

Synthesis of Zeolite-NaY for Methane Adsorption

(Sintesis Zeolit-NaY untuk Adsorpsi Metana)

Indri Susanti^{*)}, Siska Ayu Wulandari, Silvi Rosiva Rosdiana

Program Studi Pendidikan IPA, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Islam Lamongan,
Jl. Veteran No. 53A Lamongan, Indonesia

ABSTRACT

This research aims to synthesize zeolite-NaY material which is then applied as an adsorbent for methane adsorption. Zeolite-NaY was synthesized by hydrothermal method and characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), and isotherm adsorption-desorption N₂ (BET). The characterization results showed that synthesized zeolite-NaY had a diffraction peak with the highest intensity at $2\theta = 6^\circ$ and its morphology showed octahedral crystals. Zeolite-NaY was then applied as an adsorbent for methane adsorption. The methane adsorption test on zeolite-NaY was carried out using the gravimetric method at temperature of 30 °C and pressure of 1 bar. The data was recorded of increasing time every 1 minute until constant. The adsorption test results showed that the methane adsorption capacity on the zeolite-NaY material was 0.436 % wt.

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis material zeolit-NaY yang kemudian diaplikasikan sebagai adsorben untuk adsorpsi gas metana. Zeolit-NaY disintesis dengan metode hidrotermal dan kemudian dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X (XRD), mikroskop elektron scanning (SEM) dan isotherm adsorpsi-desorpsi N₂ (BET). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa material zeolit-NaY hasil sintesis menunjukkan puncak difraksi dengan intensitas tertinggi pada $2\theta = 6^\circ$ dan morfologinya menunjukkan kristal oktahedral. Zeolit-NaY kemudian diaplikasikan sebagai adsorben untuk adsorpsi gas metana. Pengujian adsorpsi gas metana pada zeolit-NaY dilakukan dengan metode gravimetri pada suhu 30 °C dan tekanan 1 bar. Data adsorpsi dicatat setiap kenaikan waktu 1 menit sampai mencapai konstan. Hasil pengujian adsorpsi menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi gas metana pada material zeolit-NaY sebesar 0,436 % berat.

Keywords: Zeolite-NaY, Adsorption, Methane.

^{*)}Corresponding author:

Indri Susanti

E-mail: indri_susanti@unisla.ac.id

PENDAHULUAN

Gas metana (CH₄) merupakan komponen utama dari gas alam yaitu dengan konsentrasi mencapai 90,12% dan sisanya seperti gas etana (C₂H₆) sebesar 0,55-14,22%, propana (C₃H₈), butana (C₄H₁₀) C₅H₁₂, CO₂, He, N₂ dan H₂S dengan jumlah yang bervariasi sesuai sumber gas alam [1]. Gas alam termasuk salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar fosil karena sumbernya jauh lebih besar dibandingkan sumber minyak bumi, yaitu mencapai 152,89 tcf (*trillion cubic feet*) [2], pembakaran yang bersih dan menghasilkan polutan yang lebih sedikit dibanding minyak bumi dan batu bara.

Selain itu, gas metana merupakan penyumbang terbesar kedua pemanasan global setelah karbon dioksida yang dihasilkan oleh aktivitas produksi,

transportasi, dan penggunaan bahan bakar fosil. Gas ini juga berasal dari pembusukan bahan organik di lahan basah, serta sebagai produk sampingan dari pencernaan ruminansia seperti sapi di pertanian. Menurut NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), peningkatan tahunan gas metana di atmosfer selama tahun 2021 berjumlah 17 bagian per miliar (ppb) [3]. Kenaikan ini terbesar yang tercatat sejak pengukuran sistematis dimulai pada 1983. Oleh karena itu, dalam upaya mengurangi pemanasan global, diperlukan suatu teknologi untuk menyimpan gas metana yang merupakan komponen utama dari gas alam kemudian digunakan sebagai energi alternatif.

Beberapa teknologi untuk menyimpan gas alam yang komponen utamanya adalah gas metana antara lain LNG (*Liquefied Natural Gas*), CNG (*Compressed Natural Gas*) dan ANG (*Adsorbed Natural Gas*) [4].

Teknologi LNG dinilai kurang efisien karena proses produksi yang mahal dan keamanannya kurang. Sedangkan pada teknologi CNG, semakin banyak gas alam yang disimpan pada tangki, maka semakin besar tekanan tangki. Tekanan yang tinggi menyebabkan tingginya biaya operasi penyimpanan gas alam. Teknologi ANG lebih banyak dikembangkan saat ini karena tidak membutuhkan tekanan yang besar, sehingga biaya operasional lebih murah. Teknologi ANG dikembangkan melalui teknik adsorpsi menggunakan adsorben berpori [5]. Namun, kemampuan adsorben menyerap gas alam masih lebih sedikit dibandingkan teknologi CNG untuk ukuran tangki yang sama. Oleh karena itu, material adsorben terus dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi gas alam agar sesuai dengan standart US Department of Energy (DEO) yaitu *volumetric storage capacity adsorben* > 180 *volum per volum* (V/V) [6].

Material adsorben yang pernah digunakan untuk adsorpsi gas metana (CH₄) adalah silika mesopori [7] MOF [8], COF [8], zeolit [7] [9] dan karbon [5] [10] [11]. Dari beberapa material tersebut, zeolit merupakan material yang menarik karena memiliki struktur pori mirip sangkar (*cage like*) dengan ukuran molekular 0,5 - 1,2 nm [12]. Pori-pori pada permukaan zeolit bisa diatur sesuai kebutuhan baik mikropori (<2 nm) maupun mesopori (2-50 nm) [13]. Zeolit dengan porositas tinggi mampu menangkap CH₄ hingga 3,8 mmol/g [14]. Berbagai jenis zeolit yang digunakan untuk adsorpsi metana antara lain zeolit-X [15], zeolit-Y [14] dan zeolite-A [16]. Zeolit Y dengan ukuran pori 7,4 Å [1] dapat digunakan untuk mengadsorp gas metana yang memiliki diameter kinetik 3,8 Å [1]. Selain itu, zeolit-Y memiliki stabilitas termodinamik yang relatif tinggi [17] dan luas permukaan zeolit-Y lebih besar (520-725 m²/g) dibandingkan zeolit-A (360-383 m²/g), zeolit-MOR (418-460 m²/g) dan zeolit-RHO (3-90 m²/g) [18]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan sintesis zeolit-NaY untuk adsorpsi gas metana dengan harapan dapat mengurangi jumlah pemanasan global melalui penyerapan gas metana.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan Sintesis Zeolit-NaY

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *magnetic stirrer*, neraca analitik, *autoclave hydrothermal* dan oven. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Natrium Aluminat (Sigma-

Aldrich, 13404-5KG-R), Natrium Silikat (Sigma-Aldrich, 338443-3L), Natrium Hidroksida 99 % p.a (Merck, 011-002-00-6), Aqua DM, gas nitrogen UHP (99,99 % N₂) dan gas metana UHP (99,99 % CH₄).

Prosedur Sintesis Zeolit-NaY

Sintesis material zeolit-NaY pada penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya oleh Susanti and Widiastuti (2019) [13], yaitu melalui teknik hidrotermal yang terdiri dari 3 tahap yaitu *seed gel*, *feedstock gel* dan *overall gel*. Preparasi *seed gel* dengan mencampurkan 23.991 g aqua DM, 3.469 g NaOH, 1.924 g natrium aluminat, dan 17.518g natrium silikat, kemudian ditutup dan didiamkan pada suhu kamar selama 24 jam. *Feedstock gel* dibuat dengan mencampurkan 157,518g aqua DM, 0,100g NaOH, 13,851g natrium aluminat, dan 107.212 g natrium silikat. Kemudian *overall gel* dibuat dengan mencampurkan *seed gel* dan *feedstock gel* pada suhu kamar selama 24 jam, kemudian dipanaskan pada suhu 100 °C selama 7 jam. Zeolit disaring dan dicuci dengan aqua DM sampai pH di bawah 9. Kemudian zeolit dikeringkan pada suhu 110 °C selama 12 jam. Selanjutnya zeolit-NaY hasil sintesis dikarakterisasi dengan XRD, SEM dan Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Gas Nitrogen.

Pengujian Adsorpsi Gas Metana pada Zeolit-NaY

Pengujian adsorpsi gas metana pada zeolite-NaY hasil sintesis dilakukan menggunakan metode gravimetri pada suhu 30°C. Data adsorpsi dicatat setiap kenaikan 1 menit sampai konstan. Kemudian data yang diperoleh digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi gas metana menggunakan persamaan (1).

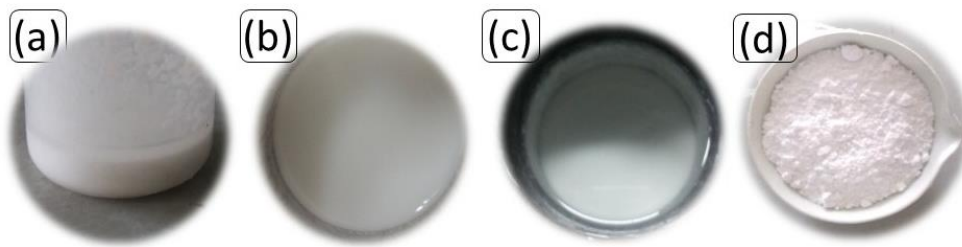
$$\%CH_4 = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \times 100\% \dots\dots\dots (1).$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, sintesis zeolit-NaY dilakukan sesuai prosedur yang telah Susanti and Widiastuti (2019) [13]. Sintesis zeolit-NaY dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu pembentukan gel, proses hidrotermal dan pencucian yang diikuti pengeringan untuk membentuk kristal zeolit. Sintesis zeolit-NaY dilakukan dengan rasio optimum penambahan *feedstock gel* terhadap *seed gel* yaitu 18:1 [19]. Pembentukan gel terdiri dari 3 tahap yaitu pembuatan *seed gel*, *feedstock gel* dan *overall gel* [20, 21], dengan menggunakan beberapa reagen diantaranya yaitu Na₂AlO, Na₂SiO₃ dan NaOH.

Pada pembuatan *seed gel* dilakukan pemeraman selama 1 hari yang berfungsi untuk membangun inti kristal zeolit [21]. *Feedstock gel* merupakan gel yang sama dengan *seed gel*, tetapi dengan jumlah lebih besar dan dibuat tanpa proses pemeraman. *Seed gel* yang dihasilkan dicampurkan ke dalam *feedstock gel* untuk membentuk *overall gel*. *Overall gel* kemudian direaksikan dalam *autoclave stainless steel* yang tertutup rapat untuk

menjaga suhu dan tekanan tetap konstan pada saat hidrotermal hingga diperoleh serbuk putih zeolit-NaY yang selanjutnya dikarakterisasi untuk mengkonfirmasi pembentukan fasa maupun morfologi zeolit-NaY. Adapun keberhasilan pembentukan masing-masing gel secara fisik seperti tertera pada Gambar 1.



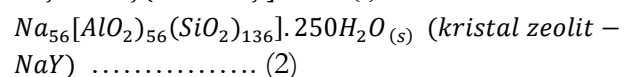
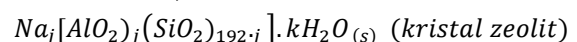
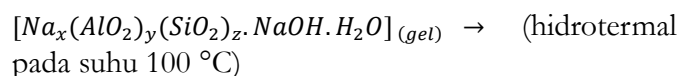
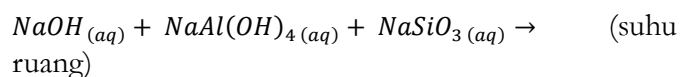
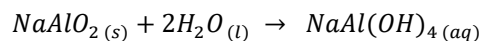
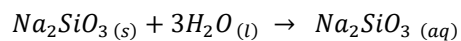
Gambar 1. Pengamatan fisik (a) *Seed gel*, (b) *Feedstock gel*, (c) *Overall gel* setelah proses hidrotermal dan (d) Zeolit-NaY setelah dikeringkan

Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil sintesis zeolit-NaY yaitu perbandingan komposisi antara *seed gel* dan *feedstock gel* serta suhu hidrotermal. Semakin banyak *feedstock gel* yang ditambahkan maka kristalinitas zeolit-NaY mengalami penurunan [19]. Sedangkan suhu hidrotermal pembentukan kristal zeolit-NaY optimum pada suhu 100 °C [22]. Proses hidrotermal pada suhu rendah (40 °C) akan menghasilkan padatan dengan bentuk amorf yang artinya kristal zeolit-NaY belum terbentuk, sebaliknya apabila suhu hidrotermal tinggi (120 °C) akan menghasilkan zeolit-P dari pada zeolit-Y [22].

Seed gel pada pembuatan zeolit-NaY berperan sebagai inti yang terdiri dari unit pembentuk sekunder [19]. Selama pemeraman dengan *feedstock gel*, inti-inti pada *seed gel* berkembang ke ukuran kritis dan kemudian tumbuh dengan cepat menjadi kristal-kristal kecil berukuran sama melalui proses polimerisasi dan depolimerisasi [23]. Reaksi keseluruhan yang terjadi selama proses sintesis zeolit adalah ditunjukkan pada persamaan (2) [24].

Setelah proses hidrotermal didapatkan larutan yang berwarna bening dan padatan putih yang merupakan zeolit-NaY. Untuk itu perlu dilakukan pemisahan dan pencucian supaya bisa didapatkan serbuk zeolit-NaY untuk proses lebih lanjut. Pemisahan dilakukan dengan alat filtrasi vakum untuk mempercepat penyaringan karena material zeolit-NaY yang didapatkan sangat padat dengan pH = 12 yang artinya

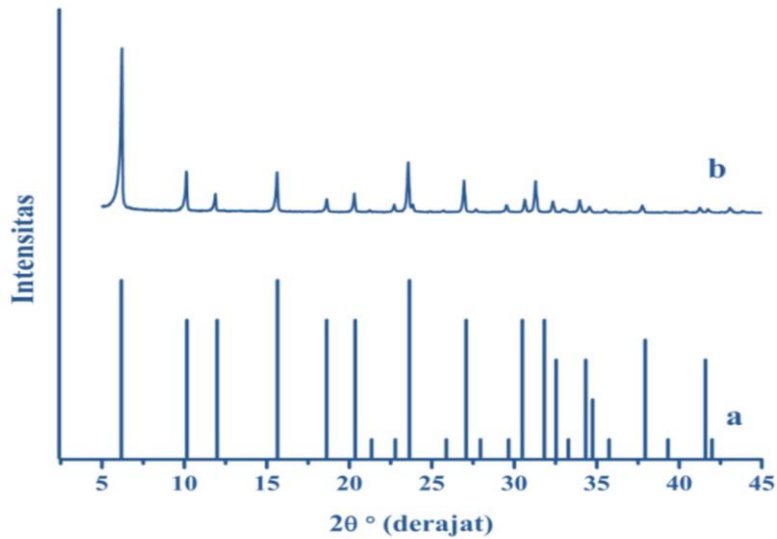
kondisi zeolit sangat basa akibat masih terdapat NaOH berlebih. Kemudian dilakukan pencucian untuk menghilangkan NaOH berlebih dengan menggunakan aqua DM, karena aqua DM memiliki kandungan mineral yang sangat sedikit, sehingga kemungkinan zeolit akan tercemari oleh mineral-mineral lain dapat dihindari. Setelah diperoleh pH dibawah 9, zeolit-NaY, dikeringkan didalam oven pada suhu 110 °C untuk menghilangkan kandungan air. Zeolit-NaY yang didapatkan berbentuk serbuk halus berwarna putih, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. (d).



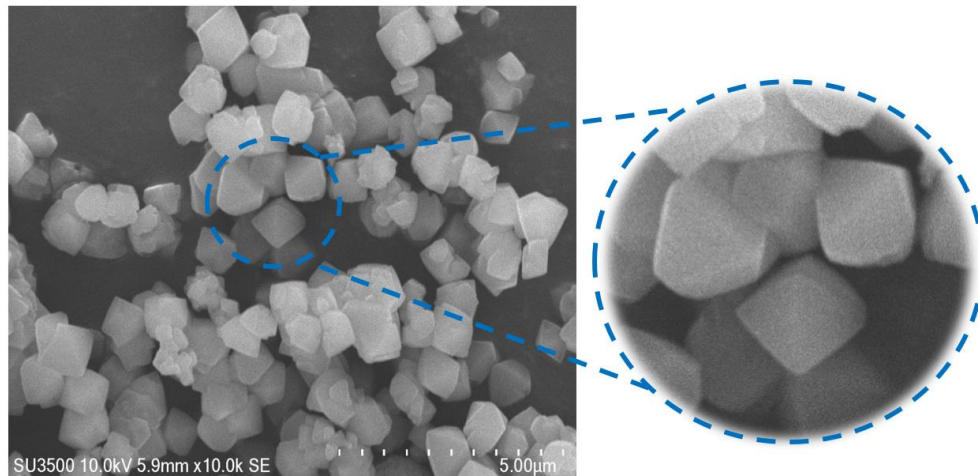
Karakterisasi zeolit-NaY menggunakan XRD bertujuan untuk mengetahui puncak karakteristik pembentukan fasa kristal zeolit dan mengamati ada atau tidaknya fasa-fasa lain yang terbentuk pada zeolit. Difraktogram zeolit-NaY hasil sintesis kemudian dicocokkan dengan difraktogram standar zeolit-NaY

untuk memastikan kesesuaian zeolit-NaY hasil sintesis dengan karakteristik fasa kristal zeolit-NaY standar. Standar zeolit-NaY JCPDS No. 00-038-0240 [25] ditunjukkan pada Gambar 2(a). Sedangkan hasil zeolit-NaY hasil sintesisnya ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2(b) difraktogram zeolit-NaY hasil sintesis menunjukkan adanya puncak difraksi pada $2\theta = 6,2^\circ$ [111], $10,1^\circ$ [220], $11,8^\circ$ [311], $20,2^\circ$ [440], $23,5^\circ$ [533], $26,9^\circ$ [642], $30,5^\circ$ [822], $31,2^\circ$ [555],

dan $32,2^\circ$ [840]. Puncak kristal zeolit-NaY dengan intensitas tertinggi muncul pada $2\theta = 6^\circ$ yang menunjukkan kristalinitas yang tinggi dan tidak terdapat fasa lain yang terbentuk selain zeolit-NaY. Puncak difraksi zeolit-NaY hasil sintesis tersebut sesuai dengan difraktogram standart JCPDS No. 00-038-0240 yang menunjukkan bahwa zeolit-NaY telah berhasil disintesis [25].



Gambar 2. Pola XRD zeolit-NaY (a) standar JCPDS No. 39-1380 dan (b) hasil sintesis



Gambar 3. Mikrograf SEM zeolit-NaY

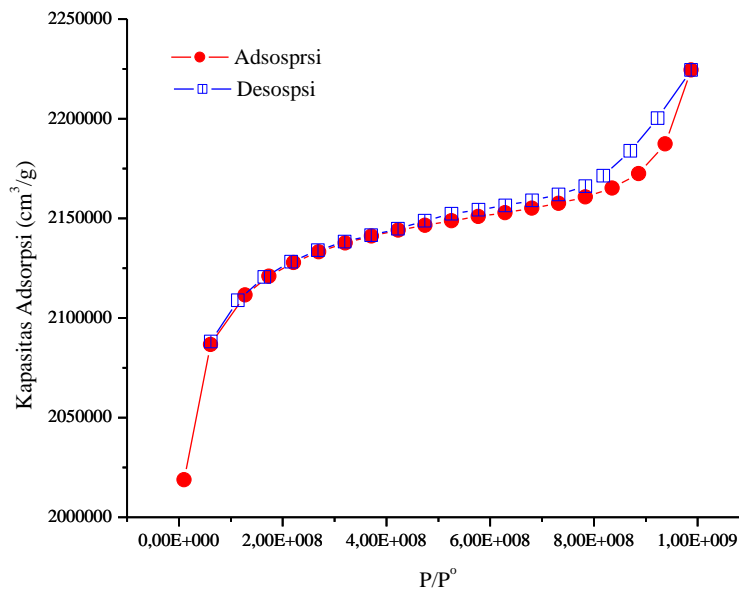
Karakterisasi zeolit-NaY juga dilakukan menggunakan SEM untuk mengkonfirmasi pembentukan morfologi zeolit-NaY hasil sintesis berupa pembentukan kristal oktahedral berbentuk

kotak. Hasil karakterisasi dengan SEM ditunjukkan pada Gambar 3. Mikrograf SEM zeolit-NaY hasil sintesis memiliki keteraturan bentuk kristal oktahedral yang mengkonfirmasi pembentukan kristal zeolit-NaY

[13]. Zeolit-NaY hasil sintesis ini kemudian digunakan sebagai adsorben untuk adsorpsi gas metana.

Zeolit-NaY hasil sintesis dikarakterisasi dengan pengujian Isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ menunjukkan hasil seperti tercantum pada Gambar 4 dan Tabel 1. Berdasarkan grafik kurva isotherm adsorpsi-desorpsi gas N₂ menunjukkan bahwa material zeolit-NaY memiliki isotherm adsorpsi tipe II, dimana pola adsorpsi menunjukkan terbentuknya monolayer sebelum kemudian dapat mengadsorpsi Kembali [26]. Isoterm adsorpsi tipe II pada adsorben berpori di

penelitian ini yakni zeolit-NaY menunjukkan adsorpsi monolayer-multilayer. Pada Gambar 4 juga terlihat adanya hysteresis loop yang menunjukkan adanya kondensasi dan evaporasi kapiler terjadi pada tekanan relatif yang berbeda. Kurva desorpsi yang ditunjukkan pada Gambar 4 selalu berada diatas kurva adsorpsi yang mengindikasikan bahwa adsorbat didesorpsi dari material berpori zeolit-NaY pada tekanan yang lebih rendah dari pada tekanan yang dibutuhkan untuk adsorpsinya [26].



Gambar 4. Kurva Isotherm Adsorpsi-Desorpsi Gas Metana Pada zeolit-NaY

Tabel 1. Karakteristik Pori zeolite-NaY Hasil Sintesis

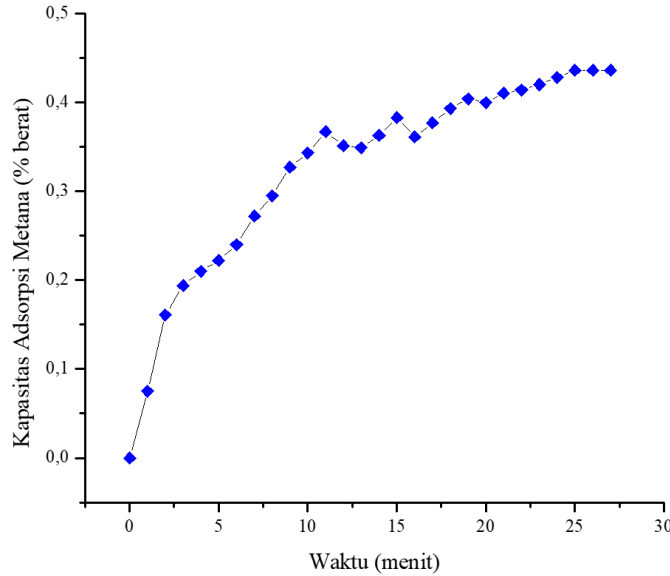
Luas Permukaan (m^2/g)	Diameter Pori (nm)	Volume Total Pori (cm^3/g)	Volume Mikropori (cm^3/g)
656,1289	2,0977	0,3441	0,3128

Pengujian zeolit-NaY untuk adsorpsi gas metana dilakukan menggunakan metode gravimetri.pada suhu 30 °C. Hasil pengujian adsorpsi gas metana pada material zeolit-NaY tercantum pada Gambar 5. Berdasarkan grafik pada Gambar 5 dan data pada Tabel 2, material zeolit-NaY memiliki kapasitas adsorpsi gas metana sebesar 0,436 % berat (0,2725 mmol/g) pada suhu 30 °C dan tekanan 1 bar. Hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Bourrelly et al (2005) menunjukkan hasil adsorpsi gas metana pada zeolit-NaY mencapai 3,8 mmol/g pada suhu 25 °C dan tekanan 30 bar [14]. Hasil adsorpsi pada

penelitian ini masih lebih kecil dikarenakan proses adsorpsi dilakukan pada tekanan yang lebih rendah yaitu 1 bar. Proses adsorpsi metana pada zeolit-NaY ini mengikuti fisisorpsi karena memiliki laju adsorpsi yang relatif cepat. Laju adsorpsi yang cepat ini menunjukkan bahwa CH₄ teradsorp pada permukaan zeolit-NaY secara acak (tidak selektif) dan tidak membutuhkan energi aktivasi besar. Sifat tidak selektif dan tidak membutuhkan energi aktivasi besar merupakan ciri dari fisisorpsi. Bukti lain proses adsorpsi metana pada zeolit-NaY ini mengikuti fisisorpsi adalah pada saat proses adsorpsi metana

berlangsung, terdapat beberapa kali pengurangan massa gas metana yang terjadi. Hal ini disebabkan belum terjadi ikatan yang sangat kuat antara adsorben zeolit-NaY dan adsorbat gas metana [27]. Pada fisisorpsi, molekul gas tertahan pada permukaan adsorben melalui gaya lemah dari kohesi intermolekular [28]. Interaksi antara adsorben dan

adsorbat disebabkan oleh momen dipol antara adsorbat yang bersifat non-polar dan adsorben yang bersifat netral. Perbedaan muatan tersebut menyebabkan munculnya gaya van der Waals yaitu gaya tarik atau tolak antara molekul gas metana dengan permukaan adsorben zeolit-NaY [27].



Gambar 5. Grafik Adsorpsi Gas Metana pada zeolit-NaY

Tabel 2. Hasil Adsorpsi Gas Metana Pada Material zeolit-NaY

Suhu (°C)	Tekanan (bar)	Kapasitas Adsorpsi	
		(% berat)	(mmol/g)
30	1	0,436	0,2725

KESIMPULAN

Zeolit-NaY pada penelitian ini telah disintesis menunjukkan kesamaan puncak difraktogram sesuai dengan standar zeolit-NaY JCPDS No. 00-038-0240. Zeolit-NaY hasil sintesis memiliki keteraturan bentuk kristal oktahedral dengan luas permukaan 656,1289 m²/g, volume mikropori dan volume total pori berturut-turut 0,3128 cm³/g dan 0,3441 cm³/g. Zeolit-NaY tersebut digunakan sebagai adsorben untuk proses adsorpsi gas metana pada suhu 30 °C dengan metode gravimetri. Hasil adsorpsi menunjukkan kapasitas adsorpsi gas metana pada material zeolit-NaY adalah sebesar 0,436% berat. Proses adsorpsi gas metana pada zeolit-NaY termasuk fisisorpsi. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat

mengembangkan performa zeolit-NaY untuk adsorpsi metana baik dengan cara aktivasi material maupun doping dengan material lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Susanti, "Polysulfone membrane with zeolite filler for CO₂/CH₄ Gas Separation: A Review," *Sci. Educ. Appl. J.*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [2] B. T. Well, P. A. Putri, S. S. Hajar, and G. Wibawa, "Plant design of cluster LNG (Liquefied Natural Gas)," *J. Tek. Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 53-55, 2013.
- [3] NOAA, "National Oceanic and Atmospheric Administration," www.noaa.gov, 2022.
- [4] K. L. Tate, S. Li, M. Yu, and M. A. Carreon, "Zeolite adsorbent-MOF layered nanovalves for CH₄ storage," *Adsorption*, vol. 23, no. 1, pp. 19-24, 2017,

- [5] M. E. Casco, M. Martínez-Escandell, E. Gadea-Ramos, K. Kaneko, J. Silvestre-Albero, and F. Rodríguez-Reinoso, "High-pressure methane storage in porous materials: are carbon materials in the pole position," *Chem. Mater.*, vol. 27, no. 3, pp. 959-964, 2015.
- [6] A. Kumar, "Adsorption of methane on activated carbon by volumetric method a project submitted to the national institute of technology, rourkela of master of technology (chemical engineering) by candidate's declaration," *Natl. Institue Technol. Rourkela*, no. 209CH1057, 2011.
- [7] H. Furukawa and O. M. Yaghi, "Storage of hydrogen, methane, and carbon dioxide in highly porous covalent organic frameworks for clean energy applications," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 25, pp. 8875-8883, 2009.
- [8] B. Li, H. M. Wen, W. Zhou, J. Q. Xu, and B. Chen, "Porous Metal-Organic Frameworks: Promising Materials for Methane Storage," *Chem*, vol. 1, no. 4, pp. 557-580, 2016.
- [9] Y. Li, C. Zhang, C. Li, Z. Liu, and W. Ge, "Simulation of the effect of coke deposition on the diffusion of methane in zeolite ZSM-5," *Chem. Eng. J.*, vol. 320, pp. 458-467, 2017.
- [10] Y. Li, D. Li, Y. Rao, X. Zhao, and M. Wu, "Superior CO₂, CH₄, and H₂ uptakes over ultrahigh-surface-area carbon spheres prepared from sustainable biomass-derived char by CO₂ activation," *Carbon N. Y.*, vol. 105, pp. 454-462, 2016.
- [11] B. Y. Sadasivam and K. R. Reddy, "Adsorption and transport of methane in biochars derived from waste wood," *Waste Manag.*, vol. 43, pp. 218-229, 2015.
- [12] P. Kelut, P. K. Kulkarni, and P. a D. Kulkarni, "CO₂ Adsorption By Various Catalysts," *Chem. Process Engineering Res.*, vol. 18, pp. 7-15, 2014.
- [13] I. Susanti and N. Widiastuti, "Activation of zeolite-Y templated carbon with KOH to enhance the CO₂ adsorption capacity," *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 249-253, 2019.
- [14] S. Bourrelly, G. Maurin, and P. L. Llewellyn, "Adsorption microcalorimetry of methane and carbon dioxide on various zeolites," *Mol. Sieves From Basic Res. to Ind. Appl. Pts a B*, vol. 158, pp. 1121-1128, 2005.
- [15] A. Anson, C. C. H. Lin, S. M. Kuznicki, and J. A. Sawada, "Adsorption of carbon dioxide, ethane, and methane on titanosilicate type molecular sieves," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 16, pp. 3683-3687, 2009.
- [16] A. Alonso *et al.*, "Critical review of existing nanomaterial adsorbents to capture carbon dioxide and methane," *Sci. Total Environ.*, vol. 595, pp. 51-62, 2017.
- [17] H. Nishihara *et al.*, "A possible buckybowllike structure of zeolite templated carbon," *Carbon N. Y.*, vol. 47, no. 5, pp. 1220-1230, 2009.
- [18] F. C. Suci, "Ztc : sintesis, karakterisasi, mekanisme penyimpanan, dan studi adsorpsi H₂," *Sintesis, Z T C Penyimpanan, Mek. H, D A N Stud. Adsorps*, vol. 1, no. 1, pp. 1-13, 2016.
- [19] Y. I. Cahyo, "Pengaruh Rasio Mol SiO₂/Al₂O₃ Pada Sintesis Zeolit Y Secara Langsung Dari Kaolin Bangka Belitung," *J. Sains dan Seni Pomits*, vol. 3, 2016, [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/75119/>.
- [20] and L. K. P. Robson, H., "Beta," in *Elsevier*, Second., vol. 1, no. 4, 2001, pp. 54-60.
- [21] S. Gjyli, A. Korpa, V. Teneqja, D. Siliqi, and C. Belviso, "Siliceous Fly Ash Utilization Conditions for Zeolite Synthesis," *Environ. Sci. Proc.*, p. 24, 2021.
- [22] S. Sang, Z. Liu, P. Tian, Z. Liu, L. Qu, and Y. Zhang, "Synthesis of small crystals zeolite NaY," *Mater. Lett.*, vol. 60, pp. 1131-1133, 2006.
- [23] C. S. Cundy and P. A. Cox, "The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 82, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [24] T. W. Manurung, Sunardi, and U. Irawati, "Kajian Pengaruh Konsentrasi NaOH Terhadap Karakter Zeolit Sintetik dari Kaolin Lokal Kalimantan Selatan," *Sains dan Terap. Kim.*, vol. 5, no. 1, pp. 76-83, 2011.
- [25] R. M. Iqbal, I. Susanti, R. A. Rachman, T. A. Pradana, and E. Prasetya, "Synthesis , Characterization and Photocatalytic Activity of N- Doped TiO₂ / Zeolite-NaY for Methylene Blue Removal," *J. Pure App. Che. Res.*, vol. 10, no. August, pp. 132-139, 2021.
- [26] W. Astuti, *Adsorpsi Menggunakan Material Berbasis Lignoselulosa*. 2018.
- [27] T. Gunawan, R. Wijiyanti, and N. Widiastuti, "Adsorption-desorption of CO₂ on zeolite-Y-templated carbon at various temperatures," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 72, pp. 41594-41602, 2018.
- [28] S. Khalili, A. A. Ghoreyshi, and M. Jahanshahi, "Carbon dioxide captured by multi-walled carbon nanotube and activated charcoal: A comparative study," *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 19, no. 1, pp. 153-164, 2013.