺ adsorption, Isoterm adsorption

Abstrak

Pada penelitian ini telah dilakukan pemanfaatan abu bawah batubara (*bottom ash*) teraktivasi sebagai adsorben ion logam Cd²⁺. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kemampuan NaOH untuk mengaktivasi abu bawah batubara, menentukan model persamaan adsorpsi limbah abu bawah batubara (*bottom ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi logam berat Cd²⁺, menentukan harga kapasitas adsorpsi limbah abu bawah batubara (*bottom ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi ion-ion logam berat Cd²⁺. Analisa jenis adsorpsi, kinetika adsorpsi dan termodinamika adsorpsi ion logam Cd²⁺ digunakan untuk mengkarakteristik adsorpsi ion logam Cd²⁺ pada abu bawah teraktivasi. Untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi abu bawah batubara, Abu bawah batubara diaktivasi menggunakan NaOH 3M. Terjadi peningkatan kemampuan adsorpsi pada abu bawah batubara teraktivasi dibanding sebelum aktivasi yaitu 40,81% menjadi 72,47%. Hasil yang diperoleh pada proses adsorpsi menunjukkan bahwa waktu kontak optimum dan konsentrasi optimum proses adsorpsi ion logam Cd²⁺ pada abu bawah teraktivasi berturut-turut adalah 160 menit dan 50 ppm. Jenis adsorpsi ion logam Cd²⁺ oleh abu bawah teraktivasi adalah adsorpsi isoterm Freundlich. Kinetika yang sesuai yakni orde reaksi dua, dengan harga k sebesar $4 \times 10^{-4} \text{ L.mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Proses adsorpsi ion logam Cd²⁺ pada abu bawah teraktivasi mengalami reaksi endoterm dengan harga ΔH_{ads} sebesar $+12,5176 \text{ kJ.mol}^{-1}$ dan merupakan reaksi fisika karena memiliki harga ΔH_{ads} kurang dari $20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Harga energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) menurun menunjukkan reaksi adsorpsi ion logam Cd²⁺ berjalan spontan dan harga energi entropi adsorpsi bernilai positif dan semakin besar dengan meningkatnya temperatur.

Kata Kunci: aktivasi abu bawah, adsorpsi Cd²⁺, adsorpsi isoterm

Pendahuluan

Dewasa ini, persediaan bahan bakar minyak mentah di Indonesia semakin menipis disertai dengan harga yang sangat fluktuatif. Melalui pertimbangan tersebut di atas, digunakanlah batubara sebagai sumber bahan bakar pengganti bahan bakar minyak karena produksi batubara di Indonesia sangat melimpah dan diperkirakan akan terus meningkat. Berdasarkan perhitungan Pusat Sumber Daya Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, jumlah sumber daya batubara Indonesia tahun 2005 adalah sebesar 61,366 miliar ton, dengan cadangan sebesar 6,7 miliar ton dan sumber daya batubara tersebut tersebar di 19 propinsi (Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara, 2006).

Pembakaran batubara menghasilkan residu berupa gas dan padatan. Penanganan residu berupa gas dapat dilakukan dengan teknik *purifikasi* gas buangan sebelum dilepas ke udara bebas, sehingga diharapkan tidak menimbulkan pencemaran udara yang serius (Rahmi, 2006).

Residu pembakaran batubara berupa padatan yaitu abu layang (*Fly Ash*) dan abu bawah (*Bottom Ash*), dimana dari limbah tersebut, sekitar 80-90% adalah abu layang dan 10-20% adalah abu bawah (Perera dan Trautman, 2006). Namun, sampai saat ini abu bawah hanya dimanfaatkan sebagai material urugan tanah karena memiliki heterogenitas yang tinggi (Álvarez-ayuso dkk., 2007).

Akumulasi residu berupa padatan atau yang disebut dengan abu, dapat diprediksi akan menimbulkan suatu masalah baru jika tidak segera dipersiapkan usaha pemanfaatan abu batubara tersebut (Rahmi, 2006). Namun, salah satu kendala pemanfaatan limbah ini secara luas adalah kandungan dan sifat-sifat kimia dari limbah batubara (abu layang dan abu bawah).

Dampak negatif lain dari era industrialisasi adalah bertambahnya jumlah limbah dari berbagai proses produksi yang dibuang ke lingkungan. Salah satu kandungan limbah industri yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan adalah logam berat, seperti timbal, kadmium, krom, nikel, arsen dan merkuri.

Ion kadmium (Cd) adalah salah satu ion logam berat yang penyebarannya sangat luas di alam dengan tingkat toksisitas di bawah logam merkuri dan timbal.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001, kandungan logam untuk timbal (Pb) dan kadmium (Cd) tidak boleh melebihi 0,03 ppm dan 0,01 ppm pada suatu perairan (Rahman, 2006). Upaya mengatasi limbah logam berat telah dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan menggunakan adsorben. Beberapa penelitian telah dilakukan, salah satunya adalah penelitian oleh Polowczyk dkk. (2010) yaitu mencoba memanfaatkan limbah abu layang sebagai adsorben ion logam arsen melalui aktivasi oksida-oksida logam abu layang seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan oksida lainnya. Aktivasi oksida-oksida logam abu layang dilakukan melalui hidrasi oksida logam dalam air selama 168 jam. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan logam arsen mampu teradsorpsi dalam abu layang. Penelitian lain yang dilakukan oleh Fahmi dkk. (2009) telah menunjukkan peningkatan gugus ikatan $-\text{OH}$ dan $-\text{ONa}$ pada geopolimer berbahan dasar abu layang dengan penambahan NaOH .

Dengan semakin bertambahnya limbah abu bawah batubara maka dilakukan pemanfaatan dengan cara mengaktivasi abu bawah batubara menggunakan NaOH sehingga dapat digunakan sebagai adsorben untuk meminimalkan konsentrasi ion logam berat kadmium (Cd).

Metode Penelitian

Material

Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah aqua demineralisasi, aqua destilasi, NaOH , HNO_3 pekat, $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, dan abu bawah batu bara (*bottom ash*).

Persiapan dan karakterisasi adsorben abu bawah batubara

Abu bawah batubara yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari power plant PT. Wilmar Nabati Indonesia yang terletak di Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik.

Abu bawah yang akan digunakan sebagai adsorben dikeringkan untuk menghilangkan kandungan air di dalamnya, dengan cara dipanaskan pada temperatur 105°C dalam oven selama 12 jam. Selanjutnya abu bawah diayak dengan ukuran 60 mesh. Kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan X-ray

Flourecence (XRF) untuk mengetahui komposisi kimianya dan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengetahui morfologi abu bawah batubara.

Aktivasi abu bawah batubara

Sebanyak 31,25 gram abu bawah dicampur dengan 250 mL larutan NaOH 3 M. Campuran tersebut kemudian dipanaskan dan distirrer pada suhu 85-90°C selama 5 jam. Hasil perlakuan tersebut disaring dan residu yang dihasilkan dikeringkan dalam oven pada temperatur 105oC selama 12 jam (Irani, 2009). Selanjutnya, abu bawah yang telah diaktivasi dihaluskan dan diayak dengan ukuran 60 mesh untuk menghomogenkan ukuran partikel. Abu bawah yang telah teraktivasi dengan NaOH diamati perubahan fasanya dengan XRF dan perubahan morfologinya dengan SEM, Hasilnya kemudian dibandingkan dengan abu bawah sebelum diaktivasi.

Adsorpsi ion Cd^{2+} oleh abu bawah batubara teraktivasi

Abu bawah teraktivasi sebanyak 10 gram dicampur dengan 100 mL larutan ion Cd^{2+} 10 ppm. Campuran diaduk sebanyak 60 kali dan larutan adsorbat diambil dengan variasi waktu 40, 80, 120, 160, 200, dan 240 menit. Prosedur ini dilakukan juga untuk adsorbat dengan konsentrasi 20, 30, 40, 50, 60, dan 70 ppm. Filtrat diukur absorbansinya dengan menggunakan spektrometer serapan atom pada panjang gelombang maksimum logam kadmium.

Penentuan parameter termodinamika

Abu bawah teraktivasi sebanyak 10 gram dicampur dengan 100 mL larutan ion Cd^{2+} dengan konsentrasi optimum yang telah didapatkan pada prosedur sebelumnya. Campuran diaduk sebanyak 60 kali pada suhu 30°C dan larutan adsorbat diambil sesuai dengan waktu optimum yang didapatkan pada prosedur sebelumnya. Prosedur ini dilakukan juga untuk temperatur 40, 50, 60, 70°C. Filtrat diukur absorbansinya dengan menggunakan spektrometer serapan atom pada panjang gelombang maksimum logam kadmium.

Hasil Dan Pembahasan

Preparasi dan Karakterisasi Abu Bawah Batubara

Abu bawah batubara yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari power plant PT. Wilmar Nabati Indonesia, Gresik. Menurut Kurama dan Kaya (2007), pada umumnya abu bawah batubara terdiri atas beberapa bahan anorganik yaitu silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO). Hal tersebut sesuai dengan hasil XRF abu bawah batubara yang telah diperoleh pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi abu bawah batubara sebelum aktivasi

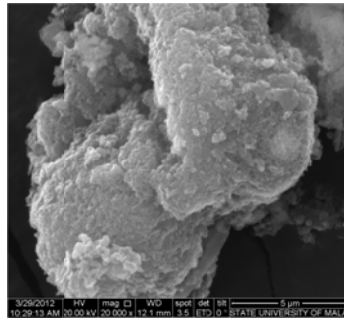
Unsur	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)
Al	3,4	Fe	22,1
Si	7,46	Ni	0,18
S	0,63	Cu	0,082
K	0,65	Sr	0,58
Ca	56,7	Mo	4,0
Ti	1,0	In	1,9
V	0,05	Ba	0,4
Cr	0,075	Yb	0,06
Mn	0,28	Re	0,35

Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa abu bawah batubara yang digunakan dalam penelitian ini sebagian besar tersusun atas SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dan CaO karena keempat unsur tersebut memiliki kadar yang tinggi dibandingkan dengan unsur yang lain.

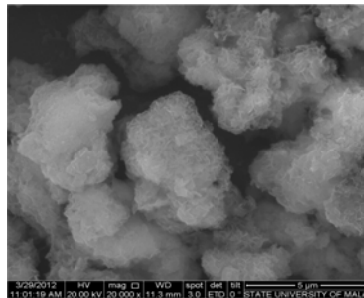
Proses Aktivasi Abu Bawah Batubara

Larutan NaOH yang bersifat basa kuat ini dapat merusak lapisan luar abu bawah dan menyebabkan terjadinya perubahan prosentase jumlah unsur atau senyawa yang terkandung dalam abu bawah. Dengan rusaknya lapisan luar abu bawah yang rapat ini maka gugus-gugus aktif yang ada didalamnya, seperti silika dan alumina, keluar ke permukaan abu bawah. Bila proses aktivasi abu bawah dilakukan pada konsentrasi OH^- yang terlalu tinggi maka rantai *glassy* silika-alumina yang rapat akan cepat rusak dan menyebabkan gugus aktif yang ada di dalam abu bawah akan cepat terlarut pula (Yan dkk., 2003 dan Goni dkk., 2003).

Komposisi abu bawah sesudah aktivasi dapat dilihat pada tabel 2. Sedangkan morfologi abu bawah sebelum dan sesudah aktivasi dapat dilihat pada gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Morfologi abu bawah batubara sebelum aktivasi (perbesaran 20.000 kali)



Gambar 2. Morfologi abu bawah batubara sesudah aktivasi (perbesaran 20.000 kali)

Pada gambar 1 dan gambar 2 terlihat perbedaan morfologi abu bawah sebelum dan setelah aktivasi. Abu bawah batubara sebelum aktivasi berbentuk amorf, kemudian setelah diaktivasi permukaan abu bawah batubara terlapisi endapan pejal seperti kerak yang membuat permukaan abu bawah batubara menjadi lebih kasar.

Tabel 2. Komposisi abu bawah batubara sesudah aktivasi

Unsur	Kadar (%)	Unsur	Kadar (%)
Al	1	Mn	0,35
Si	4,2	Fe	30,2
P	0,44	Ni	0,29
K	0,0	Cu	0,17
Ca	57,1	Sr	1,0

Ti	1,4	In	1,6
V	0,08	Ba	0,79
Cr	0,14	Eu	0,2
Yb	0,09	Hg	0,52

Larutan basa kuat dalam hal ini NaOH dapat mengubah komposisi abu bawah dengan cara merusak lapisan luar abu bawah sehingga silika dan alumina yang ada dalam abu bawah keluar ke permukaan abu bawah dan menyebabkan terjadinya perubahan prosentase jumlah unsur atau senyawa yang dikandung abu bawah. Hal tersebut terbukti dari data analisa XRF yang telah ditampilkan pada tabel 1 dan 2. Unsur Si pada abu bawah sebelum diaktivasi sebesar 7,46 %, sedangkan pada abu bawah sesudah aktivasi berkurang menjadi 4,2%. Begitu pula yang terjadi pada unsur Al, dimana terjadi perubahan kadar Al yang semula 3,4% menjadi 1%.

Adsorpsi Ion Logam Cd^{2+} oleh Abu Bawah Batubara Teraktivasi

Proses aktivasi abu bawah batubara dengan larutan NaOH dapat merusak lapisan luar abu bawah batubara yang rapat, sehingga gugus-gugus aktif yang ada didalamnya, seperti silika dan alumina, keluar ke permukaan abu bawah. Dengan keluarnya gugus-gugus aktif yang ada di dalam abu bawah tersebut, maka akan meningkatkan aktivitas abu bawah seperti dalam hal penyerapan logam berat.

Perbandingan kemampuan adsorpsi abu bawah batubara sebelum dan sesudah aktivasi ditampilkan dalam tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan kemampuan adsorpsi abu bawah batubara sebelum dan sesudah aktivasi

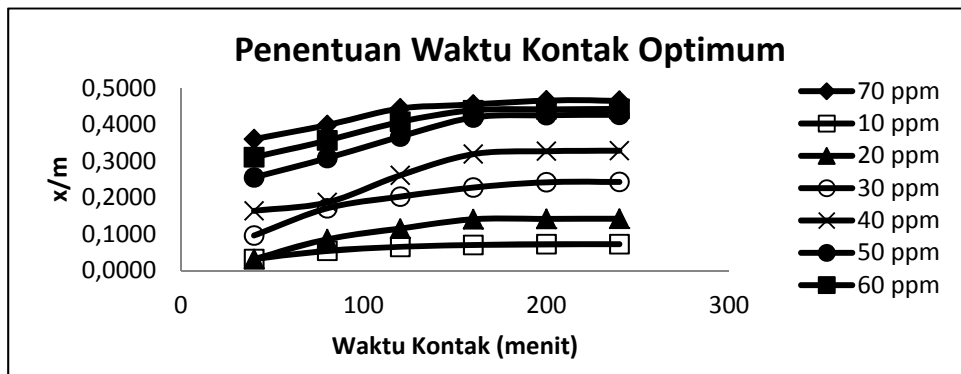
Keterangan \ Adsorben	Abu bawah batubara sebelum aktivasi	Abu bawah batubara sesudah aktivasi
Massa (gr)	10	10
Konsentrasi awal (ppm)	30	30
Waktu pengambilan (menit)	160	160
Konsentrasi sisa (ppm)	17,7574	8,2593
Efisiensi penghilangan	40,81%	72,47%

Dari hasil yang diperoleh pada tabel 3, terlihat bahwa aktivasi terhadap abu bawah dapat meningkatkan kemampuan abu bawah untuk mengadsorpsi ion logam Cd^{2+} . Hal tersebut ditunjukkan pada efisiensi penghilangan ion logam Cd^{2+} pada abu

bawah teraktivasi menjadi hampir dua kali lebih besar daripada abu bawah sebelum aktivasi.

Proses adsorpsi ion logam Cd^{2+} pada abu bawah batubara teraktivasi

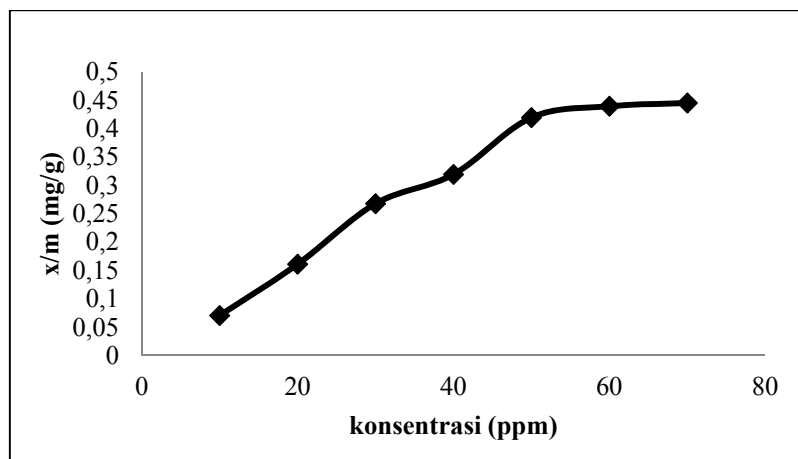
Penentuan isoterm adsorpsi dilakukan pada waktu kontak optimum untuk tiap variasi konsentrasi.



Gambar 3 Kurva kapasitas adsorpsi abu bawah teraktivasi terhadap waktu kontak

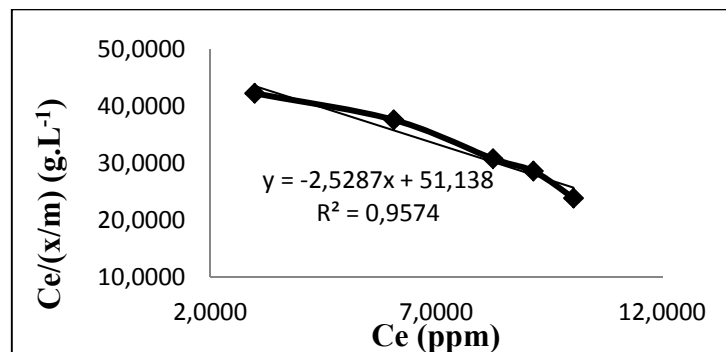
Pada gambar 3 terlihat bahwa waktu kontak optimum adsorpsi ion logam Cd^{2+} terjadi pada 160 menit, dimana pada waktu 160 menit terjadi penyerapan ion logam Cd^{2+} paling banyak.

Penentuan isoterm adsorpsi dilakukan pada waktu kontak 160 menit dan pada variasi konsentrasi 10, 20, 30 40, dan 50 ppm. Hal tersebut sesuai dengan penentuan konsentrasi optimum adsorpsi ion logam Cd^{2+} yang ditunjukkan pada gambar 4.

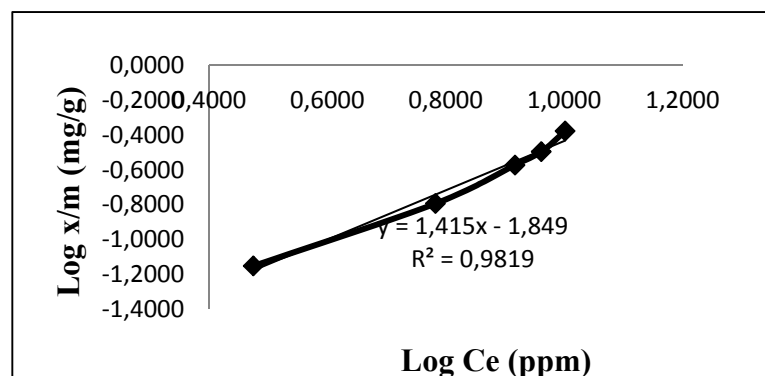


Gambar 4 Kurva hubungan antara kapasitas adsorpsi (x/m) ion logam Cd^{2+} terhadap konsentrasi ion logam Cd^{2+}

Pada persamaan isoterm adsorpsi Langmuir dibuat kurva hubungan $C_e/(x/m)$ terhadap C_e yang ditunjukkan pada gambar 5. Sedangkan persamaan isoterm adsorpsi Freundlich dibuat kurva hubungan $\text{Log}(x/m)$ terhadap $\text{Log } C_e$ yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 5. Kurva isoterm adsorpsi Langmuir

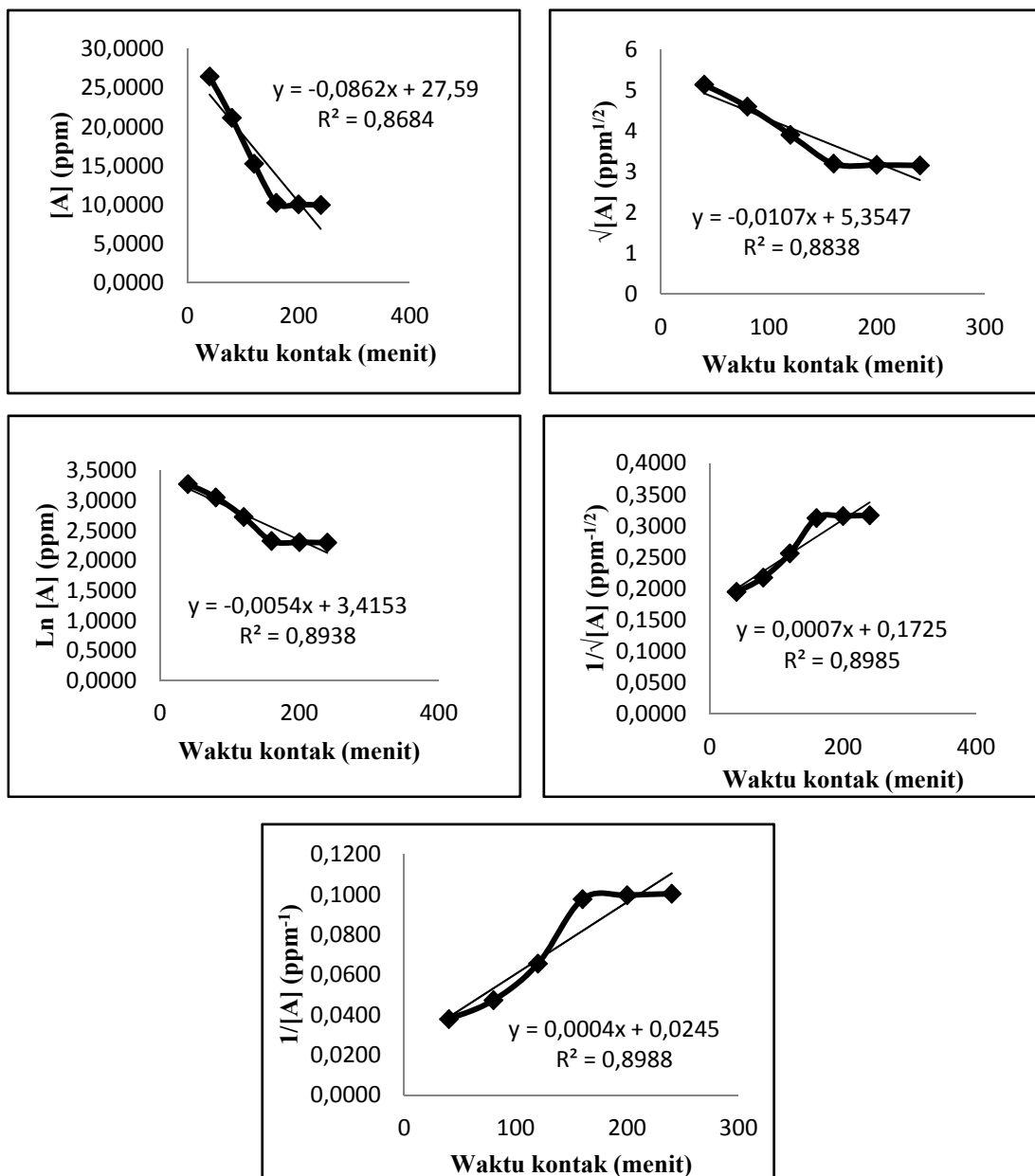


Gambar 6. Kurva isoterm adsorpsi Freundlich

Dari nilai R^2 kedua persamaan adsorpsi isoterm tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa pola adsorpsi ion logam Cd^{2+} oleh abu bawah batubara mendekati persamaan adsorpsi isoterm Freundlich karena memiliki nilai R^2 yang lebih besar dengan nilai n dan k berturut-turut 0,7067 dan 0,0142.

Penentuan kinetika reaksi dilakukan ada konsentrasi optimum yaitu 50 ppm pada tiap variasi waktu. Kinetika reaksi digunakan untuk menentukan orde

reaksi dari proses adsorpsi ion logam Cd^{2+} pada abu bawah teraktivasi. Berikut adalah grafik penentuan orde reaksi 0, 1/2, 1, 3/2, dan 2 secara berurutan.



Gambar 7. Penentuan orde reaksi

Dari kelima gambar diatas, dapat disimpulkan bahwa orde reaksi yang sesuai untuk proses adsorpsi ion logam Cd^{2+} pada abu bawah teraktivasi adalah orde reaksi dua. Hal tersebut dikarenakan pada kinetika reaksi orde dua memiliki nilai R^2 paling besar yaitu sebesar 0,8988 dengan tetapan laju reaksi adsorpsi ion logam Cd^{2+} pada abu bawah teraktivasi sebesar $0,0004 \text{ L.mg}^{-1}.\text{menit}^{-1}$.

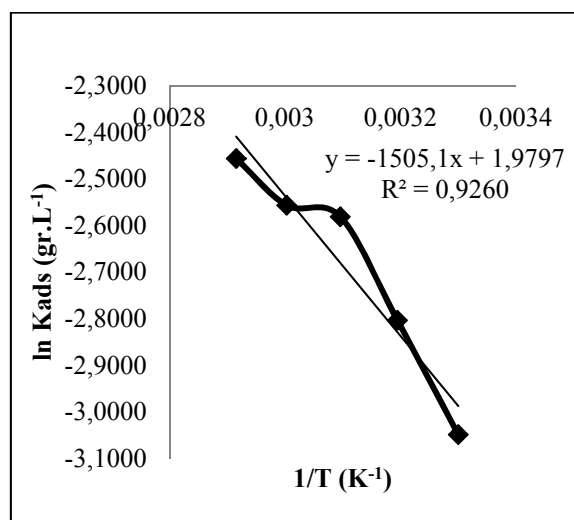
Penentuan parameter termodinamika

Pada penelitian ini, parameter-parameter termodinamika yang ditentukan antara lain entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads}).

Penentuan harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}) dengan membuat kurva hubungan $\ln K_{\text{ads}}$ terhadap $1/T$. Data penentuan (ΔH_{ads}) ditampilkan pada tabel 4. dan kurva hubungan $\ln K_{\text{ads}}$ terhadap $1/T$ ditampilkan pada gambar 8.

Tabel 4. Data penentuan ΔH_{ads}

Suhu (K)	Konsentrasi awal (ppm)	Konsentrasi sisa (ppm)	x/m (mg/g)	K _{ads} (gr.L ⁻¹)	Ln K _{ads} (gr.L ⁻¹)	1/T (K ⁻¹)
303	50	9,0667	0,4294	0,0474	-3,0491	0,0033
313	50	7,3630	0,4464	0,0606	-2,8035	0,0032
323	50	6,0711	0,4593	0,0757	-2,5809	0,0031
333	50	5,9385	0,4606	0,0776	-2,5562	0,0030
343	50	5,4296	0,4657	0,0858	-2,4557	0,0029



Gambar 8. Kurva hubungan $\ln K_{\text{ads}}$ terhadap $1/T$

Harga slope dari kurva diatas digunakan untuk menentukan (ΔH_{ads}), dimana harga slope = $-\Delta H/R$ dengan harga $8,314 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$. Berdasarkan perhitungan pada lampiran 4, didapatkan harga ΔH_{ads} sebesar $+12,5134 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Dengan mendapatkan harga ΔH_{ads} , maka dapat dijelaskan bahwa proses adsorpsi antara larutan ion logam Cd^{2+} dengan abu bawah teraktivasi berjalan secara endoterm. Proses adsorpsi ini merupakan reaksi endoterm karena reaksi tersebut membutuhkan kalor. Hal tersebut terlihat bahwa kapasitas adsorpsi meningkat dengan bertambahnya temperatur. Parameter termodinamika yang selanjutnya ditentukan adalah energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads}).

Tabel 5. Data parameter termodinamika adsorpsi

Parameter Termodinamika adsorpsi	Terperatur (K)				
	303	313	323	333	343
$\Delta G_{ads} (\text{kJ.mol}^{-1})$	7,6811	7,2955	6,9308	7,0770	7,0029
$\Delta S_{ads} (\text{kJ.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0,0159	0,0167	0,0173	0,0163	0,0161

Dari tabel 4.8 dapat dilihat bahwa pada temperatur 303 K dan 323 K energi bebas bernilai semakin kecil. Hal tersebut menjelaskan bahwa reaksi dapat berjalan secara spontan jika ada energi (Zuhriyah, 2005). Pada temperatur 303 K dan 323 K harga energi entropi adsorpsi bernilai positif dan semakin besar dengan meningkatnya temperatur. Dari hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya energi entropi pada sistem adsorpsi, menyebabkan ion-ion logam yang terserap pada adsorben semakin tidak teratur (Zuhriyah, 2005).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa NaOH mampu mengaktivasi abu bawah batubara. Hal tersebut dapat dilihat dari peningkatan kemampuan abu bawah batubara teraktivasi dalam mengadsorpsi ion logam Cd^{2+} . Persamaan adsorpsi isoterm ion logam Cd^{2+} pada abu bawah batubara teraktivasi sesuai dengan persamaan adsorpsi isoterm Freundlich. Kapasitas adsorpsi ion logam Cd^{2+} pada abu bawah

batubara pada temperatur 303 K, 313 K, 323 K, 333 K, dan 343 K berturut-turut sebesar 0,4294 mg/g; 0,4464 mg/g; 0,4593 mg/g; 0,4606 mg/g; 0,4657 mg/g.

Daftar Pustaka

1. 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.
2. Fahmi, M.Z., Fansuri, H. dan Atmaja, L., 2009, *Pola Hubungan antara Rasio SiO₂/Na₂O dengan Mikrostruktur Geopolimer berbahan Dasar Abu Layang*, Tesis, Magister Kimia ITS, Surabaya
3. Goni, S., A. Guerrero, M.P. Luxan, A. Macias., 2003, **Activation of The Fly Ash Pozzolanic Reaction by Hydrothermal Conditions**, *Chemistry Concrete Research*, 33: 1399-1405.
4. Irani K., Fansuri, H. dan Atmaja. L., 2009, *Modifikasi Permukaan Abu Layang Menggunakan NaOH dan Aplikasinya untuk Geopolimer: Sifat Fisik dan Mekanik*, Tesis, Magister Kimia ITS, Surabaya.
5. Kurama, H. dan Kaya, M., 2007, **Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture**, *Construction and Building Material*, 22: 1922-1928.
6. Perera, S.D. and Trautman L.R., 2006, **Geopolymers with the Potential for Use as Refractory Castables**, *Azajomo*, 2: 132-140
7. Polowczyk, I., Drag, E., Bastrzyk, A. and Sadowski, Z., 2010, **Use of fly ash agglomerates for removal of arsenic**, *Environ Geochem Health*, 32: 361–366.
8. Rahman, A., 2006, **Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Beberapa Jenis Krustasea Di Pantai Batakan dan Takisung Kabupaten Tanah Laut Kalimantan Selatan**, *Bioscientiae*, 3: 93-101.
9. Rahmi, L.A., 2006, *Pemanfaatan Abu Layang Batubara Untuk Stabilisasi Ion Logam Berat Besi (Fe³⁺) dan Seng (Zn²⁺) Dalam Limbah Cair Buangan Industri*, Tugas Akhir II, Program Strata 1, Jurusan Kimia Universitas Negeri Semarang, Semarang.

10. Tim Kajian Batubara Nasional Kelompok Kajian Kebijakan Mineral dan Batubara, 2006, *Batubara Indonesia*, Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara
11. Yan, S., A.L. Cai, F.X. Yu, C.H. Jiang, 2003, **Dissolving Mechanism of High Sulfate Fly Ash in Water**, *Journal Nanjing University Technology*, 25: 17-22.
12. Zuhriyah, A.L., 2005, *Studi Termodinamika Adsorpsi Zat Warna Malachite Green Oleh Arang Aktif Tempurung Kelapa*, Skripsi, Jurusan Kimia, Fakultas MIPA UNAIR, Surabaya.