

BERBAGAI POTENSI POLUTAN ABU TERBANG (*FLY ASH*) HASIL PEMBAKARAN BATUBARA PADA PLTU

Sulistiyani

Jurusan Pendidikan Kimia FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta
Jl. Kolombo No. 1 Yogyakarta
sulistiyani@uny.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini bertujuan untuk memaparkan berbagai potensi polutan abu terbang (*fly ash*) hasil pembakaran pada PLTU yang dapat dikembangkan. Indonesia memiliki sejumlah PLTU yang menggunakan bahan baku batubara sebagai sumber energi. Sisi lain dari keuntungan penggunaan batubara yang harganya relatif lebih murah dibandingkan minyak bumi, ternyata batubara menghasilkan sejumlah polutan, salah satunya abu terbang (*fly ash*). Seringkali *fly ash* batubara hanya sekedar ditimbun di dalam area PLTU. Akumulasi *fly ash* dalam jumlah yang besar tentunya akan merusak lingkungan dan kesehatan. Oleh karenanya diperlukan upaya penanganan polutan tersebut. Artikel ini memaparkan sejumlah potensi *fly ash* batubara yang dapat dikembangkan sehingga berdaya guna, menghasilkan nilai ekonomis sekaligus mengatasi permasalahan polutan. Beberapa potensi yang dapat dikembangkan di antaranya penggunaan *fly ash* batubara untuk bahan baku beton, semen, dan *filler* aspal, serta konversinya menjadi adsorben.

Kata Kunci: Polutan, abu terbang (*fly ash*), batubara, PLTU.

PENDAHULUAN

Indonesia hingga saat ini tercatat memiliki 35 buah PLTU (id.wikipedia.org) dan bisa terus bertambah lagi jumlahnya sebagai upaya pemerintah untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri yang semakin meningkat. Umumnya, PLTU di Indonesia menggunakan batubara sebagai bahan bakar karena harganya yang relatif murah dan ketersediaannya yang melimpah. Akan tetapi, semakin banyak batubara yang dibakar, semakin banyak polutan yang dihasilkan, salah satunya abu terbang (*fly ash*). Konsumsi batubara di Indonesia mencapai 36 juta ton yang umumnya digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan menghasilkan sekitar 11,5 juta ton abu terbang pada tahun 2004 (Badan Pusat Statistik, 2004).

Pada dasarnya ada dua jenis abu batubara, yaitu abu dasar (*bottom ash*) dan abu terbang (*fly ash*). Abu batubara merupakan hasil pelelehan material anorganik yang terkandung dalam batubara. *Fly ash* batubara (FA) adalah partikel-partikel halus yang dikeluarkan dari pemanas (*boiler*) pada sistem PLTU. Abu yang jatuh pada bagian bawah *boiler* disebut *bottom ash*, sedangkan FA terkumpul pada alat pengendap elektrostatis atau alat filtrasi lainnya sebelum aliran gas mencapai cerobong asap (EPA, 2010).

FA terbentuk sekitar 5-20% dari massa total bahan bakar (Jala and Goyal, 2006). Menurut data Kementerian Lingkungan Hidup (2006), limbah FA yang dihasilkan mencapai 52,2 ton/hari, sedangkan limbah abu dasar mencapai 5,8 ton/hari. Akan tetapi, massa FA yang besar tersebut hanya ditumpuk begitu saja di dalam area PLTU. Akibatnya, akumulasi FA membutuhkan area penimbunan yang relatif luas dan mempersempit lahan. Selain itu, FA menghasilkan sejumlah polutan yang dapat mengurangi kesuburan tanah serta membahayakan manusia dan lingkungan. Partikel FA yang sangat kecil menyebabkan mudah tersuspensi dengan udara sehingga menyebabkan polusi udara. Batubara diketahui mengandung sejumlah logam-logam renik, seperti V, Cr, Ni, Cd, dan Pb (Patra et al, 2012), yang akan mengalami peningkatan konsentrasi setelah pembakaran. FA mengandung logam-logam sebanyak 4-10 kali dari kadar logam dalam batubaranya. Kontaminan Radiasi dari unsur-unsur radioaktif juga mungkin dihasilkan dari FA, seperti ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K (Bhangare et al., 2014).

Seringnya terpapar FA dapat menyebabkan iritasi mata, kulit, hidung, tenggorokan, sistem pernafasan, hingga keracunan. FA yang tertimbun tanah dapat membentuk lumpur, menyumbat sistem drainase, dan mengkontaminasi air tanah dengan logam-logam berat. Masyarakat di dekat tempat pembuangan FA lebih beresiko (50%) terkena penyakit kanker atau penyakit-penyakit lainnya, terutama jika mengkonsumsi air minum dari sumur setempat. Makan, minum atau menghirup bahan-bahan toksik yang terkandung pada FA juga menyebabkan efek terhadap sistem syaraf seperti penurunan daya otak dan keterlambatan perkembangan, kerusakan hati, penyakit jantung, sukar bernafas, penyakit ginjal, kendala reproduksi, sakit pada saluran pencernaan, serta terganggunya pertumbuhan tulang pada anak (EPA, 2010).

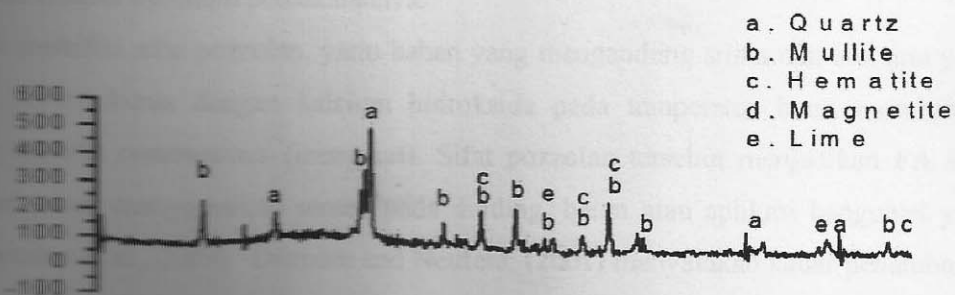
Berdasarkan uraian di atas, FA dapat menjadi sumber polutan berbahaya sehingga harus segera ditangani secara serius. Artikel ini memaparkan sifat-sifat FA dan potensi yang dapat dikembangkan. Selain mengatasi permasalahan lingkungan, pemanfaatan FA juga diharapkan menghasilkan nilai ekonomi. Banyak penelitian yang berhasil mengungkap berbagai potensi yang dapat dikembangkan dari FA seperti perbaikan tanah, bahan konstruksi, katalis, dan adsorben. Namun, bahasan pada artikel ini akan difokuskan pemanfaatannya sebagai bahan konstruksi dan konversinya menjadi adsorben.

ISI

FA hasil pembakaran merupakan hasil penguraian mineral-mineral yang terdapat dalam batubara. Pembakaran batubara di pembangkit listrik berlangsung pada suhu antara 1100 - 1500 °C, atau pada suhu oksidasi dan reduksi. Pada kondisi tersebut akan terjadi perubahan secara kimia dan fisika. Oleh karenanya, FA merupakan campuran partikel dengan komposisi yang sangat kompleks.

Sifat FA yang dihasilkan tiap PLTU bisa berbeda, tergantung pada sumber batubara, kondisi proses pembakaran, dan peralatan pengumpul FA. Secara umum, karakter fisik FA dapat dilihat dari ukuran, bentuk, serta warna partikel. Umumnya partikel FA berbentuk bulat (*spherical*) dengan ukuran partikel $< 8 \mu\text{m}$ untuk $\geq 90\%$ (Ghosal et al., 1993) sehingga dapat dikatakan FA berukuran nano. Menurut ACI Committee 226, FA mempunyai butiran yang cukup halus, yaitu lolos ayakan No. 325 (45 mili mikron) 5-27%, dengan *specific gravity* antara 2,15-2,8 dan berwarna abu-abu kehitaman. FA memiliki kerapatan jenis rendah hingga medium ($0,54 - 0,86 \text{ g/cm}^3$), permukaan area yang besar ($300-500 \text{ m}^2/\text{kg}$) dan tekstur yang terang.

Karakteristik kimia FA batubara bervariasi, sangat tergantung pada geologi sumber batubara serta metode dan kondisi pembakaran (Singh-Kolay, 2002). Secara umum, komposisi utama FA antara lain: SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 dengan kadar bisa mencapai 90%. Komposisi kimia minor antara lain: SO_3 , CaO , MgO , K_2O , uap air, dan LOI (Sobolev et al., 2013). Secara mineral, FA mengandung beberapa komponen utama, antara lain quartz, mullite, hematite, magnetit, dan kapur, yang dapat diamati pada difraktogram XRD nya (Gambar 1). Hasil yang sama juga didapatkan oleh Giere et al. (2003).



(Sumber: Bada, S.O., Potgeiter-Vermaak S., 2008)

Gambar 1. Contoh difraktogram XRD fly ash batubara.

Nilai pH FA juga bervariasi dari 1,2 hingga 12,5. Namun umumnya FA bersifat basa (Kolbe et al., 2011). Nilai pH FA terutama tergantung pada rasio molar Ca/S (Izquierdoa

and Querol, 2012). Berdasarkan rasio Ca/S, FA dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu abu sangat alkalin (pH 11-13), abu cukup alkali (pH 8-9), dan abu asam. Tergantung pada daerah penambangan batubara, FA batubara biasanya mengandung logam-logam berat seperti arsenik, timbal, merkuri, kadmium, kromium, selenium. Logam-logam lainnya yaitu aluminium, antimon, barium, berilium, boron, klorida, kobalt, mangan, molibdenum, nikel, thallium, vanadium, dan seng (EPA, 2010). Menurut ASTM (2005), FA dikelompokkan menjadi 2, yaitu kelas F dan kelas C. Pada FA kelas F kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$, sedangkan pada kelas C $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$. Kelas C mengandung kapur (CaO) lebih banyak ($> 10\%$) daripada kelas F (Thomas, M., 2015).

Berdasarkan sifat-sifatnya baik secara fisika, kimia, maupun mineralogy, FA memiliki potensi yang luar biasa untuk dikembangkan. Berikut kajian pemanfaatan FA sebagai bahan baku konstruksi dan konversinya menjadi adsorben didasarkan pada berbagai hasil penelitian.

Bahan Baku Konstruksi

Di beberapa negara seperti, China, India, Amerika, dan beberapa negara di Eropa telah memanfaatkan FA sebagai bahan baku konstruksi (Yao et al, 2015). Konstruksi yang dimaksud mencakup beton, semen, dan aspal. Perkembangan terbaru, FA sering digunakan sebagai bahan tambahan sehingga mengurangi jumlah semen atau aspal yang diperlukan sebagai *raw material*. Penambahan FA pada bahan baku konstruksi tentunya akan mengurangi biaya produksi karena harga FA murah. Selain itu, pemanfaatan FA sekaligus sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan limbah lingkungan. Akan tetapi, hal yang perlu diketahui secara jelas yaitu bagaimana kualitas konstruksi berbahan baku FA dan bagaimana kondisi optimum pemakaiannya.

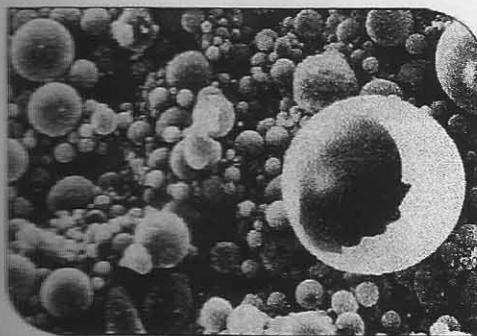
FA memiliki sifat pozzolan, yaitu bahan yang mengandung silika dan alumina yang bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida pada temperatur biasa membentuk senyawa bersifat *cementitious* (mengikat). Sifat pozzolan tersebut menjadikan FA baik digunakan untuk menggantikan semen pada dinding, beton atau aplikasi bangunan yang lain (González et al., 2009). Dilmore and Neufeld, (2001) menyatakan kadar penambahan FA pada konstruksi berkisar antara 15% hingga 35% dan dapat mencapai 70% untuk beton pada konstruksi jalan, dinding, dan area parkir, bahkan bisa mencapai 80% untuk beton dalam *autoclave*.

Aplikasi FA untuk bahan konstruksi memiliki beberapa persyaratan. FA untuk bahan baku semen sebaiknya menggunakan FA dengan kadar kapur tinggi ($>20\%$). FA sebagai

bahan baku konstruksi disyaratkan kadar karbon $< 4\%$. FA sering digunakan hingga 30% untuk menggantikan semen portland, dan dapat lebih tinggi lagi kadarnya (ASTM C618). Penggunaan FA dalam semen telah banyak dilakukan, di antaranya oleh Matjie (2004) dengan mengekstrak alumina. Silika di dalam FA akan bereaksi dengan kalsium hidroksida menghasilkan kalsium silikat hidrat (Nonavinakere and Reed, 1995). FA kelas F jika digunakan sebagai komponen semen, panas yang dihasilkan kurang optimal akibat hidrasi yang beresiko menyebabkan beton cepat retak (Sarker and McKenzie, 2009).

FA juga dapat digunakan sebagai *filler* aspal. Beton aspal merupakan material komposit terdiri dari pengikat aspal dan agregat mineral. Baik FA kelas C maupun F dapat digunakan sebagai *filler* mineral untuk mengisi kekosongan dan menghubungkan antara partikel-partikel agregat yang lebih besar dalam campuran beton aspal. Jadi, FA sebagai *filler* aspal berperan sebagai penghubung, menggantikan, juga pengikat komponen-komponen dalam aspal. Penggunaan FA sebagai *filler* aspal sebanyak 10% - 40% . Artinya, aplikasi FA dalam aspal mengurangi volume aspal sehingga produksi aspal menjadi lebih ekonomis.

Sifat hidrofobik FA menghasilkan daya tahan yang lebih baik, antara lain meningkatkan daya ikat, meningkatkan kekakuan matriks, lebih tahan terhadap panas maupun dingin (daya kerut kecil), menjadikan aspal lebih tahan lama dan tidak mudah retak karena mampu menahan proses oksidasi. Aspal yang ditambah FA memiliki nilai modulus yang lebih tinggi dibandingkan dengan aspal konvensional (Sobolev et al., 2013). Bentuk partikel FA yang cenderung bulat (*spheris*) mampu meningkatkan kinerja semen dengan mengurangi jumlah air yang dibutuhkan (Gambar 2).



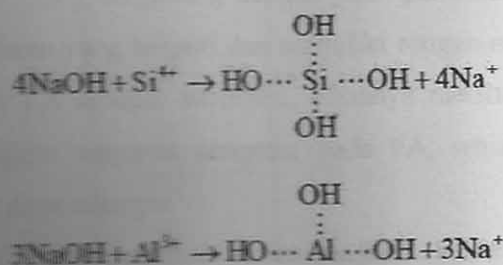
Sumber: Thomas, M. (2007)

Gambar 2. Partikel FA berbentuk *spheris*.

FA juga dapat meminimalisir agen agresif yang memungkinkan masuk seperti ion klorida sehingga meningkatkan tingkat keawetan beton (Nath and Sarker, 2011). Semakin keras beton yang mengandung FA, kekuatannya akan semakin meningkat dengan permeabilitas yang semakin menurun (Maroto-Valer et al., 2001). Peningkatan kekerasan konstruksi dengan penambahan FA dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika jarak antarpartikel lebih besar dibandingkan rata-rata ukuran partikel, pergerakan partikel lambat sehingga energi kinetiknya dapat diabaikan dan relatif tidak terjadi selipan pada permukaan partikel. Dengan demikian, partikel *filler* seperti FA mencegah aliran matriks sehingga meningkatkan kekerasan material. Hal penting juga bahwa FA sebagai *filler* aspal tidak mempengaruhi kesesuaian komponen-komponen penyusun aspal bahkan lebih meningkatkan kestabilannya.

Saat ini juga telah berkembang geopolimer berbasis FA sebagai alternatif baru material konstruksi. Geopolimer merupakan polimer anorganik aluminosilikat yang diyakini baik sebagai bahan pengganti semen Portland. H. Fansuri, dkk (2008) berhasil mensintesis geopolimer berbasis FA dengan menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 10 M dengan perbandingan Na-silikat/NaOH (b/b) 2,5. Geopolimer tersebut menghasilkan kuat tekan sebesar 78,34 MPa. Peningkatan konsentrasi NaOH dapat meningkatkan kuat tekan, namun pada jumlah yang berlebih akan memperlemah solidifikasi geopolimer akibat pembentukan Na_2O .

Larutan NaOH diperlukan dalam reaksi geopolimerisasi untuk meleburkan (*leaching*) Si dan Al dalam FA menjadi fase gel. Ion hidroksida mengaktifkan oksidasi Si dan Al dan membentuk monomer-monomer pembentuk geopolimer. Reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 3 (H. Fansuri, dkk., 2008).



Gambar 3. Reaksi pembentukan geopolimer pada *fly ash* batubara.

Temuajin et al. (2010) menyelidiki geopolimer berbasis FA yang diaduk dengan berbagai kadar agregat garam. Kekuatan tekan dan Modulus Young yang dihasilkan yaitu 40 MPa dan 2,27 GPa. Nilai tersebut tidak berubah secara signifikan hingga penambahan

50% agregat garam. Joseph dan Mathew (2012) mempelajari sifat-sifat beton geopolimer yang terbuat dari FA yang diaktivasi alkali. Uji retak dan kekuatan ikat dari beton geopolimer dengan baja bertulang diketahui lebih baik dari beton semen Portland (Sarker et al., 2012).

Berdasarkan berbagai laporan tersebut, dapat disimpulkan bahwa FA dapat digunakan secara efektif sebagai bahan konstruksi. Selain itu, penggunaan FA sebagai bahan konstruksi mengurangi produksi gas efek rumah kaca pada beton, karena produksi 1 ton semen Portland menghasilkan sekitar 1 ton CO₂, sementara jika menggunakan FA maka tidak dilepaskan gas CO₂.

Konversi Fly Ash Batubara (FA) menjadi Adsorben

Para peneliti telah melaporkan bahwa komponen utama penyusun FA batubara yaitu silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃). Besarnya kandungan silika dan alumina memungkinkan FA disintesis menjadi material adsorben silika-alumina. Komponen penyusun abu batubara tersebut hampir mirip dengan komponen penyusun zeolit, sehingga salah satu alternatif pemanfaatan FA yaitu dikonversi menjadi zeolit. Selain bernilai jual tinggi juga dalam rangka mengurangi dampak buruk limbah FA terhadap lingkungan. Saat ini para peneliti lebih fokus tentang bagaimana meningkatkan kecepatan adsorpsi FA, baik melalui perlakuan kimia maupun fisika. Kecepatan adsorpsi ditentukan oleh luas permukaan spesifik, distribusi ukuran partikel, dan porositas adsorben. Semakin besar luas permukaan area, semakin halus ukuran partikel, dan semakin besar porositasnya, maka kapasitas adsorpsi FA akan semakin besar (Kao et al., 2000).

Zeolit adalah material kristal silika-alumina yang terdiri dari unit-unit tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$, yang bergabung dengan jalan pemakaian bersama oksigen. Zeolit memiliki struktur padatan yang berpori dan memiliki rongga-rongga serta stabilitas termal yang besar. Konversi FA sebagai adsorben, biasanya melalui proses aktivasi. Aktivasi bertujuan menghilangkan senyawa pengotor pada FA, sehingga memperbaiki struktur kristal, porositas, dan daya adsorpsi.

Sintesis zeolit konvensional dikembangkan melalui kristalisasi hidrotermal menggunakan kondisi alkali (Querol et al., 2002). Murayama et al. (2002) melakukan serangkaian eksperimen hidrotermal untuk FA pada berbagai larutan basa (NaOH, KOH, Na₂CO₃, NaOH/KOH, Na₂CO₃/KOH) untuk memahami mekanisme sintesis zeolit FA. Dari hasil eksperimennya, diketahui bahwa kecepatan reaksi total dipengaruhi oleh konsentrasi Na⁺ dalam larutan alkali. Saat Na⁺ dan K⁺ terdapat bersama-sama di dalam

larutan, laju kristalisasi menurun sesuai dengan penambahan konsentrasi K^+ . Proses konversi FA menjadi zeolit melalui tiga tahap, yaitu pelarutan, kondensasi, dan kristalisasi. Sintesis zeolit dilakukan melalui peleburan FA batubara dengan NaOH pada 550 °C selama 1 jam yang dilanjutkan dengan reaksi hidrotermal dalam larutan basa pada 100 °C dengan penambahan natrium silikat (Murniati et al., 1999). Peleburan FA dengan NaOH bertujuan untuk mendekomposisi komponen silika-alumina menjadi natrium silikat dan natrium aluminat (Chang dan Shih, 1998).

Di antara zeolit yang telah berhasil disintesis dari FA batubara yaitu zeolit Na-P. Zeolit Na-P merupakan zeolit sintesis dengan kristal berbentuk kubik dan mempunyai sifat sebagai penyaring molekul dan penukar kation yang tinggi sehingga dimanfaatkan secara luas dalam industri (Querol et al., 2002). Zeolit Na-P memiliki rumus kimia $Na_4[(AlO_2)_4(SiO_2)_{10.15}H_2O]$ (Breck dalam Murniati, dkk., 2009).

Pada aplikasinya, FA dapat digunakan untuk meminimalisir COD pada limbah cair domestik, ion logam berat pada limbah cair, dan zat pewarna pada air limbah batik. Adsorben berbasis FA juga dapat digunakan untuk menyerap B, As, Cu, Pb, Zn, Mn, Cd, Cr, dan Ni dalam air limbah. Polat et al. (2004) melakukan serangkaian eksperimen secara kolom dan *batch* untuk menyelidiki penyerapan B dari air laut dan menurunkan salinitasnya dengan menggunakan FA batubara. Hasilnya menunjukkan > 90% B dapat diserap. Cho et al. (2005) melakukan eksperimen *batch* untuk mengamati penyerapan logam berat (Zn, Pb, Cd, dan Cu) dari air limbah dengan menggunakan adsorben FA. Sebagian besar ion-ion logam dapat diserap hingga 95%. FA juga dapat digunakan untuk menyerap polutan organik. Matheswaran dan Karunanithi (2007) menyelidiki penyerapan Clorhidrine B dari larutan metribuzin, metalachlor, dan atrazine dari limbah air. Kapasitas maksimum adsorpsi dari FA terhadap metribuzin, metolachlor, dan atrazine secara berturut-turut yaitu 0,56, 1,0, dan 3,33 mg/g. FA diketahui juga efektif menyerap polychlorinat biphenyl (Waller et al., 2005) dan fosfat (Agyei, 2002).

Adsorpsi polutan gas juga dapat dilakukan dengan adsorben berbasis FA. Berbagai polutan gas tersebut, di antaranya NO_2 , CO_2 , SO_x , NO_x . Lu dan Do (1991) menggunakan FA sebagai adsorben untuk menyerap NO_x . Izquierdo and Rubio (2008) menyelidiki FA sebagai adsorben SO_2 . Sarmah et al. (2013) menyelidiki penyerapan CO_2 menggunakan karapintaman berbasis FA. Yuliani (2013) memanfaatkan FA untuk adsorpsi NO_2 .

Saat ini metode konvensional sudah diperbaiki menggunakan peralatan yang lebih baik, termasuk penggunaan alkali yang dilanjutkan perlakuan hidrotermal dan sintesis zeolit yang didukung *microwave*. Yao et al. (2009), mensintesis zeolit dengan

menggunakan alkali yang diikuti perlakuan hidrotermal dalam medium $\text{LiOH.H}_2\text{O}$. Kristalinitas zeolit yang dihasilkan sebesar 97,8% pada kondisi $\text{LiOH.H}_2\text{O}$ 3 M, temperatur hidrotermal 180 °C selama 12 jam. Ansari et al. (2014) mensintesis zeolit dari FA menggunakan metode pemanasan *microwave* menghasilkan zeolit berukuran nano. Hollman et al. (1999) mengembangkan proses sintesis zeolit yang terdiri 2 tahap, yaitu ekstraksi Si dari FA diikuti dengan pengaturan rasio molar Si/Al menggunakan Al dari sumber eksternal. Metode ini dapat meningkatkan proses zeolisasi secara signifikan dengan tingkat kemurnian dan kristalinitas yang lebih baik. Park et al. (2000) mengembangkan teknik kalsinasi FA (<350 °C) dengan campuran berbagai garam dan basa dengan jangka waktu tertentu kurang dari 3 hari.

PENUTUP

Sifat-sifat abu terbang batubara (FA) baik secara fisika, kimia, maupun mineralogi merupakan suatu potensi yang cukup menjanjikan untuk terus dikembangkan dan diimplementasikan, khususnya sebagai bahan konstruksi dan adsorben. Sebagai bahan konstruksi, penambahan FA meningkatkan kekerasan dan kekakuan matriks, memiliki daya ikat terhadap partikel-partikel penyusunnya, memiliki daya tahan terhadap partikel-partikel agresif sehingga meningkatkan kualitas konstruksi dan memperpanjang masa pemakaian. Demikian pula potensi abu terbang sebagai adsorben. FA dapat digunakan sebagai adsorben berbagai polutan baik padat, cair, maupun gas. Kemampuan adsorpsi FA akan semakin meningkat setelah diberi perlakuan fisika ataupun kimia. Hal yang perlu diperhatikan bahwa sebelum diproses, sebaiknya FA terlebih dulu dilakukan karakterisasi untuk mengetahui komponen-komponennya sehingga dapat ditentukan pemanfaatannya secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI. *Manual of Concrete Practice*. 1993 parts 1 226.3R-3.
- Ansari, M., Aroujalian, A., Raisi, A., Dabir, B., Fathizadeh, M., 2014. Preparation and Characterization of Nano-NaX Zeolite by Microwave Assisted Hydrothermal Method. *Adv. Powder Technol.* 25, 722–727.
- Aravazhagan, K., et al., 2011. Effect of Coal Fly Ash on Agricultur Crops: Showcase Project on Use of Fly Ash in Agriculture in and Around Thermal Power Station Areas of National Thermal Power Corporation Ltd., India. *World of Coal Ash (WCOA) Conference*. May 9-12. 2011. USA. www.flyash.info/

- ASTM C618. 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *American Society of Testing and Materials*, West Conshohocken, PA.
- Agyei N. M., Potgeiter J.H. Strydom C A., 2002. The Removal of Phosphate Ions from Aqueous Solution by Fly Ash, Slag, Ordinary Cement and Related Blends. *Cement and Concrete Research*. 32, p. 1889-1897.
- Bada, S.O., Potgeiter-Vermaak S., 2008. Evaluation and Treatment of Coal Fly Ash for Adsorption Application, *J. Practices and Technologies*. 12. p. 37-48.
- Badan Pusat Statistik-Indonesia. 2004. Statistik Industri Besar dan Sedang (1), BPS Press: Jakarta.
- Bhangare, R.C., Tiwari, M., Ajmal, P.Y., Sahu, S.K., Pandit, G.G., 2014. Distribution of Natural Radioactivity in Coal and Combustion Residues of Thermal Power Plants. *J. Radioanal. Nucl. Chem*. 300, 17-22.
- Chang, H.L., Shih W.H., 1998. A General Method for the Conversion of Fly Ash into Zeolites as Ion Exchangers for Cesium, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39. 4185 - 4191.
- Cho, H., Oh, D., Kim, K., 2005. A Study on Removal Characteristics of Heavy Metals from Aqueous Solution by Fly Ash. *J. Hazard. Mater. B*. 127, 187-195.
- Dilmore, R.M., Neufeld, R.D., 2001. Autoclaved Aerated Concrete Produced with Low-NO_x Burner/Selective Catalytic Reduction Fly Ash. *J. Energy Eng*. 127. 37-50.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2010. Human and Ecological Risk Assessment of Coal Combustion Wastes. *Office of Solid Waste and Emergency Response*. April. 2-4.
- Ghosal, S., Ebert, J.L., Self, S.A., 1993. Fly Ash Size Distribution: Use of Coulter Multisizer and Fitting to Truncated Lognormal Distribution. *Particle and Particle Systems Characterization*. Vol. 10, 11-18.
- Giere R., Carleton L. E. Lumpkin R .G., 2003. Micro- and Nanochemistry of Fly ash From a Coal-fired Power Plant, *American Mineralogist.*, 88. 1853-1865.
- González, A., Navia, R., Moreno, N., 2009. Fly Ashes from Coal and Petroleum Coke Combustion: Current and Innovative Potential Applications. *Waste Manag. Res*. 27. 976-987.
- H. Pansuri, N. Swastika, dan L., Atmaja 2008. Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. *Akta Kimindo*. Vol. 3(2). 61 - 66.
- Hollman, G.G., Steenbruggen, G., Janssen-Jurkovičová, M., 1999. A two-step Process for the Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash. *Fuel*. 78, 1225-1230.
- Inquiereño, M., Querol, X., 2012. Leaching Behavior of Elements from Coal Combustion Fly Ash: an Overview. *Int. J. Coal Geol*. 94. 54-66.
- Inquiereño, M.T., Rubio, B., 2008. Carbon-enriched Coal Fly ash as a Precursor of Activated Carbons for SO₂ Removal. *J. Hazard. Mater*. 155. 199-205.
- Jain, S., Goyal, D., 2006. Fly Ash as a Soil Ameliorant for Improving Crop Production - a Review. *Bioresour. Technol*. 97. 1136-1147.
- Joseph, B., Mathew, G., 2012. Influence of Aggregate Content on the Behavior of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Sci. Iran*. A19. 1188-1194.

- Kao P. N., Tzeng J. H., Huang T. L., 2000. Removal of Chlorophenols from Aqueous Solution by Fly Ash. *J. Hazard. Mater.* 76. 2000, 237-249.
- Kementrian Lingkungan Hidup, 2006. Pengelolaan Bahan dan Limbah Berbahaya dan Beracun. www.Lingkunganhidup.com
- Kolbe, J.L., Lee, L.S., Jafvert, C.T., Murarka, I.P., 2011. Use of Alkaline Coal Ash for Reclamation of a Former Strip Mine. *Proceedings of World of Coal Ash (WOCA) Conference*, May 9–12. USA.
- Lu, G.Q., Do, D.D., 1991. Adsorption Properties of Fly Ash Particles for NO_x Removal from Flue Gases. *Fuel Process. Technol.* 27. 95–107.
- Maroto-Valer, M., Taulbee, D., Hower, J., 2001. Characterization of Differing Forms of Unburned Carbon Present in Fly Ash Separated by Density Gradient Centrifugation. *Fuel*. 80. 795–800.
- Matheswaran, M., Karunanithi, T., 2007. Adsorption of Chrysoidine R by Using Fly Ash in Batch Process. *J. Hazard. Mater.* 145. 154–161.
- Matjie R.H., Bunt J.R. Van Heerden. 2004. Extraction of Alumina from Coal Fly Ash Generated from a Selected Low Rank Bituminous South Africa Coal. *Mineral Engineering*, 18. 299-310.
- Murayama, N., Yamamoto, H., Shibata, J., 2002. Mechanism of Zeolite Synthesis from Coal Fly Ash by Alkali Hydrothermal Reaction. *Int. J. Miner. Process.* 64. 1–17.
- Murniati, Nurul Hidayat, Mudasar. 2009. Pemanfaatan Limbah Abu Dasar Batubara sebagai Bahan Dasar Sintesis Zeolit dan Aplikasinya sebagai Adsorben Logam Berat Cu(II). *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA.FMIPA Univ. Negeri Yogyakarta*.
- Nath, P., Sarker, P., 2011. Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete. *Procedia Eng.* 14. 1149–1156.
- Nollet, H., Roels, M., Lutgen, P., Van der, M.P., Verstraete, W., 2003. Removal of PCBs from Wastewater Using Fly Ash. *Chemosphere*. 53. 655–665.
- Nonavinakere, S., Reed, B.E., 1995. Fly Ash Enhanced Metal Removal Process. In: Sengupta, A.K. (Ed.), *Hazardous and Industrial Wastes: Proceedings of the Twenty-seventh Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*. Technomart Publishing.
- Park, M., Choi, C.L., Lim, W.T., Kim, M.C., Choi, J., Heo, N.H., 2000. Molten–salt Method for the Synthesis of Zeolitic Materials I. Zeolite Formation in Alkaline Molten–Salt System. *Microporous Mesoporous Mater.* 37. 81–89.
- Patra, K.C., Rautray, T.R., Nayak, P., 2012. Analysis of Grains Grown on Fly Ash Treated Soils. *Appl. Radiat. Isot.* 70. 1797–1802.
- Querol X., Moreno, J.C., Umana, J.C., Alastuey, A., Hernandez, E., Lopez-Soler, A., Plana, F., 2002. Synthesis of Zeolites Coal from Fly Ash; an Overview. Elsevier, *Int. J. of Coal Geologi.* 50. 413-423.
- Sarker, P.K., Haque, R., Ramgolam, V., 2012. Fracture Behaviour of Heat Cured Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Mater. Des.* 44, 580–586.

- Sarker, P.K., McKenzie, L., 2009. Strength and Hydration Heat of Concrete Using Fly Ash as a Partial Replacement. *Proceedings of 24th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia*. September 17–19, Sydney, Australia.
- Singh D.N. Kolay P.K., 2002 Simulation of Ash-Water Interaction and Its Influence on Ash Characteristic. *Progress in Energy and Combustion Science*. 28 (3), 267-299.
- Sobolev, K., Flores, I., Bohler, J.D., Faheem. A., Covi, A., 2013. Application of Fly Ash in ASHpalt Concrete from Challenges to Opportunities. *World of Coal Azh Conference*. April 22-25. USA.
- Temuujin, J., van Riessen, A., MacKenzie, K.J.D., 2010. Preparation and Characterisation of Fly ash Based Geopolymer Mortars. *Constr. Build. Mater*. 24. 1906–1910.
- Thomas, M., 2007. Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portland Cement Association*. Washington, DC. www.cement.org.
- Wikipedia. Daftar Pembangkit Listrik di Indonesia
https://id.wikipedia.org/wiki/Daftar_pembangkit_listrik_di_Indonesia.
- Yao Z.T. et al., 2015. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews* 141 (2015) 105–121. www.elsevier.com/locate/earscirev.
- Yao, Z.T., Xia, M.S., Ye, Y., Zhang, L., 2009b. Synthesis of zeolite Li-ABW from fly ash by fusion method. *J. Hazard. Mater*. 170, 639–644.
- Yuliani T.L., 2013. Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara sebagai Adsorben untuk Penentuan Kadar Gas NO₂ di Udara. *Skripsi*. FMIPA univ. Jember.
- Zhang, B., Wu, D., Wang, C., He, S., Zhang, Z., Kong, H., 2007. Simultaneous Removal of Ammonium and Phosphate by Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash as Influenced by Acid Treatment. *J. of Env. Sci.*, 19(5). 540-545.