

Pengaruh Tingkat Keasaman pada Karakteristik Zeolit Alam sebagai Adsorben Ammonium Hidroksida (NH₄OH)

Nur Indah Fajar Mukti^{*}, Luthfia Maula Hanifah, Zonanda Rizki Haromain, Alfian Dama Arrazi, Alfian Nuraya

*Jurusan Teknik Kimia, Universitas Islam Indonesia
Jalan Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584, Indonesia*

Artikel histori :

Diterima Mei 2017
Diterima dalam revisi Juli 2017
Diterima Agustus 2017
Online September 2017

ABSTRAK: Zeolit alam merupakan jenis batuan mineral yang banyak tersedia di Indonesia. Di antara banyak manfaat lainnya, zeolit alam dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengatasi pencemaran akibat limbah cair berupa senyawa - senyawa ammonia dan kombinasi turunannya. Penelitian ini dimaksudkan untuk mempelajari pengaruh perbedaan tingkat keasaman terhadap karakteristik zeolit alam sebagai adsorben ammonium hidroksida (NH₄OH). Efek penambahan asam pada zeolit alam dipelajari dengan memvariasikan konsentrasi H₂SO₄ (0,5 N; 3 N and 5 N) dan H₃PO₄ (0,5 N; 3 N and 5 N) yang digunakan dalam proses pengasaman dan dealuminasi. Pada penelitian ini permukaan zeolit diamati menggunakan analisis fourier transform infrared (FTIR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan konsentrasi yang sama, tingkat dealuminasi pada zeolit alam dengan menggunakan asam kuat (H₂SO₄) lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan asam lemah (H₃PO₄). Selain itu, diketahui pula jumlah NH₄OH yang terjerap pada H-Zeolite-H₂SO₄ memiliki kapasitas penjerapan NH₄OH yang lebih tinggi dibandingkan dengan H-Zeolite-H₃PO₄. Kapasitas adsorpsi NH₄OH untuk H-Zeolite-H₂SO₄ dan H-Zeolite-H₃PO₄ secara berturut-turut adalah 23,6 mg/g dan 12,9 mg/g. Dari analisis FTIR yang dilakukan, adsorpsi amonium hidroksida pada zeolit terdealuminasi terjadi pada puncak gugus OH Brønsted.

Kata Kunci: adsorpsi, ammonium hidroksida, asam sulfat, asam fosfat, dealuminasi,

ABSTRACT: Natural zeolites are minerals that are widely available in Indonesia. Among many other benefits, the natural zeolite can be used as an adsorbent to reduce water pollutant caused by ammonia compounds and combination of derivatives. This research aimed to study the effect of different acids on zeolite characteristics as adsorbent of ammonium hydroxide (NH₄OH). The effect of acids addition on natural zeolite was studied by varying the concentration of H₂SO₄ (0,5 N; 3 N and 5 N) and H₃PO₄ (0,5 N; 3 N and 5 N). In this study, zeolite surface was observed by Fourier Transform Infrared (FTIR). Results showed that the amount of NH₄OH adsorbed on H- zeolite has a maximum (23,6 mg/gram zeolit) at 5 N H₂SO₄. From the NH₄OH uptake experiment, it was noted that zeolite obtained from H-Zeolite-H₂SO₄ has higher NH₄OH adsorption capacity than that of zeolite obtained from H-Zeolite-H₃PO₄. The adsorption capacity of H-Zeolite-H₂SO₄, H-Zeolite-H₃PO₄, are 23,6 mg/g and 12,9 mg/g, respectively. FTIR analysis was showed that NH₄OH adsorbed on the surface of H- zeolite on Brønsted acid peak.

Keywords: adsorption, ammonium hydroxide, sulfuric acid, phosphoric acid, dealumination, FTIR

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan Negara yang memiliki berbagai macam jenis batuan mineral alam yang sangat bervariasi. Salah satu batuan alam yang saat ini mulai banyak dimanfaatkan adalah zeolite. Semakin banyaknya penelitian dan pemanfaatan terhadap zeolite dikarenakan zeolite memiliki banyak keistimewaan yaitu sifatnya yang

dapat diatur sehingga dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan dengan cara pemanasan atau proses kimia. Zeolit memiliki banyak kegunaan, diantaranya sebagai katalis, adsorben, penukar ion, dan penghilangan kesadahan pada air.

Pada umumnya zeolit yang diperoleh dari alam mempunyai jenis dan komposisi yang beraneka ragam tergantung pada lokasinya. Selain itu, zeolite yang diperoleh dari alam banyak mengandung pengotor dan

^{*} Corresponding Author:
Email: Email: nurindah_fm@uii.ac.id

umumnya tidak cukup aktif untuk digunakan sebagai katalis atau bahan penjerap. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan terlebih dahulu agar dapat digunakan sebagai adsorben maupun katalis. Dalam kegunaannya sebagai adsorben, permukaan zeolite dapat dimodifikasi sesuai dengan adsorbat yang akan dijerap.

Salah satu kegunaan zeolite sebagai adsorben adalah untuk mengatasi limbah cair yang disebabkan oleh senyawa-senyawa ammonia dan kombinasi turunannya. Hal ini disebabkan struktur zeolit yang sangat porous serta memiliki kation-kation yang dapat dipertukarkan dapat dimanfaatkan untuk menjerap limbah industri (Saltali et al, 2007). Limbah ammonia memerlukan perlakuan khusus dikarenakan beberapa senyawa turunan amonia-organik tertentu yang sangat beracun bagi biota akuatik pada kadar ratusan kali lipat lebih kecil dari kadar amonia bebas dalam limbah cair. Selain itu, menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Tahun 1995 batas maksimum persyaratan amonia bebas dalam air minum yaitu kurang dari 0,05 ppm. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi masalah limbah cair ammonia ini yang salah satunya dapat dilakukan melalui proses adsorpsi.

Sifat adsorpsi zeolit terjadi karena terdapatnya rongga dalam struktur zeolit. Kapasitas penjerapan zeolit berhubungan dengan ruang dan volume yang ada. Beberapa penelitian mengenai modifikasi permukaan zeolit alam sebagai adsorben ammonia telah banyak dilakukan. Veselovskaya et al. (2012) melakukan modifikasi zeolit menggunakan BaCl₂ untuk menjerap larutan ammonia. Lin et al. (2013) menyimpulkan bahwa modifikasi zeolit menggunakan NaCl mampu meningkatkan penjerapan ammonia seiring dengan meningkatnya jumlah Na pada permukaan zeolit. Modifikasi zeolit menggunakan NaCl juga telah dilakukan oleh Ding dan Sartaj (2015). Dari penelitiannya zeolit yang telah dimodifikasi menggunakan NaCl mampu menjerap ammonia sebanyak 22,9 mg/g.

Pada penelitian ini dipelajari pengaruh tingkat keasaman terhadap tingkat dealuminasi zeolit alam dan pengaruhnya terhadap penjerapan NH₄OH. Dalam hal ini analisis dengan fourier transform infrared digunakan untuk mengidentifikasi gugus NH₄OH atau ammonia yang terjerap pada permukaan zeolit pada tingkatan dealuminasi yang berbeda. Variabel yang diteliti adalah pengaruh penambahan H₃PO₄ dan H₂SO₄ dalam proses dealuminasi serta pengaruhnya terhadap banyaknya NH₄OH yang terjerap oleh zeolit.

2. Metode Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit alam yang didapatkan dari Gunung Kidul. Sedangkan larutan asam sulfat 98% dari Merck, larutan asam fosfat 85% dari Merck, larutan HCl 37% dari Merck dan larutan ammonia 25% dari Merck. Prosedur pelaksanaan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

2.1. Persiapan bahan

Zeolit alam yang berupa bongkahan besar dihancurkan dan lalu dihaluskan dengan ball mill untuk kemudian diayak

hingga diperoleh ukuran -100 +200 mesh. Kemudian zeolit dicuci menggunakan aquadest pada suhu 100°C selama 1 jam sebanyak 3 kali. Zeolit kemudian dikeringkan pada suhu 120°C selama 8 jam.

2.2. Pengasaman dan dealuminasi

Zeolit yang telah dicuci kemudian diasamkan menggunakan H₃PO₄ pada suhu 80°C selama 1 jam sebanyak 3 kali. Proses pengasaman terhadap zeolit dengan H₃PO₄ dilakukan pada berbagai konsentrasi (0,5 N, 3 N dan 5 N). Kemudian dilakukan kembali pencucian dengan aquadest pada suhu 80°C sampai pH larutan 3. Zeolit kemudian dikeringkan pada suhu 120°C selama 8 jam. Pada proses ini selain terjadi pertukaran kation juga terjadi proses dealuminasi zeolit. Dengan langkah yang sama juga dilakukan untuk proses pengasaman terhadap zeolit dengan H₂SO₄ pada berbagai konsentrasi (0,5 N, 3 N dan 5 N). Adsorpsi ammonia

2.3. Adsorpsi ammonia

H-zeolit dimasukkan dalam larutan NH₄OH 0,1 N. Waktu adsorpsi dihitung sejak sampel dimasukkan dalam larutan (waktu t=0). Untuk periode waktu tertentu sampel diambil sebanyak 2 mL. Analisis sampel dilakukan dengan metoda titrasi menggunakan HCl 0,01 N yang telah distandardisasi dengan menggunakan boraks. Proses adsorpsi ini dikenakan untuk sampel H-zeolit yang diasamkan dalam H₃PO₄ 5 N, H-zeolit yang telah diasamkan dengan H₂SO₄ 3N dan zeolit yang hanya dicuci dengan menggunakan aquades. Pada bagian akhir proses adsorpsi, zeolit tersebut kemudian direndam semalaman (22 jam) dan kemudian dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 150°C selama 8 jam.

Selanjutnya, konsentrasi NH₄OH di dalam padatan dapat ditentukan dari data percobaan dengan membuat neraca massa NH₄OH di dalam cairan dan padatan. Konsentrasi NH₄OH pada padatan pada keadaan setimbang (Pers. 1)

$$x_e = \frac{(C_o - C_e)V}{W} \quad (1)$$

2.4. Analisis dengan FTIR

Sampel zeolit dihaluskan dengan mortal sampai halus. Kemudian 0,001 gram sampel zeolit yang telah dihaluskan dicampur dengan KBr sampai mencapai berat 0,02 gram. Setelah homogen, campuran tersebut diambil sebanyak 0,004 gram dan kemudian dicampur dengan KBr sampai mencapai berat 0,02 gram. Setelah homogen campuran ditimbang sebanyak 0,01 gram. Campuran kemudian dicetak dengan menggunakan alat cetak sampel yang tersedia sedemikian sehingga diperoleh tingkat transparansi tertentu. Sampel yang sudah siap kemudian diletakkan pada tempat sampel di dalam ruang FTIR yang tersedia. Hasil pengukuran dalam persen transmittan direkam secara otomatis pada personal computer.

2.5. Analisis data

Keadaan kesetimbangan adsorpsi pada penelitian ini dievaluasi dengan persamaan – persamaan empiris adsorption isotherm:

Langmuir isotherm (Perry and Green, 1997)

$$x_e = \frac{K \cdot b \cdot C_e}{1 + K \cdot C_e} \quad (2)$$

Freundlich isotherm (Perry and Green, 1997)

$$x_e = K \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Zeolit alam pada awalnya tidak aktif perlu diaktifkan terlebih dahulu. Pengaktifan zeolit dilakukan dengan dua tahap yaitu tahap pencucian zeolit menggunakan aquadest yang bertujuan untuk membersihkan zeolit yang masih mengandung pengotor yang dapat larut dalam air dan untuk membuka pori-porinya.

Tabel 1. Komposisi Zeolit dari Gunungkidul

Komponen	Berat (%)
SiO ₂	69,50
TiO ₂	0,14
Al ₂ O ₃	12,00
Fe ₂ O ₃	0,93
CaO	0,31
MgO	0,86
K ₂ O	0,66
Na ₂ O	2,22
MnO	0,01
P ₂ O ₅	0,05
H ₂ O	4,07
HD	9,11

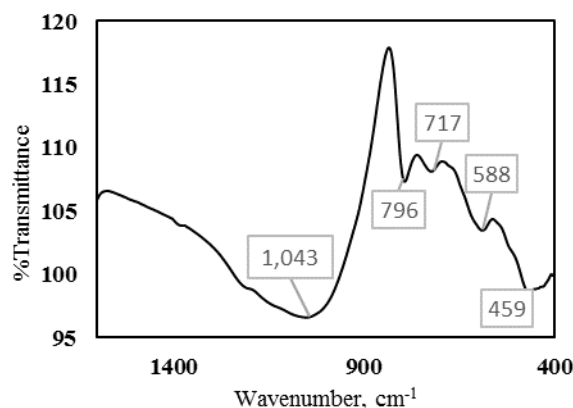
Selanjutnya dilakukan pengasaman pada zeolit dengan menggunakan berbagai jenis asam (HNO₃, H₂SO₄, H₃PO₄). Pengasaman ini bertujuan untuk menukar kation yang ada dalam zeolit digantikan dengan proton H⁺ dari asam, selain itu juga terjadi proses dealuminasi. Zeolit dapat dipertukarkan kationnya karena perbedaan muatan antara Si⁴⁺ dan Al³⁺ menjadikan Al dalam kristal bermuatan negatif dan membutuhkan kation penetral. Kation penetral yang bukan menjadi bagian dari kerangka ini mudah diganti dengan kation lainnya. Penggantian kation penetral dengan proton menjadikan zeolit menjadi padatan yang bersifat asam.

Tahap pencucian zeolit dilakukan sampai pH larutan mencapai 3. Hal ini dikarenakan proses adsorpsi akan lebih efektif dilakukan pada pH 4-8. Karena pada range pH tersebut efisiensi penjerapan ammonium hidroksida pada permukaan zeolit akan meningkat dan akan mulai turun kembali pada pH 9 (Saltali et al., 2006). Selain itu, jika

terdapat asam yang tertinggal maka asam tersebut dapat bereaksi dengan NH₄OH yang dapat mempengaruhi deteksi penjerapan.

3.1. Karakteristik zeolit alam Gunung Kidul

Komposisi dari zeolit alam yang digunakan disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil analisis menggunakan Energy Diffraction X-Ray (EDX), zeolit alam yang berasal dari Gunungkidul merupakan jenis zeolit mordernite. Zeolit mordernite adalah jenis zeolite yang memiliki rasio Si/Al sebesar 5,5 – 6,2. Sebagaimana terlihat pada Tabel 1., terlihat bahwa kandungan Si dan Al pada zeolite alam dari Gunungkidul secara berturut-turut adalah 69,50% dan 12,00%. Sehingga rasio dari Si dan Al dari zeolite alam Gunungkidul sebesar 5,79.



Gambar 1. Hasil spektrum FTIR zeolit alam Gunungkidul

Hasil tersebut juga diperkuat dengan data hasil analisis menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR). Pembacaan spektra FTIR terhadap sampel zeolit alam dari Gunungkidul yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Dari analisis FTIR vibrasi framework zeolit (stretching and bending) dapat terlihat pada daerah mid-IR dan far-IR. Untuk asymmetrical stretching mode (←OTO→) terletak pada 1250 – 950 cm⁻¹, symmetrical stretching (←OTO→) terletak pada 790– 650 cm⁻¹, sedangkan untuk T-O bending mode terletak pada 500– 420 cm⁻¹. Sedangkan untuk group OH pada zeolit terlihat pada daerah 3600–3650 cm⁻¹, (Auerbach, S., 2003).

Tabel 2. Data IR untuk Mordernite

Tipe zeolite	Asymmetrical stretch		Symmetrical stretch		Double Ring	T-O bend
	E	I	E	I		
Mordernite	1223	1045	800	720	580, 560	450

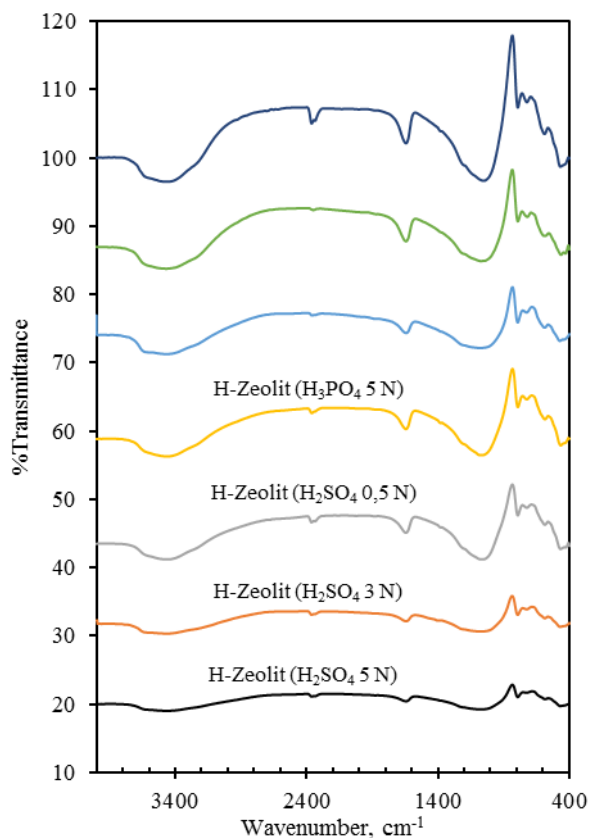
Ket: E= external, I= internal

Dengan membandingkan spektra hasil pengukuran pada Gambar 1 dan vibrasi gugus-gugus untuk zeolit mordernite pada Tabel 2 dapat disimpulkan bahwa zeolit yang berasal dari Gunungkidul merupakan zeolit jenis mordernite.

3.2. Pengaruh pengasaman terhadap tingkat dealuminasi

Penambahan Asam pada zeolit menyebabkan zeolit mengalami proses dealuminasi. Dealuminasi terjadi karena Al dalam kerangka zeolit larut dan bereaksi dengan asam. Efek dealuminasi akan menyebabkan rasio Si/Al dalam zeolit meningkat. Asam yang ditambahkan pada proses pertukaran kation menyumbang proton sebagai asam Brønsted pada zeolit, sehingga semakin tinggi konsentrasi asam maka semakin kuat keasaman zeolit. Namun konsentrasi asam yang semakin kuat akan menyebabkan rasio Si/Al semakin besar sehingga jumlah asam yang ada pada zeolit semakin sedikit (Wang et al., 2007).

Zeolit yang telah melalui proses pengasaman selanjutnya dilakukan analisis menggunakan FTIR untuk mengetahui perubahan struktur dari zeolit setelah proses pengasaman tersebut. Hasil analisis FTIR untuk masing-masing zeolit dapat dilihat pada Gambar 2.



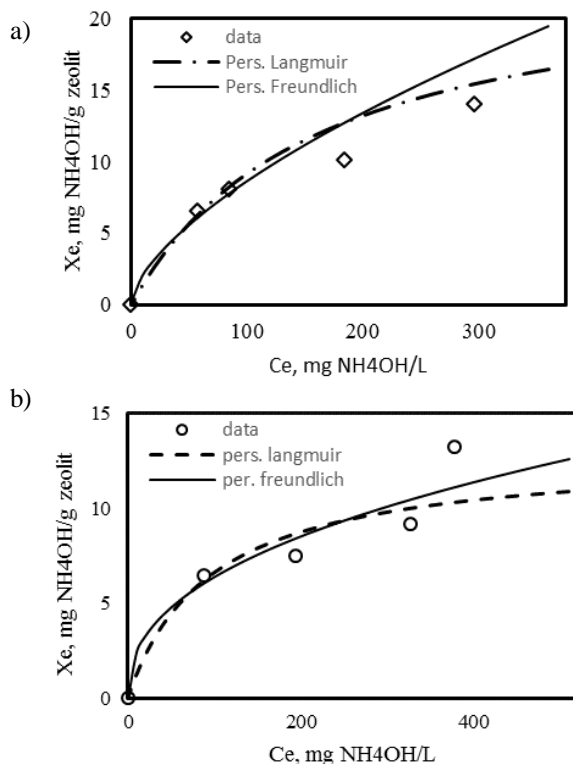
Gambar 2. Hasil analisis FTIR pada zeolit sebelum dan setelah pengasaman

Dari Gambar 2 terlihat adanya perubahan struktur pada zeolit alam yang telah mengalami proses pengasaman. Perbedaan terlihat pada daerah serapan antara 3500–3300 cm⁻¹, 2400 cm⁻¹, 1800–1600 cm⁻¹, 1200–900 cm⁻¹. Pada daerah 3500–3300 cm⁻¹, 1800–1600 cm⁻¹, 1200–900 cm⁻¹ mengalami penurunan puncak serapan seiring dengan meningkatnya konsentrasi dari H₃PO₄ meskipun

penurunannya tidak cukup signifikan. Hal yang sama ditunjukkan pula oleh zeolit yang telah mengalami pengasaman oleh H₂SO₄. Dimana pada daerah tersebut telah mengalami penurunan puncak serapan pada daerah tersebut dan berkurangnya puncak serapan pada daerah tersebut cukup signifikan dibandingkan dengan penambahan H₃PO₄. Sedangkan untuk puncak serapan 2400 cm⁻¹, zeolit dengan penambahan H₃PO₄ memberikan hasil yang berbeda dengan zeolit dengan penambahan H₂SO₄. Dengan penambahan H₃PO₄ pada zeolit alam puncak serapan pada daerah tersebut menghilang meskipun hanya dengan penambahan konsentrasi H₃PO₄ yang rendah. Namun dengan penambahan H₂SO₄ pada zeolit alam masih terlihat adanya puncak serapan pada daerah tersebut meskipun terjadi penurunan puncak serapan.

Dari hasil analisis FTIR pada Gambar 2 tersebut dapat diprediksi adanya kerusakan struktur pada zeolit alam dengan penambahan H₂SO₄ konsentrasi tinggi (H₂SO₄ 5N). Sedangkan pada zeolit alam dengan penambahan konsentrasi H₃PO₄ yang sama (5N) tidak memperlihatkan hal yang sama. Hal ini disebabkan karena perbedaan tingkat keasaman dari H₃PO₄ dan H₂SO₄. H₂SO₄ merupakan asam kuat, sedangkan H₃PO₄ merupakan golongan asam lemah. Sehingga dengan penambahan konsentrasi H₂SO₄ yang terlalu besar dapat merusak struktur dari zeolit alam tersebut. Namun kerusakan struktur tidak diperlihatkan pada penambahan konsentrasi H₃PO₄ yang tinggi. Untuk itu, pada proses penjerapan ammonium hidroksida digunakan H-zeolit dari H₃PO₄ 5N dan H-zeolit dari H₂SO₄ 3N.

3.3. Adsorpsi Ammonium Hidroksida



Gambar 3. Kestimbangan adsorpsi NH₄OH pada H-Zeolit

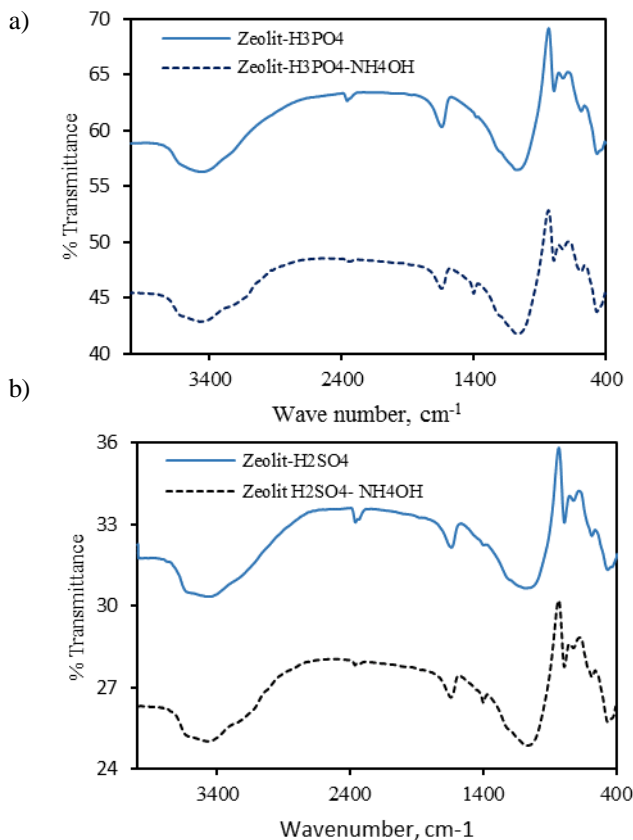
(a) H- Zeolit H₂SO₄, (b) H-Zeolit H₃PO₄

Proses adsorpsi dilakukan setelah zeolit telah mengalami pengaktifan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan proses batch dengan melihat pengaruh penambahan waktu terhadap NH₄OH yang terjerap pada permukaan zeolit. Dari proses adsorpsi pada permukaan zeolit diperoleh hubungan kesetimbangan antara konsentrasi NH₄OH di cairan dengan konsentrasi NH₄OH di padatan.

Tabel 3. Nilai Konstanta untuk Persamaan Langmuir dan Persamaan Freundlich

Persamaan Langmuir		Persamaan Freundlich	
H-Zeolit H₂SO₄ 3 N			
K (L/mg)	6,336 x10 ⁻³	k	0,460
b (mg/gr)	23,616	n	1,571
H-Zeolit H₃PO₄ 5N			
K (L/mg)	1,051 x10 ⁻²	k	0,934
b (mg/gr)	12,928	n	2,398

Dilakukan pula analisis FTIR untuk H-Zeolit sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Dari hasil analisis FTIR diperoleh data seperti pada Gambar 4. Dari Gambar 4 terlihat bahwa terdapat perbedaan antara zeolit yang sebelum proses adsorpsi dan setelah proses adsorpsi.



Gambar 4. Hasil analisis FTIR pada zeolit sebelum dan setelah adsorpsi NH₄OH. (a) H-Zeolit-H₃PO₄ (b) H-Zeolit-H₂SO₄

Pada zeolit setelah proses adsorpsi terlihat adanya peak baru pada kisaran 3200 – 3300 dan 1350 – 1450 cm⁻¹. Selain itu, terlihat pula adanya kehilangan/pengurangan peak pada kisaran 2400 cm⁻¹. Dari hasil analisis FTIR stretching vibrations ion ammonium pada zeolit terlihat pada 3300 cm⁻¹ dan pada 1450 cm⁻¹ untuk ikatan NH₄⁺ (Auerbach et al., 2003).

Gambar 3 menunjukkan bahwa hubungan kesetimbangan antara konsentrasi NH₄OH dalam padatan dengan konsentrasi NH₄OH dalam cairan untuk H-zeolit-H₃PO₄ dan H-zeolit- H₂SO₄. Dari Gambar 3 terlihat bahwa data kesetimbangan hasil percobaan yang dilakukan mendekati Persamaan Freundlich. Nilai – nilai konstanta pada Persamaan Langmuir dan Persamaan Freundlich dapat terlihat pada Tabel 3.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa H-Zeolit-H₂SO₄ memiliki kapasitas penjerapan NH₄OH yang lebih tinggi dibandingkan dengan H-Zeolit-H₃PO₄. Dari nilai-nilai konstanta pada persamaan Langmuir yang diperoleh pada Tabel 3 juga terlihat bahwa kapasitas maksimum dari H-Zeolit-H₂SO₄ lebih tinggi dibandingkan dengan H-Zeolit-H₃PO₄. Nilai kapasitas maksimum untuk H-Zeolit-H₂SO₄ dan H-Zeolit-H₃PO₄ secara berturut-turut yaitu 23,616 mg/gram zeolit dan 12,928 mg/gram zeolit.

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, tingkat dealuminasi akan meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi asam yang digunakan. Dengan konsentrasi yang sama, tingkat dealuminasi dengan menggunakan asam kuat (H₂SO₄) lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan asam lemah (H₃PO₄). Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa jumlah NH₄OH yang terjerap pada H-Zeolite-H₂SO₄ memiliki kapasitas penjerapan NH₄OH yang lebih tinggi dibandingkan dengan H-Zeolite- H₃PO₄. Kapasitas adsorpsi NH₄OH untuk H-Zeolite- H₂SO₄ dan H-Zeolite-H₃PO₄ secara berturut-turut adalah 23,6 mg/g dan 12,9 mg/g. Dari analisis FTIR yang dilakukan, adsorpsi amonium hidroksida pada zeolit terdealuminasi terjadi pada puncak gugus OH Brønsted.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Jurusan Teknik Kimia Universitas Islam Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui skema penelitian Dosen dan Mahasiswa.

Daftar lambang

- b = konstanta persamaan Langmuir
- Ce = konsentrasi NH₄OH dalam cairan pada saat kesetimbangan (mg/L)
- CL = konsentrasi NH₄OH dalam cairan (mg/L)
- Co = konsentrasi NH₄OH dalam cairan mula-mula (mg/L)
- K = konstanta Persamaan Langmuir/Freundlich
- n = konstanta persamaan Freundlich

- w = berat zeolit (gram)
V = volume larutan NH₄OH (mL)
Xe = konsentrasi NH₄OH dalam padatan pada saat kesetimbangan (mg/gr zeolit)

Daftar pustaka

- Auerbach, S., Carrado, K., and Dutta, P.K., 2003, "Handbook of Zeolite Science and Technology", Marcel Dekker, Inc., New York.
- Ding, Y., Sartaj, M., 2015, Statistical analysis and optimization of ammonia removal from aqueous solution by zeolite using factorial design and response surface methodology, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 807–814.
- Kirk, R.E. and Othmer, D.E., 1951, "Encyclopedia of Chemical Technology", vol.5, pp.781-790, Interscience Incyclopedia Inc., New York.
- Lin, L., Lei, Z., Wang, L., Liu, X., Zhang, Y., Wan, C., Lee, D.J., Tay, J.H., 2013, Adsorption mechanisms of high-levels of ammonium onto natural and NaCl-modified zeolites, *Separation and Purification Technology*, 103, 15–20.
- Lusiana, O., 2008, "Pemanfaatan Zeolit Alam Sebagai Adsorben Dan Katalis Yang Bersifat Asam", Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
- Perry, R.H., and Green, D.W., 1997, "Perry's Chemical Engineers Handbook", 7ed., pp. 16-8 – 16-15, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- Saltali, K., Sari, A., and Aydin, M., 2007, "Removal of ammonium ion from aqueous solution by natural Turkish (Yıldızeli) zeolite for environmental quality", *Journal of Hazardous Materials.*, 141, 258–263.
- Treybal, R.E., 1981, "Mass Transfer Operation", 3ed., pp. 106-110, McGrawHill Book Comapny, Inc., New York
- Veselovskaya, J.V., Tokarev, M.M., Grekova, A.D., Gordeeva, L.G., 2012, Novel ammonia sorbents "porous matrix modified by active salt" for adsorptive heat transformation: 6. The ways of adsorption dynamics enhancement, *Applied Thermal Engineering*, 37, 87-94.
- Wang, Y.F., Lin, F., Pang, W.Q., 2007, "Ammonium exchange in aqueous solution using Chinese natural clinoptilolite and modified zeolite", *Journal of Hazardous Materials.*, 142, 160–164.