

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF LAMPUNG NATURAL ZEOLITE FUNCTIONALIZED MERCAPTO-SILANE

Yulyani Nur Azizah^{1*}, Faizal Rachman^{1**}

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta,
Ir.H. Djuanda 95, Tangerang Selatan, 15412, Indonesia

E-mail: *yulyani@uinjkt.ac.id; ** faizal.rachman08@gmail.com

Received: 02 Agustus 2022. Accepted: 19 Mei 2023. Published: 31 Mei 2023

DOI: 10.30870/educhemia.v8i1.18514

Abstract: Lampung natural zeolite (ZAL) is a potential adsorbent for metal pollutants. However, its adsorption capacity is still low due to the presence of impurities that cover the pores and active sites on its surface. To improve the adsorption performance, especially on soft acid Lewis metals/cations, ZAL needs to be activated and functionalized with organosilanes containing thiol groups (-SH) as soft Lewis bases such as (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane (MPTMS). This study aims to determine the physicochemical properties of organosilane-modified natural zeolites. The MPTMS silanization process in ethanol: water (1:1, v/v) media was carried out on ZAL activated with 1 M HCl. Qualitatively, the success of the functionalization can be directly observed from the dispersion of the zeolite in organic and aqueous phases, where the hydrophobicity of the silane-modified zeolite (ZM-EA) increased compared to the natural zeolite. The functional group analysis results showed typical peaks of S-H and C-H at 2554 and 2930 cm^{-1} . MPTMS functionalization produced five peaks of the typical diffraction pattern of clinoptilolite at 2θ : 10,4°; 17,8°; 22,8°; 28,3°; 30,5°; dan 32,4°. SEM-EDX results on ZM-EA showed the presence of a sulfur component of 4.75% (% At) with a Si/Al ratio >7.

Keywords: (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane, surface modification, silanization, Lampung natural zeolite

Abstrak: Zeolit Alam Lampung (ZAL) merupakan adsorben cemaran polutan logam yang potensial, namun kapasitas adsorpsinya masih rendah karena banyak tercampur dengan materi pengotor yang menutupi pori atau situs aktif dipermukaan. Untuk meningkatkan performa adsorpsi khususnya pada logam/ kation asam lunak Lewis, ZAL harus diaktivasi dan difungsionalisasi salah satunya dengan organosilan yang mengandung gugus tiol (-SH) sebagai basa lunak lewis seperti (3-merkaptopropil)trimetoksisilan (MPTMS). Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sifat fisika-kimia zeolit alam termodifikasi organosilan. Metode silanisasi MPTMS dalam media etanol:air (1:1, v/v) dilakukan terhadap ZAL yang telah diaktivasi oleh HCl 1 M. Secara kualitatif, keberhasilan fungsionalisasi dapat teramati langsung dari dispersi zeolit dalam fasa organik dan air, dimana hidrofobisitas zeolit modifikasi silan (ZM-EA) meningkat dibanding zeolit alam. Hasil analisa gugus fungsi menunjukkan munculnya puncak khas dari S-H dan C-H pada bilangan gelombang 2554 dan

2930 cm^{-1} . Fungsionalisasi MPTMS menghasilkan lima puncak pola difraksi khas dari zeolit tipe klinoptilolit pada 2θ : 10,4°; 17,8°; 22,8°; 28,3°; 30,5°; dan 32,4°. Hasil SEM-EDX pada ZM-EA menunjukkan keberadaan komponen sulfur sebesar 4,75% (% At) dengan rasio Si/Al >7.

Kata kunci: (3-merkaptopropil)trimetoksisilan, modifikasi permukaan, silanisasi, zeolit alam lampung

PENDAHULUAN

Zeolit Alam Lampung (ZAL) merupakan mineral hasil tambang tidak terbarukan yang melimpah di Indonesia, dengan kandungan klinoptilolit > 91% (Kalista *et al.* 2017). Zeolit tipe klinoptilolit memiliki rumus umum $(\text{Na},\text{K})_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$ dengan rasio Si/Al pada rentang 4,0-5,3 (Ambrozova *et al.* 2017). Hal tersebut mengakibatkan karakteristik dari tipe zeolit ini stabil, memiliki luas permukaan yang besar, kapasitas tukar kation tinggi serta pengayak molekul dan katalis yang baik (Aziz *et al.* 2022). Namun, pemanfaatan ZAL masih terbatas karena tingkat kemurniannya yang rendah akibat adanya kandungan pengotor seperti Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , Mg^{2+} dan Ca^{2+} (Ginting *et al.* 2022).

Keberadaan materi pengotor yang terperangkap dalam pori zeolit alam dapat menghambat situs aktif zeolit, sehingga kinerja zeolit alam umumnya lebih rendah daripada zeolit sintetik. Karakter permukaan zeolit alam perlu diubah sifatnya dengan melakukan aktivasi serta modifikasi permukaan

sebelum diaplikasikan sebagai adsorben, katalis, penukar ion, pupuk, dan sebagainya (Ulfa & Samik, 2022).

Beberapa metode aktivasi dan modifikasi yang telah dilakukan untuk meningkatkan performa ZAL diantaranya; ZAL yang diaktivasi HCl dan dimodifikasi asam fosfat diketahui memiliki luas permukaan lebih besar, sehingga dapat meningkatkan kapasitas tukar kation logam berat hingga 60% (Subariyah *et al.* 2013); Pencucian ZAL dengan EDTA juga dapat digunakan sebagai antidotum keracunan timbal hingga 89% (Kalista *et al.* 2017); ZAL yang dimodifikasi dengan surfaktan kationik seperti *cetyltrimethylammonium bromide* (CTAB) dan *hexadecyltrimethylammonium bromide* (HDTMA-Br) digunakan sebagai adsorben senyawa organik dan logam berat (Supriyadi *et al.* 2021; Putra *et al.* 2013).

Silanisasi merupakan metode *coating* kovalen yang paling efektif dan efisien untuk modifikasi permukaan yang mengandung banyak gugus hidroksil

(Ozel *et al.* 2021). Agen kopling organosilan seperti 3-merkaptopropiltrimetoksisilan (MPTMS) dapat menghasilkan tiga gugus pergi sekaligus. Hal tersebut membuat molekul MPTMS dapat berlabuh melalui lebih dari satu gugus silanol pada permukaan yang mengandung silika (Mujiyanti *et al.* 2013).

Modifikasi permukaan zeolit dengan organosilan sudah banyak dilakukan, namun lebih banyak diaplikasikan pada material silika dan zeolit sintetik. Pada penelitian sebelumnya, gel silika yang dimodifikasi menggunakan 3-merkaptopropiltrimetoksisilan (MPTMS) dengan metode sol-gel menghasilkan kapasitas adsorpsi empat kali lebih tinggi dibanding tanpa modifikasi (Buhani *et al.* 2009). Selain secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsinya, fungsionalisasi MPTMS juga dapat menghasilkan adsorben dengan selektivitas tinggi terhadap ion asam lewis lunak seperti ion Hg^{2+} dan Cu^{2+} (Fardmousavi & Faghihian, 2014; Sugiarti *et al.* 2017). Penambahan organosilan pada permukaan zeolit juga dimanfaatkan untuk meningkatkan interaksi antara fase organik dan anorganik. Zeolit yang bersifat hidrofilik digunakan sebagai filler anorganik (Widiastuti *et al.* 2021).

Umumnya metode yang digunakan untuk silanisasi zeolit adalah refluks dalam pelarut organik dengan kepolaran sedang-rendah seperti toluena (Fardmousavi & Faghihian, 2014). Laju reaksi hidrolisis dan kondensasi pada polimerisasi silanol dalam pelarut nonpolar seperti toluena berjalan lambat, sehingga peran air sebagai media berdampak signifikan pada fungsionalisasi nanopartikel dengan % grafting -S pada permukaan silika (Pena *et al.* 2014).

Pada penelitian ini, zeolit alam lampung yang diaktivasi asam akan dimodifikasi dengan merkpto-silan dalam pelarut campuran etanol:air, untuk kemudian dikarakterisasi sifat fisika-kimianya. Instrument FTIR digunakan secara kualitatif untuk mengidentifikasi gugus fungsi. Kristalinitas dan fasa zeolit diuji menggunakan instrument difraktometer sinar-X, sedangkan morfologi dan komponen unsur dipelajari dengan instrument SEM-EDX.

METODE

Material

Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi zeolit alam (PT. Winatama Lampung) dan aquadest. Selain itu digunakan juga (3-merkaptopropil) trimetoksisilan

(MPTMS), etanol, metanol, toluena dan HCl, dimana semua bahan diperoleh dari Merck Co., dan digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut.

Peralatan dan Instrument

Alat serta instrument yang digunakan meliputi oven (memmert), furnace, hotplate (thermo), termometer, set refluks, vial, *X-Ray Diffraction* (XRD, Shimadzu type 7000), *Fourier Transform Infrared* (FTIR, Prestige 21 Shimadzu), dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX, Hitachi SU 3500).

Prosedur

Aktivasi zeolit alam

Zeolit Alam Lampung (ZAL) direndam dalam akuades sambil diaduk selama 24 jam pada suhu ruang. Zeolit yang telah dicuci kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven 100°C. Zeolit diaktivasi menggunakan HCl 1 M (1:5, m/v) dengan pengadukan selama 3 jam (Subariyah *et al.* 2013). Zeolit disaring dengan penambahan aquadest hingga netral. Filtrat diuji dengan AgNO₃ untuk memastikan telah bebas Cl⁻. Zeolit teraktivasi dikeringkan dalam oven pada 120°C selama 3 jam dan didinginkan dalam desikator.

Modifikasi zeolit alam dengan MPTMS

Modifikasi permukaan zeolit alam dilakukan dengan prosedur sebagai berikut; 2,0 g serbuk zeolit teraktivasi dilarutkan dalam 100 mL etanol: air (1:1, v/v), yang telah mengandung 2,0 mL MPTMS. Larutan direfluks pada 80°C selama 6 jam. Setelah disaring, zeolit termodifikasi kemudian dicuci dengan aquadest dan etanol, lalu dikeringkan dalam oven pada 60°C selama 2 jam (Zhang *et al.* 2009).

Karakterisasi gugus fungsi dengan FTIR

Analisis FTIR dilakukan menggunakan teknik KBr pelet yaitu padatan sampel zeolit terfungsionalisasi MPTMS digerus dalam mortar kecil bersama padatan dengan kristal KBr kering dalam jumlah yang sedikit (0,5-2 mg cuplikan + 100 mg KBr kering). Campuran tersebut kemudian di press dengan alat penekan hidrolitik hingga menjadi pellet yang transparan. Pengukuran dilakukan pada kisaran bilangan gelombang yang diatur mulai 500-4000 cm⁻¹.

Karakterisasi fasa kristal dengan XRD

Sampel dikarakterisasi menggunakan XRD-Shimadzu tipe 7000 dengan radiasi Cu K α . Sampel yang telah dihaluskan dimasukkan ke pemegang sampel secara tepat, kemudian

permukaan dihomogenkan dan diletakkan pada posisi yang sesuai. Pola XRD dipindai dari 10-90° (2θ) dengan kecepatan 2° per menit pada temperatur ruang dalam metode kontinyu dan absolut. Tegangan dan arus tabung dari X-ray generator masing-masing adalah 40 kV dan 30 mA. Fasa kristal dari spektrum XRD yang diperoleh dievaluasi dengan standar XRD dari JCPDS. Ukuran kristal ditentukan dengan persamaan Debye Scherrer [1], sementara derajat kristalinitas dihitung dengan persamaan [2],

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \quad [1]$$

$$\text{Kristalinitas (\%)} = \frac{\text{fraksi luas kristal}}{(\text{fraksi luas kristal} + \text{fraksi luas amorf})} \times 100 \quad [2]$$

dimana D = ukuran kristal (nm), K = konstanta difraktogram, λ = Panjang gelombang, β = FWHM, θ = sudut difraksi (°).

Karakterisasi morfologi permukaan dengan SEM-EDX

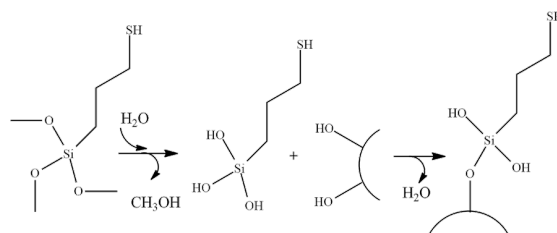
Penentuan morfologi permukaan zeolit terfungsionalisasi dianalisis menggunakan mikroskop pemindai elektron (SEM) Quanta 650 dengan tegangan 25 kV dan perbesaran hingga 10000x. Sampel sebanyak 5 mg zeolit terfungsionalisasi MPTMS dimasukkan ke dalam wadah sampel yang berukuran 3 mm. Kemudian, sampel ditetaskan metanol lalu ditembakkan dengan ion

argon hingga berlubang. Kemudian hasil tembakan ion argon tersebut menembus sampel yang akan ditangkap oleh detektor EDX.

HASIL DAN PEMBAHASAN

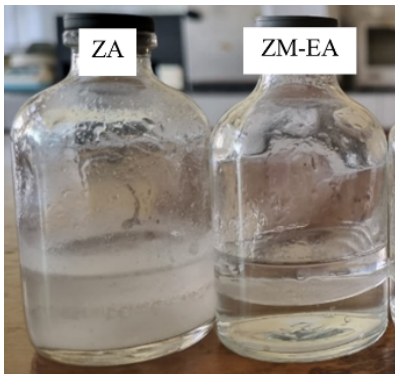
Proses aktivasi zeolit alam dilakukan secara kimiawi, dengan menggunakan HCl 1 M. Penggunaan senyawa asam bertujuan untuk membuka pori zeolit serta merenggangkan ruang antarpori sehingga gas dapat menembus pori-pori yang kecil dan mendesak kotoran serta zat organik sisa yang masih menempel dalam zeolit alam untuk keluar dari pori (Qomaruzzaman *et al.* 2020). Selain itu, aktivasi asam juga bertujuan agar terjadi proses dealuminasi pada zeolit sehingga fungsionalisasi MPTMS pada permukaan zeolit bisa optimal dengan meningkatnya rasio Si/Al (Nurliati *et al.* 2015).

Suhu berperan sangat penting pada proses fungsionalisasi, agar hanya situs aktif dipermukaan saja yang mengalami reaksi pembentukan alkoksisisilan (O'Connor *et al.* 2001), dengan reaksi pada gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Reaksi silanisasi MPTMS (Pena *et al.* 2014)

Pada penelitian ini, suhu rendah digunakan untuk fungsionalisasi dalam media etanol:air karena campurannya menghasilkan azeotrop positif. Pelarut azeotrop positif diketahui menghasilkan titik didih lebih rendah dibanding masing-masing komponennya (Fibriari *et al.* 2012).



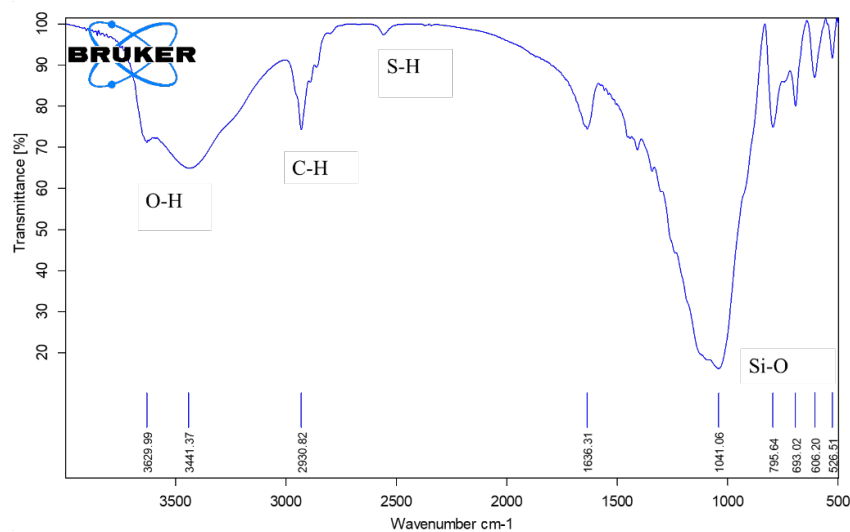
Gambar 2. Distribusi zeolit pada dua fasa (ZA= zeolit aktivasi, ZM-EA= zeolit modifikasi etanol:air)

Keberhasilan silanisasi zeolit dapat teramati melalui distribusi zeolit dalam dua fasa yaitu fasa organik (toluena) dan fasa air (Susanti & Variyana, 2021).

Berdasarkan hasil uji fisik pada Gambar 2, terdapat perbedaan nyata antara distribusi zeolit alam (ZA) dengan zeolit termodifikasi (ZM-EA). Zeolit alam tanpa silanisasi terdispersi dalam fasa air (lapisan bawah), sedangkan zeolit hasil silanisasi terdispersi dalam fasa organik (lapisan atas). Hasil tersebut membuktikan bahwa modifikasi senyawa organosilan dapat meningkatkan hidrofobisitas zeolit.

Hasil Karakterisasi Gugus Fungsi Zeolit Modifikasi

Proses karakterisasi menggunakan FTIR bertujuan untuk menganalisis gugus fungsi yang terdapat dalam zeolit, yang dinyatakan dalam puncak transmittan (%) pada bilangan gelombang tertentu. Hasil analisa gugus fungsi silanisasi MPTMS terhadap zeolit (ZM-EA) ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum FTIR zeolit termodifikasi

Sampel modifikasi zeolit ZM-EA, memiliki puncak utama pada gugus O-H, C-H, S-H dan Si-O. Pada sampel tersebut, Si-OH-Al muncul pada ~ 3630 cm^{-1} , mengindikasikan struktur zeolit tidak berubah selama fungsionalisasi dengan gugus merkaptosilan (Fardmousavi & Faghihian, 2014). Puncak melebar yang muncul pada 3440 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur dari gugus Si-OH dari air yang terserap pada permukaan silika, sementara puncak ~ 1630 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi dari air yang terikat secara fisik (Ozel *et al.* 2021). Puncak melebar lain terkait vibrasi asimetrik dan simetri ulur Si-O-Si juga muncul masing-masing pada bilangan gelombang 1040 cm^{-1} dan < 800 cm^{-1} . Perbandingan perubahan gugus fungsi zeolit hasil modifikasi dengan zeolit alam dirinci pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Gugus Fungsi Zeolit alam teraktivasi (ZA) dan Zeolit Modifikasi (ZM-EA)

Gugus fungsi	ZA (Sulistiowati <i>et al.</i> 2017)	ZM-EA (penelitian ini)
Si-OH-Al	3635 cm^{-1}	3630 cm^{-1}
Si-OH ulur		3440 cm^{-1}
O-H	1634 cm^{-1}	1630 cm^{-1}
Si-O-Si tekuk	1031 cm^{-1}	1040 cm^{-1}
Si-O simetri	788 cm^{-1}	795 cm^{-1}
C-H	-	2930 cm^{-1}
S-H	-	2554 cm^{-1}

Pita lemah pada 2554 cm^{-1} menunjukkan adanya agregasi gugus merkapto dalam monolayer dan efek

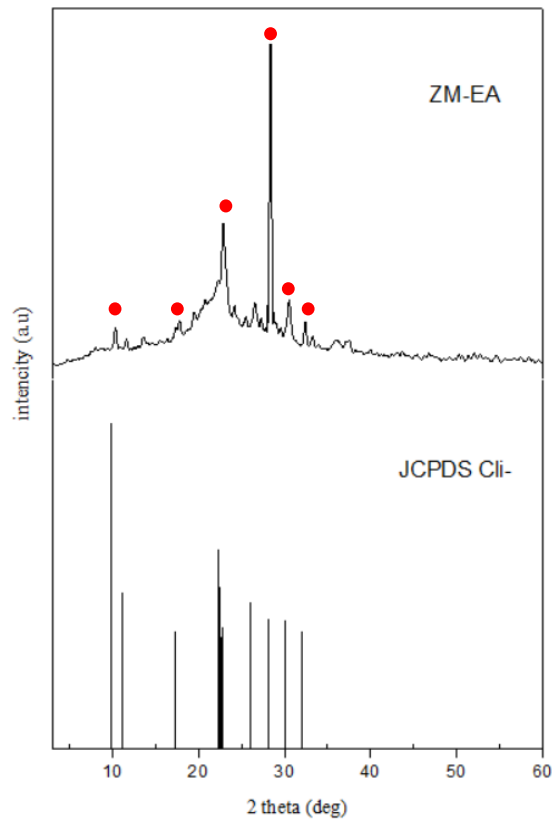
pengikatan hidrogen (Li *et al.* 2011). Puncak vibrasi gugus alifatik -CH muncul pada bilangan gelombang 2930 cm^{-1} , mengindikasikan kehadiran gugus organik yang terikat pada permukaan zeolit (Ozel, *et al.* 2021).

Hasil Kristalinitas dan Fasa Zeolit Modifikasi

Pada penelitian sebelumnya, zeolit alam lampung (ZA) yang diaktivasi HCl 1 M teridentifikasi memiliki fasa dominan klinoptilolit, dengan puncak utama $2\theta = 28,19^\circ$ dan kristalinitas mencapai $90,42\%$ (Subariyah *et al.* 2013). Adanya modifikasi pada permukaan dapat menghasilkan perubahan fasa, jika modifikasi tersebut berpengaruh terhadap struktur kerangka internal zeolit (Sugiarti *et al.* 2017). Berdasarkan hasil analisis difraktogram menurut *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS : 00-025-1349), modifikasi zeolit dalam pelarut etanol: air (ZM-EA) tetap dapat mempertahankan fasa kristal klinoptilolit berdasarkan seperti disajikan pada Gambar 4.

Zeolit termodifikasi menghasilkan puncak difraktogram tertinggi pada 2θ : $10,4^\circ$; $17,8^\circ$; $22,8^\circ$; $28,3^\circ$; $30,5^\circ$; dan $32,4^\circ$. Hal tersebut menunjukkan bahwa silanisasi dalam pelarut etanol: air tidak

merusak fasa kristal dari zeolit. Namun, modifikasi permukaan dengan senyawa organik dapat menurunkan intensitas klinoptilolit karena sebagian terurai, diduga agregat klinoptilolit menjadi lebih kecil dibanding keadaan awal.



Gambar 4. Difraktogram zeolit termodifikasi

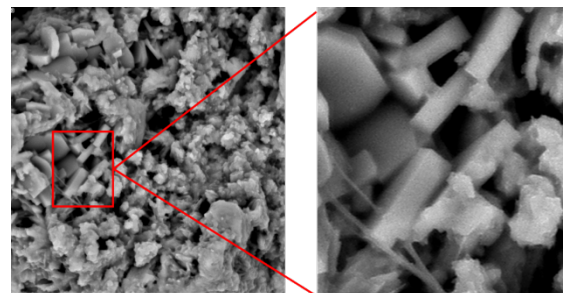
Berdasarkan perhitungan ukuran kristal dengan persamaan Debye Scherer [1], diperoleh ukuran kristal sampel ZM-EA adalah sebesar 43,6 nm. Hal tersebut didukung dengan perhitungan data luas area [2] yang menunjukkan kristalinitas ZM-EA hanya sebesar 70,8%.

Puncak lain berasal dari pengotor seperti kuarsa salah satunya teridentifikasi pada $2\theta = 20,80^\circ$

(Subariyah *et al.* 2013). Banyaknya pengotor yang muncul dalam puncak difraktogram dikarenakan sampel zeolit berasal dari alam, sehingga bukan hanya klinoptilolit murni yang teridentifikasi.

Morfologi Permukaan dan Komposisi Unsur

Keberadaan senyawa organik dapat menurunkan kristalinitas zeolit alam. Hal tersebut juga diperkuat oleh hasil analisa SEM Gambar 5 yang menunjukkan modifikasi permukaan mengakibatkan aglomerasi partikel. Berdasarkan hasil analisis SEM pada perbesaran 10000x, tampak ZM-EA memiliki bentuk campuran kristal balok dan pipih yang sesuai dengan karakteristik dari klinoptilolit. Bentuk serat pada citra SEM tersebut dimungkinkan adanya fase mineral non zeolit yang tergabung dalam sampel (Kalista *et al.* 2017).



Gambar 5. Morfologi permukaan zeolit termodifikasi

Pada gambar perbesaran, tampak bagian kristal balok terhalangi komponen lain yang diidentifikasi sebagai molekul MPTMS yang telah menempel di

permukaan zeolit. Semakin tinggi kadar Sulfur (S) yang terikat, maka unit kristal diduga akan menjadi semakin amorf. Secara kuantitatif, jumlah MPTMS yang menempel pada permukaan zeolit diidentifikasi dari kandungan atom S yang dapat dianalisis dari hasil uji EDX, dengan data pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi unsur ZM-EA

Unsur	Atomic conc. (At) %	Weight conc. (Wt) %
S	4,75	8,59
Si	15,12	23,98
Al	1,98	3,01
Rasio Si/Al		= 7,6- 7,9

Perlakuan yang dilakukan telah menghasilkan rasio Si/Al lebih tinggi daripada rasio Si/Al klinoptilolit seharusnya ~5 (Kalista *et al.* 2017). Adanya penambahan asam menurunkan konsentrasi Al, yang menunjukkan proses aktivasi telah berhasil. Pada penelitian sebelumnya, aktivasi dengan HCl menghasilkan nilai Si/Al hingga ~6 (Sulistiowati *et al.* 2017). Semakin tinggi nilai Si/Al, maka semakin tinggi keasaman atau semakin banyak situs asam pada zeolit. Pada penelitian ini, nilai Si/Al yang diperoleh lebih tinggi yang menandakan adanya peran MPTMS dan pelarut dalam meningkatkan keasaman zeolit alam.

KESIMPULAN

Modifikasi zeolit alam lampung dengan MPTMS dapat difasilitasi dengan pelarut campuran etanol:air. Hasil karakterisasi sampel ZM-EA dengan FTIR menunjukkan adanya pita serapan spesifik yang berasal gugus v S-H dan v C-H ulur dari MPTMS yang terikat pada zeolit. Modifikasi permukaan zeolit dalam pelarut etanol:air menurunkan kristalinitas fasa kristal klinoptilolit menjadi 70,8% dengan ukuran kristal 43,6 nm. Selain meningkatkan hidrofobisitas, fungsionalisasi MPTMS juga dapat meningkatkan rasio Si/Al dari zeolit alam lampung hingga >7. Zeolit yang telah terfungsionalisasi oleh MPTMS sangat potensial digunakan sebagai adsorben logam asam lewis lunak karena telah mengandung gugus -SH dipermukaannya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih atas pendanaan riset dari BLU LPPM UIN Syarif Hidayatullah Jakarta tahun anggaran 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambrozova, P., Kynicky, J., Urubek, T., & Nguyen, V. (2017). Synthesis and Modification of Clinoptilolite. *Molecules*, 22(1107), 1-13.
- Aziz, I., Nurbayti, S., & Falepi, R. (2022). Optimization of Biofuel Production From Used Cooking Oil using Natural Zeolite Catalyst. *EduChemia (Jurnal Kimia dan Pendidikan)*, 7(2), 193-203.
- Buhani, Narsito, Nuryono, & Kunarti, E. S. (2009). Amino and mercapto-silica hybrid for Cd(II) adsorption in aqueous solution. *Indonesia Journal Chemistry*, 9(2), 170-176.
- Cai, L., Zhang, Y., Zhou, Y., Zhang, X., Ji, L., Song, W., . . . Liu, J. (2019). Effective Adsorption of Diesel Oil by Crab-Shell-Derived Biochar Nanomaterials. *Materials*, 12(236), 1-15.
- Fardmousavi, O., & Faghihian, H. (2014). Thiol-functionalized hierarchical zeolite nanocomposite for adsorption of Hg²⁺ from aqueous solutions. *Comptes Rendus Chimie*, 1-9.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.crci.2014.05.001>
- Fibriari, I., Gunawan, & Hastuti, R. (2012). Pengkayaan Alkohol Ciu Bekonang dengan Metode Destilasi Adsorptif Menggunakan Zeolit Alam dan Silika Gel. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 15(3), 79-83.
- Ginting, S., Islamia, U., Darmansyah, & Wardono, H. (2022). Characterization and application of HCl-activated LTA Zeolite from Lampung Natural Zeolite (LNZ) for Bioethanol Purification. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 17(2), 152-162.
- Kalista, N. N., Kartasasmita, R. E., Wibowo, M. S., & Estiaty, L. M. (2017). Karakterisasi dan Pemurnian Zeolit Alam Lampung Sebagai Kandidat Antidotum Keracunan Timbal. *Acta Pharmaceutica Indonesia*, 42(2), 84-91.
- Li, G., Zhao, Z., Liu, J., & Jiang, G. (2011). Effective heavy metal removal from aqueous systems by thiol functionalized magnetiv mesoporous silica. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 277-283.
- Mujiyanti, D., Komari, N., & Sari, N. (2013). Kajian Termodinamika

- Adsorpsi Hibrida Merkapto-Silika dari Abu Sekam Padi Terhadap Ion Co(II). *Valensi*, 3(2), 71-75.
- Nurliati, G., Krisnandi, Y. K., Sihombing, R., & Salimin, Z. (2015). Studies of Modification of Zeolite by Tandem Acid-Base Treatments and its Adsorptions Performance Towards Thorium. *Atom Indonesia*, 41(2), 87-95.
- O'Connor, C. T., Moller, K. P., & Manstein, H. (2001). The effect of silanization on the catalytic and sorption properties of zeolites. *Cattech*, 5(3), 172-182.
- Ozel, C., Akat, C., Alosmanov, R., Kahveci, M. U., Emir, C., & Yucel, S. (2021). Surface modification of zeolite and kaolin with 3-(aminopropyl) triethoxysilane and 3-(trimethoxysilyl) propyl methacrylate. *Bulgarian Chemical Communication*, 53(4), 464-470.
- Pena, L., Hohn, K. L., Sun, X. S., & Wang, D. (2014). Synthesis of Propyl-Sulfonic Acid-Functionalized Nanoparticles as Catalyst for Cellobiose Hydrolysis. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 5, 214-253.
- Putra, B., Darusman, L., & Rohaeti, E. (2013). Carbon paste electrode hexadecyltrimethylammonium bromide modified natural zeolite for chromium (VI) detection. *Indonesian Journal of Chemistry*, 13(2), 122-128.
- Qomaruzzaman, I., Sriatun, & Suhartana. (2020). Modifikasi zeolit alam menggunakan trietanolamin (TEA) sebagai adsorben ion logam kromium (III). *Akta Kimindo*, 5(2), 62-75.
- Subariyah, I., Zakaria, A., & Purwamargapratala, Y. (2013). Karakterisasi Zeolit Alam Lampung Teraktivasi Asam Klorida dan Termodifikasi Asam Fosfat. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 16(3), 17-24.
- Sugiarti, S., Charlena, & Aflakhah, N. (2017). Zeolit Sintesis Terfungsionalisasi 3-(trimetoksisilil)-1-Propantiol sebagai adsorben kation Cu(II) dan Biru Metilena. *Jurnal Kimia Valensi*, 3(1), 11-19.
- Sulistiowati, D. D., Hermiyati, R. P., Utami, H., & Ginting, S. (2017). Kajian Pengaruh Konsentrasi Zeolit Alam Lampung pada Hidrasi Terpentin menjadi a-Terpineol.

- Indonesian Journal of Chemical Science*, 6(2), 133-137.
- Supriyadi, D., Darmansyah, Sari, R., & Farhani, A. (2021). Application of non-linear and isotherm model for investigation of Cod removal from tapioca liquid waste onto modified natural zeolite. *Science and Technology Indonesia*, 6(4), 218-227.
- Susanti, Y., & Variyana, Y. (2021). Stabilitas Zeolit HY Hidrofobik terhadap Uji Hot Liquid Water (HLW). *Jurnal Teknik Kimia USU*, 10(2), 58-62.
- Ulfa, S., & Samik, S. (2022). Artikel review: pemanfaatan katalis zeolit alam teraktivasi dalam sintesis biodiesel dengan metode esterifikasi dan transesterifikasi. *UNESA Journal of Chemistry*, 11(3), 165-181.
- Widiastuti, N., Huzain, F., & Romadiansyah, T. (2021). Preparasi dan Karakterisasi Membran Gabungan PSf/PEG dengan Variasi Pengisi KTZ dan KTZ Teroksidasi untuk Aplikasi pada Larutan Kristal Violet. *Akta Kimia Indonesia*, 6(2), 136-152.
- Zhang, X.-Y., Wang, Q.-C., Zhang, S.-Q., Sun, X.-J., & Zhang, Z.-S. (2009). Stabilization/solidification (S/S) of mercury-contaminated hazardous wastes using thiol-functionalized zeolite and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, 1575-1580.