

**PENGARUH WAKTU REFLUKS DENGAN NaOH TERHADAP  
KONVERSI ABU LAYANG BATUBARA MENJADI ZEOLIT**

**THE EFFECT OF REFLUX TIME WITH NaOH TO  
CONVERSION OF COAL FLY ASH INTO ZEOLITE**

**Sunardi, Taufiqur Rohman, Edi Mikrianto, Rini Rusmayanthi**

Program Studi Kimia, FMIPA, UNLAM, Banjarbaru  
Jl. Jend. A. Yani Km 35,8 Banjarbaru, Kalsel 70714  
Telp: (0511)4772428, email: embunabila@telkom.net

**ABSTRAK**

*Telah dilakukan penelitian untuk abu layang batubara PLTU Asam-asam menjadi zeolit. Proses konversi abu layang menjadi zeolit dilakukan dengan menggunakan metode refluks dengan NaOH 3M, dan abu layang 8 ml g<sup>-1</sup> pada temperatur 100°C. Karakterisasi hasil dilakukan dengan difraksi sinar X dan spektroskopi inframerah, sedangkan analisis kandungan logam Na dengan metode SSA. Metode refluks tersebut mampu mengubah fasa mineral alumina dan silika menjadi zeolit dimana semakin lama waktu refluks menyebabkan semakin banyak jenis zeolit yang terbentuk. Zeolit yang dihasilkan untuk waktu refluks 12 jam adalah zeolit Na-P1, 24 jam adalah zeolit Na-P1 dan NaA-Hidrat dan 72 jam adalah zeolit Na-P1, NaA- mengkaji pengaruh waktu refluks dengan variasi waktu 12, 24 dan 72 jam terhadap konversi Hidrat, Analsim dan NaX-Hidrat. Kandungan logam Na mengalami peningkatan dari 0,119 mg/g menjadi 4,18 mg/g pada waktu refluks 12 dan 24 jam kemudian turun menjadi 2,085 mg/g pada waktu refluks 72 jam.*

**Kata kunci : Abu layang, zeolit, refluks**

**ABSTRACT**

*The effect of reflux time with time variation 12, 24 and 72 hours on conversion of coal fly ash from Asam-asam Power Plant has been studied. The conversion process of fly ash into zeolite was carried out with reflux method with NaOH 3 M and 8 ml g<sup>-1</sup> of fly ash at 100°C. The product was analyzed by X-ray diffraction and infrared spectrometry, and the Na metal content was measured by atomic absorption spectrophotometry. The reflux method was able to change alumina and silica mineral phase into zeolite, where a longer time of reflux will form more type of zeolite. Zeolite Na-P1 was produced for reflux time of 12 hours, zeolite Na-P1 and Hydroxy-NaA for 24 hours and zeolite Na-P1, Hydroxy-NaA, Analcime and Hydroxy-NaX for 72 hours. The Na metal content increased from 0,119 mg/g to 4,18 mg/g for time of refluks 12 hours to 24 hours and then it decreased to 2,085 mg/g for time of refluks 72 hours.*

**Key word: fly ash, zeolite, reflux**

## PENDAHULUAN

Secara kimiawi, hasil pembakaran batubara adalah bahan-bahan volatil seperti CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O serta bahan non-volatil berupa abu batubara yang dikenal dengan abu dasar (*bottom ash*) dan abu layang (*fly ash*) (Querol *et al*, 1997). Sisa hasil pembakaran ini menimbulkan masalah baru dengan timbulnya akumulasi abu batubara yang dapat menyebabkan pencemaran.

Komposisi abu layang yang hampir sama dengan beberapa batuan vulkanik dengan komponen utama berupa senyawa alumina dan silika telah menuntun para peneliti untuk melakukan sintesis zeolit dari abu layang. Konversi abu layang menjadi zeolit berdasarkan pada perlakuan termal dalam kondisi basa yang bertujuan untuk melarutkan silika dan alumina dari abu layang. Salah satu metode konversi yang dapat dilakukan adalah metode basa klasik dengan cara refluks. Fajril (1996) dan Darwanta (1997), berhasil mensintesis zeolit 4A dari abu layang batubara asal PLTU Suralaya, dengan metode refluks dalam larutan NaOH 5M pada suhu 80°C. Sedangkan Bergaut & Singer (1996), berhasil mensintesis penukar kation dari abu layang batubara dengan metode refluks larutan NaOH 4,5M pada suhu 100°C selama 2-48 jam. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh waktu refluks terhadap abu layang PLTU Asam-asam pada

konsentrasi yang lebih rendah yaitu 3M dengan variasi waktu 12, 24 dan 72 jam.

## METODOLOGI

### Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *hot plate* (Cimarec), pompa vakum (Clements), oven (Memmert), termometer, pH meter (CyberScan 1000), furnace (Taber), *XRD powder* (Philips tipe PW1710), Spektrofotometer Serapan Atom (Variants) dan Spektroskop Inframerah (Shimadzu tipe 8400). Beberapa bahan yang digunakan antara lain abu layang batubara PLTU Asam-asam, NaOH (E. Merck), HNO<sub>3</sub> pekat (E. Merck), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pekat (E. Merck), NH<sub>4</sub>OH pekat, dan HCl pekat (E. Merck).

### Refluks abu layang batu bara

Sebanyak 37,5 gram abu layang dicampur dengan 300 ml larutan NaOH 3M. Campuran diaduk dalam labu leher tiga dengan pengaduk magnetik selama 24 jam pada suhu kamar. Setelah 24 jam, suhu dinaikkan menjadi 100°C, dilanjutkan diaduk dengan variasi waktu 12, 24 dan 72 jam pada masing-masing labu leher tiga. Endapan yang dihasilkan didekantir, dicuci dengan akuades dan dikeringkan dalam oven pada temperatur 105°C. Penentuan kandungan logam Na dilakukan dengan metode SSA. Abu layang dan hasil konversi dikarakterisasi dengan menggunakan difraksi sinar X dan FTIR.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Abu layang batubara yang digunakan berasal dari hasil pembakaran PLTU Asam-Asam Kabupaten Tanah Laut provinsi Kalimantan Selatan. Abu layang ini dikonversi menjadi zeolit dengan metode refluks menggunakan larutan pengaktivasi NaOH 3M, rasio NaOH dan abu layang  $8 \text{ ml g}^{-1}$ , dan pada temperatur  $100^\circ\text{C}$ . Proses konversi abu layang menjadi zeolit dengan menggunakan metode refluks ternyata mampu mengubah fasa kristal alumina dan silika yang cukup stabil sehingga menjadi spesies reaktif yang sesuai untuk memperoleh zeolit.

Perlakuan terhadap abu layang dengan refluks pada suasana basa memberikan berbagai macam tipe zeolit, karena spesies yang aktif pada reaksi pembentukan zeolit bentuknya cukup

heterogen. Berdasarkan penelitian Querol *et al* (1997), penggunaan NaOH lebih efisien dibandingkan dengan KOH dalam proses konversi walaupun KOH yang digunakan dalam konsentrasi yang tinggi, karena kuarsa dan alumina tidak dapat terlarut secara sempurna.

Konversi abu layang menjadi zeolit dilakukan dengan metode refluks menggunakan larutan pengaktivasi NaOH. Larutan NaOH dalam reaksi campuran bertindak sebagai aktivator dalam pelarutan garam silikat dan alumina, yang akan menempati formasi selama proses zeolitisasi. Oleh karenanya, penting untuk mengetahui berapa kandungan logam Na yang masuk ke dalam kerangka zeolit. Analisis kandungan logam Na dilakukan dengan menggunakan metode SSA dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Data kandungan logam Na pada berbagai waktu refluks

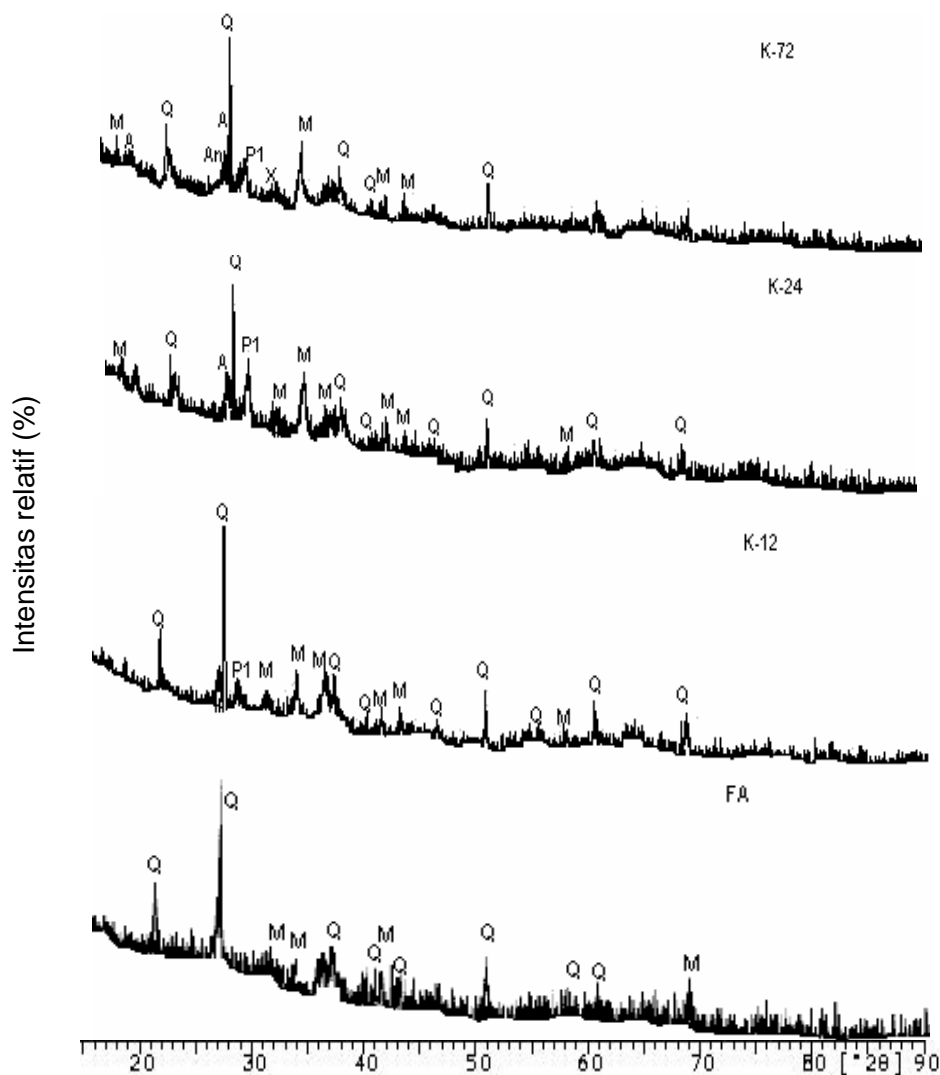
Perlakuan	Kandungan logam Na (mg/g)
Abu layang (Refluks 0 jam)	0,119
Refluks 12 jam	0,121
Refluks 24 jam	4,18
Refluks 72 jam	2,085

Waktu refluks ternyata tidak mengakibatkan perubahan yang mempunyai pola terhadap kandungan logam Na. Data menunjukkan bahwa terjadi kenaikan logam Na yang tinggi pada waktu refluks 24 jam namun mengalami penurunan pada waktu refluks 72 jam. Kandungan logam Na mengalami kenaikan disebabkan kation  $\text{Na}^+$  terlibat

dalam proses zeolitisasi lebih banyak sehingga kristalinitas dari zeolit yang terbentuk menjadi lebih baik. Kation  $\text{Na}^+$  merupakan stabilisator dari unit bangun sekunder kerangka zeolit. Atom Al yang bermuatan negatif dapat mengikat kation Na dengan gaya elektrostatis sehingga kristal yang terbentuk cenderung netral. Hal ini menyebabkan kristal lebih stabil.

Abu layang dan hasil konversi dikarakterisasi untuk melihat perubahan struktur dan gugus-gugus yang terbentuk dalam material. Karakterisasi ini menggunakan difraksi sinar X dan spektroskopi inframerah. Analisis kualitatif suatu material kristalin digunakan difraksi sinar X berdasarkan fakta bahwa setiap material kristal mempunyai pola difraksi yang karakteristik sehingga dengan

membandingkan difraktogram sinar X sampel dengan zeolit standar dapat diperoleh informasi mengenai jenis zeolit yang terbentuk. Difraktogram dari abu layang, dan abu layang hasil konversi dengan variasi waktu refluks 12 jam, 24 jam dan 72 jam ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan untuk hasil interpretasi difraktogram sinar X ditampilkan pada Tabel 2.



**Gambar 1.** Difraktogram sinar X abu layang pada berbagai waktu refluks (FA = abu layang, K-12 = refluks 12 jam, K-24 = refluks 24 jam, K-72 = refluks 72 jam, Q= kuarsa, M = mulit, P1 = zeolit Na-P1, A = zeolit NaA-Hidrat, An = *Analcime* dan X = zeolit NaX-Hidrat)

**Tabel 2.** Hasil interpretasi difraktogram sinar X pada berbagai waktu refluks

Waktu Refluks (jam)	2 $\theta$			
	Na-P1	NaA-Hidrat	Analcime	NaX-Hidrat
12	28,060	–	–	–
24	28,115	26,160	–	–
72	28,055	17,730	25,925	30,940

Keterangan : Na-P1 ( $\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}(\text{H}_2\text{O})_{12}$ )  
 NaA-Hidrat ( $\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\text{O}_{384}(\text{H}_2\text{O})_{216}$ )  
*Analcime* ( $\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}(\text{H}_2\text{O})_{16}$ )  
 NaX-Hidrat ( $\text{Na}_{88}\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384}(\text{H}_2\text{O})_{220}$ )

**Tabel 3.** Intensitas relatif puncak zeolit Na-P1 pada berbagai waktu refluks

Waktu Refluks (jam)	Intensitas Relatif Puncak Zeolit Na-P1 (%)
12	3,9
24	27,0
72	12,6

Adanya proses refluks dengan larutan NaOH mengkonversi sebagian mineral kuarsa dan mulit menjadi zeolit Na-P1, zeolit NaA-Hidrat, *analcime*, dan Zeolit NaX-Hidrat. Masing-masing waktu refluks yaitu 12, 24 dan 72 jam menghasilkan jenis zeolit yang sama yaitu zeolit Na-P1. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Querol *et al* (1997) bahwa dengan menggunakan larutan NaOH 3M pada temperatur 90-175°C dihasilkan zeolit Na-P1. Perbedaan dari tiga jenis perlakuan ini adalah terdapat pada intensitas relatif puncak. Data ditampilkan pada Tabel 3.

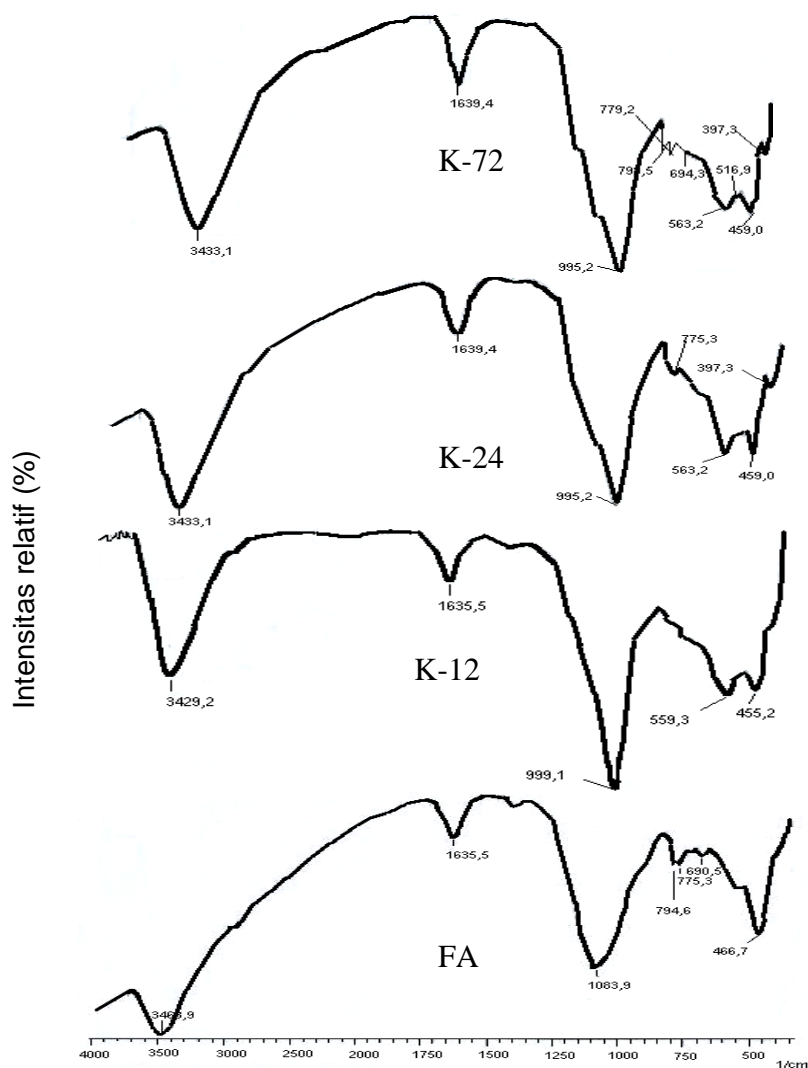
Adanya peningkatan intensitas relatif puncak zeolit Na-P1 dapat dikaitkan dengan kristalinitas, dimana semakin tinggi intensitas relatif puncak maka kristalinitas

semakin baik. Kristalinitas yang semakin baik dapat dikaitkan dengan stabilitas kristal. Adanya penurunan intensitas relatif puncak dari 24 jam ke 72 jam menunjukkan bahwa kestabilan zeolit berkurang. Kemungkinan setelah 72 jam, zeolit Na-P1 akan berubah menjadi zeolit lain. Semakin lama waktu refluks ternyata jenis zeolit yang dihasilkan semakin bervariasi namun untuk zeolit Na-P1 mempunyai kristalinitas yang lebih baik pada waktu refluks 24 jam. Hal ini sesuai dengan penelitian Querol *et al* (1997) bahwa dengan menggunakan larutan NaOH 3M pada temperatur 90-175°C selama 24 jam dihasilkan zeolit Na-P1. Namun sampai waktu refluks 72 jam kuarsa dan mulit masih mendominasi hal

ini menunjukkan perlunya perlakuan lebih lanjut untuk mengubah semua kuarsa dan mulit.

Karakterisasi terhadap abu layang dan abu layang hasil konversi dengan metode spektroskopi inframerah juga berguna untuk memberikan informasi selain difraktogram sinar X yang dapat mengidentifikasi struktur zeolit. Spektroskopi inframerah dapat memberikan informasi yang berhubungan dengan gugus fungsional dari komponen

abu layang dan abu layang hasil konversi. Lamanya waktu refluks pada abu layang dengan larutan NaOH ternyata mengakibatkan perubahan pada hasil konversi. Hal ini terlihat dari adanya perubahan pola serapan pada spektra inframerah abu layang sebelum dan sesudah konversi. Spektra inframerah produk konversi abu layang pada berbagai waktu refluks ditampilkan pada Gambar 2 dan hasil interpretasinya ditunjukkan pada Tabel 4.



**Gambar 2.** Spektra inframerah dengan pada berbagai waktu refluks (FA = abu layang, K-12 = refluks 12 jam, K-24 = refluks 24 jam, K-72 = refluks 72 jam)

**Tabel 4.** Hasil interpretasi spektra inframerah pada berbagai waktu refluks

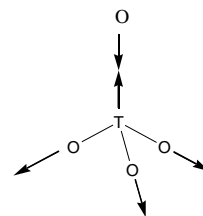
Daerah ( $\text{cm}^{-1}$ )	FA	K-12	K-24	K-72	Keterangan
4000-1250	3463,9	3429,2	3433,1	3433,1	vibrasi ulur gugus –OH
	1635,5	1635,5	1639,4	1639,4	vibrasi tekuk –OH
1250-950	1083,9	999,1	995,2	995,2	vibrasi rentangan asimetris
820-650	794,6 ; 775,3 ; 690,5	–	775,3	793,5 ; 779,2 ; 694,3	vibrasi rentangan simetris
650-500	–	559,3	563,2	563,2 516,9	vibrasi cincin ganda
500-420	466,7	455,2	459,0	459,0	vibrasi tekuk T-O
420-300	–	–	397,3	397,3	vibrasi pori terbuka

Keterangan : T = Si atau Al ; FA = Abu Layang ; K-12 = waktu refluks 12 jam ; K-24 = waktu refluks 24 jam dan K-72 = waktu refluks 72 jam.

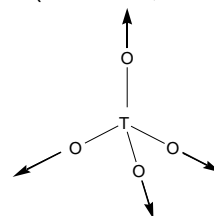
Pita serapan pada daerah antara 4000-1250  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya serapan vibrasi gugus –OH. Pada kristal zeolit gugus ini dapat berasal dari air hidrat (Hamdan, 1992). Pita serapan pada daerah antara 1250-950  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan serapan vibrasi rentangan asimetris eksternal (T-O-T) dan internal (O-T-O) (Flanigen *et al*, 1971). Model vibrasi rentangan asimetris ditunjukkan pada Gambar 3. Pita serapan vibrasi rentangan asimetris yang muncul pada keempat perlakuan secara berturut-turut untuk abu layang tanpa refluks (FA), K-12, K-24, dan K-72 adalah 1083,9  $\text{cm}^{-1}$ , 999,1  $\text{cm}^{-1}$ , 995,2  $\text{cm}^{-1}$  dan 995,2  $\text{cm}^{-1}$ . Pita-pita serapan ini cenderung bergeser ke arah bilangan gelombang yang lebih kecil. Panjang ikatan Al-O lebih besar daripada Si-O dan juga kekuatan ikatan Al-O yang lebih lemah menyebabkan lebih mudah bervibrasi sehingga akan muncul pita serapan pada daerah bilangan gelombang yang lebih kecil.

Serapan pada daerah 850-650  $\text{cm}^{-1}$  merupakan vibrasi rentangan simetris

yang dapat dibedakan menjadi 2 daerah yaitu 720-650  $\text{cm}^{-1}$  merupakan vibrasi internal (Flanigen *et al*, 1971) dan 780-720  $\text{cm}^{-1}$  merupakan hasil vibrasi eksternal (Hamdan, 1992). Vibrasi rentangan simetris ditunjukkan pada Gambar 4. Pada K-12 belum terlihat vibrasi rentangan simetris hal ini menunjukkan penyusunan silika dan alumina terlarut belum sempurna sehingga berpengaruh terhadap kristalinitas zeolit yang terbentuk.



**Gambar 3.** Model vibrasi rentangan asimetris (T = Si atau Al) (Williams, 1995)



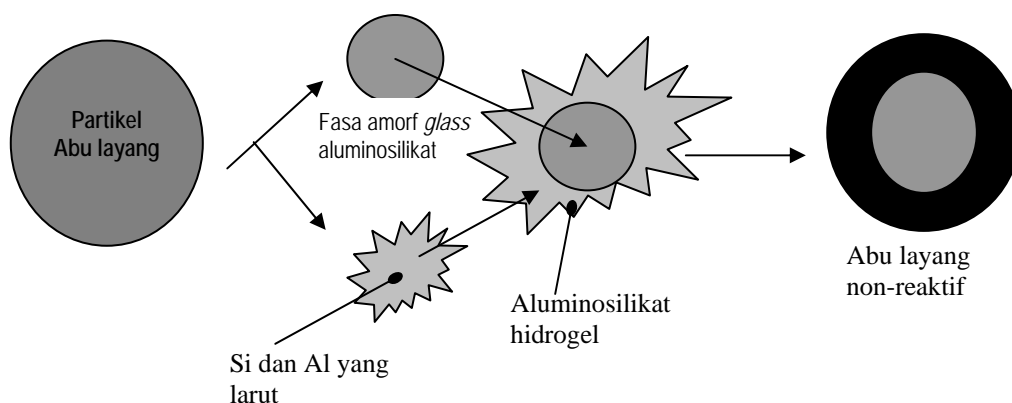
**Gambar 4.** Model vibrasi rentangan simetris (T = Si atau Al) (Williams, 1995)

Pita serapan pada daerah antara 580-500  $\text{cm}^{-1}$  dapat dihubungkan dengan adanya cincin ganda yang terdapat pada zeolit. Unit primer bergabung membentuk unit bangun sekunder yang terdapat cincin ganda. Pada abu layang tanpa refluks (FA) tidak terdapat pita serapan cincin ganda di dalamnya. Hal ini dapat dipahami karena abu layang belum membentuk zeolit tanpa perlakuan refluks. Pita serapan vibrasi cincin ganda muncul pada K-12, K-24 dan pada K-72. Hal ini mengindikasikan bahwa terbentuk zeolit pada abu layang hasil konversi dengan refluks.

Pita serapan pada daerah antara 500-420  $\text{cm}^{-1}$  berhubungan dengan serapan vibrasi tekuk T-O (Flanigen *et al*, 1971). Pita serapan muncul pada keempat perlakuan. Hal ini mengindikasikan adanya ikatan antara Si-O atau Al-O. Pita serapan pada daerah antara 420-300  $\text{cm}^{-1}$  berhubungan dengan serapan vibrasi dari pori terbuka (Flanigen *et al*, 1971). Pita serapan yang muncul menunjukkan adanya pori terbuka hanya pada K-24 dan K-72 yaitu 397,3  $\text{cm}^{-1}$ . Tidak adanya

indikasi pori terbuka pada K-12 dikarenakan zeolit yang terbentuk kristalinitasnya sangat rendah sehingga pori-pori yang terbentuk juga tidak sempurna. Informasi yang diperoleh dari spektra inframerah menunjukkan bahwa pada abu layang hasil konversi dengan waktu refluks 12 jam, 24 jam dan 72 jam sudah terbentuk zeolit dengan adanya serapan vibrasi cincin ganda.

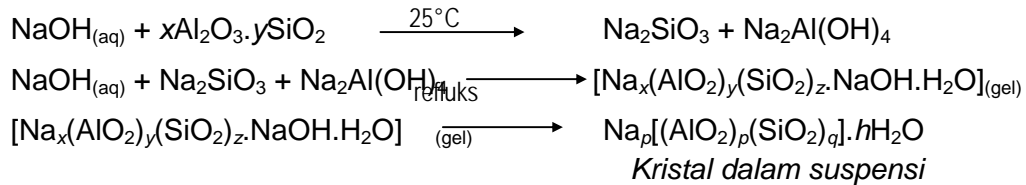
Pada proses konversi abu layang, larutan NaOH 3M direaksikan dengan abu layang (rasio 8  $\text{ml g}^{-1}$ ) selama 24 jam dalam labu leher tiga pada temperatur kamar. Hal ini bertujuan untuk melarutkan sebagian silika dan alumina yang terdapat pada abu layang. Silika dan alumina berasal dari *glass* aluminosilikat dalam fasa amorf, kuarsa dan mulit. Kemudian dengan proses refluks pada suhu 100°C dengan waktu refluks selama 12 jam, 24 jam dan 72 jam terjadi pengendapan gel aluminosilikat pada permukaan abu layang yang diikuti dengan proses kristalisasi zeolit. Deskripsi penjelasan tersebut ditampilkan dalam Gambar 5.



**Gambar 5.** Mekanisme reaksi konversi zeolit dari abu layang (Murayama *et.al*, 2002)



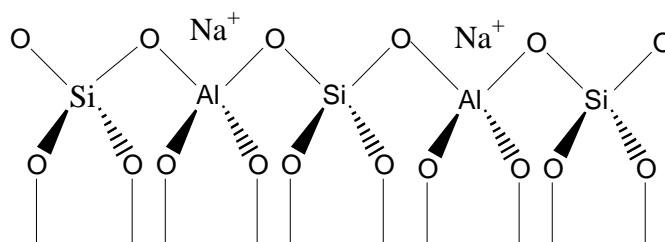
Persamaan reaksi yang dapat menggambarkan proses konversi abu layang adalah sebagai berikut :



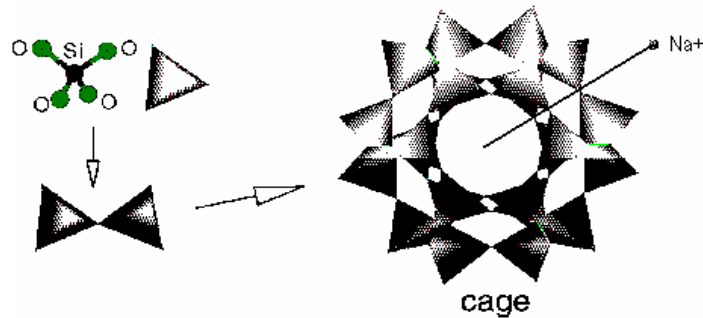
Anion silikat bereaksi dengan prekursor Al(III) untuk membentuk komponen aluminosilikat. Pada larutan basa, aluminium memberikan muatan negatif pada spesies tetrahedral  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ , sebagai struktur yang selalu ada selama proses konversi berlangsung. Dengan adanya proses refluks selama 12 jam, 24 jam dan 72 jam pada temperatur  $100^\circ\text{C}$  dapat mengakibatkan terjadinya penyusunan kembali silika dan alumina yang terlarut membentuk struktur zeolit yang lebih teratur. Silika dan alumina membentuk kerangka zeolit seperti Gambar 6 dan Gambar.7.

Peningkatan konsentrasi zat terlarut (silika dan alumina) pada temperatur konstan akan mengubah larutan stabil menjadi larutan metastabil. Pada larutan

metastabil inilah terjadi pertumbuhan kristal (Feijen, 1994). Kenampakan inti yang menyebabkan kristal tumbuh spontan adalah hasil fluktuasi proses pelarutan. Fluktuasi ini menghasilkan proses timbul dan hilangnya embrio inti hingga embrio mencapai ukuran kritis yang dibutuhkan untuk pertumbuhan kristal (Barrer, 1982). Konsentrasi spesies oligomer paling tinggi sebagai akibat peningkatan konsentrasi silikat karena pelarutan terdapat pada daerah perbatasan lapisan yang mengelilingi gel. Pada daerah ini pembentukan inti (nukleasi) lebih mudah terjadi. Setelah nukleasi, pertumbuhan kristal mulai berlangsung, dimana inti berkembang melalui kondensasi spesies prekursor menjadi kristal yang sempurna (Feijen, 1994).



**Gambar 6.** Mata rantai kerangka zeolit (Oudejans, 1984)



**Gambar 7.** Kerangka zeolit yang terbentuk dari ikatan 4 atom O dengan 1 atom Si dan letak kation logam  $\text{Na}^+$  (Bell, 2001).

## KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kandungan logam Na mengalami peningkatan pada waktu refluks 12-24 jam yaitu dari 0,119 mg/g – 4,18 mg/g, kemudian mengalami penurunan pada waktu refluks 72 jam menjadi 2,085 mg/g.
2. Metode refluks dengan NaOH 3M, temperatur  $100^\circ\text{C}$  dan rasio NaOH dengan abu layang 8 ml  $\text{g}^{-1}$  dapat mengkonversi abu layang batubara menjadi zeolit.
3. Untuk waktu refluks 12-72 jam, semakin banyak jenis zeolit yang terbentuk. Zeolit yang terbentuk dari hasil refluks dengan waktu 12 jam adalah zeolit Na-P1, 24 jam adalah zeolit Na-P1 dan NaA-Hidrat dan 72 jam adalah zeolit Na-P1, NaA-Hidrat, *Analcime* dan NaX-Hidrat. Zeolit Na-P1 mempunyai kristalinitas yang baik pada waktu refluks 24 jam.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barrer, R.M., 1982, *Hydrothermal Chemistry of Zeolites*, Academic Press, London.
- Darwanta., 1997, *Kajian Penambahan  $\text{Al}(\text{OH})_3$  dalam Sintesis Zeolit 4A dari Abu Layang Batubara*, Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas MIPA UGM, Yogyakarta.
- Fajril A., 1996, *Sintesis Zeolit 4A dari Abu Layang Batubara*, Thesis Program Pasca Sarjana. UGM, Yogyakarta.
- Feijen, E.J.P., Martens, J.A., dan Jacobs, P.A., 1994, Zeolite and Their Mechanism of Synthesis, *Studies in Surface Science and Catalysis*, 84: 3-15.
- Flanigen, E.M., Khatami, H., Szymanski, H.A., 1971, Infrared Strucural Studies of Zeolite Framework. Molecular Sieve Zeolite-I, *American Society Advanced in Chemistry Series*.
- Hamdan, H.,1992, *Introduction to Zeolites : Synthesis, Characterization and Modification*, Universitas Teknologi Malaysia, Kuala Lumpur
- Murayama, N., Yamamoto, H., dan Shibata, J., 2002, Zeolite Synthesis From Coal Fly Ash by Hydrothermal Reaction Using Various Alkali Sources. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 77(3): 280-286.
- Querol, X., Alastuey, A., Soler, A.L., dan Plana, F., 1997, A Fast Method for Recycling Fly Ash: Microwave-Assisted Zeolite Synthesis. *Environ. Sci. Technol.*, 31(9): 2527-2533.