

SINTESIS ZEOLIT ZSM-5 RENDAH BIAYA MENGGUNAKAN SILIKA ORGANIK DARI LIMBAH PERTANIAN SEKAM PADI***LOW-COST SYNTHESIS OF ZSM-5 ZEOLITE USING ORGANIC SILICA FROM RICE HUSK AGRO WASTE*****Priyadi ^{1)*}, Nurleni Kurniawati ²⁾, Vera Prawestiana ³⁾**

¹⁾ Jurusan Budidaya Tanaman Pangan, Politeknik Negeri Lampung, Jl. Soekarno Hatta No.10, Kota Bandar Lampung, Lampung

²⁾ Program Studi Agroteknologi, Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian Dharma Wacana, Jl. Kenanga No. 3, Kota Metro, Lampung

³⁾ Jurusan Sains, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Lampung Selatan
email: priyadi@ge@gmail.com

ARTICLE HISTORY : Received [24 March 2022] Revised [25 May 2022] Accepted [13 June 2022]

ABSTRAK

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang berpotensi sebagai sumber silika pada sintesis zeolit berbiaya murah. Tujuan penelitian ini adalah 1) ekstraksi silika dari sekam padi sebagai bahan baku zeolite sintesis, 2) sintesis dan karakterisasi zeolit ZSM-5 menggunakan silika dari sekam padi. Penelitian dilakukan dengan mengekstraksi sekam padi menjadi silika. Ekstraksi silika dilakukan dengan merendam sekam padi menggunakan larutan NaOH 15% yang dipanaskan. Selanjutnya dilakukan penambahan larutan HNO₃ 10% hingga pH 7 selama 12 jam. Filtrat kemudian dikeringkan menggunakan oven selama 12 jam pada suhu 100 °C. Analisis komposisi silika menggunakan XRF, kristalinitas menggunakan XRD, dan SEM untuk morfologi. Hasil menunjukkan bahwa sekam padi berhasil diekstraksi dengan penambahan alkali dan digunakan sebagai sumber silika pada sintesis zeolit ZSM-5. Sintesis zeolit dilakukan dengan suhu rendah 90 °C dan pengurangan agen pengarah struktur. Zeolit ZSM-5 menunjukkan bahwa tingkat kristalinitas dan morfologi sesuai dengan standar zeolit ZSM-5. Pengurangan agen pengarah struktur didapatkan pada rasio SDA/Si yaitu 0,045.

Kata Kunci : Sekam Padi; Silika; Sintesis; Zeolit.

ABSTRACT

Rice husk is an agricultural waste that has the potential source of silica in low-cost zeolite synthesis. The objectives of this study were 1) silica extraction of rice husks as synthetic zeolite raw materials, 2) synthesis and characterized ZSM-5 zeolite from rice husks silica. Silica extraction was carried out by soaking rice husks using a heated 15% NaOH solution. Furthermore, 10% HNO₃ solution was added to pH 7 for 12 hours. The filtrate dried in an oven for 12 hours at 100°C. Analysis of silica composition using XRF, crystallinity using XRD, and SEM for morphology. The results showed that rice husks were successfully extracted with an alkali addition and used as a source of silica in the synthesized of ZSM-5 zeolite. The zeolite synthesis was carried out with a low temperature of 90°C and a structural directing agent decrease. Zeolite ZSM-5 showed that the level of crystallinity and morphology by the standard ZSM-5 zeolite. Decreasing of the structural directing agent was found at the SDA/Si ratio of 0.045.

Kata Kunci : Rice Husk; Silica; Synthesis; Zeolite.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara agraris yang sebagian besar penduduknya berprofesi sebagai petani padi. Budidaya padi menjadi sektor yang cukup besar karena hampir sebagian penduduk Indonesia mengkonsumsi nasi sebagai makanan pokok. Namun disisi lain, kegiatan ini juga menyumbangkan limbah di bidang pertanian yang sampai saat ini belum dimanfaatkan secara optimal. Saat ini pemanfaatan limbah pertanian padi masih sebatas pada penerapan sebagai bahan organik in situ dan sebagai pakan ternak. Selain itu, limbah padi yang dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak tersebut adalah berupa jerami padi, sedangkan sekam padi digunakan sebagai campuran media tanam, bahan bakar briket dan sebagian besar hanya dibakar begitu saja. Menurut (Yu et al., 2009) menyebutkan dari proses penggilingan padi dapat menghasilkan produk sampingan sekam padi hingga 25%. Hasil penelitian (Dhankhar, 2014) menjelaskan bahwa dari kegiatan penggilingan padi yang terdiri dari beberapa tahapan menghasilkan sekitar 20% sekam padi, 11% dedak, dan 69% beras giling.

Sekam padi merupakan salah satu sumber silika organik yang cukup besar setelah dilakukan pembakaran sempurna.

Silika dapat diperoleh melalui pembakaran terkontrol dengan suhu kalsinasi 600°C yang dapat menghasilkan kemurnian silika berkisar antara 84-99% berat (Azat et al., 2019). Menurut (Hossain et al., 2018) sekam padi merupakan biomassa yang memiliki kandungan silika hingga 85-95% silika amorf. Lebih lanjut (Sandhu & Siddique, 2017) menjelaskan bahwa dari proses pembakaran sekam padi mampu menghasilkan silika amorf sekitar 90%. Silika sekam padi dapat juga dihasilkan dengan cara ekstraksi tanpa pembakaran dan menghasilkan silika yang reaktif pada sintesis zeolit (Shoumkova dan Stoyanova, 2013). Kandungan silika yang tinggi pada sekam padi berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku ekonomis dalam pembuatan material berbasis silika seperti zeolit.

Zeolit merupakan kristal alumino silikat yang memiliki rongga berisi ion-ion alkali yang terbentuk dari endapan abu vulkan kemudian pada lingkungan yang bersifat basa. Zeolit memiliki sifat kimia dan fisika antara lain memiliki Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi serta bersifat hidrofilik. Sifat ini menjadikan zeolit banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti pembenah tanah, pembawa pada pupuk bersifat lambat tersedia, campuran media tanam, dan adsorben logam berat, serta pemurnian gas dan

penjernihan air. Semakin meningkatnya pemanfaatan zeolit, mendorong perkembangan salah satunya dengan teknologi zeolit sintetis. Hal ini dilakukan selain untuk menurunkan ketergantungan terhadap zeolit alam juga bertujuan meningkatkan Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan memodifikasi ruang pori menjadi lebih seragam sehingga kemampuannya meningkat.

Salah satu jenis zeolit sintetis dengan kadar silika tinggi dan telah banyak digunakan pada berbagai bidang adalah zeolit ZSM-5 (Y. Wang et al., 2015). Hasil penelitian (Jesudoss et al., 2018) menyebutkan bahwa ZSM-5 berhasil disintesis dari sekam padi dan digunakan sebagai anti kanker paru-paru. (Kordatos et al., 2013) menyebutkan bahwa sekam padi merupakan bahan baku yang melimpah dan murah untuk mensintesis material berpori seperti zeolit ZSM-5. Selain itu ZSM-5 dapat digunakan sebagai katalis yang bersifat selektif (Jesudoss et al., 2018) dan mampu menyerap beberapa jenis logam berat (Priyadi et al., 2015). Berdasarkan hal tersebut penelitian ini dilakukan untuk 1) ekstraksi silika dari sekam padi sebagai bahan baku zeolite sintesis, 2) sintesis dan karakterisasi zeolit ZSM-5 menggunakan silika dari sekam padi.

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah sekam padi yang diperoleh dari rumah penggilingan padi di Kecamatan Jati Agung Lampung Selatan. Bahan lain untuk proses ekstraksi silika dari sekam padi yaitu larutan HNO_3 10%, larutan NaOH 1,5%, dan aquades. Sedangkan bahan tambahan yang digunakan untuk sintesis zeolit yaitu natrium hidroksida (NaOH 50%), sumber alumina menggunakan natrium alumina (NaAlO_2), template organik sebagai agen pengarah dalam pembentukan zeolit menggunakan tetrapropilen bromida (TPABr), dan silika hasil ekstraksi sekam padi.

Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk ekstraksi silika sekam padi dan sintesis zeolit yaitu antara lain: gelas beaker, gelas ukur, pipet tetes, corong buchner, corong gelas, botol polipropilen, pH meter, timbangan analitik, oven dan *magnetic stirrer*. Adapaun peralatan yang digunakan untuk analisis karakterisasi silika dan zeolit sintesis yaitu *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Scanning Electron Microscope* (SEM), Nitrogen isothermal adsorpsi-desorpsi, dan *Magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance* (MAS NMR).

Prosedur Penelitian

Ekstraksi Silika Sekam Padi

Bahan utama sekam padi dilakukan pembersihan dari pengotor kemudian dicuci hingga bersih dengan air dan dijemur di bawah sinar matahari selama kurang lebih 3 hari. Setelah sekam padi benar-benar kering dilakukan perendaman menggunakan larutan NaOH 1,5% sambil dipanaskan hingga mendidih. Selanjutnya sekam padi istirahatkan selama 12 jam dan kemudian disaring sehingga diperoleh filtrat berwarna kecoklatan. Filtrat tersebut selanjutnya ditambahkan larutan HNO₃ 10% dengan cara diteteskan perlahan hingga terbentuk gel dengan nilai pH = 7. Gel yang terbentuk didiamkan selama kurang lebih 12 jam untuk proses aging. Gel kemudian dicuci dengan aquades panas hingga berubah menjadi gel berwarna putih. Gel putih kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 100°C selama 12 jam. Setelah di oven maka akan terbentuk padatan dan setelah kering dilakukan penggilingan hingga halus dan siap digunakan sebagai sumber silika pada sintesis zeolit.

Sintesis Zeolit ZSM-5

Zeolit ZSM-5 disintesis dengan menggunakan empat prekursor utama yaitu silika, aluminium, NaOH dan template organik. Silika yang digunakan berupa silika dari sekam padi, NaAlO₂ sebagai

sumber alumina, TPABr sebagai template organik. Adapaun perbandingan rasio molaritas yang digunakan yaitu rasio Si/Al =100, H₂O/Si = 11,69, NaOH/Si = 0,14 dan TPABr/Si = 0,086. Mula-mula bahan dicampurkan dengan jumlah 0,041 g NaAlO₂ ke dalam 0,84 g NaOH 50% ke dalam botol polipropilen 1. Selanjutnya 1,14 gr TPABr dilarutkan dalam 9,95 g aquades pada botol polipropilen 2, diaduk menggunakan magnetic stirer dengan kecepatan 600 rpm selama 1 jam. Kemudian isi botol polipropilen 2 dicampurkan ke dalam botol polipropilen 1, dengan ditambahkan sejumlah 4,29 g silika sambil distirer sehingga terbentuk semi gel. Larutan dalam botol propilen distirer selama 1 jam pada temperatur ruang, setelah homogen botol propilen dimasukkan ke dalam oven pada suhu 90 °C selama 4 hari. Endapan yang terbentuk kemudian dicuci dengan air dan disaring menggunakan corong Buchner. Setelah itu endapan dimasukkan kembali ke dalam oven pada suhu 90 °C selama 3 jam untuk memperoleh padatan yang kering sempurna. Setelah dikeringkan, padatan putih kemudian dihaluskan dan dikarakterisasi.

Analisis Karakterisasi Zeolit

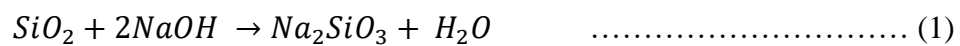
Analisa kuantitatif komposisi kimia sekam padi dilakukan menggunakan XRF model ARL 9900 Advant XP, kristalinitas

silika dan zeolit dilakukan menggunakan XRD model Philips PN-1830 Diffractometer (Cu K α , k = 1.5406 Å), morfologi zeolit dilakukan dengan SEM model JEOL 6303 LA instrument.

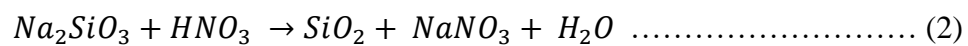
HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekstraksi dan Karakterisasi silika dari sekam padi

Proses ekstraksi pada umumnya dapat dilakukan dengan berberapa cara antara lain yaitu melalui proses pembakaran. Namun disisi lain, proses ini dianggap tidak ramah lingkungan karena



Silika yang terbentuk menghasilkan larutan natrium silikat, kemudian larutan direaksikan dengan larutan HNO₃ 10% untuk mengikat



Larutan asam nitrat yang ditambahkan berfungsi sebagai bahan pengendap. Menurut (Moraes et al., 2018) senyawa silika mudah larut pada suasana basa, dan akan mengendap pada suasana asam. Berdasarkan hal tersebut, agar senyawa silika mudah diekstrak dari sekam padi, maka diperlukan tambahan pelarut alkali yaitu NaOH, selanjutnya digunakan larutan asam HNO₃ 10%, untuk mengendapkannya kembali. Setelah silika mengendap dilanjutkan dengan pengeringan dengan menggunakan oven untuk menurunkan kelembabannya. Untuk

menghasilkan polutan yang tidak baik bagi kesehatan dan dapat menurunkan reaktifitas silika yang dihasilkan. Hal ini terjadi disebabkan adanya senyawa pengotor yang akan menurunkan titik lebur silika menjadi fase kristal (Kumari & Singh, 2020). Tahapan ekstraksi pada penelitian ini dilakukan dengan merendam padi dalam pelarut alkali yaitu larutan NaOH. Adapun reaksi yang terjadi antara SiO₂ dalam sekam padi dengan larutan alkali (NaOH) adalah sebagai berikut:

natrium sehingga menghasilkan SiO₂. Reaksi yang terjadi dapat ditulis sebagai berikut:

mendapatkan serbuk silika dengan tingkat kemurnian tinggi maka dilakukan proses kalsinasi silika dengan menggunakan suhu 550 °C. Komposisi kimia silika sekam padi mengalami peningkatan setelah melalui proses kalsinasi (Tabel 1).

Kandungan silika hasil ekstraksi sekam padi mengalami peningkatan dari 69,9 menjadi 86,02 % berat. Selain itu, dengan proses kalsinasi ini juga dapat menurunkan beberapa senyawa oksida logam antara lain Fe₂O₃, TiO₂, SO₃, ZnO. Kalsinasi merupakan suatu proses

pemanasan pada material padatan yang menyebabkan

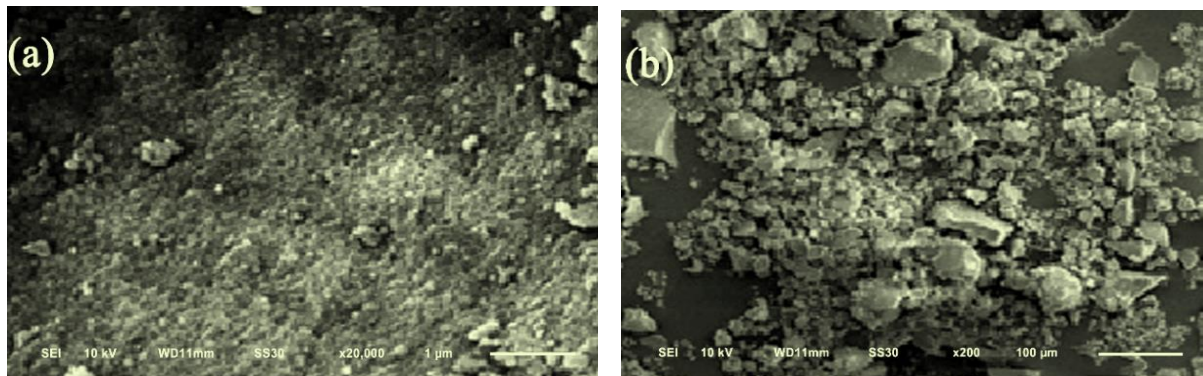
Tabel 1. Komposisi kimia silika dari sekam padi dengan proses kalsinasi

Oksida	Tanpa kalsinasi (% berat)	Kalsinasi (% berat)
SiO ₂	69,90	86,02
Al ₂ O ₃	0,162	0,955
Fe ₂ O ₃	0,045	0,020
MnO	0,015	0,016
CaO	1,02	0,719
MgO	0,469	0,232
Na ₂ O	0,377	0,628
K ₂ O	0,056	0,064
P ₂ O ₅	0,049	*
TiO ₂	0,026	*
SO ₃	0,284	*
ZnO	0,007	*
LOI	28,97	11,60

*tidak terdeteksi

dekomposisi, transisi fasa atau penghilangan suatu komponen dengan menggunakan reaktor ataupun *furnace* (Yodyingyong et al., 2009). Proses

kalsinasi dilakukan untuk mengontrol temperatur pembakaran agar fasa amorf pada silika sekam padi tidak berubah menjadi fasa kristalin.



Gambar 1. SEM silika sekam padi 200x pembesaran; (a) proses kalsinasi dan (b) tanpa kalsinasi

Hasil analisis SEM sekam padi menunjukkan bahwa morfologi dari silika melalui proses kalsinasi lebih seragam dibandingkan dengan silika tanpa melalui proses kalsinasi (Gambar. 1). Hal ini terjadi karena silika hasil ekstraksi sekam padi banyak terdapat material pengotor baik organik maupun organik.

Melalui proses kalsinasi pengotor tersebut menjadi hilang karena adanya proses pemanasan sehingga diperoleh silika yang lebih seragam dan bersih dari pengotor. Menurut (Athinarayanan et al., 2015) menunjukkan bahwa bio silika sekam padi yang melalui perlakuan awal dengan asam dan proses kalsinasi menghasilkan silika

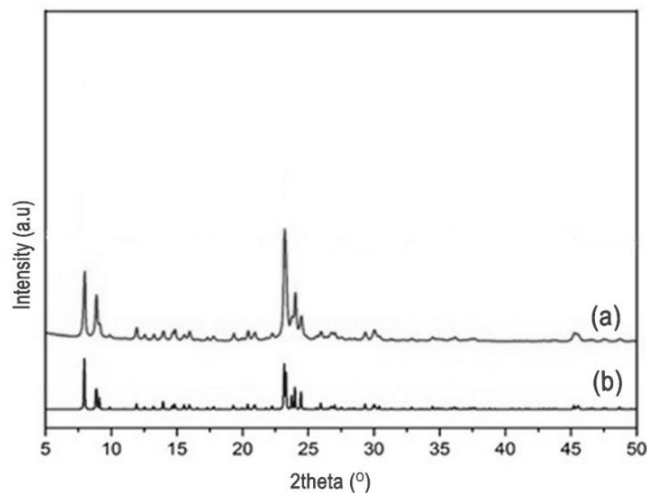
dengan kualitas tinggi baik struktur maupun kemurniannya. Selain itu, proses kalsinasi dengan suhu dan laju pemanasan dalam proses sintesis silika seam padi

Sintesis zeolit ZSM-5

Sintesis zeolit ZSM-5 dilakukan menggunakan sumber silika dari sekam padi (SiO_2), sumber alumina (NaAlO_2), sumber mineral (NaOH), dan senyawa organik sebagai agen pengarah struktur (TPABr). Silika sekam padi yang digunakan merupakan silika alternatif dari alam yang dapat digunakan pada sintesis zeolit ZSM-5. Selain memiliki kadar silika yang tinggi, sumber bahan baku sekam

memiliki pengaruh yang signifikan terhadap bentuk dan ukuran nanopartikel (Zarei et al., 2021).

padi tersedia cukup melimpah dan mudah diperoleh. Sintesis zeolit ZSM-5 dalam penelitian ini menggunakan prekursor yaitu silika dari sekam padi pada suhu rendah ($90\text{ }^\circ\text{C}$), dengan rasio molar $\text{Si/Al} = 100$, $\text{H}_2\text{O/Si} = 11,69$, $\text{NaOH/Si} = 0,14$ dan $\text{TPA-Br/Si} = (0: 0.015: 0.045: 0.086)$. Sintesis dilakukan dengan kondisi statis selama 4 hari dengan tambahan template organik yaitu tetrapropilamoniumbromida (TPABr).



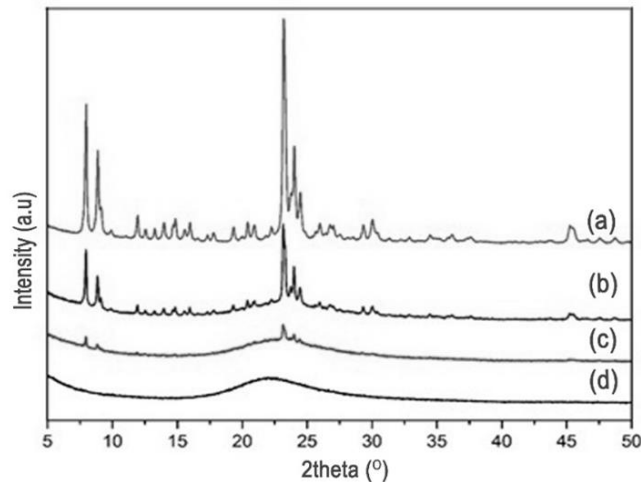
Gambar 2. Difraktogram sintesis zeolit ZSM-5; (a) ZSM-5 silika sekam padi dan (b) ZSM-5 standar.

Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa difraksi sinar-X zeolit silika dari sekam padi memiliki pola yang sesuai dengan zeolit ZSM-5 standar (Gambar 2). Kesesuaian pola tersebut ditunjukkan pada puncak 2θ yaitu $7,79$ dan $8,01$ yang merupakan puncak khas pada zeolit ZSM-

5. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian (Li et al., 2019) yang menyebutkan bahwa zeolite ZSM-5 yang dibuat untuk menghilangkan fenol mempunyai puncak khas 2θ pada $7-10^\circ$. Berdasarkan hasil tersebut maka dapat disimpulkan bahwa silika sekam padi dapat digunakan sebagai

sumber silika alternatif rendah biaya pada sintesis zeolit ZSM-5. Selain penggunaan bahan baku silika, pada sintesis zeolit ZSM-5 juga menggunakan senyawa pengarah struktur yaitu tetrapropilen amonium bromida. Untuk mengurangi besarnya biaya dan juga tingkat kemurnian

zeolit pada sintesis yang dilakukan maka dilakukan pengurangan agen pengarah struktur ini. Sintesis zeolite ZSM-5 ini dilakukan dengan rasio molar SDA/Si yaitu 0: 0,015: 0,045 dan 0,086 dengan menggunakan suhu 90 °C selama 4 hari.

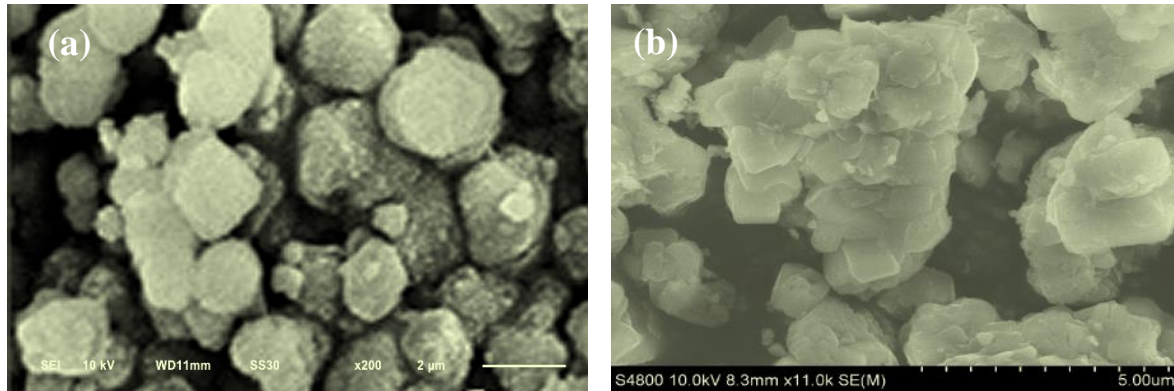


Gambar 3. Difraktogram ZSM-5 dengan rasio pengurangan agen pengarah struktur dengan rasio SDA/Si. (a) 0,086; (b) 0,045; (c) 0,015; dan (d) 0.

Pengurangan komposisi agen pengarah berupa senyawa organik pada sintesis zeolite ZSM-5 menunjukkan hasil yang cukup baik (Gambar 3). Hasil difraksi zeolite ZSM-5 pada rasio SDA/Si = 0 (Gambar 3d) menunjukkan fase amorf tanpa puncak kristalinitas zeolite. Sedangkan hasil difraksi dengan puncak kristalinitas tertinggi ditunjukkan pada rasio SDA/Si = 0,086 dengan puncak yang tajam (Gambar. 3a). Berdasarkan gambar 3 dapat disimpulkan bahwa pengurangan senyawa organik pengarah struktur masih dapat dilakukan pada sintesis zeolite ZSM-

5 untuk menurunkan biaya. Rasio SDA/Si yang masih memungkinkan pada sintesis zeolite ZSM-5 tanpa menurunkan kualitas dan tingkat kristalinitas yaitu SDA/Si =0,045 (Gambar 3b).

Morfologi permukaan kristal zeolite sintetis ZSM-5 cenderung berbentuk membulat (Gambar 4). Jika dibandingkan dengan morfologi zeolit standar ZSM-5 terlihat bahwa standar zeolite menunjukkan bentuk permukaan yang lebih halus dan cenderung bersudut dibandingkan zeolite sekam padi.



Gambar 4. SEM zeolit sintetis ZSM-5. a) zeolit dari sekam padi, b) zeolit standar (ACS Material, 2021)

Hal ini terjadi karena silika yang digunakan dalam sintesis zeolite merupakan silika amorf yang berasal dari sekam padi. Selain itu, penampakan hasil SEM menunjukkan adanya rongga pada permukaan ZSM-5 yang merupakan pengaruh dari adanya pori yang terbentuk

pada kristal zeolit. Hal ini juga ditunjukkan pada sintesis ZSM-5 yang dilakukan oleh (L. Wang et al., 2010), dimana adanya pori pada zeolit menyebabkan permukaan zeolit yang disintesis memiliki bentuk berongga.

KESIMPULAN

Sekam padi berhasil diekstraksi dengan menggunakan pelarut alkali dan dapat digunakan menjadi sumber silika pada sintesis zeolit ZSM-5. Sintesis zeolit ZSM-5 menggunakan metode dengan biaya rendah dengan senyawa organik sebagai pengaruh struktur pada suhu rendah yaitu (90°C). Metode ini berhasil mengubah fasa amorf silika sekam padi menjadi fasa kristalin zeolit ZSM-5. Selain itu, untuk menurunkan biaya pada sintesis digunakan pengurangan pada penggunaan senyawa organik pengaruh struktur yaitu rasio SDA/Si = 0,045. Hasil sintesis dengan pengurangan agen pengaruh struktur menghasilkan kualitas zeolit yang baik

ditunjukkan oleh grafik kristalinitas dan morfologi sesuai dengan standar pada zeolit ZSM-5.

DAFTAR PUSTAKA

- ACS Material. (2021). *Technical Data Sheet ACS Material Silicon nanoparticles*. www.acsmaterial.com
- Athinarayanan, J., Periasamy, V. S., Alhazmi, M., Alatah, K. A., & Alshatwi, A. A. (2015). Synthesis of biogenic silica nanoparticles from rice husks for biomedical applications. *Ceramics International*, *41*(1), 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.08.069>
- Azat, S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. (2019). Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, *217*, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>

- Dhankhar, P. (2014). Rice Milling. *IOSR Journal of Engineering*, 4(5), 34–42. <https://doi.org/10.9790/3021-04543442>
- Hossain, S. K. S., Mathur, L., & Roy, P. K. (2018). Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(4), 299–313. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1539210>
- Jesudoss, S. K., Vijaya, J. J., Kaviyarasu, K., Kennedy, L. J., Jothi Ramalingam, R., & Al-Lohedan, H. A. (2018). Anti-cancer activity of hierarchical ZSM-5 zeolites synthesized from rice-based waste materials. *RSC Advances*, 8(1), 481–490. <https://doi.org/10.1039/c7ra11763a>
- Kordatos, K., Ntziouni, A., Iliadis, L., & Kasselouri-Rigopoulou, V. (2013). Utilization of amorphous rice husk ash for the synthesis of ZSM-5 zeolite under low temperature. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15(4), 571–580. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0141-x>
- Kumari, A., & Singh, A. K. (2020). From Amorphous to crystalline nature of silica nanoparticles obtain from rice husk. *Wutan Huatan Jisuan Jishu*, 16(4), 532–538.
- Li, H., Cheng, R., Liu, Z., & Du, C. (2019). Waste control by waste: Fenton-like oxidation of phenol over Cu modified ZSM-5 from coal gangue. *Science of the Total Environment*, 683, 638–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.242>
- Moraes, J. C. B., Font, A., Soriano, L., Akasaki, J. L., Tashima, M. M., Monzó, J., Borrachero, M. V., & Payá, J. (2018). New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 171, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.230>
- Priyadi, Iskandar, Suwardi, & Mukti, R. (2015). Characteristics of Heavy Metals Adsorption Cu, Pb and Cd Using Synthetics Zeolite Zsm-5. *J Trop Soils*, 20(2), 77–83. <https://doi.org/10.5400/jts.2015.20.2.77>
- Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 153, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>
- Wang, L., Zhang, Z., Yin, C., Shan, Z., & Xiao, F. S. (2010). Hierarchical mesoporous zeolites with controllable mesoporosity templated from cationic polymers. *Microporous and Mesoporous Materials*, 131(1–3), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.12.001>
- Wang, Y., Fan, S., Zhang, J., & Zhao, T. S. (2015). Effects of synthesis conditions on the yields and properties of HZSM-5. *Crystal Research and Technology*, 50(7), 522–527. <https://doi.org/10.1002/crat.201400481>
- Yodyingyong, S., Panijpan, B., Triampo, W., & Triampo, D. (2009). An inexpensive furnace for calcination: Simple TiO₂ synthesis. *Journal of Chemical Education*, 86(8), 950–952. <https://doi.org/10.1021/ed086p950>
- Yu, J., Zhang, J., He, J., Liu, Z., & Yu, Z. (2009). Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull. *Bioresource Technology*, 100(2), 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.025>
- Zarei, V., Mirzaasadi, M., Davarpanah, A., Nasiri, A., Valizadeh, M., & Hosseini, M. J. S. (2021). Environmental method for synthesizing amorphous silica oxide nanoparticles from a natural material. *Processes*, 9(2), 1–9. <https://doi.org/10.3390/pr9020334>