



Kapasitas Adsorpsi Bentonit terhadap Sulfur dan Merkuri secara Simultan pada Pembakaran Batubara

Adsorption Capacity of Bentonite on Sulfur and Mercury Simultaneously in Coal Combustion

Alhamidi Yusran¹, M. Dani Supardan^{1,2}, Mahidin^{1,2*}

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, PPs Unsyiah, Banda Aceh

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Unsyiah, Banda Aceh

Jl. Tgk. Syekh Abdur Rauf No. 7, Darussalam, 23111, Banda Aceh

*E-mail: mahidin@unsyiah.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi melalui pembakaran langsung akan menghasilkan emisi gas, partikulat *trace metal* (logam berat) dan abu (terutama abu terbang) yang akan mencemari udara. Penanganan terhadap pencemaran tersebut merupakan hal yang sangat mendesak. Dalam studi ini ditawarkan penyelesaian secara simultan terhadap emisi SO_x dan partikulat logam berat merkuri pada pembakaran batubara peringkat rendah yang ada di Aceh melalui penyerapan menggunakan bentonit alam yang juga terdapat di Aceh (juga di daerah lain di Indonesia). Penggunaan bentonit dapat mengurangi emisi gas SO₂ dan partikulat *trace metal* Hg dalam gas buang dan abu terbang. Bentonit dapat meningkatkan afinitas atau gaya tarik menarik antara Hg dan mineral-mineral dalam bentonit dan sekaligus menurunkan afinitas Hg terhadap S atau SO₂. Konsentrasi bentonit dalam kajian ini, tanpa kalsinasi dan langsung dicampur dalam batubara, adalah 0 - 16% dan temperatur pembakaran adalah 700 - 900°C. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa kondisi maksimum penyerapan sulfur dan/atau SO₂ serta merkuri terjadi pada kandungan bentonit 6% dan temperatur 700°C.

Kata kunci: emisi gas, kapasitas adsorpsi, merkuri, partikulat, sulfur, *trace metal*

Abstract

Utilization of coal as a source of energy by direct combustion might release gas emission, trace metal (heavy metal) particulate and ash (especially fly ash) that can cause the air pollution. Reduce the air pollution is an urgent effort in the coal fired. In this study simultaneous solution on SO_x emission and mercury particulate release during Aceh low rank coal combustion through the adsorption by using natural bentonite, which can also be found in Aceh (also in others regions in Indonesia) is proposed. Use of bentonite can suppress SO₂ gas emission and trace metal particulate (Hg) in flue gas and fly ash. Bentonite can enhanced the affinity or bounding force between trace metal (Hg) and minerals in the bentonite and simultaneously lowered the affinity of Hg on S or SO₂. The bentonite concentrations in this study, without calcination and directly blended in coal, were 0 - 16% and burning temperature lied from 700 to 900°C. It was found that maximum conditions for sulfur and/or SO₂ and mercury adsorptions appeared at bentonite content of 6% and temperature of 700°C.

Keywords: adsorption capacity, gas emission, mercury, particulate, sulfur, trace metal

1. Pendahuluan

Batubara adalah batuan yang mudah terbakar yang diantara 50-70% berat volumenya merupakan bahan organik berupa material karbon, termasuk *inherent moisture*. Unsur pembentuk batubara terdiri dari unsur utama (C, H, O, N, S, Al, Si), unsur sekunder (Fe, Ca, Mg, Ba, K, Na, P, Ti), dan unsur sangat kecil (*trace*) berupa logam-logam berat (*heavy metals*) dengan berat jenis di atas 5 g/cm³. Masing-masing logam berat berkadar sangat rendah yang dinyatakan dalam ppm serta jumlahnya ada

sekitar 40 unsur yang dapat merusak lingkungan dan kesehatan, sedangkan unsur *ultimate* dan *proximate* dinyatakan dalam persen (%). Dari sejumlah logam berat tersebut, yang biasa dipertimbangkan sebagai kandidat emisi logam berbahaya hanya 10 unsur logam berat yaitu As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn (Lin dan Ho, 2005).

Komponen pembentuk batubara berdasarkan analisis proksimatter diri dari atas air (*moisture*, M), abu (*ash*), zat mudah menguap (*volatile matter*, VM) dan karbon

tertambat (*fixed carbon*, FC). Beberapa pengotor yang biasanya terkandung dalam batubara antara lain adalah abu dan unsur-unsur atau senyawa-senyawa yang keberadaannya dalam jumlah sangat kecil, baik berbentuk logam maupun non-logam (*trace element*). Secara kimia, karakteristik abu batubara sangat tergantung pada karakteristik batubara. Abu merupakan bagian batubara yang tidak bisa terbakar. Kandungan abu dalam batubara sangat bervariasi dan berkisar 3–9% (Munir, 2006). Abu batubara mengandung mineral-mineral berupa SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , dan Fe_2O_3 . Kandungan SiO_2 umumnya cukup tinggi mencapai 70% (Munir, 2008). *Trace element* yang terkandung dalam batubara bisa mempengaruhi proses pembakaran dan mengakibatkan pencemaran udara berupa partikulat dalam abu terbang dan jelaga dalam gas buang yang dihasilkan. Senyawa yang sering ditemui dalam jumlah kecil tersebut antara lain sodium, sulfur, *phosphorous*, clorida, merkuri, nitrat, sulfat dan arsen.

Sampai saat ini hanya terdapat sedikit referensi yang melaporkan tentang penyerapan emisi SO_x (senyawa sulfur lainnya) dan *traceelement* (*tracemetal*), terutama merkuri (Hg), secara simultan (Ma dkk., 2014; Wang dkk., 2013). Mereka memanfaatkan sorben berbasis besi (*iron-based sorbent*) dalam penelitian mereka masing-masing. Di pihak lain, R&D terhadap teknologi desulfurisasi menggunakan bermacam-macam adsorben atau *desulfurizer* dapat ditemukan dalam banyak publikasi (Cheng dkk., 2003; Zhou dkk., 2001). Lebih lanjut, fakta serupa juga dapat dilihat terhadap *Research and Development* (R&D) untuk penangkapan merkuri dengan berbagai adsorben, termasuk bentonit baik bentonit alam maupun bentonit yang sudah diolah/dimodifikasi (Li dkk., 2014; Wilcox dkk., 2012). Sejauh ini tidak ada R&D untuk adsorpsi emisi SO_x dan *trace mercury* menggunakan bentonit sebagai adsorben.

Ditinjau dari komponennya yang dapat teroksidasi, proses pembakaran batubara dapat menghasilkan emisi yang mempengaruhi lingkungan dan kesehatan manusia. Emisi utama yang dihasilkan dari pembakaran batubara adalah sulfur oksida (SO_x), nitrogen oksida (NO_x), partikulat, karbon dioksida (CO_2), merkuri dan logam berat lainnya, serta *fly ash* dan *bottom ash* yang merupakan residu hasil pembakaran batubara pada tungku pembakaran. Untuk mengurangi emisi gas dan logam berat dilakukan dengan penambahan adsorben

seperti zeolit, *limestone* dan bentonit. Saat ini untuk menekan kandungan sulfur dalam batubara digunakan adsorben *limestone*, namun tidak tertutup kemungkinan untuk menggunakan bentonit sebagai adsorben karenakandungansilika dan kalsium yang tinggi.

Penambahan bentonit akan menimbulkan fenomena adsorpsi padat-gas, dimana adanya adsorbat gas yang teradsorpsi dalam adsorben padat. Permukaan zat padat bentonit dapat mengadsorpsi fase padat-gas pada tekanan rendah disebabkan karena adanya pengumpulan molekul-molekul suatu zat pada permukaan zat lain sebagai akibat ketidak-seimbangan gaya-gaya pada permukaan tersebut. Biasanya adsorpsi diikuti dengan pengamatan banyaknya zat yang teradsorpsi persatuan berat adsorben pada temperatur tertentu atau temperatur tetap yang dinyatakan dengan kurva kapasitas adsorpsi.

Desulfurisasi awalnya dikembangkan untuk meningkatkan kualitas batubara, salah satunya adalah desulfurisasi dengan metode flotasi, dimana sekaligus dapat juga mereduksi kandungan abu batubara. Flotasi merupakan proses yang sangat kompleks, dimana variabel-variabel yang berpengaruh signifikan pada umumnya saling memberikan keterkaitan satu sama lain. Para peneliti hanya mengamati variabel flotasi, tidak melakukan optimasi simultan (Hlincik dan Buryan, 2013).

Pada penelitian ini diusulkan proses penyerapan SO_2 dan merkuri secara simultan dengan menggunakan adsorben bentonit alam, dimana kondisi percobaannya merupakan pendekatan terhadap proses pembakaran pada *boiler* di *powerplant* berbahan bakar batubara peringkat rendah. Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kapasitas adsorbansi bentonit sebagai penjerap SO_2 dan/atau sulfur serta merkuri, dan melihat pengaruh penambahan adsorben bentonit terhadap nilai kalor batubara peringkat rendah Aceh.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

Bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: batubara (berasal dari Kaway XVI Kabupaten Aceh Barat), bentonit alam (berasal dari Lampung) dan *reagent* asam kuat untuk Hg, yaitu HCl dan H_2SO_4 . Sedangkan peralatan yang digunakan meliputi *Crusher*, *Ball mill*, *Vibrating screen*,

Compressor, Flow meter, Electric tube furnace, Desiccator, Ceramics boat, Multi-wave, Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS), Spectrophotometer, Gelas kimia, Erlenmeyer dan Timbangan elektrik.

2.2. Kondisi Eksperimen

Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan melihat pengaruh masing-masing variabel observasi terhadap kapasitas adsorbansi bentonit dalam menyerap SO_2 dan *trace element* Hg. Kondisi eksperimen adalah sebagai berikut: massa sampel batubara dan adsorben 20 gram (curah), ukuran partikel kedua bahan tersebut lolos 60 mesh, laju alir udara = 1,5 l liter/menit (λ adalah laju alir udara stoikiometrik) (Yao dan Naruse, 2005) dan waktu pembakaran 60 menit.

Sampel dipersiapkan dengan mencampur batubara dan adsorben (bentonit) yang sudah dikeringkan di udara dengan variasi perbandingan yang telah ditentukan. Campuran diaduk sampai homogen. Sebelum dilakukan pencampuran batubara dan adsorben tersebut dikeringkan dan dihaluskan sampai ukuran lolos 60 mesh, dan kemudian ditimbang sesuai dengan perbandingan berat antara batubara dan adsorben. Selanjutnya sampel (sebanyak 20 gram) ditempatkan ke dalam *Ceramic boat*

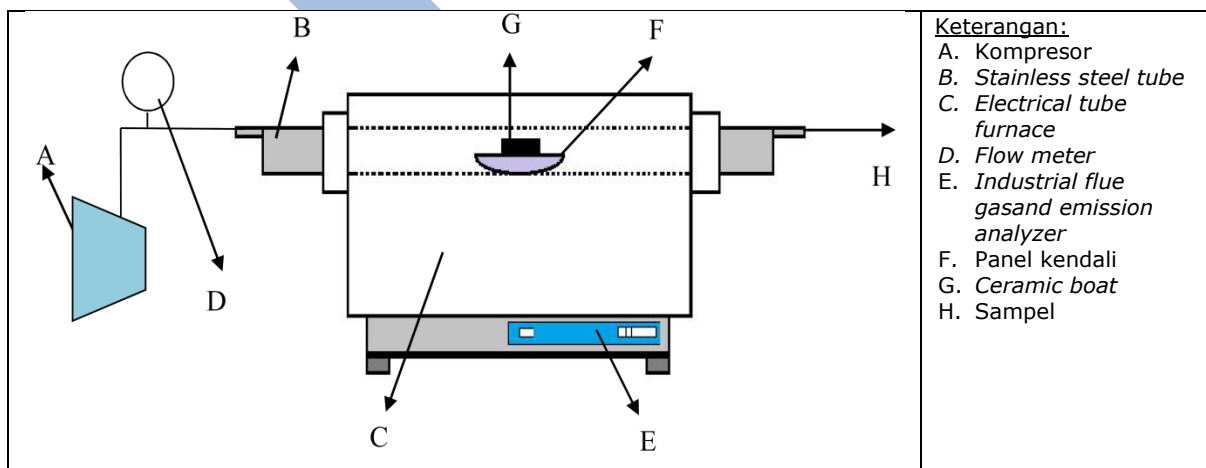
Variabel berubah (variabel pengujian) dalam studi ini mencakup temperatur pembakaran (yaitu 700, 800 dan 900°C). Interval temperatur yang ditetapkan ini merupakan kondisi pembakaran yang umum diterapkan dalam *Fluidized Bed Combustor* (FBC). Variabel pengamatan berikutnya adalah kandungan adsorben dalam campuran sampel (batubara dan bentonit) dengan

variasi 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 dan 16% (berat). Kandungan sulfur dan merkuri dalam batubara sampel dan komposisi bentonit sudah disampaikan dalam artikel yang lain (Yusran dkk., 2015).

Pembakaran batubara dilakukan dalam *Electric tube furnace* (Gambar 1), dimana sampel diletakkan dalam *Ceramic boat*. Setelah pembakaran sesuai variasi-variasi diatas selesai, didapat *bottom ash* untuk masing-masing perlakuan. *Bottom ash* yang didapat kemudian disimpan di dalam *Decicator* untuk pengkondisian suhu hasil pembakaran dengan suhu lingkungan.

Masing-masing sampel *bottom ash* yang ada dalam *Ceramic boat* kemudian dilarutkan dengan *reagent*. Sampel dibagi menjadi 3 (tiga) bagian sehingga dapat dilarutkan dengan *reagent* berupa asam kuat seperti HCl dan H_2SO_4 . Dari hasil *multiwave* didapat 81 (delapan puluh satu) sampel yang akan didigesti menggunakan *microwave*. Untuk 81 sampel tersebut, masing masing sampel dibuat larutan induknya. Prinsip kerja pada *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) yaitu dengan sistem kalibrasi larutan induk dengan larutan yang telah diencerkan karena AAS ini sangat sensitif terhadap konsentrasi larutan sampel.

Tujuan dari kalibrasi larutan induk dengan larutan hasil pengenceran tersebut adalah untuk kalibrasi sebelum dilakukan analisis dari masing-masing sampel sehingga kandungan sampel dapat dianalisis dalam skala *part per billion* (ppb) sampai dengan *part per million* (ppm). Setelah dilakukan kalibrasi AAS, selanjutnya kandungan *trace metal* (Hg) pada sampel dianalisa dengan menggunakan sinar X.



Gambar 1. Skema alat pembakaran (*Electric tube furnace*)

2.2. Evaluasi Kapasitas Adsorpsi

Kapasitas adsorpsi menggambarkan kemampuan penyerapan terhadap adsorbat per satuan berat adsorben. Nilai tersebut dapat dijadikan acuan penentuan jumlah adsorben yang digunakan dalam skala yang berbeda atau lebih besar. Dengan mengkomparasi nilai kapasitas adsorpsi dari tiap-tiap konsentrasi adsorben yang digunakan maka akan didapat kapasitas optimum pada kandungan-kandungan tertentu. Kapasitas adsorpsi ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$q = \frac{Ca - Ca_0}{M_{adsorben}} \quad (1)$$

dimana q adalah kapasitas adsorpsi, Ca adalah konsentrasi emisi setelah penambahan adsorben (bentonit), Ca_0 adalah konsentrasi emisi tanpa penambahan adsorben (bentonit) dan $M_{adsorben}$ adalah berat adsorben.

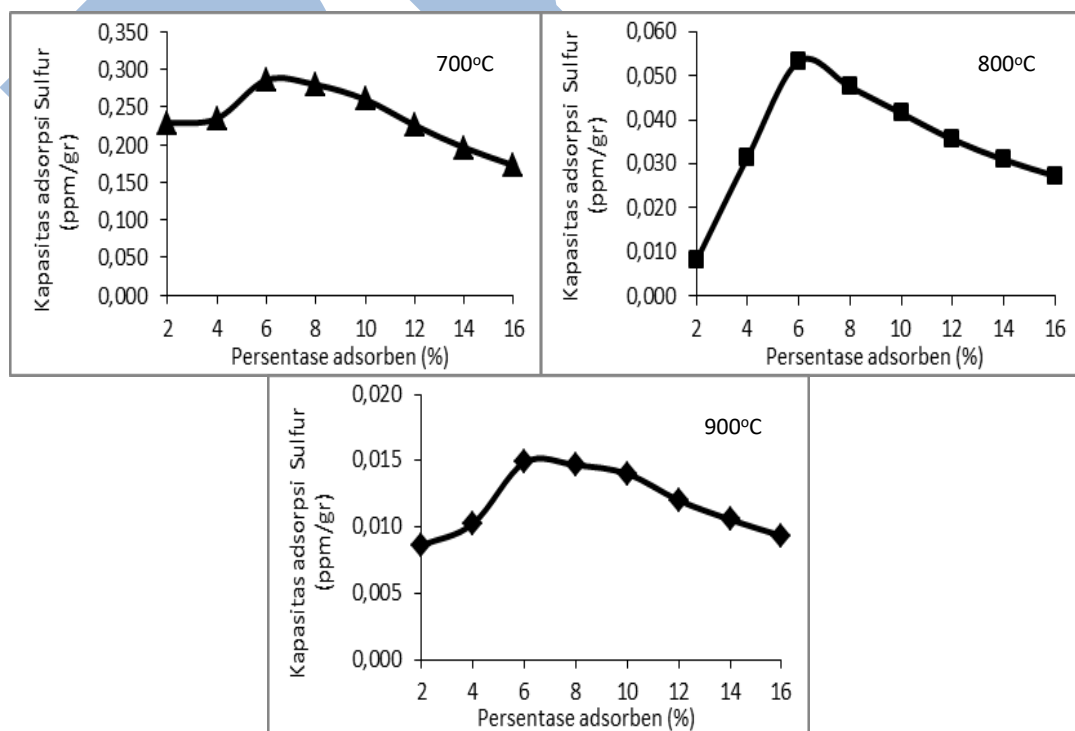
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kapasitas Penyerapan Sulfur

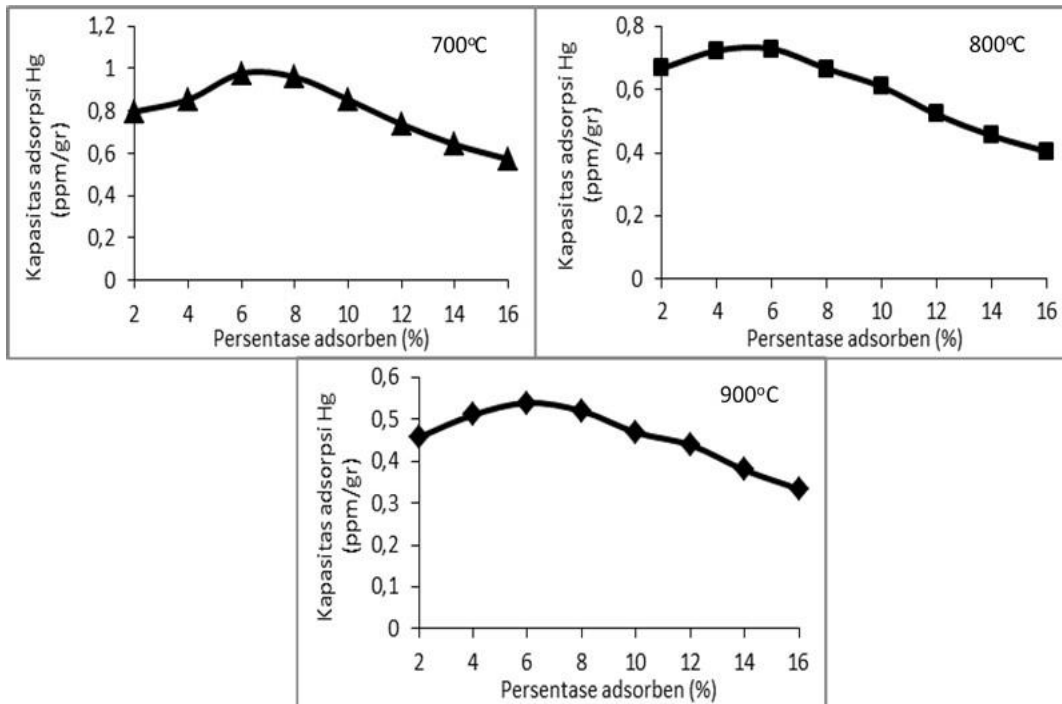
Penyerapan komponen atau senyawa kimia oleh bentonit tidaklah selektif, artinya ben-

tonit tidak secara khusus menangkap suatu unsur tertentu. Proses yang terjadi pada penyerapan sulfur dan/atau SO_2 oleh bentonit adalah adsorpsi kimia dan fisika. Pada adsorpsi kimia faktor pengendali kapasitas adsorpsi dipengaruhi oleh komposisi unsur mineral dalam bentonit, sedangkan pada adsorpsi fisika kapasitas adsorpsinya lebih dipengaruhi oleh karakteristik dari adsorben itu sendiri. Kapasitas adsorpsi sulfur dan/atau SO_2 oleh bentonit disajikan pada Gambar 2. SO_2 diperkirakan terbentuk dalam unggun batubara yang dihasilkan oleh oksidasi sulfur sebelum diserap oleh bentonit, terlebih lagi proses pembakaran dilangsungkan pada temperatur tinggi ($\geq 700^\circ C$).

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa pada temperatur pembakaran $700^\circ C$ kapasitas penyerapan bentonit terhadap sulfur dan/atau SO_2 bernilai maksimum terdeteksi pada penambahan adsorben 6%. Pada temperatur $800^\circ C$ dan $900^\circ C$ kapasitas penyerapan maksimum juga terdapat pada kandungan adsorben yang sama. Kapasitas adsorpsi pada $900^\circ C$ cenderung lebih kecil dibandingkan dengan temperatur yang lebih rendah. Hal ini diperkirakan karena semakin tinggi temperatur maka pembakaran yang terjadi semakin sempurna.

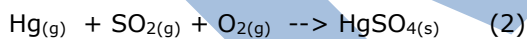


Gambar 2. Pengaruh konsentrasi adsorben terhadap kapasitas penyerapan sulfur pada masing-masing temperatur pembakaran



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi adsorben terhadap kapasitas penyerapan merkuri pada masing-masing temperatur pembakaran

Apabila mengacu kepada persamaan Arrhenius, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur maka semakin besar nilai konstanta oksidasi sehingga kecepatan reaksi konversi S menjadi SO_2 semakin besar juga. Penyebab lain tingginya sulfur dalam *bottom ash* pada temperatur rendah dikarenakan terjadinya proses adsorpsi kimia secara simultan oleh Hg terhadap SO_2 , yang reaksinya terjadi seperti pada Persamaan 2.



Proses adsorpsi SO_2 secara kimia oleh merkuri tersebut menjadi fenomena yang menguntungkan, dimana beban bentonit dalam menyerap dapat dikurangi oleh penyerapan sesama emisi. Dapat dikatakan kedua variabel tersebut saling menurunkan konsentrasinya pada *fly ash*. Penyebab tingginya Hg dalam *bottom ash* ada korelasinya dengan karbon tidak terbakar (*unburned carbon*)

Jumlah maksimum sulfur yang terserap per satuan massa bentonit berada pada rentang 0,015–0,29 ppm/gram. Hal ini menunjukkan kapasitas adsorben pada kondisi operasi yang berbeda cenderung sama. Secara ekonomis pemilihan rasio adsorben didasarkan pada kapasitas penyerapan itu sendiri. Batasan lain yang perlu diingat bahwa

peningkatan kandungan adsorben dapat menurunkan nilai bakar batubara itu sendiri (dibahas pada sub 3.3).

3.2. Kapasitas Penyerapan Logam Hg

Pada saat pembakaran di atas temperatur 700°C kandungan logam Hg diperkirakan seluruhnya menguap dan terbawa dalam *fly ash*, kecuali *particulate bounded mercury* (Hgp). Hgp adalah merkuri yang tidak terbawa *fly ash* dan diikat oleh *unburned carbon* pada *bottom ash* (Wilcox dkk., 2012). Oleh karena itu, penyerapan merkuri oleh bentonit lebih baik dan lebih signifikan terjadi pada temperatur 700°C (temperatur terendah dalam studi ini). Pada temperatur yang lebih rendah, jumlah merkuri yang menguap tentu saja lebih rendah dibanding dengan pada temperatur tinggi

Gambar 3 menunjukkan kapasitas adsorpsi logam Hg, dengan kapasitas penyerapan terendah terdapat pada temperatur pembakaran 900°C . Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa performa adsorben bentonit cenderung lebih baik pada temperatur pembakaran 700°C . Hal tersebut utamanya dipengaruhi oleh temperatur dan waktu kontak ketika terjadinya proses oksidasi batubara secara keseluruhan. Adsorpsi pada kecepatan reaksi tinggi menyebabkan sulitnya merkuri terdifusi

kedalam pori-pori adsorben akibat waktu yang lebih singkat sehingga mempengaruhi kesetimbangan gaya tarik menarik antar kedua molekul di permukaan.

Fenomena lain yang dapat menjelaskan penyebab tingginya Hg dalam *bottom ash* berhubungan erat dengan keberadaan *unburned carbon*. Morfologi *unburned carbon* sangat memungkinkan untuk menangkap Hg. *Unburned carbon* dari batubara peringkat rendah (lignit dan sub-bituminus) memiliki kemampuan menangkap Hg lebih tinggi dibandingkan batubara peringkat tinggi (antrasit dan bituminus). Luas permukaan *unburned carbon* dari batubara peringkat rendah 400 kali lebih besar dibandingkan dengan yang dari batubara peringkat tinggi. Fakta ini menjadi salah satu alasan kenapa *unburned carbon* dari batubara peringkat rendah lebih efektif dalam menangkap karbon. Fakta ini sudah diamati oleh Hower dkk. (2010) dan Kostova dkk. (2011).

Kapasitas adsorpsi merkuri oleh bentonit juga memperlihatkan nilai maksimum pada persentase adsorben sebesar 6% untuk semua temperatur pembakaran yang diuji, sebagaimana halnya sulfur. Pada penelitian sebelumnya, kandungan adsorben yang memberikan kapasitas adsorpsi optimum adalah pada harga sekitar 5% untuk adsorben batu kapur dan kaolin pada kondisi pembakaran 1,5λ serta 10% untuk kaolin berbasis kalsium dengan 1,2λ (Chen dkk., 2010). Kapasitas adsorpsi yang didapat tersebut tergolong tinggi, yaitu dalam interval 0,54–0,98 ppm/gram.

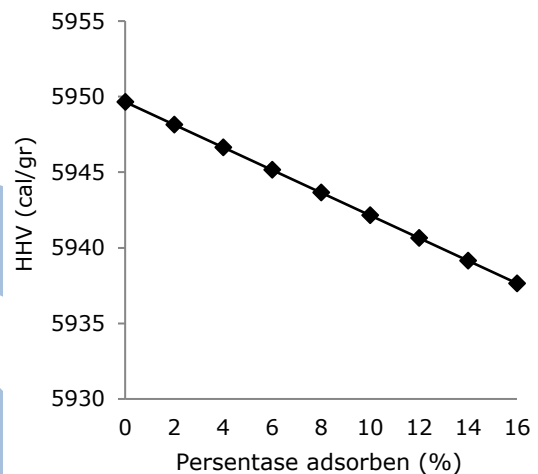
3.3. Pengaruh Penambahan Adsorben terhadap Nilai Kalori Batubara

Kandungan abu (*ash*) merupakan pengotor didalam batubara, oleh karena itu nilai kalori dalam batubara berbanding terbalik dengan kandungan abu. Diasumsikan penambahan adsorben meningkatkan fraksi abu pada komponen batubara. Nilai kalor kotor batubara diprediksi dengan menggunakan korelasi dari *Institute of Gas Technology* (IGT), karena dianggap mendekati nilai kalor dari hasil pengujian dengan menggunakan Bomb Kalorimeter (Sheng dan Azevedo, 2005).

$$HHV = 0,341C + 1,322 H + 0,0686S - 0,0153A - 0,1194(O+N) \quad (3)$$

Pengaruh penambahan adsorben terhadap nilai kalori batubara dapat dilihat pada Gambar 4. Menunjukkan bahwa penam-

bahan bentonit (adsorben) yang merupakan senyawa mineral dianggap menambah fraksi massa dari komponen inert berupa abu (*ash*) pada analisa proksimasi batubara. Semakin tinggi kandungan abu, maka semakin rendah kualitas batubara, dikarenakan dengan penambahan zat mineral menghambat proses pembakaran dan menurunkan fraksi *volatile matter* dan *fixed carbon* sehingga zat mineral tersebut merupakan penghambat dalam proses pembakaran. Dari hasil yang didapat, nilai kalori terendah terdeteksi pada kandungan adsorben 16% yaitu 5937,64 cal/gr, masih setara dengan nilai kalor batubara sub-bituminus. Dengan demikian, penambahan adsorben 16% (maksimum) masih menghasilkan nilai kalor batubara yang dianggap wajar.



Gambar 4. Hubungan antara konsentrasi adsorben dengan nilai kalori batubara

4. Kesimpulan

Adsorben bentonit alam tanpa kalsinasi dapat digunakan untuk menangkap merkuri dan sulfur dan/atau SO₂ secara simultan pada pembakaran batubara, dimana Kapasitas adsorpsi maksimum SO₂ dan/atau sulfur yang teramati pada konsentrasi adsorben 6% dan temperatur 700°C, sebesar 0,29 ppm/gram. Untuk penyerapan logam Hg juga terdeteksi pada kondisi yang sama, nilainya 0,98 ppm/gram dan secara teknis penambahan adsorben menyebabkan penurunan nilai kalor batubara. Pada penelitian ini juga ditinjau pengaruh penambahan adsorben mencapai 16%, nilai kalori yang didapat setara dengan kalor batubara sub-bituminus. Dengan demikian penambahan sampai 16% masih dianggap wajar secara teknis dan ekonomis.

Daftar Pustaka

- Chen, J., Yao, H., Zhang, P., Xiao, L., Luo, G., Xu, M. (2010) Control of PM₁ by kaolin or limestone during O₂/CO₂ pulverized coal combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 2837 - 2843.
- Cheng, J., Zhou, J., Liu, J., Zhou, Z., Huang, Z., Cao, X., Zhao, X., Cen, K. (2003) Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: a review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(5), 381 - 405.
- Hlincik, T., Buryan, P. (2013) Desulfurization of boiler flue gas by means of activated calcium oxide, *Fuel Processing Technology*, 111, 62 - 67.
- Hower, J.C., Senior, C.L., Suuberg, E.M., Hurt, R.H., Wilcox, J.L., Olson, E.S. (2010) Mercury capture by native fly ash carbons in coal-fired power plants, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(4), 510 - 529.
- Kostova, I.J., Hower, J.C., Mastalerz, M., Vassilev, S. V. (2011) Mercury capture by selected Bulgarian fly ashes: influence of coal rank and fly ash carbon pore structure on capture efficiency, *Applied Geochemistry*, 26(1), 18 - 27.
- Li, M., Wang, L., Chen, J.-y., Jiang, Y.-i., Wang, W.-j. (2014) Adsorption performance and mechanism of bentonite modified by ammonium bromide for gas-phase elemental mercury removal, *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 42(10), 1266 - 1272.
- Lin, L. Y., Ho, T. C. (2005) *Control of heavy metals in emissions streams*, dalam Wang, L. K., Pereira, N. C., Hung, Y.-T. (eds.), *Advanced Air and Noise Pollution Control*, Humana Press, Totowa, New Jersey.
- Ma, Y., Qu, Z., Xu, H., Wang, W., Yan, N. (2014) Investigation on mercury removal method from flue gas in the presence of sulfur dioxide, *Journal of Hazardous Materials*, 279, 289 - 295.
- Munir, M. (2008) Pemanfaatan Abu Batubara (Fly Ash) untuk Hollow Block yang Bermutu dan Aman bagi Lingkungan, *Tesis Magister*, Universitas Diponegoro, Indonesia.
- Munir, S. (2006) Karakteristik Batubara, Teknologi Pembakaran Batubara dan Prinsip-prinsip Pengelolaan dan Regulasi Penggunaan Abu Batubara (ccps) yang Bermanfaat, Puslitbang TekMira - DESDM.
- Sheng, C., Azevedo, J. L. T. (2005) Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy*, 28, 499 - 507.
- Wang, J., Zhang, Y., Han, L., Chang, L., Bao, W. (2013) Simultaneous removal of hydrogen sulfide and mercury from simulated syngas by iron-based sorbents, *Fuel*, 103, 73 - 79.
- Wilcox, J., Rupp, E., Ying, S.C., Lim, D., Negreira, A.S., Kirchofer, A., Feng, F., Lee, K. (2012) Mercury adsorption and oxidation in coal combustion and gasification processes, *International Journal of Coal Geology*, 90-91, 4 - 20.
- Yao, H., Naruse, I. (2005) Control of trace metal emissions by sorbents during sewage sludge combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2), 3009 - 3016.
- Yusran, A., Supardan, M. D., Mahidin. (2015) Development of Pretreatment Process for Aceh Low-rank Coal by Simultaneously Capture of Sulfur and Trace Element, *Proceedings of the 1st IJCIMBI*, Banda Aceh, 27-28 April, 208 - 214.
- Zhou, J., Chen, J., Cao, X., Liu, J., Zhao, X., Huang, Z., Cen, K. (2001) Experimental research on two-stage desulfurization technology in traveling grate boilers, *Energy*, 26(8), 759 - 774.