

Sintesis Zeolit dari Bahan Dasar Abu Terbang Sebagai Adsorben Logam Berat Cu (II)

Rio B. Handika¹, Suwardi², dan Untung Sudadi²

¹ Mahasiswa Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, ² Staf Pengajar, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Jl. Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680; Email: handikaharu@gmail.com

Abstrak

Beberapa penelitian untuk meningkatkan kemampuan zeolit sebagai bahan penjerap logam berat telah banyak dilakukan dengan cara aktivasi. Namun demikian sampai saat ini belum diperoleh metode aktivasi yang memuaskan. Cara lain untuk meningkatkan kemampuan zeolit dengan pembuatan zeolit sintesis. Hanya saja cara ini dianggap mahal karena harus dibuat dari bahan kimia dan diproses melalui reaksi kimia yang agak rumit di laboratorium. Oleh karena itu, pembuatan zeolit sintetik dari bahan baku yang murah dan proses yang sederhana menjadi alternatif yang menarik untuk diteliti. Abu terbang (*fly ash*) yang dihasilkan dari pembakaran batubara merupakan limbah yang tersedia dalam jumlah yang sangat besar. Tidak kurang dari 400.000 ton/tahun abu terbang dihasilkan dari limbah pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Kandungan silika oksida yang terdapat pada abu terbang merupakan bahan baku penting untuk pembuatan zeolit sintetik. Karakterisasi terhadap zeolit sintetik, zeolit alam asal Lampung dan abu terbang dengan melakukan analisis kapasitas tukar kation, jumlah basa-basa, dan gugus yang terbentuk. Kemudian dilakukan percobaan terhadap kemampuan adsorpsi zeolit sintetik, zeolit alam asal Lampung, dan abu terbang terhadap logam berat tembaga (Cu II) dengan menggunakan sistem batch. Parameter yang diamati adalah kemampuan penjerapan logam Cu pada konsentrasi 50, 100, 150, 200, dan 250 ppm dengan waktu kontak yang sama 30 menit. Interpretasi terhadap data yang diperoleh dilakukan dengan menggunakan persamaan Langmuir dan persamaan BET (Brunauer-Emmett-Teller).

Hasil penelitian dengan menggunakan X-ray menunjukkan bahwa zeolit sintetik telah berhasil dibuat yang dicirikan oleh terbentuknya puncak-puncak difraksi pada 2 theta yang sama dengan zeolit standar. Dalam difraktogram terdapat 10 puncak khas yang dihasilkan pada zeolit sintetik yang telah dibuat. Dari 10 puncak khas yang dihasilkan terdapat 5 puncak yang cocok dengan jenis mineral (Zeolit Sintetik ITQ-12) $\text{Si}_{24}\text{O}_{48}$ dan $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. Gugus yang terbentuk terlihat pada rentang bilangan gelombang 1400 – 900 yang menunjukkan karakteristik pembentukan silika oksida. Kapasitas tukar kation zeolit sintetik sebesar 249,52 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ jauh lebih besar dibandingkan dengan zeolit alam asal Lampung dan abu terbang yang memiliki kapasitas tukar kation masing-masing sebesar 136,67 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ dan 36,46 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$. Hasil analisis kemampuan adsorpsi zeolit sintetik terhadap logam berat Cu dengan persamaan Langmuir sebesar 107,53 mg.g^{-1} jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam asal Lampung sebesar 7,86 mg.g^{-1} maupun abu terbang sebesar 22,08 mg.g^{-1} . Demikian juga jika digunakan persamaan BET zeolit sintetik mempunyai daya jerap Cu sebesar 46,00 mg.g^{-1} yang jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam asal Lampung sebesar 0,11 mg.g^{-1} maupun abu terbang sebesar 0,43 mg.g^{-1} . Hal ini menjelaskan bahwa secara umum logam Cu terjerap pada lapisan multilayer akibat adanya ikatan logam.

Kata kunci: Abu terbang, Karakterisasi zeolit, Logam berat, Zeolit sintetik

1. Pendahuluan

Pencemaran lingkungan merupakan hal yang selalu menjadi perhatian dalam masalah lingkungan. Pengaruh yang diberikan kepada ekosistem akibat pencemaran dapat menyebabkan kerusakan yang sangat fatal bagi kehidupan. Secara umum Contoh logam berat yang sering di temui dalam kegiatan industri yaitu Cu (Tembaga), Zn (Seng), Fe (Besi), Cr (Krom), dan Sn (Timah). Kelima unsur tersebut merupakan logam berat dengan konsentrasi yang tinggi dalam pencemaran lingkungan (Zakaria, 2011). Maka dari itu perlu adanya suatu cara untuk dapat mengurangi pencemaran yang dihasilkan oleh logam berat tersebut. Salah satu cara yang sering digunakan adalah pemberian bahan penjerap logam yaitu zeolit.

Beberapa penelitian untuk meningkatkan kemampuan zeolit sebagai bahan penjerap logam berat telah banyak dilakukan dengan cara aktivasi. Namun demikian sampai saat ini belum diperoleh metode aktivasi yang memuaskan. Cara lain untuk meningkatkan kemampuan zeolit dengan pembuatan zeolit sintesis. Contoh zeolit sintesis yang umum dibuat yaitu ZSM-5, ITQ-12, ITQ-24. Hanya saja cara ini dianggap mahal karena harus dibuat dari bahan kimia dan diproses melalui reaksi kimia yang agak rumit di laboratorium. Oleh karena itu, pembuatan zeolit sintetik dari bahan baku yang murah dan proses yang sederhana menjadi alternatif yang menarik untuk diteliti. Abu terbang (*fly ash*) yang dihasilkan dari pembakaran batubara merupakan limbah yang tersedia dalam jumlah yang sangat besar. Tidak kurang dari 400.000 ton/tahun abu terbang dihasilkan dari limbah pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Kandungan silika oksida yang terdapat pada abu terbang merupakan bahan baku penting untuk pembuatan zeolit sintetik. Pembuatan zeolit sintetik sendiri membutuhkan bahan utama yaitu silika dan alumina sebagai kerangka. Salah satu contoh material yang dapat dijadikan sebagai bahan utama dalam pembuatan zeolit sintetik adalah abu terbang (*fly ash*). Penggunaan abu

terbang sebagai bahan dasar pembuatan zeolit sintetik mengacu pada penelitian Ralayu *et al.* 2005 dan dilakukan modifikasi dalam pembuatannya.

2. Metodologi

Penelitian ini dimulai pada bulan juni hingga september 2015. Penelitian dilakukan di laboratorium Pengembangan Sumberdaya Fisik Lahan, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB, Bogor.

Penelitian dimulai dengan pembuatan zeolit sintetik dari abu terbang. Metode yang digunakan dalam pembuatannya adalah dengan hidrotermal suhu rendah dan penambahan basa yang mengacu pada penelitian Ralayu *et al.* (2005). Tahapan pembuatan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. Tahapan Pembuatan Zeolit Sintetik dari Abu Terbang

No	Tahapan	Uraian
1	Penambahan basa dan katalis	<ul style="list-style-type: none"> Larutan basa yang digunakan adalah NaOH 50% dengan jumlah 1.2 : 1 abu layang. Tanur pada suhu 550 °C selama 2 jam untuk pencampuran bahan. Penambahan Al powder dan NaOH sebanyak 0.02 mol dalam air 200 ml setelah proses tanur.
2	Proses Kristalisasi	<ul style="list-style-type: none"> Aduk dengan pengaduk magnetis selama 30 menit pada 500 rpm. Proses Aging selama semalam. Autoklaf selama 2 jam pada suhu 110 °C Terdapat endapan kristal
3	Produksi zeolit Sintetik	<ul style="list-style-type: none"> Kristal dipisahkan dari larutan. Cuci kristal hingga mendapatkan pH 11 Kristal yang telah dicuci dikeringovenkan selama ± 48 jam.

Setelah mendapatkan zeolit sintetik yang diinginkan kemudian dikarakterisasi dengan penentuan kapasitas tukar kation (KTK) dan basa-basa, analisis struktur dengan menggunakan XRD dan FTIR. Penetapan KTK dilakukan dengan menggunakan larutan NH₄OAc. Uji kemampuan jerapan yang dimiliki oleh zeolit sintetik menggunakan larutan Cu (II). Sebagai pembanding digunakan abu terbang dan zeolit alam yang berasal dari lampung dalam pengukuran kemampuan jerapan. Larutan Cu (II) dibuat dari CuSO₄.5H₂O, dalam berbagai konsentrasi yaitu 50, 100, 150, 200 dan 250 ppm. Waktu serapan yang digunakan adalah selama 30-45 menit. Kemudian larutan setimbang dianalisis menggunakan AAS Shimadzu AA-6300.

Hasil yang diperoleh kemudian dianalisis dengan menggunakan persamaan Langmuir dan persamaan BET. Secara umum persamaan Langmuir dan persamaan BET ditulis sebagai berikut

Langmuir

$$: \frac{C_e}{q} = \frac{q_m K C_e}{1 + K C_e}$$

Bentuk Linear

$$: \frac{C_e}{q} = \frac{1}{q_m K} C_e + \frac{1}{q_m K}$$

BET

$$: \frac{q}{q_{mono}} = \frac{K C_s}{(1 - \frac{C_e}{C_s}) [1 + \frac{C_e}{C_s} (K - 1)] C_s}$$

Bentuk Linear

$$: \frac{1}{q[(\frac{C_s}{C_e}) - 1]} = \frac{K - 1}{q_{mono} K} (\frac{C_e}{C_s}) + \frac{1}{q_{mono} K}$$

Dimana (q) merupakan jumlah kapasitas adsorpsi, (Cs) konsentrasi larutan yang digunakan dan ditambahkan kedalam adsorben, (Ce) konsentrasi larutan saat setimbang. Nilai (K) merupakan konstanta BET dan (q_{mono}) merupakan jumlah adsorben yang terjerap pada permukaan jerapan. Persamaan ini digunakan karena jerapan antar logam sangat kompleks dan tidak hanya membentuk satu lapisan saja, sehingga persamaan ini lebih tepat digunakan pada jerapan logam berat.

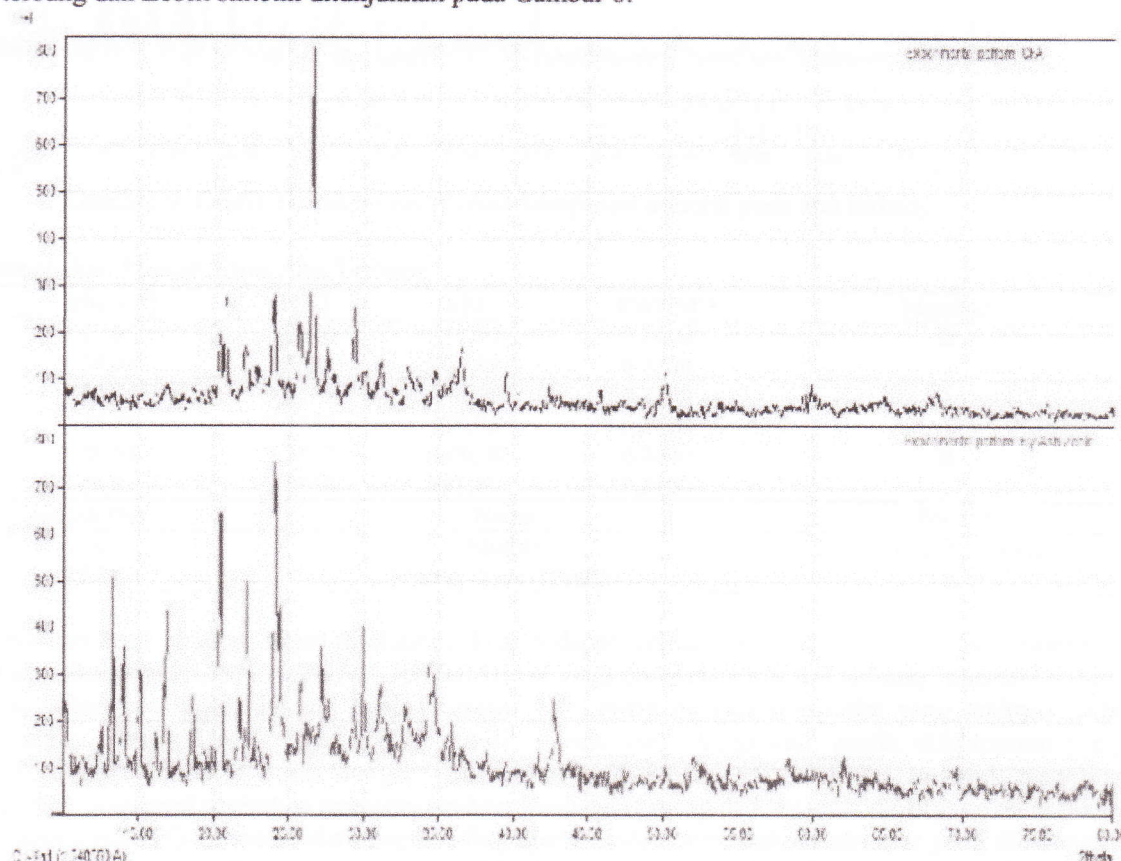
3. Hasil dan Pembahasan

Zeolit sintetik yang telah dibuat terlebih dahulu dikarakterisasi. Hasil KTK dan basa-basa yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 5. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa, sintesis yang dilakukan dari abu terbang dengan penambahan basa dan hidrotermal suhu rendah dapat meningkatkan kemampuan tukar kation. Terjadi perubahan struktur yang terdapat pada abu terbang. Zeolit alam digunakan sebagai pembanding dalam penentuan KTK Zeolit sintetik. Priyadi (2015) menyebutkan bahwa zeolit sintetik memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam menyerap ion, terutama logam berat. Karena secara umum zeolit alam memiliki kemampuan yang lebih rendah, walaupun sudah banyak digunakan sebagai penyerap ion. Hasil pada tabel 2 menjelaskan bahwa zeolit sintetik memiliki kemampuan yang jauh lebih baik jika dibandingkan dengan zeolit alam.

Tabel 5. Nilai Kapasitas Tukar Kation dan Basa-basa

Bahan	KTK	Na	K	Ca	Mg
	cmol kg ⁻¹				
Zeolit Sintetik	246,56	1128,99	107,53	149,47	37,80
Abu Terbang	36,46	4,62	28,07	122,13	39,68
Zeolit Alam	136,67	81,26	9,91	46,17	5,81

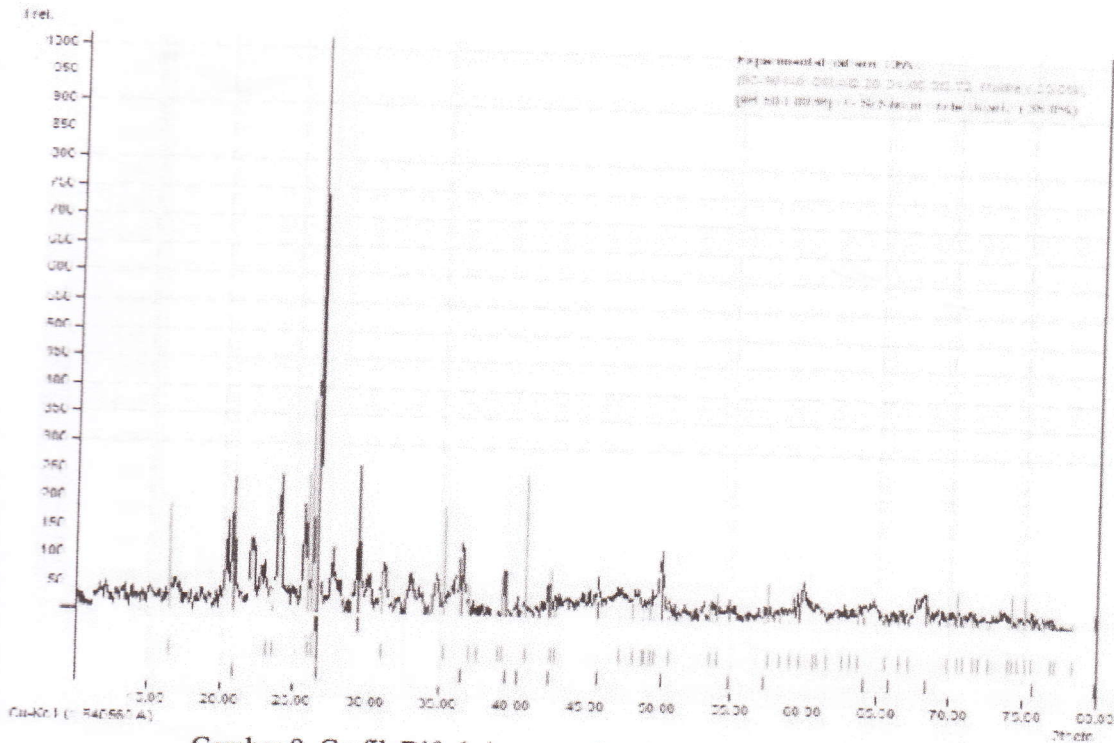
Analisis lebih lanjut untuk dapat mengetahui struktur yang terbentuk dengan menggunakan XRD (*X-ray Diffraction*). XRD merupakan teknik analisis kuantitatif yang digunakan dalam menganalisis karakteristik material untuk mendapatkan informasi tentang ukuran atom dan material kristal. Zeolit sintetik yang telah dibuat dicirikan dan dibandingkan dengan abu terbang. XRD yang menggunakan sumber radiasi Cu K α , dengan nilai k = 1,5406 A. Puncak-puncak khas yang dihasilkan dicocokkan dengan aplikasi Match! 3 dengan referensi data berdasarkan COD Inorganics 6 juli 2015. Data yang diperoleh kemudian diperhalus dan ditentukan peaknya secara otomatis dengan sensitivitas sebesar 0%. Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh puncak khas pada jumlah tertentu. Pencocokan data dilakukan dengan tingkat pengguna rietveld. Hasil difraksi abu terbang dan Zeolit sintetik ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Difraksi Abu Terbang (Atas) dan Zeolit Sintetik (Bawah)

Berdasarkan hasil Gambar 8. dapat terlihat bahwa terjadi perubahan struktur yang terdapat pada abu terbang yang di sintesis menjadi zeolit. Secara umum zeolit tersusun dari kristal alumino silikat dengan struktur kerangka tiga dimensi yang terbentuk dari silika tetrahedral [SiO₄]⁴⁻ dan alumina tetrahedral [AlO₄]⁵⁻ yang terhubung melalui atom oksigen. Abu terbang pada umumnya memiliki komposisi seperti silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan oksida besi (Fe₂O₃). Keberadaan komponen tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembentukan zeolit sintetik (Mufrodi, 2010). Abu terbang (*Fly ash*) merupakan hasil limbah yang berasal dari penggunaan batu bara sebagai sumber bahan bakar.

Data hasil difraktogram kemudian dicocokkan dengan mineral kristal yang diharapkan. Untuk abu terbang komponen silika merupakan komposisi utama yang terdapat di dalamnya, sedangkan untuk alumina dicocokkan dengan mineral mulit (Al₃SiO₅). Hasil pencocokan data disajikan pada Gambar 9 dan Tabel 6.

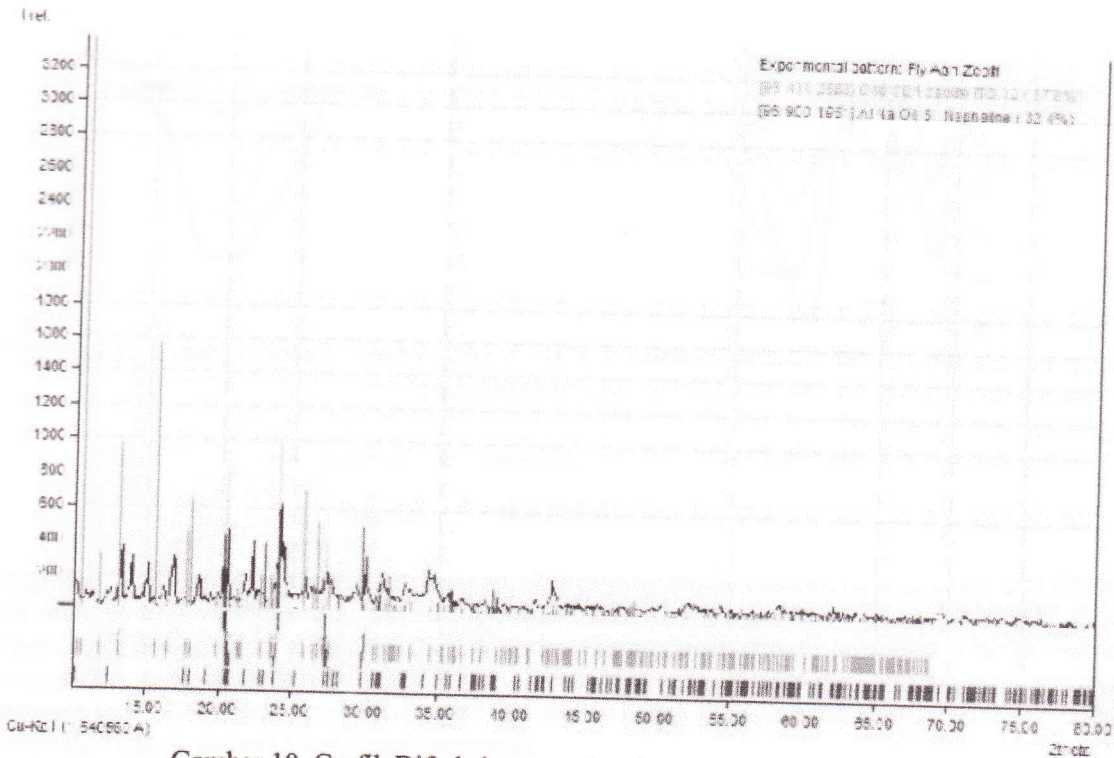


Gambar 9. Grafik Difraksi pencocokan komposisi mineral pada abu terbang

Tabel 6. Pencocokan Puncak Khas Abu Terbang

No.	2theta [°]	d [Å]	I/I0	FWHM	Matched
1	20,85	4,2570	290,84	0,2400	B
2	24,04	3,6980	308,23	0,2400	
3	25,75	3,4567	240,99	0,2400	A
4	26,46	3,3657	382,01	0,2400	A
5	26,64	3,3437	1000,00	0,2400	B
6	29,41	3,0340	261,41	0,2400	
indeks	Jumlah (%)	Nama		Formula	
A	65,0	Mullite		$Al_{2,28} O_{4,86} Si_{0,72}$	
B	35,0	Silicon oxide (Quartz)		$O_2 Si$	

Berdasarkan hasil tersebut dapat dijelaskan, kuarsa dapat terlihat pada 20,85° dan 26,64° sedangkan untuk mineral mullite pada 25,75° dan 26,64°. Jumlah kristal yang dominan pada abu terbang yaitu mullite yaitu sebesar 65%, sedangkan untuk mineral kuarsa sebesar 35% mirip dengan komposisi yang terdapat pada penelitian Zakaria (2011). Untuk dapat melihat hasil sintesis yang diinginkan, grafik difraktogram yang diperoleh dalam zeolit sintetik mirip dengan jenis zeolit sintetik jenis ITQ-12 dan mineral nepheline ($NaAlSiO_4$), dimana mineral nepheline memiliki struktur kimia yang mirip dengan jenis zeolit yang diharapkan sedangkan zeolit jenis ITQ-12 merupakan pembanding apabila tidak terbentuknya struktur yang diharapkan dalam pembuatan zeolit sintetik namun tetap memiliki kemampuan yang baik karena struktur SiO_2 yang dihasilkan memiliki pori-pori yang dapat menyerap ion dengan aktif. Hasil difraksi zeolit sintetik dianalisis terhadap mineral yang diharapkan terbentuk ditunjukkan pada Gambar 10 dan Tabel 7.



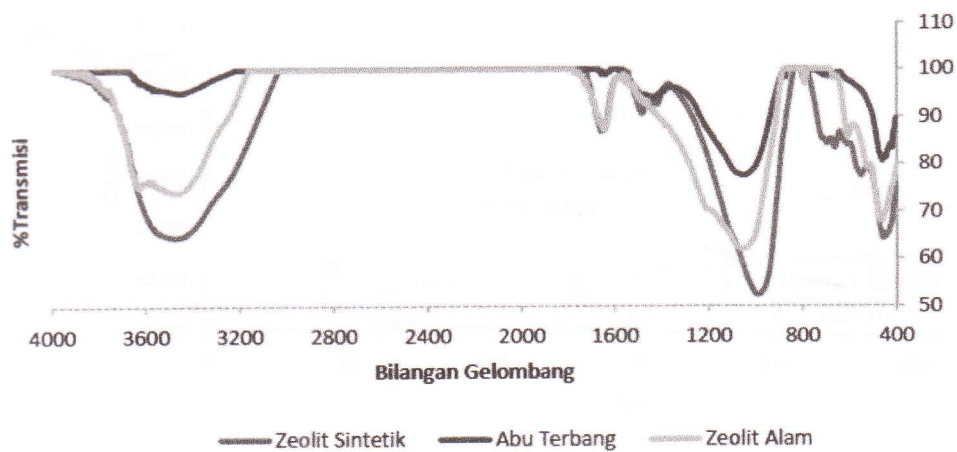
Gambar 10. Grafik Difraksi pencocokan komposisi mineral pada zeolit sintetik

Tabel 7. Pencocokan puncak khas abu terbang

No.	2theta [°]	d [Å]	I/I0	FWHM	Matched
1	13,35	6,6253	619,72	0,2400	
2	14,05	6,2975	460,25	0,2400	A
3	16,94	5,2290	523,85	0,2400	
4	20,32	4,3667	439,37	0,2400	
5	20,52	4,3237	819,06	0,2400	
6	22,28	3,9860	616,99	0,2400	A,B
7	24,11	3,6883	1.000,00	0,2400	
8	24,40	3,6447	625,76	0,2400	A,B
9	27,28	3,2665	428,18	0,2400	
10	30,05	2,9710	471,77	0,2400	A,B
Index	Jumlah (%)	Nama		Formula	
A	67,6	zeolite ITQ-12		O ₄₈ Si ₂₄	
B	32,4	Nepheline		Al Na O ₄ Si	

Berdasarkan hasil tersebut dapat terlihat bahwa terdapat 10 puncak khas yang dihasilkan pada zeolit sintetik yang diperoleh. Dari 10 puncak khas yang dihasilkan terdapat 5 puncak yang cocok dengan jenis mineral yang diharapkan. Selain itu dapat diketahui juga jumlah kristal yang terbentuk didalamnya. Jika pencocokan dilakukan terhadap kedua jenis mineral yang diharapkan, 32,4% maka bahan telah membentuk kristal yang diharapkan, sedangkan 67,6% sisanya membentuk struktur silika baru yang mirip dengan zeolit sintetik ITQ-12.

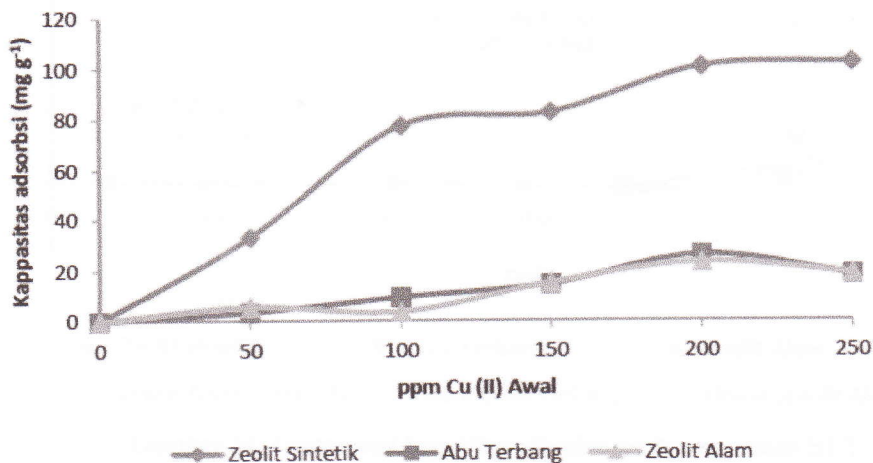
Fourier Transmission Infra-Red (FTIR) merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mengetahui gugus yang terbentuk pada suatu benda. Zeolit sintetik yang telah dibuat dicirikan dan dibandingkan dengan abu terbang serta zeolit alam. Terdapat rentang nilai yang khas dalam menentukan gugus yang terdapat pada zeolit. Hal yang paling terlihat dalam transmisi yang dihasilkan terdapat pada rentang hidroksi dan silika yang merupakan dasar mineral yang terdapat pada zeolit. Pencirian dengan FTIR dapat dilihat pada Gambar 11.



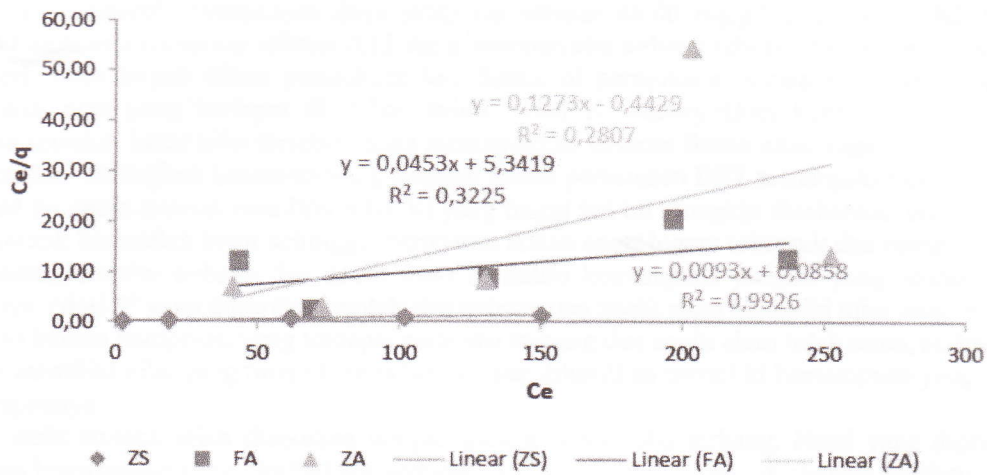
Gambar 11. Grafik hasil analisis FTIR

Gambar 11 menunjukkan bahwa terdapat perubahan yang terjadi pada komposisi kimia dari abu terbang menjadi zeolit sintetik. Pada rentang 3600-3200 menunjukkan bahwa terdapat vibrasi ikatan -OH dalam hal ini berhubungan dengan basa yang dihasilkan pada basa-basa. Zeolit sintetik memiliki nilai basa-basa yang lebih tinggi dibandingkan bahan lainnya (Tabel 2). Rentang yang menentukan terbentuknya struktur baru terdapat pada 1.200-800 dimana pada rentang ini merupakan ikatan O-Si-O. Semakin rendah nilai transmisinya maka semakin banyak ikatan O-Si-O yang terbentuk.

Pengujian terhadap serapan logam berat dilakukan dengan membandingkan zeolit sintetik yang dihasilkan terhadap abu terbang yang digunakan dan zeolit alam yang berasal dari lampung. Hal tersebut dilakukan untuk dapat mengetahui apakah zeolit sintetik dapat menyerap jauh lebih baik dibandingkan dengan zeolit alam. Waktu kontak yang digunakan adalah selama 30-45 menit dengan variasi konsentrasi yang digunakan sebesar 50-250 ppm.



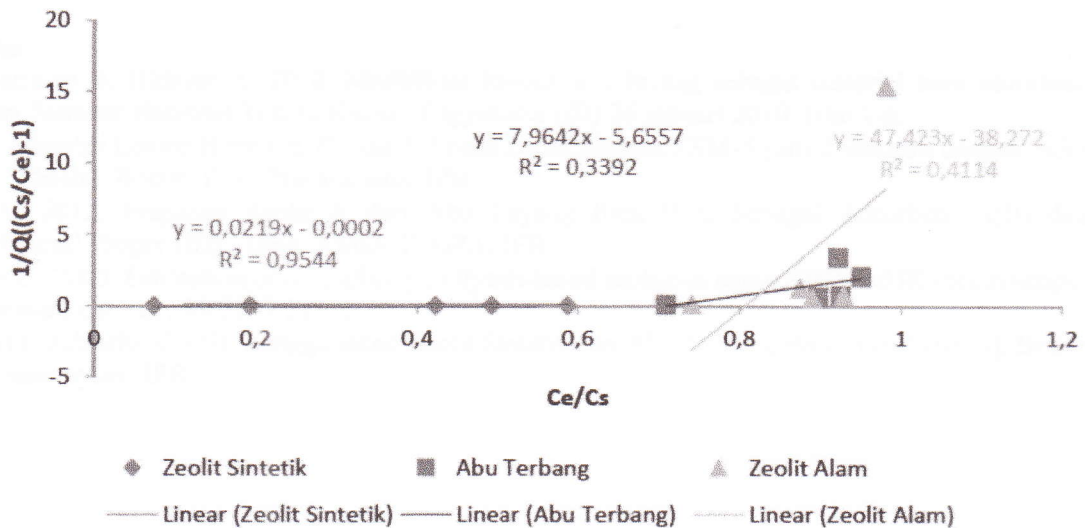
Gambar 12. Kemampuan adsorpsi zeolit pada variasi konsentrasi



Gambar 13. Linearisasi kapasitas adsorpsi pada persamaan langmuir

Tabel 8. Nilai Persamaan Langmuir

Bahan	a	b	R ²	q _c (mg g ⁻¹)	K
Zeolit Sintetik	0,0093	0,0858	0,9926	107,53	0,108
Abu Terbang	0,0453	5,3419	0,3225	22,08	0,008
Zeolit Alam	0,1273	-0,4429	0,2807	7,86	-0,287



Gambar 14. Linearisasi kapasitas adsorpsi pada persamaan BET

Tabel 9. Nilai Persamaan BET

Bahan	A	I	R ²	q _{mono} (mg g ⁻¹)	K
Zeolit Sintetik	0,0219	-0,0002	0,9544	46,00	127,88
Abu Terbang	7,9642	-5,6557	0,3392	0,43	0,41
Zeolit Alam	47,4230	-38,2720	0,4144	0,11	0,24

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terlihat bahwa jumlah jerapan yang dilakukan pada permukaan bahan memiliki kemampuan yang rendah untuk abu terbang dan zeolit alam. Akan tetapi dalam pembuatan zeolit sintetik dapat meningkatkan kemampuan jerapan yang dimiliki ion. Pada hasil yang ditunjukkan, dalam persamaan langmuir persamaan Langmuir sebesar 10.753 mg.g⁻¹ jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam asal Lampung sebesar 7,86 mg.g⁻¹ maupun abu terbang sebesar 22,08 mg.g⁻¹. Demikian juga jika digunakan

persamaan BET zeolit sintetik mempunyai daya jerap Cu sebesar $46,00 \text{ mg.g}^{-1}$ yang jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam asal Lampung sebesar $0,11 \text{ mg g}^{-1}$ maupun abu terbang sebesar $0,43 \text{ mg g}^{-1}$. Sebagian besar jerapan diperkirakan terjadi diluar permukaan ion. Selain di permukaan, logam berat dapat masuk kedalam rongga atau pori yang terdapat di dalam zeolit. Nilai K menunjukkan konstanta BET yang mengartikan bahwa semakin besar nilai tersebut maka menunjukkan besaran ikatan antar logam yang terjadi diluar kompleks jerapan, sedangkan konstanta yang terdapat dalam persamaan BET menunjukkan kemampuan desorpsi. Dalam hal ini zeolit sintetik memiliki nilai $|K|$ yang tinggi hal ini mungkin disebabkan oleh jumlah basa pada zeolit sintetik berjumlah besar sehingga membantu ikatan antar logam terbentuk dan menghasilkan lapisan banyak, sedangkan abu terbang dan zeolit alam memiliki kemampuan jerapan yang rendah pada kompleks jerapannya. Nilai R^2 yang dihasilkan, untuk abu terbang dan zeolit alam memiliki nilai yang rendah, hal ini menunjukkan bahwa komposisi yang terdapat pada abu terbang dan zeolit alam tidak sama, sedangkan pada zeolit sintetik memiliki nilai yang tinggi karena benda yang dihasilkan memiliki kemampuan yang sama pada kompleks jerapannya.

Pembuatan zeolit sintetik telah dilakukan dengan menggunakan abu terbang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kemampuan yang dimiliki abu terbang dapat meningkat setelah di sintesis menjadi zeolit dalam melakukan jerapan terhadap ion logam Cu (II). Kemampuan yang dimiliki oleh zeolit sintetik jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam. Hal tersebut dikarenakan struktur yang terbentuk pada zeolit sintetik dapat dibuat sehingga dapat disesuaikan dengan kemampuan yang diinginkan.

4. Kesimpulan

Sintesis zeolit dari bahan dasar abu terbang dapat digunakan sebagai penjerap logam berat Cu (II). Hal ini terlihat pada hasil karakterisasi mineral yang terbentuk pada XRD dan FTIR. Selain itu, persamaan BET zeolit sintetik mempunyai daya jerap Cu sebesar $46,00 \text{ mg.g}^{-1}$ yang jauh lebih besar dibandingkan zeolit alam asal Lampung sebesar $0,11 \text{ mg g}^{-1}$ maupun abu terbang sebesar $0,43 \text{ mg g}^{-1}$. Hal ini menjelaskan bahwa secara umum logam Cu terjerap pada lapisan multilayer akibat adanya ikatan logam.

Daftar Pustaka

- Mufrodi Z, Sutrisno B, Hidayat A. 2010. Modifikasi limbah abu layang sebagai material baru adsorben. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia. Yogyakarta (ID) 26 januari 2010. Hlm 1-6.
- Priyadi. 2015. Adsorpsi Logam Berat Cu, Pb, dan Cd pada Zeolit Sintetik ZSM-5 yang Disintesis dengan Suhu Rendah [Thesis]. Bogor (ID) : Pascasarjana, IPB.
- Putri, D. L. L. 2012. Preparasi Zeolit A dari Abu Layang Batu Bara Sebagai Adsorben Ni(II) dan Zn(II)[Skripsi]. Bogor (ID) : Dept. Kimia, FMIPA, IPB.
- Ralayu, S.S., *et al.* 2005. Estimation of crystallinity in flyash-based zeolite-A using XRD and IR spectroscopy. *Res Communi Curr Sci* 89:2147-2151.
- Zakaria, A. 2011. Adsorpsi Cu(II) Menggunakan Zeolit Sintetis dari Abu Terbang Batu Bara [Thesis]. Bogor (ID) : Pascasarjana, IPB.