

## SINTESIS KATALIS Fe-ZSM-5 MELALUI VARIASI PREKURSOR DAN METODE PREPARASI

Sintha Soraya Santi, Shanita Agitiya Utama, Achmad Naufal Nuraffandy, Reva Edra Nugraha, Bambang Wahyudi, Silvana Dwi Nurhediana\*

Program Studi Teknik Kimia Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur  
Jl. Raya Rungkut Madya No.1 Gunung Anyar, Kota Surabaya, Jawa Timur 60249, Indonesia  
Penulis korespondensi: silvana.dwi.tk@upnjatim.ac.id

### Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi sifat katalis besi (Fe) pendukung ZSM-5 yang disintesis dengan berbagai metode yaitu impregnasi (IG) dan solid state ion exchange (SSIE) dan variasi prekursor Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 dan H-ZSM-5. Bubuk katalis yang diperoleh dikarakterisasi dengan analisis dasar x-ray diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). Hasil XRD memperlihatkan adanya perbedaan precursor menghasilkan perbedaan kristalinitas tetapi tidak menunjukkan pergeseran puncak. Puncak difraksi yang dihasilkan sesuai dengan standar ZSM-5 pada  $2\theta = 7,8^\circ, 8,7^\circ, 23,0^\circ, \& 24,0^\circ$ . Penerapan perbedaan metode sintesis menghasilkan pergeseran puncak difraksi yang menunjukkan adanya perubahan ukuran partikel. Hasil identifikasi secara mikroskopis menunjukkan ZSM-5 termodifikasi logam Fe pada kedua metode terdapat aglomerasi partikel berbentuk struktur prisma dan memiliki struktur yang lebih rapat dengan ukuran panjang rata-rata yang berbeda yaitu pada Fe-Na-ZSM-5 (IG) sebesar 968nm, dan Fe-NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (IG) sebesar 799nm. Hasil identifikasi distribusi unsur Fe pada pendukung ZSM-5 menunjukkan bahwa prekursor dengan kation NH<sub>4</sub> pada ZSM-5 memiliki kandungan Si lebih tinggi dibandingkan dengan ZSM-5 berkation Na. Keberadaan logam Fe pada ZSM-5 menunjukkan persentase yang sangat rendah yaitu 0,26% pada Na-ZSM-5 (IG), 0,27% pada NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (IG), 1,21% pada Na-ZSM-5 (SI), 0,81% pada NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (SI). Hasil yang diperoleh dapat menjadi informasi dasar dalam penentuan jenis prekursor awal antara Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 dan H-ZSM-5 serta metode preparasi yang tepat untuk menghasilkan interkoneksi dan penyebaran logam merata dalam mencapai material Fe-ZSM-5.

**Kata kunci:** katalis; impregnasi; sintesis; solid-state ion exchange; zeolit

## SYNTHESIS OF Fe-ZSM-5 CATALYST BY VARYING PRECURSORES AND PREPARATION METHODS

### Abstract

The purpose of this study was to identify the properties of the ZSM-5 supporting iron (Fe) catalyst which was synthesized by various methods impregnation (IG) and solid state ion exchange (SSIE) and variations of the precursors Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 and H-ZSM-5. The catalyst powder obtained was characterized by basic analysis of x-ray diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX). XRD results showed that there were differences in precursors resulting in differences in crystallinity but did not show peak shifts. The resulting diffraction peaks were in accordance with the ZSM-5 standard at  $2\theta = 7.8^\circ, 8.7^\circ, 23.0^\circ, \& 24.0^\circ$ . The application of different synthesis methods results in a shift in the diffraction peak which indicates a change in particle size. The results of microscopic identification showed that the Fe-modified ZSM-5 in both methods contained agglomeration of particles in the form of a prismatic structure and had a denser structure with a different average length, namely in Fe-Na-ZSM-5 (IG) of 968 nm, and Fe-NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (IG) at 799 nm. The results of the identification of the distribution of Fe elements on the ZSM-5 support showed that the precursor with NH<sub>4</sub> cations in ZSM-5 had a higher Si content than ZSM-5 with Na cations. The presence of Fe metal in ZSM-5 showed a very low percentage, namely 0.26% in Na-ZSM-5 (IG), 0.27% in NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (IG), 1.21% in Na-ZSM-5 (SI), 0.81% in NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (SI). The results obtained can be used as fundamental knowledge in determining the type of initial precursor between Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 and H-ZSM-5 as well as the appropriate preparation method to produce optimal interconnection and uniform metal distribution in achieving Fe-ZSM-5 material.

**Keywords:** catalyst; impregnation; synthesis; solid-state ion exchange

## PENDAHULUAN

Logam terdiri dari butiran kristal dengan sifat berbeda dalam arah kristalografi yang berbeda. Logam yang sejak awal memiliki beberapa sifat yang berguna secara teknis dan dapat diperoleh dalam jumlah yang cukup adalah: besi, tembaga, seng, timah, nikel, aluminium, magnesium. Logam besi relatif mudah diperoleh, tetapi tambang bijinya terbatas, sehingga produksi *pig iron* sangat terbatas. Besi murni kimia (besi atau Fe) tidak cocok sebagai bahan karena terlalu lunak. Besi yang dapat dikerjakan secara teknis selalu merupakan campuran antara besi (Fe) dengan karbon (C) dan unsur lainnya (Kim et al., 2009).

Zeolit merupakan adsorben alternatif dengan kapasitas adsorpsi yang tinggi karena memiliki banyak pori dan kapasitas tukar kation yang tinggi dan dapat diunakan dalam rentang temperatur yang luas, sehingga sangat cocok digunakan sebagai adsorben. Beberapa sifat zeolit adalah dehidrasi, adsorpsi, penukar ion, kaalis dan separator. Sifat zeolit sebagai filter adsorptif dan molekuler dimungkinkan karena struktur zeolit mampu menyerap sejumlah besar molekul yang lebih kecil atau sesuai dengan ukuran rongga (Heymans et al., 2011). Menurut Hammond, dkk., (2013) zeolit yang mengandung tembaga dan besi merupakan katalis yang efisien untuk proses satu langkah tersebut. Besi dapat ditetapkan sebagai katalitik aktif dan sifat pasti dari zeolit ini (Hammond, Dimitratos, Jenkins, et al., 2013).

Zeolit juga telah dikembangkan menjadi beberapa tipe yang berbeda, seperti ZSM-5. ZSM-5 merupakan salah satu zeolit dengan rumus umumnya  $\text{Na}_n(\text{AlO}_2)_n(\text{SiO}_2)_{96-n} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ , dan rasio Si/Al bervariasi dari 10 hingga ratusan dan biasanya disintesis dengan menggunakan kation  $\text{Na}^+$  sebagai *counter ion framework* yang bermuatan negatif. Ion  $\text{Na}^+$  ini dapat ditukar dengan kation lain yang dapat masuk kedalam pori selama modifikasi zeolit (Widayat and Annisa, 2017).

Zeolit sering digunakan sebagai katalis karena mengandung komponen penting yang tidak terdapat pada katalis amorf konvensional. Zeolit memiliki struktur berongga dan biasanya rongga ini diisi oleh air dan kation yang dapat ditukar dengan ukuran pori yang tetap. Oleh karena itu, zeolit dapat digunakan sebagai filter, penukar ion, bahan penyerap dan katalis. Dengan demikian, secara langsung zeolit digunakan untuk adsorpsi limbah (Liu et al., 2017). Selektivitas bentuk pada zeolit didasarkan pada interaksi reaktan dengan sistem pori yang terdefinisi dengan baik.

Faktor penting yang mempengaruhi reaksi katalis bifungsional tersebut adalah lokasi logam, ukuran partikel, dan interaksi dukungan logam dengan jalur interaksi. Fungsi ganda katalis zeolit yang didoping logam dapat meningkatkan selektifitas

produk pada suatu reaksi penting seperti isomerisasi, oksidasi langsung dan hidrogenasi yang dapat menghasilkan produk bernilai lebih. Hal ini menunjukkan modifikasi lebih pada zeolit dapat dilakukan seperti: substitusi isomorfik dan *doping* dengan logam. Beberapa karakteristik dapat dioptimalkan melalui penambahan logam adalah penambahan luas permukaan, pori-pori zeolit, dan keasamannya. Secara umum, metode penambahan logam pada zeolit didasarkan pada metode hidrotermal, pertukaran ion *solid-state*, dan impregnasi (Krisnandi et al., 2015).

Penggunaan ZSM-5 sebagai pendukung untuk keterikatan dengan logam Fe telah diketahui dengan baik. Namun, ZSM-5 yang pada dasarnya terdapat ion  $\text{Na}^+$  didalamnya dapat diganti dengan  $\text{H}^+$  dan  $\text{NH}_4^+$ . Kefektifan antara tiga prekursor dalam mengikat ion besi masih belum dijumpai pada literatur. Oleh karena itu, analisis perbedaan prekursor ZSM-5 dengan perbedaan teknik preparasi yaitu pertukaran *ion solid-state* dan impregnasi perlu untuk dikaji dengan baik sebagai sumber informasi dalam sintesis material Fe-ZSM-5. Serbuk material berbasis zeolit termodifikasi dengan ion besi yang diperoleh akan dikarakterisasi susunan serta struktur secara kimia menggunakan difraksi sinar-X (XRD), serta morfologi dan penyebaran ion besi menggunakan *scanning electron microscope-energy dispersive X-Ray* (SEM-EDX).

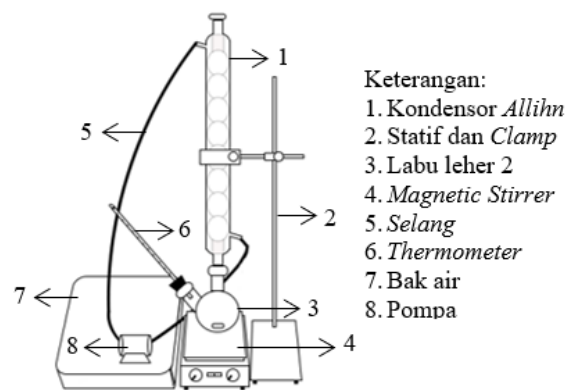
## METODE PENELITIAN

### Bahan

Bahan baku yang digunakan adalah zeolit (Na-ZSM-5) sebagai bahan awal yang disintesis melalui metode yang diterapkan sebelumnya (Nugraha dkk., 2021), besi (III) nitrat nonahidrat ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) (diperoleh dari pemasok yaitu Sigma Aldrich, dengan kemurnian  $\geq 99,95\%$ ), amonium asetat ( $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$ ) (Sigma Aldrich,  $\geq 99\%$ ), dan aquadest ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

### Alat

Secara detail, rangkaian alat penambahan Fe di zeolit melalui metode preparasi SSIE ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian alat untuk metode SSIE

## Prosedur

### Pembuatan NH<sub>4</sub>-ZSM5 dan H-ZSM-5 dari Na-ZSM5

Na-ZSM5 yang digunakan didapatkan dari penelitian sebelumnya yaitu oleh Nugraha dkk., (2021). Bubuk Na-ZSM-5 hierarki yang diperoleh berwujud padat bubuk halus berwarna putih. Langkah yang pertama yaitu dengan cara mengubah prekursor Na-ZSM-5 menjadi NH<sub>4</sub>-ZSM-5 menggunakan metode *ion exchange* dengan proses reflux. Preparasi awal dilakukan dengan pengadukan Na-ZSM-5 dengan ammonium asetat. Kemudian proses reflux dengan temperatur 80°C selama 3 jam dan diaduk secara simultan. Selanjutnya proses penyaringan menggunakan kertas saring setelah itu dikeringkan dengan oven pada suhu 60°C selama 5 jam. Bubuk NH<sub>4</sub>-ZSM-5 yang diperoleh diubah menjadi H-ZSM-5 melalui tahapan kalsinasi menggunakan alat tubular furnace dengan suhu 550°C selama 5 jam.

### Pembuatan Fe-ZSM-5

Prosedur pembuatan menggunakan metode *Solid State Ion Exchange* (SSIE) yang merujuk pada penelitian Hammond dkk., (2013) (Hammond, Dimitratos, Lopez-Sanchez, et al., 2013) diawali dengan pembuatan larutan induk logam Fe melalui pengenceran hingga diperoleh larutan Fe dengan konsentrasi 0,034M. Proses pelarutan melalui penambahan zeolit (1,95g, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 atau Na-ZSM-5) ke dalam larutan aquades, kemudian ditambah 3,613 mL larutan Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O yang sebelumnya telah diencerkan. Proses pengadukan larutan dilakukan bersamaan dengan proses reflux untuk menjaga tidak adanya endapan saat proses reflux dilakukan menggunakan magnetic stirrer, sedangkan proses reflux dilakukan untuk penukaran ion. Proses ini dilakukan selama 7 jam dengan suhu 80°C. Penyaringan dilakukan menggunakan kertas saring, proses ini bertujuan untuk memisahkan padatan yang dihasilkan dari proses pengadukan larutan. Padatan yang dihasilkan dari proses sebelumnya, dikeringkan dengan oven pada suhu 110°C selama 3 jam untuk mengurangi kandungan air pada padatan. Selanjutnya sampel bubuk yang diperoleh ditimbang. Selanjutnya, produk bubuk dikalsinasi pada suhu 550°C selama 5 jam.

Prosedur pembuatan menggunakan metode Impregnasi (IG) yang telah dijelaskan pada penelitian (Widayat and Annisa, 2017) diawali dengan pembuatan larutan induk logam Fe melalui pengenceran hingga diperoleh larutan Fe dengan konsentrasi 0,034 M. Proses pelarutan melalui penambahan zeolit (1,95g, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 atau Na-ZSM-5) ke dalam larutan aquades, kemudian ditambah 3,613 mL larutan Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O yang sebelumnya telah diencerkan. Proses pengadukan larutan dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 3 jam hingga homogen. Kemudian disaring untuk memisahkan dari filtratnya. Padatan yang

dihasilkan dari proses sebelumnya, dikeringkan dengan oven pada temperatur 110°C selama 6 jam agar dapat mengurangi kandungan air dalam padatan. Akhirnya dikalsinasi dengan temperatur 550°C selama 3 jam.

### Karakterisasi Katalis Fe-ZSM-5

*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) menggunakan alat HITACHI SU 3500 untuk menganalisis morfologi dan penyebaran unsur di material katalis. Selanjutnya, *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengenali fasa yang diukur pada suhu kamar dengan sumber sinar-X. Analisis XRD pada suhu ruang menggunakan instrumen PANalytical Expert system (tipe difraktometer: Xpert MPD). Radiasi sinar-x yang digunakan adalah Cu-K $\alpha$  dari sumber Cu yang dioperasikan dengan tegangan 40 kV dan arus 30 mA.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

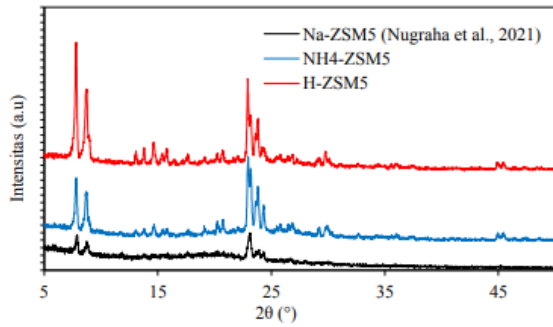
### Karakteristik NH<sub>4</sub>- ZSM-5 dan H-ZSM-5

Setelah preparasi pendahuluan selesai, dilakukan karakterisasi XRD dan SEM untuk mengetahui struktur dan morfologi kristal dari berbagai jenis prekursor. Selain itu, analisis menggunakan SEM yang dilengkapi EDX memberikan informasi pada distribusi ion pada pendukung ZSM-5.

Analisis difraksi sinar X (XRD) yang telah dilakukan menunjukkan bahwa perbedaan unsur pusat dari Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5 dan H-ZSM-5 terdapat perbedaan kristalinitas tetapi tidak adanya pergeseran puncak. Puncak difraksi yang dihasilkan sesuai dengan standar ZSM-5 pada  $2\theta = 7,8^\circ, 8,7^\circ, 23,0^\circ, \text{ dan } 24,0^\circ$  (JCPDS No. 44-0003) dapat dilihat dalam Gambar 2. Hasil menunjukkan bahwa H-ZSM-5 memiliki kristalinitas tertinggi yang menunjukkan tingkat tatanan struktural dalam material lebih teratur.

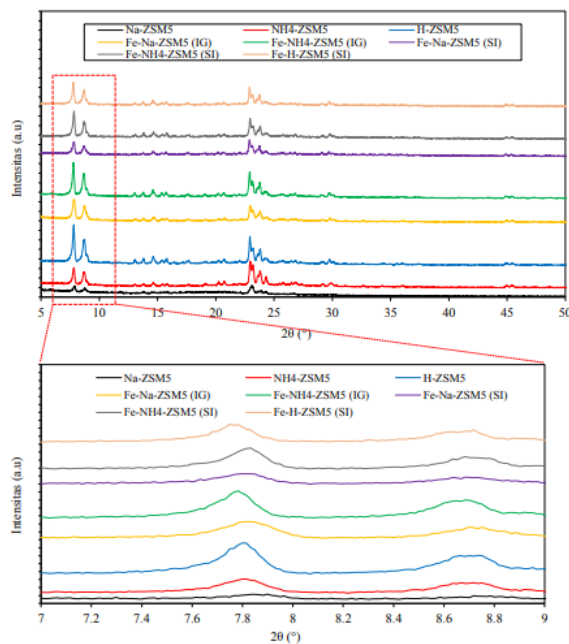
### Karakteristik ZSM-5 Tersubstitusi Logam Fe

ZSM-5 dimodifikasi dengan menambahkan 2,5% berat Fe/ZSM-5 menggunakan metode impregnasi dan Solid State Ion Exchange (SSIE) dengan berbagai macam prekursor yaitu Na-ZSM-5, NH<sub>4</sub>-ZSM-5, dan H-ZSM-5. Setelah ZSM-5 dimodifikasi, dilakukan karakterisasi difraksi sinar-X untuk menentukan struktur kristal dan SEM untuk menentukan morfologinya. Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan 2,5% berat Fe tidak memunculkan puncak baru, tetapi memberikan pengaruh terhadap kristalinitas dari material. Pada perbedaan metode sintesis yaitu impregnasi (IG) dengan *solid state ion exchange* (SI) menunjukkan adanya pergeseran puncak yang dapat menyebabkan adanya perubahan ukuran partikel yang dapat disesuaikan dengan morfologinya.



**Gambar 2.** Hasil analisis XRD  $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$  dan  $\text{H-ZSM-5}$  dibandingkan dengan  $\text{Na-ZSM-5}$

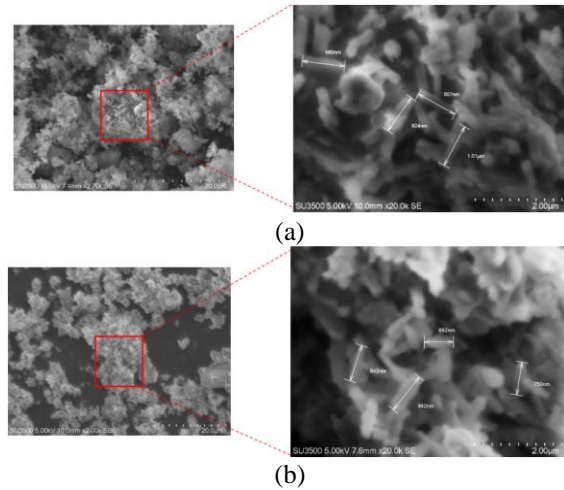
Analisis SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi material dan sebaran unsur serta keberadaan logam Fe pada ZSM-5. Hasil analisis SEM pada metode impregnasi (IG) dan metode *Solid State Ion Exchange* (SI) material ZSM-5 termodifikasi logam Fe menunjukkan bahwa pada  $\text{Fe-Na-ZSM-5}$  dan  $\text{Fe-NH}_4\text{-ZSM-5}$  (Gambar 4 dan 5) menunjukkan morfologi dan bentuk kristal yang tidak jauh berbeda dengan ZSM-5 sebelum dimodifikasi dengan logam Fe yaitu adanya aglomerasi partikel berbentuk struktur prisma, namun pada ZSM-5 yang dimodifikasi dengan logam Fe memiliki struktur yang lebih rapat.



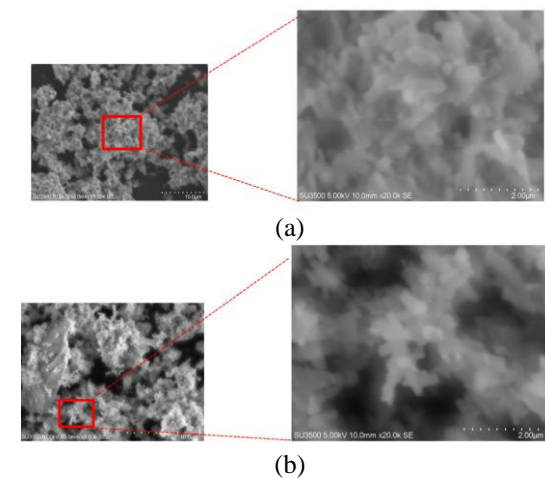
**Gambar 3.** Hasil analisis XRD dengan penambahan berat 2,5% Fe pada ZSM-5 menggunakan metode impregnasi (IG) dan *Solid State Ion Exchange* (SI)

Menurut Purbaningtyas dkk. (2019) (Purbaningtyas et al., 2019) dengan modifikasi zeolit yang menyebabkan partikel padat kecil untuk menghubungkan padatan yang lebih besar. Pada metode impregnasi material ZSM-5 termodifikasi

logam Fe memiliki ukuran panjang rata-rata yang berbeda yaitu pada  $\text{Fe-Na-ZSM-5}$  memiliki panjang rata-rata 968nm, sedangkan untuk  $\text{Fe-NH}_4\text{-ZSM-5}$  memiliki panjang rata-rata 799nm, hal ini dapat dilihat seperti yang ditunjukkan Gambar 4 (a) dan (b). Pada Gambar 5 (a) dan (b) merupakan morfologi dari zeolit termodifikasi Fe melalui metode SSIE.

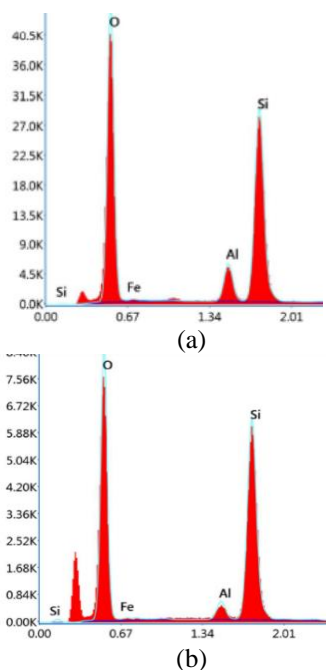


**Gambar 4.** (a) Hasil analisis SEM  $\text{Fe-Na-ZSM-5}$  (IG); dan (b) Hasil analisis SEM  $\text{Fe-Na-ZSM-5}$  (IG)

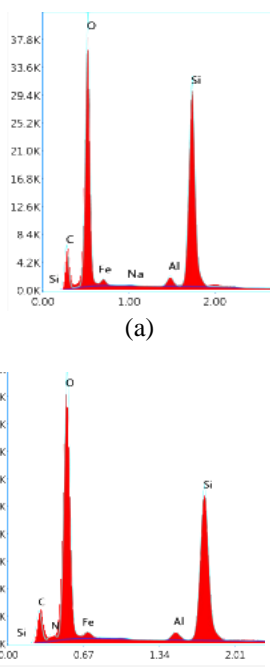


**Gambar 5.** (a) Hasil analisis SEM  $\text{Fe-Na-ZSM-5}$  (SSIE); dan (b) Hasil analisis SEM  $\text{Fe-H-ZSM-5}$  (SSIE).

Analisis EDX juga dilakukan untuk mengetahui keberadaan dan persebaran unsur yang ada didalam material tersebut. Pada metode impregnasi (IG) hasil analisis menunjukkan bahwa pada  $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$  memiliki kandungan Si lebih tinggi daripada  $\text{Na-ZSM-5}$ . Keberadaan logam Fe tidak menunjukkan hasil yang optimal karena memiliki prosentase yang rendah yaitu pada  $\text{Na-ZSM-5}$  sebesar 0,26% dan pada  $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$  sebesar 0,27%. Kedua persentase tidak menunjukkan hasil yang berbeda secara signifikan, dapat dilihat dalam Gambar 6 (a) dan (b).



**Gambar 6.** (a) Hasil analisis EDX Fe-Na-ZSM-5 (IG); dan (b) Hasil analisis EDX Fe-NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (IG)



**Gambar 7.** (a) Hasil analisa EDX Fe-Na-ZSM-5 (SSIE); dan (b) Hasil analisis EDX Fe-NH<sub>4</sub>-ZSM-5 (SSIE)

Pada metode *solid state ion exchange* (SI) hasil analisis EDX menunjukkan bahwa kandungan Si dalam NH<sub>4</sub>-ZSM-5 lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan Si pada Na-ZSM-5. Sedangkan keberadaan logam Fe pada metode ini menunjukkan hasil yang kurang optimal, namun lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode impregnasi yaitu pada

Na-ZSM-5 sebesar 1,21% dan pada NH<sub>4</sub>-ZSM-5 sebesar 0,81%. Hal ini dapat ditunjukkan dalam Gambar 7 (a) dan (b).

### SIMPULAN

Material ZSM-5 termodifikasi dengan adanya tambahan ion besi sebesar 2,5% berhasil dibuat menggunakan teknik preparasi pertukaran ion solid-state dan impregnasi. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pusat ion logam Na, H dan NH<sub>4</sub> pada ZSM-5 menghasilkan perbedaan sifat kristalinitas yang menunjukkan keteraturan kristal pada material dengan keteraturan tertinggi adalah H-ZSM-5. Perbedaan metode sintesis yaitu impregnasi (IG) dengan *solid state ion exchange* (SI) menunjukkan adanya pergeseran puncak yang dapat menyebabkan adanya perubahan ukuran partikel pada material Fe-ZSM-5. Hasil analisis SEM material ZSM-5 termodifikasi logam Fe pada kedua metode menunjukkan bahwa adanya aglomerasi partikel berbentuk struktur prismatic dan memiliki struktur yang lebih rapat. Hasil analisis SEM-EDX menunjukkan keberadaan logam Fe lebih banyak ditemukan pada Fe-ZSM-5 yang disintesis melalui metode preparasi pertukaran ion solid-state.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada LPPM Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur atas pendanaan untuk penelitian ini, Tahun Anggaran 2022 dari DIPA UPNVJT dengan nomor kontrak SPP/7/UN.63.8/LT/IV/2022.

### DAFTAR PUSTAKA

Hammond, C., Dimitratos, N., Jenkins, R. L., Lopez-Sanchez, J. A., Kondrat, S. A., Hasbi Ab Rahim, M., Forde, M. M., Thetford, A., Taylor, S. H., Hagen, H., Stangland, E. E., Kang, J. H., Moulijn, J. M., Willock, D. J., and Hutchings, G. J. (2013): Elucidation and evolution of the active component within Cu/Fe/ZSM-5 for catalytic methane oxidation: From synthesis to catalysis, *ACS Catalysis*, 3(4), 689–699. <https://doi.org/10.1021/cs3007999>

Hammond, C., Dimitratos, N., Lopez-Sanchez, J. A., Jenkins, R. L., Whiting, G., Kondrat, S. A., Ab Rahim, M. H., Forde, M. M., Thetford, A., Hagen, H., Stangland, E. E., Moulijn, J. M., Taylor, S. H., Willock, D. J., and Hutchings, G. J. (2013): Aqueous-phase methane oxidation over Fe-MFI zeolites; Promotion through isomorphous framework substitution, *ACS Catalysis*, 3(8), 1835–1844. <https://doi.org/10.1021/cs400288b>

- Heymans, N., Alban, B., Moreau, S., and De Weireld, G. (2011): Experimental and theoretical study of the adsorption of pure molecules and binary systems containing methane, carbon monoxide, carbon dioxide and nitrogen. Application to the syngas generation, *Chemical Engineering Science*, 66(17), 3850–3858.  
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.018>
- Kim, B., Gupta, S., French, D., and Sakurovs, R. (2009): Effect of Thermal Treatment on Coke Reactivity and Catalytic Iron Mineralogy, *53(10)*, 3694–3702.
- Krisnandi, Y. K., Putra, B. A. P., Bahtiar, M., Abdullah, I., and Howe, R. F. (2015): Partial Oxidation of Methane to Methanol over Heterogeneous Catalyst Co/ZSM-5, *Procedia Chemistry*, 14, 508–515.
- Liu, Q., He, P., Qian, X., Fei, Z., Zhang, Z., Chen, X., Tang, J., Cui, M., Qiao, X., and Shi, Y. (2017): Enhanced CO<sub>2</sub> Adsorption Performance on Hierarchical Porous ZSM-5 Zeolite, *Energy and Fuels*, 31(12), 13933–13941.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02543>
- Nugraha, R. E., Prasetyoko, D., Asikin-Mijan, N., Bahruji, H., Suprpto, S., Taufiq-Yap, Y. H., and Jalil, A. A. (2021): The effect of structure directing agents on micro/mesopore structures of aluminosilicates from Indonesian kaolin as deoxygenation catalysts, *Microporous and Mesoporous Materials*, 315(January), 110917.  
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110917>
- Purbaningtias, T., Kurniawati, P., Wiyantoko, B., Prasetyoko, D., and Suprpto, S. (2019): Pengaruh Penambahan Surfaktan pada Modifikasi Material Alam, *Akta Kimia Indonesia*, 4(2), 118–132.
- Widayat, W., and Annisa, A. N. (2017): Synthesis and Characterization of ZSM-5 Catalyst at Different Temperatures, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 214(1).  
<https://doi.org/10.1088/1757899X/214/1/012032>