

Sintesis Zeolit-A dari Abu Dasar Batubara dengan Pemisahan Fe dan Ca

Randy Yusuf Kurniawan dan Nurul Widiastuti

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: nurul_widiastuti@chem.its.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit-A dari abu dasar dengan pemisahan kandungan Fe dan Ca sebelum dilakukan peleburan. Zeolit-A disintesis menggunakan ekstrak yang dihasilkan melalui metode peleburan abu dasar pada suhu 750°C dalam atmosfer udara yang diikuti proses hidrotermal pada suhu 100°C selama 12 jam. Hasil menunjukkan bahwa kristalinitas zeolit-A dengan pemisahan Fe dan Ca sebesar 88,64% dengan tingkat kemurnian yang lebih besar, sementara pada zeolit-A tanpa pemisahan Fe dan Ca yang telah dilaporkan pada penelitian sebelumnya didapatkan kristalinitas sebesar 84,19% dengan tingkat kemurnian yang lebih rendah.

Kata Kunci—Zeolit-A, Abu Dasar, Sintesis, Pemisahan Fe dan Ca, Peleburan.

I. PENDAHULUAN

ABU dasar batubara merupakan salah satu jenis residu yang dihasilkan oleh pembakaran batubara PLTU yang jatuh pada dasar tungku pembakar (*boiler*) dan terkumpul pada penampung debu (*ash hopper*) karena terlalu berat untuk dibawa oleh gas buang [1]. Menurut peraturan pemerintah No. 18 tahun 1999, limbah abu dasar digolongkan sebagai limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya). Oleh karena itu, untuk mengurangi dampak negatif dari limbah abu tersebut, sangat perlu dilakukan pemanfaatan limbah abu tersebut menjadi material yang memiliki nilai manfaat yang cukup tinggi [2]. Abu dasar batubara mengandung silikon (Si) 24,10 %, aluminium (Al) 6,80%, besi (Fe) 33,59 %, kalsium (Ca) 26,30% dan karbon (C) total sekitar 11,2% berat. Kandungan Si dan Al dalam abu dasar ditemukan dalam fasa amorf dan kristalin [3]. Unsur-unsur kimia tersebut merupakan komponen penyusun zeolit, sehingga dengan proses tertentu, maka abu dasar dapat dimanfaatkan sebagai bahan penyusun zeolit atau mesoporous aluminosilikat lainnya [4].

Pembuatan zeolit dari abu dasar telah banyak dilaporkan. Berbagai jenis zeolit yang disintesis dari abu dasar diantaranya adalah zeolit-A [5], zeolit-X [6] dan hidroksi-sodalit [7]. Kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ pada abu dasar merupakan komponen utama dalam pembentukan zeolit yang dapat diekstrak melalui proses peleburan secara langsung [8]. Namun, peleburan secara langsung mengakibatkan rendahnya kemurnian dari zeolit yang terbentuk, karena beberapa pengotor abu dasar seperti Fe dan Ca juga ikut larut dalam ekstrak tersebut. Pengotor Fe dan Ca yang terlarut tersebut mengakibatkan terbentuknya fasa lain seperti hidroksi sodalit, sehingga penghilangan logam Fe dan Ca dapat mempengaruhi pembentukan kristal zeolit yang terbentuk [8]. Oleh karena itu, kandungan Fe dan Ca pada abu dasar perlu

dilakukan pemisahan, sehingga dapat digunakan untuk sintesis zeolit.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Alat dan bahan

Alat yang digunakan adalah corong Buchner, muffle furnace, dan reaktor hidrotermal (autoclave stainless steel). Karakterisasi material ini dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscopy (SEM).

Bahan yang digunakan adalah abu dasar batubara, air demineralisasi, padatan natrium aluminat (Sigma Aldrich), larutan natrium silikat (Sigma Aldrich) dan pelet NaOH (99% p.a).

B. Prosedur Kerja

1) Identifikasi Komposisi Kimia Abu Dasar

Abu dasar batubara dipanaskan pada suhu 110°C selama 3 jam untuk menghilangkan kandungan air yang terdapat dalam abu dasar tersebut. Selanjutnya abu dasar dianalisis menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk menentukan komposisi unsur-unsur dari abu dasar.

2) Pemisahan Fe dan Ca Abu Dasar Batubara

Pemisahan kandungan besi (Fe) pada abu dasar batubara pada penelitian ini dilakukan menggunakan magnet ferrit dan larutan HCl 12 M [9]. Abu dasar diletakkan dalam bejana yang cukup luas, kemudian magnet ferrit diletakkan pada bagian atas abu dasar. Abu dasar harus diaduk terus menerus agar proses pemisahan kadar Fe dapat merata pada seluruh bagian abu dasar. Kemudian, Abu dasar bebas Fe ditimbang sebesar 5 gram dan dimasukkan dalam larutan HCl 12 M sebanyak 150 ml. Campuran tersebut kemudian diaduk selama 4 jam pada suhu 100°-110°C untuk memaksimalkan proses pemisahan. Campuran dikeringkan pada suhu 105°C. Hasil pemisahan kemudian dikarakterisasi kembali menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan komposisi unsur-unsur kimianya, serta fasa mineral dari abu dasar setelah pemisahan.

3) Peleburan Abu dasar dan Ekstraksi Si dan Al

Abu dasar batubara dan NaOH yang sudah digerus, dicampurkan dengan perbandingan massa NaOH/Abu dasar = 1,2. Campuran kemudian dipanaskan pada suhu 750°C dalam waktu tertentu dalam *muffle furnace*. Setelah peleburan campuran didinginkan, digerus dan dibuat suspensi dengan penambahan air demineralisasi, campuran hasil peleburan diaduk dan dilakukan pemeraman (*aging*) selama 2 jam pada suhu kamar. Campuran yang telah diperam, selanjutnya disaring dan diambil ekstrak supernatannya sebagai larutan sumber Si dan Al [10].

4) Sintesis Zeolit-A dari Abu Dasar

Ekstrak tersebut kemudian dibuat *slurry* berkomposisi molar relatif $Al_2O_3:1,926 SiO_2$ dengan penambahan larutan $NaAlO_2-NaOH$ sebagai sumber Al untuk mengatur rasio molar Si/Al yang sesuai untuk sintesis zeolit Na-A. Kemudian kristalisasi hidrotermal dilakukan pada suhu $100^\circ C$ selama 12 jam. Setelah perlakuan hidrotermal, padatan hasil kristalisasi dipisahkan dari filtratnya, dicuci dengan air demineralisasi sampai pH 9-10, dan dikeringkan pada suhu $105^\circ C$ selama 24 jam [3].

5) Karakterisasi Zeolit-A dari Abu Dasar

Zeolit-A hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)* dan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Identifikasi Komposisi Kimia Abu Dasar

Penelitian ini diawali dengan penentuan komposisi kimia dari abu dasar dengan menggunakan Instrumen *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Penentuan komposisi kimia yang terkandung dalam abu dasar sangat penting karena dapat diketahui prosentase kandungan berat Si dan Al dalam abu dasar yang merupakan komponen utama dalam pembuatan zeolit. Hasil analisis abu dasar dengan *X-Ray Fluorescence (XRF)* dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis Komposisi Kimia Abu Dasar

| Komponen | Komponen (% berat) | Komponen | Komponen (% berat) |
|----------|--------------------|----------|--------------------|
| Al | 5,5 | Fe | 49,40 |
| Si | 13,2 | Ni | 0,23 |
| S | 0,59 | Cu | 0,14 |
| K | 1,2 | Zn | 0,22 |
| Ca | 25,5 | Sr | 0,53 |

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* tersebut, abu dasar memiliki kandungan Si dan Al dalam bentuk oksidanya yang cukup tinggi yaitu 13,2 % dan 5,5 %. Adanya kandungan Si dan Al tersebut membuat abu dasar dapat dijadikan sebagai bahan dalam pembuatan zeolit. Nilai kandungan Si dan Al tersebut digunakan dalam menentukan rasio Si/Al. Nilai rasio tersebut akan mempengaruhi jenis zeolit yang terbentuk. Nilai rasio berat Si/Al pada abu dasar tersebut adalah sebesar 2,4. Nilai rasio Si/Al tersebut relatif rendah, sehingga sesuai digunakan sebagai bahan dasar untuk mensintesis zeolit dengan nilai Si rendah seperti Zeolit-A.

Selain Si dan Al, kandungan yang mendominasi dalam abu dasar adalah Fe dan Ca. Adanya kandungan Ca dan Fe cukup tinggi dapat mengganggu dalam proses sintesis zeolit, sehingga Ca dan Fe harus dipisahkan terlebih dahulu. Hasil pemisahan, dilakukan analisis kembali menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* untuk menentukan nilai kandungan Ca dan Fe setelah proses pemisahan. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

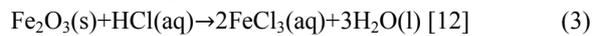
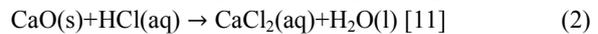
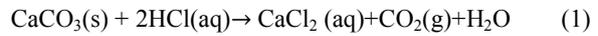
Tabel 2.

Hasil Analisis Komposisi Kimia Abu Dasar Setelah Pemisahan Fe dan Ca

| Komponen | Komponen (% berat) | Komponen | Komponen (% berat) |
|----------|--------------------|----------|--------------------|
| Al | 3,2 | Fe | 23,50 |
| Si | 37,1 | Ni | 1,46 |

| | | | |
|----|------|----|------|
| S | 0,59 | Cu | 0,17 |
| K | 2,0 | Zn | 0,24 |
| Ca | 11,1 | Sr | 0,50 |

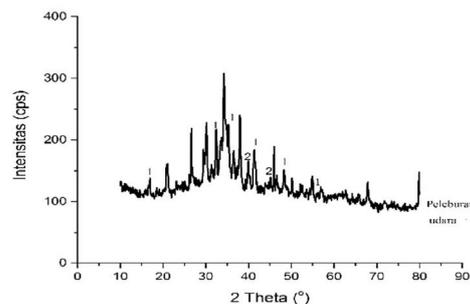
Pada Tabel 2 tersebut, dapat terlihat bahwa proses pemisahan Fe dan Ca mampu menurunkan kandungan Fe pada abu dasar sebesar 25,90% dan kandungan Ca sebesar 14,40%. Penurunan komposisi tersebut menunjukkan bahwa Ca dalam fasa *kalsit* ($CaCO_3$) dan kalsium oksida (CaO) telah bereaksi dengan HCl membentuk $CaCl_2$ yang mudah larut dalam air. Kandungan Fe yang masih tersisa dalam abu dasar juga ikut bereaksi dengan larutan HCl membentuk $FeCl_3$. Reaksi pemisahan logam-logam oksida pada abu dasar tersebut dapat dilihat pada Persamaan (1-3).



B. Peleburan Abu Dasar dan Ekstraksi Si dan Al

Proses ekstraksi Si dan Al dalam abu dasar dalam pembuatan zeolit dapat dilakukan dengan peleburan dalam atmosfer udara [3]. Peleburan abu dasar dengan atmosfer udara akan menghasilkan padatan berwarna kuning kecoklatan yang menandakan bahwa kandungan karbon dalam abu dasar telah hilang selama proses peleburan berlangsung, sehingga didapatkan hasil leburan bebas karbon. Kandungan karbon dalam abu dasar akan mudah lepas dan membentuk hasil samping berupa gas CO_2 , sehingga dari proses inilah akan dihasilkan zeolit-A dengan kemurnian tinggi tanpa adanya karbon.

Padatan leburan kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan XRD untuk menentukan komponen mineral yang terbentuk yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Difraktogram padatan abu dasar hasil leburan (1=Natrium Silikat, 2= Natrium AluminatSilikat)

Pada difraktogram tersebut, menunjukkan bahwa proses peleburan akan menghasilkan garam natrium silikat dan natrium alumina silikat dengan adanya pola puncak-puncak khas yang menunjukkan puncak difraksi dari kedua garam tersebut. Hasil difraktogram tersebut juga menunjukkan hilangnya puncak-puncak dari hematit dan kalsit. Hal ini dikarenakan proses peleburan pada suhu tinggi membuat hematit dan kalsit akan hilang. Selain itu, puncak-puncak fasa kristalin lainnya seperti kuarsa dan mullit sebagian besar juga ikut menghilang yang menunjukkan bahwa kuarsa dan mullit tersebut telah bereaksi dengan NaOH dan diaktivasi menghasilkan garam natrium silikat (PDF 16-0818) dan garam alumina silikat (PDF 33-1203). Selain fasa kristalin tersebut, fasa amorf dari aluminasilikat juga

ditemukan dalam intensitas yang lebih banyak jika dibandingkan pada abu dasar sebelum dilakukan peleburan. Hal ini membuktikan bahwa proses peleburan pada suhu tinggi merupakan metode yang efektif dalam mengekstrak kandungan Si dan Al dalam abu dasar menjadi garam yang mudah larut.

Setelah didapatkan hasil berupa natrium silikat dan natrium aluminasilikat dari proses peleburan, kemudian dilakukan proses ekstraksi dari padatan hasil leburan untuk mendapatkan komponen Si dan Al yang terlarut. Proses ekstraksi pada penelitian ini dilakukan dengan mencampurkan padatan hasil leburan yang telah digerus dengan air demineralisasi. Reaksi padatan hasil peleburan abu dasar dalam air destilasi adalah sebagai berikut :



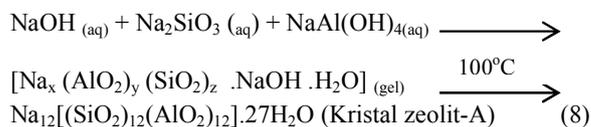
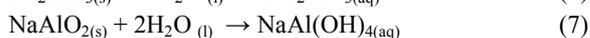
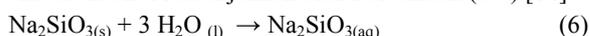
Setelah dilakukan pemeraman, campuran tersebut disaring dan dihasilkan filtrat rata-rata sebesar 200 ml. Hasil filtrat ini tidak sama dengan volume awal air demineralisasi yang dimasukkan untuk proses ekstraksi, karena sejumlah air demineralisasi tersebut terserap pada padatan hasil leburan.

Ekstrak leburan tersebut kemudian digunakan sebagai bahan pembuatan gel. Nilai rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dikontrol melalui penambahan larutan $\text{NaAlO}_2\text{-NaOH}$ sebagai sumber Al eksternal, karena nilai kelarutan Al dalam ekstrak cukup kecil. Penambahan sumber Al tersebut bertujuan untuk memperkecil nilai rasio molar gel. Besarnya rasio molar dalam penelitian ini diatur sesuai rasio molar gel zeolit-A yaitu $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 1,926. Perbandingan molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ itulah yang paling menentukan terbentuknya zeolit-A [5].

Penambahan larutan $\text{NaAlO}_2\text{-NaOH}$ tersebut akan menghasilkan pasta aluminosilikat. Residu ekstrak leburan dalam atmosfer udara, tidak perlu ditambahkan residu hasil ekstrak dalam preparasi sintesis zeolit agar nantinya dihasilkan zeolit tanpa karbon. Pasta aluminosilikat yang terbentuk memiliki karakteristik berbentuk gel berwarna putih layaknya mensintesis zeolit-A dari bahan murni. Ion aluminat dan ion silikat akan mengalami kondensasi dalam proses pembentukan pasta aluminosilikat tersebut dan digunakan sebagai prekursor pembuatan zeolit.

C. Sintesis Zeolit-A dari Abu Dasar

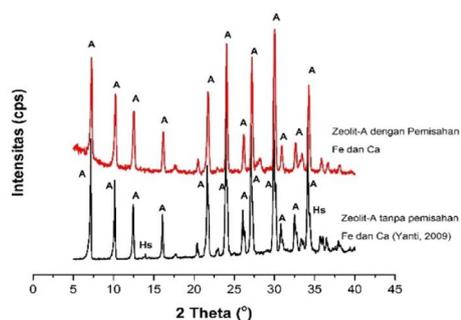
Zeolit-A dalam penelitian ini disintesis dari dua jenis prekursor yaitu dari bahan murni/sintetik dan abu dasar. Sintesis zeolit-A dengan bahan murni dalam penelitian ini digunakan sebagai pembanding terhadap zeolit-A yang disintesis dari abu dasar. Proses sintesis zeolit-A dengan bahan murni dilakukan sesuai komposisi dengan perbandingan komposisi molar 3,165 Na_2O : 1 Al_2O_3 : 1,926 SiO_2 : 128 H_2O . [13]. Prekursor yang digunakan adalah air demineralisasi (DM), NaAlO_2 , Na_2SiO_3 , dan NaOH . Larutan prekursor diaduk dengan kecepatan konstan selama 12 jam untuk proses homogenisasi. Kemudian larutan aluminosilikat yang terbentuk dimasukkan, ke dalam autoklaf untuk proses hidrotermal dan proses kristalisasi selama 12 jam pada suhu 100°C . Reaksi yang terjadi selama proses kristalisasi pada sintesis zeolit A ditunjukkan oleh Persamaan (6-8) [14].



Hasil proses hidrotermal berupa padatan putih dan larutan supernatan yang berwarna bening. Padatan disaring untuk memisahkan dengan larutan dan dilakukan pencucian dengan air demineralisasi hingga pH kurang dari 9. Perlakuan pencucian dilakukan untuk menghilangkan sisa NaOH yang bersifat basa. Nilai derajat keasaman padatan zeolit A hasil proses hidrotermal adalah 14 yang mengindikasikan bahwa zeolit-A telah terbentuk karena prekursor utama yakni $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ terbentuk pada $\text{pH} > 6$ [15]. Tahapan selanjutnya adalah pengeringan padatan di dalam oven pada suhu 100°C selama 12 jam untuk menghilangkan air yang masih terikat pada padatan zeolit hasil sintesis, sehingga diperoleh padatan zeolit-A berwarna putih.

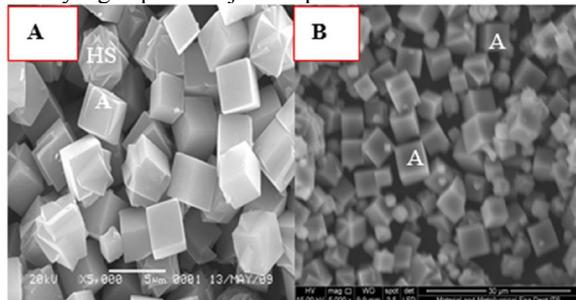
Sementara itu, proses pembentukan zeolit dari prekursor peleburan abu dasar dilakukan melalui metode hidrotermal dalam autoklaf *stainless steel* pada kondisi suhu 100°C selama 12 jam. Pemilihan waktu hidrotermal tersebut karena zeolit-A dengan kristalinitas tinggi dari bahan alam berupa ekstrak abu layang dapat disintesis dengan waktu hidrotermal selama 12 jam dalam suhu 100°C [5]. Pada akhir proses hidrotermal, didapatkan padatan hasil sintesis berwarna putih dengan filtrat berwarna kuning. Padatan yang dihasilkan kemudian disaring dan dicuci berulang kali dengan air demineralisasi untuk menghilangkan pengotor dan kelebihan NaOH yang masih menempel hingga didapatkan pH 9-10. Padatan yang telah dicuci kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk menghilangkan kelebihan air yang terikat pada padatan hasil sintesis.

Padatan hasil sintesis pada perlakuan hidrotermal dari dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristal zeolit yang terbentuk. Hasil analisis menggunakan XRD dapat ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil difraktogram tersebut menunjukkan bahwa zeolit-A dengan pemisahan Fe dan Ca memiliki pola difraksi dari zeolit-A. Pola difraksi tersebut memiliki pola yang sama dengan zeolit-A tanpa pemisahan Fe dan Ca yang pernah dilaporkan pada penelitian sebelumnya [3]. Zeolit-A dengan pemisahan Fe dan Ca memiliki nilai kristalinitas tertinggi yaitu sebesar 88,64% sementara untuk zeolit-A tanpa pemisahan Fe dan Ca memiliki nilai kristalinitas lebih rendah yaitu 84,19%.



Gambar 2. Difraktogram Zeolit-A tanpa pemisahan Fe dan Ca [3] dan Zeolit-A hasil sintesis dengan pemisahan Fe dan Ca

Zeolit-A yang terbentuk merupakan tipe zeolit Linde Tipe-A (LTA) dengan rumus $[\text{Na}_{96}(\text{AlO}_2)_{96}(\text{SiO}_2)_{96} \cdot 216\text{H}_2\text{O}]$. Kristalinitas yang tinggi menunjukkan bahwa zeolit-A yang dihasilkan memiliki kemurnian yang tinggi jika dibandingkan oleh zeolit-A yang disintesis tanpa pemisahan Fe dan Ca. Kemurnian tersebut dapat diamati pada pengujian menggunakan SEM yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Foto SEM (a) Zeolit-A tanpa pemisahan Fe dan Ca [3] (b) Zeolit-A dengan pemisahan Fe dan Ca (A=Zeolit-A, HS=Hidroksi Sodalit)

Zeolit yang disintesis melalui proses pemisahan Fe dan Ca memiliki bentuk kubik. Bentuk ini sama halnya dengan zeolit yang disintesis dari abu dasar pada penelitian sebelumnya, namun tanpa dilakukan pemisahan kandungan Fe dan Ca yang juga memiliki bentuk kubik [3]. Dari hasil SEM tersebut, juga dapat terlihat bahwa zeolit-A dengan pemisahan Fe dan Ca menghasilkan fasa kristal dengan struktur geometri kubik yang teratur serta tidak adanya fasa lain seperti hidroksi sodalit yang terbentuk seperti halnya proses sintesis zeolit dari abu dasar yang pernah dilaporkan oleh beberapa penelitian sebelumnya [3], [8], sehingga kemurnian zeolit-A yang terbentuk cukup tinggi. Tingginya kemurnian tersebut memberikan indikasi bahwa selama proses sintesis, ekstrak leburan tidak mengandung komponen-komponen pengganggu, sehingga proses pembentukan zeolit terjadi secara sempurna. Hal tersebut terjadi karena komponen pengganggu seperti Fe dan Ca pada abu dasar telah berhasil dipisahkan walaupun tidak 100% semua komponen Fe dan Ca berhasil dihilangkan dari abu dasar. Namun, dengan kadar Fe dan Ca yang rendah, hal itu sangat berpengaruh terhadap karakteristik zeolit-A yang terbentuk.

IV. KESIMPULAN

Zeolit-A dari abu dasar dapat disintesis dengan pemisahan kadar Fe dan Ca sebelum dilakukan proses peleburan. Hasil zeolit-A yang terbentuk menunjukkan bahwa proses pemisahan Fe dan Ca pada abu dasar dapat meningkatkan kristalinitas dan kemurnian pada zeolit-A tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Energi ITS dan Laboratorium Kimia UNJ atas bantuan karakterisasinya, kedua orang tua dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prijatama, H. dan Sumarnadi, E.T., 1996. "Mengubah Limbah menjadi Rupiah: Pemanfaatan limbah Abu Batubara PLTU". *Prosiding Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik*, Bandung.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup. 2006. "Pengelolaan Bahan dan Limbah Berbahaya dan Beracun". www.LingkunganHidup.com
- [3] Yanti, Y. 2009. "Sintesis Zeolit A dan Zeolit Karbon Aktif dari Abu Dasar PLTU Paiton dengan Metode Peleburan". *Tesis Megister*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [4] Tanaka, H. 2002. "Formation of Na-A and Na-X Zeolites from waste solution in conversion of aol fly ash to zeolites". *Material Research Buletin*, 37, hal 1873-1884.
- [5] Said, N.F, Nurul, W. 2008. "Adsorpsi Cu(II) pada Zeolit A yang Disintesis dari Abu Dasar Batubara PT IPMOMI PAITON". *Jurnal Zeolit Indonesia*, 7, hal 1-11.
- [6] Nurul, H.Z.M. 2012. "Sintesis Zeolit-X dari Abu Dasar Batubara dan Karakterisasinya sebagai Material Penyimpanan Hidrogen". *Skripsi*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [7] Buhl, J.C., Gesing, T.M., Kerkamm, I., Gurriss, C. 2003. "Synthesis and Crystal Structure of Cyanate Sodalite $\text{Na}_8(\text{OCN})_2[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]$ ". *Microporous and Mesoporous Materials*, 65, hal 145-153.
- [8] Sallam, M. 2006. "Zeolite Synthesis from Municipal Solid Waste Ash using Fusion and Hydrothermal Treatment". *Graduate Theses and Dissertation*, Universitas South Florida.
- [9] Chareonpanich, M., Jullaphan, O., Tang, C. 2011. "Bench-Scale Synthesis Zeolite-A from Subbituminous Coal Ashes with High Crystalline Content". *Journal of Cleaner Production*, 19, hal 58-63.
- [10] Londar, E., Hamzah, F., Nurul, W. 2010. "Pengaruh Karbon Terhadap Pembentukan Zeolit dari Abu Dasar dengan Metode Hidrotermal langsung". *Jurnal Kimia ITS*, FMIPA ITS, hal 1-13.
- [11] Wolf, K.J., Smeda, A., Muller, M., Hilpert, K. 2005. "Investigations on the Influence of Additives for SO₂ Reduction during High Alkaline Biomass Combustion". *Energy Fuels*, 19, hal 820-824.
- [12] Tobiasen, L., Skytte, R., Pedersen, LS, Pedersen, S.T., Linberg, M.A. 2007. "Deposit Characteristic After Injection of Additive to A Danish Straw-Fired Suspension Boiler". *Fuel Process Technological*, 88, hal 1108-1117.
- [13] Kugbe, J., Matsue, N., dan Henmi, T. (2009). "Synthesis of Linde type A zeolite-goethite nanocomposite as an adsorbent for cationic and anionic pollutants". *Journal of Hazardous Materials*, 164, hal. 929-935.
- [14] Ojha, K., Pranadhan, N.C, Samanta, A.N. 2004. "Zeolite from Fly Ash : Synthesis and Characterization". *Departement of Chemical Engineering*, Indian of Technology, 21, hal 555-564.
- [15] Handayani, R.F. (2012). "Sintesis ZSM-5 Menggunakan Prekursor Zeolit Nano Kluster: Pengaruh Waktu Hidrotermal". *Prosiding Skripsi*, Surabaya, KIMIA ITS.