SINTESIS ADSORBEN ZEOLITE ALAM AKTIF DENGAN BANTUAN MICROWAVE UNTUK ADSORPSI CO₂

Bambang Poerwadi^{*)}, Farid Fadillah Miranda, Mutiara Dita Arini, Rama Oktavian dan Rizka Zulhijah

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono No. 167, Malang, 6541, Telp : (0341) 587710 ext : 1333, Fax: (0341)574140

^{*)}Penulis korespondensi : bampoer@ub.ac.id

Abstract

Synthesis of activated zeolites assisted by microwave and its application for CO₂ adsorption were reported. Zeolites were activated by NaOH aqueous solution with the varied concentration of 1-3M, then were subsequently heated by microwave at 80 °C with the varied time of 3-7 minutes. The CO₂ adsorption process was performed by flowing CO₂ and N₂ gas mixture into fixed bed adsorption column containing activated zeolite granule continuously at 28 °C. The results showed that the concentration of NaOH and the heating time significantly affected the adsorption capacity of zeolites, where the highest CO₂ adsorption capacity of up to 1.165 mmol was obtained for zeolite activated by 1M NaOH and heating times of 3 minutes. Too high concentration of NaOH and prolonged heating time resulted in decreasing the surface area of zeolites. These results also indicate that the activation process of the natural zeolite was able to significantly increase the adsorption capacity, compared to the natural zeolites. Additionally, the effectiveness of the use of microwave was also investigated by comparing it with the zeolite activated by a conventional oven. It was found that the zeolite activated by NaOH 1M and heated for 3 minutes by a microwave has the same adsorption capacity, compared to that of heated for 4 hours by an oven.

Keywords: CO₂ adsorption; Zeolite; NaOH; Microwave

Abstrak

Pada penelitian ini telah dikembangkan sintesa adsorben zeolite alam aktif dengan bantuan microwave dan aplikasinya untuk proses adsorpsi gas CO₂. Zeolite alam diaktivasi dalam larutan NaOH dengan variasi konsentrasi 1-3M, kemudian dilakukan proses pemanasan dengan menggunakan microwave pada suhu 80 °C dengan variasi waktu 3-7 menit. Uji penyerapan CO₂ dilakukan dengan mengalirkan campuran gas N₂ dan CO₂ pada kolom adsorpsi tipe fixed bed yang berisi granul zeolite teraktivasi pada suhu 28 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH dan lama waktu pemanasan mempengaruhi kemampuan adsorpsi zeolite, dimana kapasitas adsorpsi CO₂ tertinggi, yaitu sebesar 1,165 mmol, diperoleh untuk zeolite yang diaktivasi dengan NaOH 1M dan lama pemanasan 3 menit. Terlalu tinggi konsentrasi NaOH dan terlalu lama pemanasan mengakibatkan menurunnya luas permukaan adsorben. Hasil ini juga menunjukkan proses aktivasi pada zeolite alam mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan jika dibandingkan dengan zeolite yang tidak diaktivasi (0,377 mmol CO₂/gram adsorben). Selain itu, efektivitas penggunaan microwave juga dievaluasi dengan membandingkannya dengan zeolite yang diaktivasi dengan menggunakan oven, dimana diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda untuk zeolite yang diaktivasi dengan NaOH 1M selama 3 menit dengan microwave, dibandingkan dengan pemanasan selama 4 jam dengan oven (1,405 mmol CO₂/gram adsorben).

Kata kunci: adsorpsi CO₂; Zeolite; NaOH; Microwave

PENDAHULUAN

Gas CO₂ merupakan gas yang tidak berbau dan tidak berwarna. Pada temperatur dan tekanan normal

(1 atm, 25°C) CO₂ berada dalam fase gas, sedangkan pada temperatur lebih rendah CO₂ akan berbentuk padatan (Kirk dkk., 1992). Sebagian besar gas CO₂

terdapat pada biogas, asap buangan kendaraan dan sebagian kecil pada atmosfer (Yuan dkk., 2013). Gas CO₂ perlu dipisahkan selain karena menyebabkan kerusakan lingkungan, pemisahan gas CO₂ juga dibutuhkan untuk meningkatkan nilai bakar pada biogas (Abatzoglou dkk., 2008). Metode untuk memisahkan CO₂ telah berkembang, salah satunya yaitu metode adsorpsi dengan menggunakan adsorben padat (Chaemchuen dkk., 2016). Metode adsorpsi menggunakan adsorben padat memiliki beberapa keunggulan dibanding metode lainnya, diantaranya mudah untuk di regenerasi, mudah penanganannya dan lebih murah karena proses regenerasi yang mudah, meskipun kapasitas adsorpsi yang dihasilkan oleh adsorben padat tidak setinggi adsorben cair (Yang, 2003).

Salah satu adsorben padat yang banyak digunakan untuk mengadsorpsi gas CO₂ adalah *zeolite*. Penggunaan *zeolite* untuk adsorben gas CO₂ telah banyak dikembangkan, antara lain sintesis *zeolite* untuk memodifikasi struktur maupun untuk meningkatkan luas permukaan dan pori. Berbagai metode telah digunakan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi *zeolite*, salah satunya adalah aktivasi menggunakan logam-logam alkali dan alkali tanah melalui proses pertukaran kation (Adriany, 2012; Zhang dkk., 2008).

Zeolite alam sebagai adsorben padat mempunyai struktur AlO₄ dan SiO₄ yang berbentuk tetrahedral. Substitusi Si oleh Al menyebabkan muatan negatif pada strukturnya, sehingga sangat dimungkinkan untuk dimasuki oleh gugus kation logam-logam alkali dan alkali tanah (Margeta, 2013). Penelitian-penelitian terkait mengenai peningkatan kapasitas adsorpsi CO₂ oleh *zeolite* telah banyak dilakukan, antara lain Adriany (2012), Pillai, dkk. (2015) dan Yang, dkk. (2010) yang menghasilkan kesimpulan bahwa aktivasi *zeolite* menggunakan logam alkali dan alkali tanah mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui bahwa aktivator logam Na⁺ mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂ lebih tinggi daripada aktivator logam alkali lainnya. Namun, pada penelitian tersebut masih ditemukan kelemahan yaitu hanya digunakan satu variasi konsentrasi aktivator saja sehingga masih perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang variasi konsentrasi aktivator larutan NaOH. Selain itu, aktivasi zeolit tersebut dilakukan dengan pemanasan menggunakan oven konvensional dan memerlukan waktu yang cukup angka yaitu 1-24 jam.

Di sisi lain, telah banyak dilaporkan penelitian tentang pemanfaatan gelombang mikro dalam proses pemanasan untuk sintesis berbagai material. Penggunaan *microwave* dalam sintesis material memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan pemanasan konvensional, antara lain mampu memanaskan campuran dalam waktu yang lebih cepat dan menghasilkan panas yang lebih seragam dibandingkan pemanasan konvensional.

Pada pemanasan menggunakan *microwave*, gelombang mikro yang tersebar diserap oleh material yang dipanaskan (Lee dkk., 2004). Panas ditransfer akibat interaksi molekul dielektrik dengan gelombang mikro. Energi yang tertinduksi muncul sebagai panas melalui gesekan molekul sehingga menghasilkan distribusi panas yang lebih merata dan menurunkan energi aktivasi akibat adanya mobilitas atomik yang tinggi pada struktur kristal (Bukhori dkk., 2015). Gelombang mikro dapat memanaskan campuran reaksi dengan sangat cepat, seragam dan secara langsung tanpa terhambat masalah transfer panas melalui dinding seperti yang terjadi pada pemanasan konvensional (Romero, 2007).

Mengacu pada beberapa kelebihan tersebut, beberapa penelitian tentang aplikasi teknologi *microwave* dalam sintesis *zeolite* juga telah banyak dilaporkan (Abrishamkar dkk., 2010; Song dkk., 2013). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa dengan menggunakan bantuan *microwave* akan mampu mempersingkat waktu kristalisasi, mempercepat proses nukleasi, menghasilkan partikel dengan distribusi partikel yang sempit, mengurangi fase yang tidak diinginkan dan menghasilkan partikel dengan morfologi yang berbeda-beda.

Berdasarkan penjelasan tersebut, maka pada penelitian ini dilaporkan hasil penelitian tentang pemanfaatan *microwave* dalam proses aktivasi *zeolite* alam Malang. Pengaruh aktivator larutan NaOH dalam berbagai konsentrasi pada suhu 80°C dengan berbagai waktu aktivasi terhadap kapasitas adsorpsi *zeolite* pada gas CO₂ juga dipelajari dengan detail. Selain itu, hasil yang didapatkan juga dibandingkan dengan *zeolite* yang diaktivasi dengan menggunakan metode konvensional.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *zeolite* alam Malang. Bahan penunjang yang digunakan antara lain NaOH *Pure Analysis Grade*, KOH *Pure Analysis Grade*, natrium metasilikat, akuades, *methylene blue*, gas CO₂ dan gas N₂.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain kolom adsorber tipe *fixed bed*, *beaker glass*, neraca analitik, ayakan 10 mesh dan 12 mesh, *furnace*, orsat, *microwave*, *granulator*, kertas saring, dan *shaker*.

Prosedur Penelitian

Sintesis Zeolite Aktif

Proses aktivasi *zeolite* dilakukan dengan mencampurkan tiap 1 gram *zeolite* alam berukuran 100 mesh dalam 2 ml larutan NaOH dengan konsentrasi 1M, 2M dan 3M, kemudian dipanaskan pada suhu 80°C menggunakan oven dan *microwave*. Aktivasi *zeolite* menggunakan oven dilakukan selama 4 jam, sedangkan aktivasi *zeolite* menggunakan *microwave* dilakukan dengan variasi waktu 3, 4, 5, 6 dan 7 menit. *Zeolite* yang telah diaktivasi kemudian

dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat sama dengan pH akuades ketika diukur menggunakan indikator pH universal. Zeolite yang telah dicuci kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 110°C selama 2 jam.

Zeolite teraktivasi kemudian digranulasi dengan cara menempatkan serbuk zeolite teraktivasi pada granulator yang berputar dengan kecepatan 32 rpm, kemudian disemprotkan larutan Natrium metasilikat konsentrasi 50%. Proses granulasi dilakukan hingga mendapatkan granul zeolite. Kemudian dilakukan pengayakan untuk mendapatkan partikel yang lolos ukuran mesh 10 dan tertahan di ukuran mesh 12 (-10+12 mesh). Granul zeolite kemudian dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam kemudian dikalsinasi pada suhu 300°C selama 2 jam.

Karakterisasi

Granul zeolite teraktivasi kemudian dilakukan uji gugus fungsi dengan *Forrie Transform Infra Red* (FT-IR; Nicolet 6700, KBr powder, USA) dengan rentang angka gelombang 4000–400 cm⁻¹.

Luas permukaan pori zeolit dikarakterisasi dengan uji adsorpsi *methylene blue*. Pengujian *methylene blue* diawali dengan pengujian angka gelombang adsorbansi maksimum dan pembuatan kurva standar menggunakan UV-Vis Spektrofotometri. Dari kurva standar tersebut dapat diperoleh persamaan hubungan antara adsorbansi *methylene blue* oleh UV-Vis Spektrofotometri dan konsentrasi *methylene blue* (ppm). Adsorpsi *methylene blue* dilakukan menggunakan sampel adsorben zeolite sebanyak 0,5 gram dan larutan *methylene blue* 25 ppm sebanyak 50 ml. Adsorpsi dilakukan selama 1 jam dengan menggunakan *shaker* dengan kecepatan putaran 160 rpm. Hasil adsorpsi kemudian diukur adsorbansinya menggunakan UV-Vis Spektrofotometri. Kapasitas adsorpsi *methylene blue* dihitung melalui persamaan berikut.

$$\text{Adsorpsi methylene blue } \left(\frac{\text{ppm}}{\text{g}} \right) = \frac{C_0 - C_t}{m} \quad (1)$$

dimana, C_0 = konsentrasi *methylene blue* sebelum adsorpsi (ppm)

C_t = konsentrasi *methylene blue* sesudah adsorpsi (ppm)

Uji Adsorpsi CO₂

Proses adsorpsi gas CO₂ dilakukan menggunakan laju alir gas CO₂ 0,15-0,16 L/menit dan konsentrasi gas CO₂ sebesar 29,35 - 31,38 % volume. Komposisi campuran gas diatur setiap awal proses adsorpsi dengan *trial* dengan bantuan alat Orsat. Susunan kolom adsorber CO₂ ditunjukkan pada gambar 1.

Pengukuran konsentrasi CO₂ pada proses adsorpsi dilakukan menggunakan alat Orsat tiap 10 menit hingga 120 menit, serta pada awal dan akhir adsorpsi.

Gambar 1. Susunan alat adsorpsi CO₂

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Proses Aktivasi Terhadap Gugus Fungsi Zeolite

Gambar 2 menunjukkan hasil Uji FT-IR zeolite tanpa aktivasi, zeolite teraktivasi NaOH 1M dengan bantuan microwave 3 menit, dan zeolite teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan oven 4 jam.

Berdasarkan hasil uji FT-IR, gugus hidroksil berupa Si-OH pada *defect silanol nest* muncul pada puncak ~3450 cm⁻¹. Gugus Si-O-Si muncul pada angka gelombang ~1031 cm⁻¹ (Lambert, dkk, 1987). Peak pada angka gelombang ~496 cm⁻¹ terbaca sebagai gugus Si-O-Al (Saikia dkk., 2010) dan puncak pada angka gelombang 3622 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus Al-OH yang diketahui sebagai gugus Al-OH *extraframework* atau tidak terikat pada struktur zeolite (Saikia dkk., 2010).

Dari uji FTIR diperoleh pula data luas area puncak (cm²). Luas area puncak menunjukkan absorbansi gugus fungsi pada zeolite yang besarnya proporsional dengan jumlah gugus fungsi terkait (Chen dkk., 2015).

Tabel 1 menunjukkan penurunan luas area puncak pada angka gelombang 3450, 1031, dan 496 cm⁻¹ untuk sampel setelah aktivasi. Penurunan intensitas ketiga gugus tersebut menunjukkan penurunan jumlah gugus Si-OH, Si-O-Si, dan Si-O-Al akibat pemutusan ikatan karena ekstraksi Si (desilikasi) setelah aktivasi menggunakan larutan NaOH. Penurunan intensitas Si-OH, Si-O-Si, dan Si-O-Al yang lebih besar terjadi pada zeolite teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan oven selama 4 jam dibandingkan zeolite teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan *microwave* selama 3 menit. Hal ini menunjukkan penurunan intensitas beberapa gugus fungsi tetapi tidak merubah gugus fungsi tersebut.

Penurunan luas permukaan puncak yang sangat signifikan terlihat pada gugus Si-O-Si, dimana pada zeolite teraktivasi, gugus Si-O-Si turun sampai sekitar 4 kali lipat dibanding zeolite yang tidak teraktivasi. Hal ini dikarenakan pada proses aktivasi terjadi proses desilikasi dari rangka zeolite dengan media alkali. Atom Si pada Si-O-Si terekstraksi terlebih dahulu pada perlakuan basa dibandingkan Si-O-Al. Hal ini disebabkan keberadaan AlO₄⁻ yang mampu menstabilkan atom Si di sekitarnya dengan menolak OH⁻. Sehingga Si-O-Al cenderung tidak diserang oleh OH⁻ dibandingkan Si-O-Si (Sadowska dkk., 2013).

Tabel 1. Gugus-gugus interpretasi pada spektra hasil FT-IR

Gugus	Angka Gelombang	Luas permukaan puncak (cm ²)		
		ZA	ZN-1M-3MW	ZN-1M-O
Si-OH silanol nest	3449-3453	7732	6734	1915
Si-O-Si	1031-1035	4338	1020	955
Al-OH	3622	-	-	41
Si-O-Al	467-469	1642	1577	424

Selain itu, pada *zeolite* teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan oven selama 4 jam muncul puncak yang diinterpretasikan sebagai gugus Al-OH *extraframework* pada angka gelombang 3622 cm⁻¹. Al-OH *extraframework* merupakan Al-OH lepas yang merupakan hasil dari deformasi struktur akibat aktivasi NaOH.

Pengaruh Proses Aktivasi terhadap Luas Permukaan Zeolite

Uji adsorpsi *methylene blue* memberikan hasil berupa kapasitas adsorpsi *methylene blue* pada *zeolite* (ppm/gram adsorben), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai kapasitas adsorpsi ini mampu mewakili besar pori *zeolite* berdasarkan persamaan berikut:

$$Smb = \frac{Ng \times aMB \times N \times 10^{-20}}{M} \quad (2)$$

Sumber: Graham (1998)

dimana *Smb* merupakan luas permukaan area *zeolite* yang dihitung menggunakan persamaan adsorpsi *isothermis Langmuir*, *Ng* merupakan banyaknya *methylene blue* yang teradsorpsi pada *monolayer*, *aMB* merupakan luas dari 1 molekul *methylene blue* (197,2 Å²), *N* merupakan bilangan Avogadro dan *M* merupakan massa molekul *Methylene Blue* (Graham, 1998). Pada penelitian ini, pengujian adsorpsi *methylene blue* hanya sampai tahap penentuan *Ng*. Nilai *aMB*, *N* dan *M* adalah sama untuk tiap sampel *zeolite*, sehingga dapat disimpulkan besar *Smb* sebanding dengan *Ng* yaitu banyak konsentrasi *methylene blue* yang teradsorpsi pada *monolayer*.

Gambar 3a menunjukkan pengaruh lama waktu aktivasi dengan *microwave* terhadap besar konsentrasi *methylene blue* yang bisa teradsorpsi pada *zeolite*. Pada gambar ini dibandingkan dua sampel *zeolite* yang diaktivasi dengan konsentrasi NaOH yang berbeda, yaitu 1M dan 3M. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk sampel *zeolite* yang diaktivasi dengan NaOH 1M terjadi peningkatan konsentrasi *methylene blue* yang dapat diserap pada *zeolite* yang dipanaskan selama 3 dan 4 menit dengan menggunakan *microwave*, yaitu sebesar 21,12 dan 18,64 ppm/g adsorben. Waktu pemanasan yang lebih lama justru semakin menurunkan konsentrasi *methylene blue* yang bisa diserap. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu pemanasan dengan *microwave* yang optimum (3 dan 4 menit) mampu meningkatkan luas permukaan *zeolite*.

Gambar 2. Spektra hasil Uji FT-IR (Biru: Zeolite tanpa aktivasi; Merah: Zeolite teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan *microwave* 3 menit; Hijau: teraktivasi NaOH 1M dengan pemanasan oven 4 jam)

Adapun pengaruh konsentrasi NaOH pada proses aktivasi untuk beberapa sampel *zeolite* terhadap konsentrasi *methylene blue* yang bisa diadsorpsi dapat dilihat pada Gambar 3b. Mengacu pada hasil sebelumnya, maka waktu pemanasan yang digunakan adalah 3 menit dengan *microwave* (ZN-3MW) dan 4 menit dengan *microwave* (4 MW). Sebagai tambahan, kedua sampel ini juga dibandingkan dengan hasil pemanasan dengan menggunakan oven selama 4 jam (ZN-4O).

Gambar 3b menunjukkan bahwa untuk ketiga sampel, konsentrasi *methylene blue* yang dapat diserap oleh *zeolite* meningkat untuk aktivasi menggunakan konsentrasi NaOH 1 dan 2M. Hal ini juga menunjukkan bahwa aktivasi dengan menggunakan NaOH 1M dan 2M akan meningkatkan luas permukaan *zeolite*. Akan tetapi, penggunaan konsentrasi NaOH yang lebih tinggi, yaitu 3M, justru akan menurunkan luas permukaan *zeolite*, sebagaimana terlihat dari penurunan konsentrasi *methylene blue* yang bisa diserap.

Sebagai tambahan perbandingan, *zeolite* tanpa aktivasi juga diuji adsorpsi *methylene blue*. Uji adsorpsi *methylene blue* menghasilkan adsorpsi 18,22 ppm/gram adsorben *methylene blue* pada *zeolite* tanpa aktivasi. Dimana hasil ini lebih rendah dari semua sampel *zeolite* yang diaktivasi dengan beberapa variabel konsentrasi NaOH dan waktu pemanasan.

Dari hasil tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa *zeolite* teraktivasi dengan bantuan *microwave* 3 dan 4 menit serta *zeolite* teraktivasi dengan bantuan oven memiliki luas pori yang lebih besar dibandingkan *zeolite* tanpa aktivasi. Hal ini disebabkan aktivasi *zeolite* menggunakan NaOH mampu menghilangkan pengotor-pengotor yang

menyumbat pori *zeolite*. Penghilangan pengotor mampu membuka pori sehingga meningkatkan luas permukaan *zeolite* (Taffarel dan Rubio, 2009). Kemudian terjadi penurunan luas pori *zeolite* pada *zeolite* teraktivasi dengan bantuan *microwave* selama 4 hingga 7 menit. Hal ini terjadi dikarenakan seiring dengan peningkatan waktu aktivasi dan konsentrasi NaOH akan menyebabkan deformasi struktur, sehingga menyebabkan luas permukaan *zeolite* berkurang.

Selain itu, dari hasil tersebut juga dapat dilihat bahwa proses pemanasan dengan menggunakan *microwave* dengan waktu yang relatif singkat yaitu 3 dan 4 menit menghasilkan *zeolite* dengan luas permukaan yang hampir sama dengan *zeolite* yang diaktivasi dengan menggunakan oven selama 4 jam. Dengan demikian, penggunaan *microwave* pada proses aktivasi *zeolite* mampu mempersingkat waktu aktivasi dengan menghasilkan kapasitas adsorpsi yang setara dengan penggunaan oven konvensional.

Berdasarkan gambar 3, dapat terlihat bahwa aktivasi *zeolite* menggunakan NaOH menunjukkan peningkatan adsorpsi *methylene blue* pada *zeolite* teraktivasi dengan bantuan oven dan *zeolite* teraktivasi dengan bantuan *microwave* selama 3 menit dan 4 menit. Selanjutnya, sampel *zeolite* dengan luas permukaan terbesar, *zeolite* teraktivasi NaOH dengan pemanasan *microwave* selama 3 menit dan luas permukaan makropori terendah, *zeolite* teraktivasi NaOH dengan pemanasan *microwave* selama 7 menit, serta *zeolite* teraktivasi NaOH dengan pemanasan oven selama 4 jam diuji kapasitas adsorpsi CO₂ nya pada uji adsorpsi CO₂ menggunakan kolom *fixed bed*.

Gambar 3. Hasil evaluasi luas permukaan *zeolite* melalui uji adsorpsi *methylene blue*. 3(a) dan (b) adalah pengaruh lama pemanasan dan konsentrasi NaOH pada proses aktivasi *zeolite* terhadap besarnya konsentrasi *methylene blue* yang bisa diserap.

Evaluasi Kapasitas Adsorpsi CO₂

Hasil uji adsorpsi CO₂ pada *zeolite* yang sudah diaktivasi dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan kapasitas adsorpsi (Qt) CO₂ untuk *zeolite* yang teraktivasi NaOH dibandingkan dengan *zeolite* yang tidak teraktivasi. Dari grafik tersebut bisa dilihat bahwa dalam waktu proses

adsorpsi selama 120 menit, *zeolite* yang tidak teraktivasi memiliki kapasitas adsorpsi CO₂ sebesar 0,38 mmol/g, sedangkan untuk *zeolite* yang teraktivasi NaOH 1M, 2M, dan 3M memiliki kapasitas adsorpsi CO₂ yang lebih besar, yaitu 1,16; 1,00; dan 0,87 mmol/g.

Peningkatan kapasitas adsorpsi CO_2 ini terjadi akibat peningkatan interaksi antara CO_2 – kation penyeimbang dan CO_2 – rangka *zeolite*. Aktivasi menggunakan larutan NaOH menyebabkan terjadinya *cation exchange* antara ion Na^+ pada NaOH dengan kation penyeimbang yang dapat ditukar pada rangka *zeolite*. Jenis kation penyeimbang berhubungan dengan interaksi CO_2 – kation penyeimbang.

Gambar 4. Grafik kapasitas adsorpsi CO_2 pada zeolite tanpa aktivasi dan teraktivasi NaOH

Semakin tinggi kemampuan mempolarisasi CO_2 yang dimiliki kation maka akan semakin tinggi interaksi CO_2 – kation penyeimbang. Kemampuan mempolarisasi ini berbanding terbalik dengan radius ionik kation. Radius ionik Na^+ relatif lebih kecil dibandingkan dengan kation pada golongan yang sama (0,095 nm), sehingga Na^+ memiliki kemampuan mempolarisasi relatif lebih tinggi dibandingkan kation pada golongan yang sama (Kamarudin dkk., 2003).

Aktivasi *zeolite* menggunakan NaOH juga memiliki kemampuan meningkatkan interaksi CO_2 – rangka *zeolite* dengan meningkatkan gradien medan listrik *zeolite* melalui desilikasi. Keberadaan kation Na^+ pada *zeolite* dapat meningkatkan polarisasi CO_2 akibat kemampuan mempolarisasi yang tinggi milik kation Na^+ . Kation Na^+ ditukarkan ke dalam *zeolite* dengan *exchangeable cation* pada rangka *zeolite*.

Selain itu, aktivasi *zeolite* mampu menghilangkan pengotor-pengotor yang terdapat pada pori-pori *zeolite*. Proses ini mampu meningkatkan luas permukaan *zeolite*, sebagaimana yang ditunjukkan pada uji luas permukaan makropori menggunakan adsorpsi *methylene blue* (Gambar 2). Oleh karena itu, aktivasi *zeolite* mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi CO_2 .

Pengaruh konsentrasi NaOH pada aktivasi *zeolite* terhadap kapasitas adsorpsi CO_2 dapat dilihat dalam Gambar 5. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa untuk setiap perlakuan aktivasi, baik menggunakan oven konvensional maupun menggunakan *microwave*, meningkatnya konsentrasi

larutan NaOH menyebabkan menurunnya kapasitas adsorpsi CO_2 . Hal ini disebabkan karena turunnya luas permukaan pori pada *zeolite* yang teraktivasi pada penggunaan konsentrasi NaOH yang lebih tinggi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi akan menyebabkan *substantial loss*, yaitu adanya sebagian kecil Al^{3+} yang terlepas sebagai akibat tingginya konsentrasi NaOH, sehingga menyebabkan turunnya luas permukaan makropori. Selain itu, berkurangnya kandungan Al pada *zeolite* menyebabkan menghasilkan turunya interaksi CO_2 – *zeolite* sehingga menurunkan kapasitas adsorpsi CO_2 . Terlepasnya Al^{3+} terlihat pada hasil uji FTIR yang mendeteksi adanya gugus Al-OH *extraframework* pada ZN-1M-O. Sehingga peningkatan konsentrasi larutan NaOH menyebabkan menurunnya kapasitas adsorpsi CO_2 .

Pengaruh perbedaan proses aktivasi dengan menggunakan *microwave* dan konvensional oven terhadap kapasitas adsorpsi CO_2 juga dapat dilihat dari Gambar 5. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa kapasitas adsorpsi tertinggi untuk pemanasan menggunakan oven selama 4 jam adalah *zeolite* teraktivasi larutan NaOH 1M (ZN-1M-O) yaitu 1,405 mmol CO_2 /gram adsorben, sedangkan *zeolite* yang diaktivasi menggunakan bantuan *microwave* memiliki kemampuan adsorpsi CO_2 tertinggi sebesar 1,165 mmol CO_2 /gram adsorben yaitu pada *zeolite* teraktivasi larutan NaOH 1M dengan pemanasan *microwave* 3 menit (ZN-1M-3MW). Cara pemanasan yang berbeda ini memberikan hasil kapasitas adsorpsi yang tidak jauh berbeda. Hasil ini senada dengan hasil uji karakteristik FTIR, dimana ZN-1M-O memiliki kemiripan perubahan struktur yang terjadi pada ZN-1M-3MW.

Gambar 5. Pengaruh konsentrasi larutan NaOH terhadap kapasitas adsorpsi CO_2

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pemanasan menggunakan *microwave* mampu memberikan hasil yang serupa dengan pemanasan menggunakan oven, dengan waktu pemanasan yang jauh lebih cepat. Peningkatan laju reaksi dengan bantuan gelombang mikro merupakan suatu efek kinetik. Radiasi gelombang mikro menstimulasi

partikel bermuatan untuk berpindah atau berputar, menghasilkan gesekan antar molekul dan akhirnya menghasilkan panas. Pada pemanasan konvensional menggunakan oven, suhu pada campuran reaksi tidak seragam akibat aliran konveksi yang terjadi selama pemanasan antar dinding wadah dengan larutan. Sedangkan pada pemanasan dengan *microwave* suhu campuran lebih seragam, *zeolite* menyerap radiasi gelombang mikro sehingga menghasilkan pemanasan yang lebih cepat dan efisien.

KESIMPULAN

Adsorpsi CO₂ menggunakan *zeolite* dapat ditingkatkan dengan aktivasi *zeolite* secara kimia dengan NaOH pada 80°C. Peningkatan hingga 3,7 kali lipat dapat dicapai untuk pemanasan oven selama 4 jam dan 3,1 kali lipat untuk pemanasan *microwave* selama 3 menit dengan konsentrasi NaOH 1M. Aktivasi *zeolite* dengan bantuan *microwave* sebagai sumber panas mampu menghasilkan *zeolite* dengan karakteristik yang serupa dengan *zeolite* hasil aktivasi dengan sumber panas berupa oven.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriany, R. (2012). Pemanfaatan Zeolit Alam Termodifikasi Kation Na⁺ untuk Penangkapan CO₂. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi*, 46(3), 145-151.
- Yuan, B., Wu, X., Chen, Y., Huang, J., Luo, H., dan Deng, S. (2013). Adsorption of CO₂, CH₄, and N₂ on Ordered Mesoporous Carbon: Approach for greenhouse Gases Capture and Biogas Upgrading. *Environmental Science Technology*, 47(10), 5474-5480.
- Buchholz, F. L., Graham, T., (1998). *Modern Superadsorbent Polymer Technology*. New York, NY: Wiley- VCH.
- Bukhari, S.S., Behin, J., Kazemian, H., dan Rohani, S. (2015). Conversion of Coal Fly Ash To Zeolite Utilizing Microwave and Ultrasound Energies: A Review. *Fuel*, 140, 250-266.
- Yan, C., Zou, C., Mastalerz, M., Hu, S., Gasaway, C., dan Tao, X. (2015). Application of Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in the Geological Sciences – A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 30223-30250.
- Song, H., Wan, X., dan Sun, X. (2013). Preparation of AgY Zeolites using Microwave Irradiation and Study on Their Adsorptive Desulphurisation Performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(5), 915-923.
- Kirk, R.E. dan Othmer, D.F. (1992). *Encyclopedia of Chemical Engineering Technology*. New York, NY: John Wiley and Sons Inc.
- Lambert, J. B. (1987). *Introduction to Organic Spectroscopy*, New York, NY: Macmillan Publisher,
- Abrishamkar, M., Azizi, S. N., dan Kazemian, H. (2010). The Effect of Various Sources and Templates on the Microwave-assisted Synthesis of BZSM-5 Zeolite. *Journal of Anorganic and General Chemistry*, 637(2), 312-316.
- Karmen, M., Logar, N. Z., Siljeg, M., dan Farkas, A. (2013). *Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use*. Croatia: InTech.
- Abatzoglou, N dan Boivin, S. (2008). A review of Biogas Purification Processes. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(1), 42-71.
- Paixao, V., R., Monteiro, M., Andrade, A., Fernandes, J., Rocha, A.P., Carvalho, A., dan Martins. (2011). Desilication of MOR Zeolite: Conventional Versus Microwave Assisted Heating. *Applied Catalyst A: General*, 402(1-2), 59-68.
- Pillai, R.S. dan Titus, E. (2015). CO₂ and N₂ Adsorption in Nano-porous BEA Type Zeolite with Different Cations. *Materials Today: Proceedings*, 2(1), 446-455.
- Romero, M.D, Ovejero, G., Uguina, M.A., Rodriguez, A., dan Gomez. J. M. (2007). Fast Tailoring of the Acid-Base Properties in the NaX Zeolite by Cesium Exchange Under Microwave Heating. *Microporous and Mesoporous Materials*, 98(1-3), 317-322.
- Yang, R.T. (2003). *Adsorbents: Fundamentals dan Applications*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Sadowska, K., Wach, A., Olejniczak, Z., Kustrowski, P., dan Datka, J. (2013). Hierarchic Zeolites: Zeolite ZSM-5 Desilicated with NaOH and NaOH/Tetrabutylamine hydroxide. *Microporous and Mesoporous Materials*, 167, 82-88.
- Saikia, H.J., Parthasarathy, dan Gopalakrishnarao. (2010). *Fourier Transform Infrared Spectroscopic Characterization of Kaolinite from Assam and Meghalaya*. Northeastern. India, India: Almora.
- Taffarel, S.R. dan Rubio, J. (2009). On the Removal of Mn²⁺ Ions by Adsorption Onto Natural and Activated Chilean Zeolites. *Minerals Engineering*, 22(4), 336-343
- Chaemchuen, S., Zhuo, K., dan Verpoort, F. (2016). From Biogas to Biofuel: Material Used for Biogas Cleaning to Biomethane. *ChemBioEng Reviews*, 3(6), 1-17
- Seungtae, Y., Kim, J., dan Ahn, W.S. (2010). CO₂ Adsorption Over Ion-Exchanged Zeolite Beta With Alkali and Alkaline Earth Metal Ions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 135(1-3), 90-94.