

Síntesis hidrotermal de zeolitas y sus aplicaciones ambientales

Hydrothermal synthesis of zeolites and their environmental applications

Andrés Pérez-Aguilar^a, Verónica Cecilia López-González^b, Màrius Ramírez-Cardona^d,
Marcelino A. Zúñiga-Estrada^{e*}

Abstract:

Synthetic zeolites are highly versatile and effective materials, especially in environmental applications such as wastewater treatment. Thanks to their high adsorption capacity, large surface area and selectivity, they are useful for removing heavy metals and organic contaminants such as phenols and antibiotics. They are synthesized mainly by the hydrothermal method, which allows precise control over their properties. Although this method is efficient and economical, it still presents challenges, such as high energy consumption and emission of hazardous gases. Zeolites have also been modified and improved, such as nanocrystalline zeolites, which have demonstrated greater effectiveness in adsorption processes. Synthetic zeolites continue to be a promising option for contaminant removal, with great potential in the environmental sector and other industries.

Keywords:

Zeolites, environmental, remediation, hydrothermal synthesis

Resumen:

Las zeolitas sintéticas son materiales altamente versátiles y eficaces, especialmente en aplicaciones ambientales como el tratamiento de aguas residuales. Gracias a su alta capacidad de adsorción, gran área superficial y selectividad, son útiles para eliminar metales pesados y contaminantes orgánicos como fenoles y antibióticos. Se sintetizan principalmente mediante el método hidrotermal, que permite un control preciso sobre sus propiedades. Aunque este método es eficiente y económico, aún presenta desafíos, como el alto consumo de energía y la emisión de gases peligrosos. Las zeolitas también se han modificado y mejorado, como las zeolitas nanocristalinas, que han demostrado mayor efectividad en procesos de adsorción. Las zeolitas sintéticas continúan siendo una opción prometedora para la remoción de contaminantes, con un gran potencial en el sector ambiental y otras industrias.

Palabras Clave:

Zeolitas, ambiental, remediación, síntesis hidrotermal

1. Introducción

Las zeolitas son un grupo de minerales pertenecientes a los aluminosilicatos cristalinos

microporosos [1]. Poseen una estructura tridimensional compuesta por tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ enlazados mediante átomos de oxígeno [2]. La composición química general de las zeolitas

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Mineral de la Reforma, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-5957-1756>, Email: andres.perez@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Mineral de la Reforma, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0002-9979-6223>, Email: lo463630@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Mineral de la Reforma, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4376-3377>, Email: mariusr@uaeh.edu.mx

^{d*} Autor de Correspondencia: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Mineral de la Reforma, Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-1040-9670>, Email: marcelino_zuniga@uaeh.edu.mx

se expresa como $\text{Ma/b}[(\text{AlO}_2)_a(\text{SiO}_2)_y] \cdot c\text{H}_2\text{O}$, donde M representa un catión de metal alcalino o alcalinotérreo, b representa la valencia del catión metálico, c corresponde a la cantidad de agua de cristalización por celda unitaria, a es el número total de tetraedros de $[\text{AlO}_4]^{5-}$ e y el número total de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ [2]. Según su origen, las zeolitas se clasifican en naturales y sintéticas. Las zeolitas naturales se forman a través de procesos geológicos a partir de la alteración de materiales volcánicos, mientras que las zeolitas sintéticas son obtenidas en laboratorio mediante técnicas controladas que permiten ajustar su pureza, tamaño de partícula y propiedades específicas para diversas aplicaciones industriales, ambientales y biomédicas.

Las zeolitas, gracias a su estructura porosa y sus propiedades de intercambio iónico, poseen un amplio potencial de aplicación [3]. Las zeolitas naturales se emplean principalmente como materiales en la industria de la construcción y del papel [4], así como en actividades agrícolas. Por su parte, las zeolitas sintéticas tienen una gama aún más diversa de aplicaciones, utilizándose como adsorbentes, catalizadores y tamices moleculares [5], en la eliminación de contaminantes radiactivos [6] y en productos de lavandería [7]. Además, juegan un papel importante en la mitigación ambiental, especialmente en la remoción de contaminantes y la captura de gases [8].

Una ventaja significativa de las zeolitas sintéticas es que pueden ser elaboradas en formas extremadamente puras, con tamaños de partícula uniformes y con capacidades de intercambio iónico optimizadas, lo que amplía aún más sus posibilidades de aplicación [1].

2. Propiedades de las zeolitas sintéticas

Las zeolitas sintéticas, gracias a su alta pureza y al control en el tamaño de cristal, ofrecen una gran versatilidad que permite su uso en diversos sectores industriales. A diferencia de las zeolitas naturales, que contienen materiales ajenos y presentan variaciones en el tamaño de sus cristales, las zeolitas sintéticas ofrecen una mayor uniformidad. Mientras que la formación natural de zeolitas puede tardar desde varios días hasta incluso décadas, las zeolitas sintéticas pueden producirse en laboratorio en un periodo que va de unas pocas horas a algunos días, con la posibilidad de modificar propiedades como el tamaño de poro, la estabilidad térmica y la capacidad

adsorbente. Sin embargo, su producción implica un costo ligeramente superior.

La obtención de zeolitas sintéticas puede realizarse mediante diversos métodos, lo que permite modificar tanto su composición química como sus propiedades fisicoquímicas. Estas zeolitas presentan tamaños de cristal que generalmente varían entre 1.0 y 10.0 μm , con densidades que oscilan de 2.0 a 23.0 g/cm^3 y una gravedad específica entre 0.80 y 0.90 g/cm^3 [9]. También destacan por su capacidad de absorción de agua, situada entre 45.0 y 75.0 ml por cada 100 g de material [10]. Además, su estabilidad térmica puede mejorarse ajustando parámetros como el contenido de aluminio y la relación sílice/alúmina en su estructura.

3. Tipos de zeolitas sintéticas

En la actualidad se han reconocido mas de 200 especies diferentes de zeolitas sintéticas hasta la fecha Tabla 1 [11; 12]. Entre las más destacadas se encuentran la zeolita A, zeolita Y, ZSM-5, aluminofosfato (AIPO-5) [13], silicoaluminofosfato (SAPO-5/SAPO-34) [14], SBA-15 [15; 16], SBA-16 [17] y las zeolitas tipo Lynde (LTA) [16]. Estas zeolitas sintéticas tienen aplicaciones altamente versátiles que van desde el sector ambiental hasta el médico. Debido a esto, la comprensión de la química detrás de las estructuras de las zeolitas y los diferentes métodos de preparación es de suma importancia [18]. Además, se han explorado diversas fuentes de materias primas para obtener zeolitas con propiedades multifacéticas. En este proceso, un parámetro clave es el adecuado contenido de alúmina y sílice en las materias primas utilizadas.

Tabla 1. Principales tipos de zeolitas sintéticas y sus aplicaciones ambientales

Nombre	Fórmula típica de celda unitaria	Aplicaciones ambientales
A	$\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$ $\text{Ca}_2\text{Na}_2[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$ $\text{K}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$	Tratamiento de aguas residuales porcinas, eliminación de contaminantes radioactivos, adsorción de gases y catalizador
P	$\text{Na}_6(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_6 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	Tratamiento de aguas residuales
X	$\text{Na}_{86}[(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106}]$ $\text{Ca}_{40}\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106}]$ $\text{Sr}_{21}\text{Ba}_{22}[(\text{AlO}_2)_{86}(\text{SiO}_2)_{106}]$	Adsorción de gases
Y	$\text{K}_{60}(\text{AlO}_2)_{56}(\text{SiO}_2)_{136}$	Petroquímica
Mordenita	$\text{Ag}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}]$ $\text{H}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}]$	Adsorción de gases y catálisis
ZSM-5	$\text{Na}_3[(\text{AlO}_2)_3(\text{SiO}_2)_{93}]$	Petroquímica

4. Método hidrotermal en la síntesis de zeolitas sintéticas

Las zeolitas pueden ser sintetizadas a partir de una variedad de materiales. No obstante, no todos los materiales son económicamente viables para la síntesis de zeolitas, ya que, para ser rentables, deben tener un costo bajo y una alta disponibilidad. Hasta la fecha, se han desarrollado diversos métodos para la producción de zeolitas sintéticas, tales como el método hidrotermal [19], la fusión alcalina [20], el método sol-gel [21] y el lixiviado alcalino [22]. Sin embargo, la elección de cada método presenta tanto ventajas como limitaciones.

4.1 Método Solvotérmico

El método solvotérmico es un término general que hace referencia al uso de un disolvente para sintetizar zeolitas. Los disolventes pueden ser orgánicos como alcoholes (metanol, etanol, pentanol), etilenglicol, hidrocarburos y piridina [23; 24] y agua. Al igual que el agua, estos disolventes generan una presión autógena considerable a temperaturas elevadas. Las propiedades del disolvente utilizado pueden ser no polares o, en el caso de los disolventes polares, hidrofóbicos o ionotérmicos [25].

Los métodos solvotérmicos no solo dependen de factores como la temperatura y la presión, sino también de otros aspectos como las fuentes de reactivos, la composición, la relación entre sílice y álcali, la alcalinidad, las condiciones de agitación, los cationes inorgánicos y el tipo de disolvente utilizado [25; 26]. Este método permite un control preciso sobre el tamaño, la distribución de la forma y la cristalinidad del producto final al ajustar adecuadamente la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, entre otros parámetros [27; 28; 29; 30; 31; 32]. La síntesis suele realizarse a temperaturas que oscilan entre 200 y 250 °C, lo cual favorece la formación controlada de estructuras cristalinas. A pesar de los logros alcanzados con este método en varios aspectos, aún enfrenta desafíos debido al uso de disolventes orgánicos que resultan perjudiciales para el medio ambiente, además de tratarse de procesos que consumen grandes cantidades de energía y tiempo [33]. Sin embargo, este método sigue ganando aceptación y popularidad con el tiempo. Jamil et al. [32] demostraron la síntesis de la zeolita ZSM-22 mediante un método solvotérmico asistido por microondas, empleando diversos cosolventes, entre ellos etanol, 2-propanol, glicerol y etilenglicol.

4.2 Método hidrotermal

El método hidrotermal es ampliamente considerado como la principal técnica para la obtención de zeolitas sintéticas [34]. Este proceso se clasifica como solvotérmico, ya que emplea agua como disolvente y una base como mineralizador, operando a diversas temperaturas y presiones.

La síntesis hidrotermal se realiza generalmente en un recipiente sellado, fabricado de polipropileno y recubierto con teflón, utilizando una autoclave de acero (Figura 1) [35]. Una de sus ventajas es que se requiere una temperatura relativamente baja (100°C-150°C), lo que lo hace más sencillo y económico en comparación con otros métodos.

Las zeolitas se sintetizan comúnmente mediante este método debido a sus numerosas ventajas, como el bajo consumo energético, la alta reactividad de los reactantes, el fácil mantenimiento de la solución, menor contaminación atmosférica y la formación de fases metaestables y fases condensadas únicas [36; 37; 34; 38; 39]. Sin embargo, existen varios factores que pueden influir en el rendimiento, tales como la temperatura, la presión, la composición de la mezcla, la relación sílice/aluminio, los materiales reactantes, y la alcalinidad global, entre otros [25].

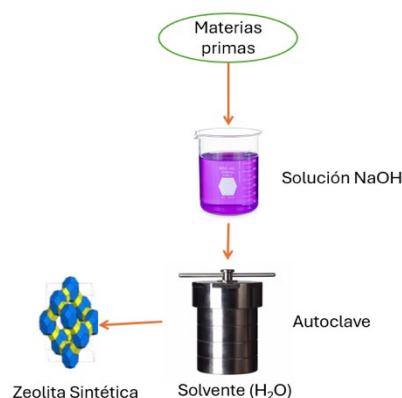


Figura 1. Método de síntesis hidrotermal de zeolitas con H_2O como solvente.

Wang et al. [40] demostraron la preparación de zeolitas sintéticas de tipo ZSM-5 a partir de perlita expandida utilizando este método. De manera similar, otros investigadores desarrollaron zeolitas de estructura jerárquica, como BEA, LTA y FAU, empleando el mismo enfoque [33]. En los últimos años, se han propuesto diversas mejoras en este proceso. Por ejemplo, Yao et al. [41] sintetizaron polvo de zeolita X a partir de diatomea mediante un

método hidrotermal verde y sencillo. Por su parte, Tsujiguchi et al. [42] lograron la obtención de zeolita A a partir de vidrio aluminoborosilicatado utilizando el enfoque hidrotermal. Además, se ha recurrido al uso de residuos municipales para producir zeolita A, debido a su bajo costo y su alto contenido en alúmina [43].

A pesar de los avances exitosos en la obtención de zeolitas mediante el método hidrotermal, este proceso conlleva ciertos riesgos, como la emisión de gases peligrosos y de efecto invernadero debido a la combustión a altas temperaturas. Además, la alta presión dentro del autoclave representa una amenaza significativa para el equipo. Sumado a esto, el método hidrotermal es reconocido por su elevado consumo energético, ya que la producción final puede llevar entre 1 y 20 días. Para superar estas limitaciones, los investigadores han desarrollado diversas estrategias sostenibles de síntesis, como el método hidrotermal asistido por microondas [44], el método hidrotermal con fusión alcalina [45], el método hidrotermal combinado con fusión alcalina digerida por microondas [46] y el método hidrotermal asistido por ultrasonido [47].

5. Aplicaciones ambientales

Las zeolitas tienen una amplia gama de aplicaciones en distintos sectores industriales, incluyendo la ingeniería ambiental, donde se utilizan en el tratamiento de agua de escorrentía y residuales, así como en biotecnología, biomedicina y la industria petroquímica. Estas aplicaciones se deben principalmente a las propiedades específicas de las zeolitas, que las hacen adecuadas para cada uno de estos campos.

5.1 Remoción de metales pesados, cationes y aniones

Las zeolitas han demostrado que tienen un gran potencial para eliminar especies de metales pesados catiónicos, como Cd^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} y Hg^{2+} , presentes en aguas residuales [48; 49]. El tratamiento de los materiales utilizados para su síntesis juega un papel crucial en la remoción de estos contaminantes. Por ejemplo, Lee et al. [50] demostraron que la ceniza volante cruda eliminó menos del 8% de Pb^{2+} , mientras que la ceniza tratada para obtener zeolita logró una remoción del 98%. En otro estudio, se encontró que una zeolita sintetizada a partir de cenizas volantes de carbón exhibió una alta capacidad de adsorción para varios

cationes de metales pesados en un medio artificialmente contaminado [51].

El uso de intercambiadores de cationes y aniones para tratar aguas residuales con el fin de eliminar contaminantes inorgánicos es un enfoque ampliamente utilizado. En este contexto, las zeolitas sintéticas tienen un gran potencial para la captura selectiva de cationes presentes en aguas residuales. Zeolitas como la mordenita y las faujasitas pueden actuar eficazmente como intercambiadores de cationes [52]. Las zeolitas obtenidas de cenizas volantes de carbón han demostrado ser algunos de los materiales más prometedores para la eliminación de cationes [53].

Además, se ha documentado que las zeolitas 4A y Na-P1 tienen una capacidad superior de intercambio de cationes, particularmente en el intercambio de iones de calcio y amonio (por ejemplo, zeolitas 4A: $4.5 \text{ meq Ca}^{2+} \text{ g}^{-1}$ y zeolitas Na-P1: $2.6\text{--}2.8 \text{ meq NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$) [53]. También se ha observado que las zeolitas preparadas a partir de caolinita pueden desempeñar la función de intercambiador de cationes [54].

Es importante señalar que las altas concentraciones de Na^+ en el agua son indeseables, ya que pueden ser absorbidas por el suelo, lo que podría provocar su degradación y una reducción en la permeabilidad de este. Por lo tanto, la concentración de sodio es un factor crucial para considerar al evaluar la idoneidad de las aguas residuales para su uso en riego [55].

5.2 Remoción de componentes orgánicos

Las zeolitas han ganado considerable interés en la eliminación de contaminantes orgánicos, como anilina, fenol y antibióticos sulfonamínicos, debido a su alta capacidad de adsorción, gran área superficial específica y elevada selectividad [56; 57]. En tiempos recientes, se han desarrollado zeolitas nanocristalinas con propiedades mejoradas para procesos de adsorción. Un estudio reciente reportó la preparación de Fe-zeolita nano (Fe-NZ) para tratar compuestos fenólicos en aguas residuales. Las capacidades máximas de adsorción de fenol (Ph), 2-clorofenol (2-CP) y 2-nitrofenol (2-NP) utilizando Fe-NZ fueron de 138.7, 158.9 y 171.2 mg/g, respectivamente [58]. En cuanto a la eliminación de 4-nitrofenol, se logró una eficiencia del 90% con zeolita sintética y del 80% con arcilla de caolín [59]. Además, la zeolita Na-P1 modificada con surfactante a partir de cenizas volantes presentó capacidades de

adsorción para fenol, p-clorofenol y bisfenol A de 37.7 mg/g, 52.4 mg/g y 90.9 mg/g, respectivamente [60].

6. Conclusiones

Las zeolitas sintéticas se presentan como materiales altamente versátiles y eficientes para una amplia gama de aplicaciones industriales, especialmente en el tratamiento ambiental. Gracias a su capacidad de adsorción y su uniformidad estructural, pueden ser empleadas en la remoción de contaminantes tanto inorgánicos, como orgánicos. Además, los avances en la síntesis de zeolitas nanocristalinas y su modificación permiten mejorar aún más sus propiedades, aumentando su efectividad en procesos de adsorción.

El método hidrotermal se destaca como una de las principales técnicas para la producción de zeolitas sintéticas, debido a su bajo costo energético y la capacidad de controlar diversas variables de producción. Sin embargo, es necesario continuar con el desarrollo de métodos más sostenibles y eficientes para superar sus limitaciones, como el alto consumo de energía y los riesgos asociados con los gases peligrosos.

Las zeolitas sintéticas continúan evolucionando y consolidándose como una opción prometedora en el ámbito de la ingeniería ambiental y otros sectores industriales.

7. Referencias

- [1] Auerbach, S. M., Carrado, K. A., y Dutta, P. K. (2004). Handbook of layered materials. CRC press.
- [2] Chiang, A. S. T., y Chao, K. J. (2001). Membranes and films of zeolite and zeolite-like materials. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 62(9-10), 1899-1910.
- [3] Yilmaz, B., y Müller, U. (2009). Catalytic applications of zeolites in chemical industry. Topics in Catalysis, 52, 888-895.
- [4] Feng, N. Q., y Peng, G. F. (2005). Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. Construction and Building Materials, 19(8), 579-584.
- [5] Minachev, K. M., Garanin, V. I., y Isakov, Y. I. (1966). Application of synthetic zeolites (molecular sieves) to catalysis. Russian Chemical Reviews, 35(12), 903.
- [6] Malekpour, A., Millani, M. R., y Kheirkhah, M. (2008). Synthesis and characterization of a NaA zeolite membrane and its applications for desalination of radioactive solutions. Desalination, 225(1-3), 199-208.
- [7] Fruijtier-Pölloth, C. (2009). The safety of synthetic zeolites used in detergents. Archives of toxicology, 83(1), 23-35.
- [8] He, K., Chen, Y., Tang, Z., y Hu, Y. (2016). Removal of heavy metal ions from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash. Environmental Science and Pollution Research, 23, 2778-2788.
- [9] Brinker, C. J., y Scherer, G. W. (2013). Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing. Academic press.
- [10] Smit, B., y Maesen, T. L. (2008). Molecular simulations of zeolites: adsorption, diffusion, and shape selectivity. Chemical reviews, 108(10), 4125-4184.
- [11] Zhao, Y., Zhang, B., Zhang, X., Wang, J., Liu, J., y Chen, R. (2010). Preparation of highly ordered cubic NaA zeolite from halloysite mineral for adsorption of ammonium ions. Journal of Hazardous Materials, 178(1-3), 658-664.
- [12] Sillanpää, M., Bhatnagar, A., 2015. Chapter 7 - NOM removal by adsorption. In: Sillanpää, M. (Ed.), Natural Organic Matter in Water. Butterworth-Heinemann, pp. 213-238.
- [13] Jhung, S.H., Chang, J.S., Hwang, Y.K., Park, S.E., 2004. Crystal morphology control of AFI type molecular sieves with microwave irradiation. J. Mater. Chem. 14, 280-285.
- [14] Jhung, S.H., Chang, J.-S., Hwang, J.S., Park, S.E., 2003. Selective formation of SAPO-5 and SAPO-34 molecular sieves with microwave irradiation and hydrothermal heating. Microporous Mesoporous Mater. 64, 33-39.
- [15] Kruk, M., Jaroniec, M., Sayari, A.J.L., 1997. Application of large pore MCM-41 molecular sieves to improve pore size analysis using nitrogen adsorption measurements. Langmuir 13, 6267-6273.
- [16] Luan, Z., Hartmann, M., Zhao, D., Zhou, W., Kevan, L., 1999. Alumination and ion exchange of mesoporous SBA-15 molecular sieves. Chem. Mater. 11, 1621-1627.
- [17] Dong, Y., Niu, X., Zhu, Y., Yuan, F., Fu, H., 2011. One-pot synthesis and characterization of Cu-SBA-16 mesoporous molecular sieves as an excellent catalyst for phenol hydroxylation. Catal. Lett. 141, 242-250.
- [18] Moshoeshoe, M., Nadiye-Tabbiruka, M., Obuseng, V.J.A.J.M.S., 2017. A review of the chemistry, structure, properties and applications of zeolites. Am. J. Mater. Sci. 7, 196-221.
- [19] Sugano, Y., Sahara, R., Murakami, T., Narushima, T., Iguchi, Y., Ouchi, C., 2005. Hydrothermal synthesis of zeolite A using blast furnace slag. Iron Steel Inst. Jpn. Int. 45, 937-945.
- [20] Wajima, T., Yoshizuka, K., Hirai, T., Ikegami, Y., 2008. Synthesis of zeolite X from waste sandstone cake using alkali fusion method. Mater. Trans. 49, 612-618.
- [21] Tsujiguchi, M., Kobashi, T., Utsumi, Y., Kakimori, N., Nakahira, A., 2014. Synthesis of zeolite A from aluminoborosilicate glass used in glass substrates of liquid crystal display panels and evaluation of its cation exchange capacity. J. Am. Ceram. Soc. 97, 114-119.

- [22] Shoppert, A., Loginova, I., Chaikin, L., Rogozhnikov, D., 2017. Alkali fusion-leaching method for comprehensive processing of fly ash. *Knowl. E Mater. Sci.* 89-96.
- [23] Sangeetha, C., Baskar, P., 2016. Zeolite and its potential uses in agriculture: a critical review. *Agric. Rev.* 37, 101-108.
- [24] Bibby, D., Dale, M., 1985. Synthesis of silica-sodalite from non-aqueous systems. *Nature* 317, 157-158.
- [25] Johnson, E., Arshad, S.E., 2014. Hydrothermally synthesized zeolites based on kaolinite: a review. *Appl. Clay Sci.* 97, 215-221.
- [26] Abdullahi, T., Harun, Z., Othman, M.H.D., 2017. A review on sustainable synthesis of zeolite from kaolinite resources via hydrothermal process. *Adv. Powder Technol.* 28, 1827-1840.
- [27] Qiang, Z., Shen, X., Guo, M., Cheng, F., Zhang, M., 2019. A simple hydrothermal synthesis of zeolite X from bauxite tailings for highly efficient adsorbing CO₂ at room temperature. *Microporous Mesoporous Mater.* 287, 77-84.
- [28] Yao, G., Lei, J., Zhang, X., Sun, Z., Zheng, S., 2018. One-step hydrothermal synthesis of zeolite X powder from natural low-grade diatomite. *Materials* 11, 906.
- [29] Borel, M., Dodin, M., Daou, T.J., Bats, N., Harbuzaru, B., Patarin, J., 2017. SDA-free hydrothermal synthesis of high-silica ultra-nanosized zeolite Y. *Crys. Growth Des.* 17, 1173-1179.
- [30] Sethaya, N., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., 2016. Preparation of zeolite nanocrystals via hydrothermal and solvothermal synthesis using rice husk ash and metakaolin. *Mater. Sci. Forum Trans. Tech. Publ.* 242-247.
- [31] Cui, M., Wang, Y., Liu, X., Zhu, J., Sun, J., Lv, N., Meng, C., 2014. Solvothermal conversion of magadiite into zeolite omega in a glycerol-water system. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 89 (3), 419-424.
- [32] Jamil, A.K., Muraza, O., Al-Amer, A.M., 2016. Microwave-assisted solvothermal synthesis of ZSM-22 zeolite with controllable crystal lengths. *Particuology* 24, 138-141.
- [33] Chen, Y., Tang, S., 2019. Solvothermal synthesis of porous hydrangea-like zeolitic imidazole framework-8 (ZIF-8) crystals. *J. Solid State Chem.* 276, 68-74.
- [34] Rabenau, A., 1985. The role of hydrothermal synthesis in preparative chemistry. *Angew. Chem. Int. Ed.* 24, 1026-1040.
- [35] Sangeetha, C., Baskar, P., 2016. Zeolite and its potential uses in agriculture: a critical review. *Agric. Rev.* 37, 101-108.
- [36] Byrappa, K., Yoshimura, M., 2012. *Handbook of Hydrothermal Technology*. William Andrew.
- [37] Julbe, A., Farrusseng, D., Jalibert, J.C., Mirodatos, C., Guizard, C., 2000. Characteristics and performance in the oxidative dehydrogenation of propane of MFI and V-MFI zeolite membranes. *Catal. Today* 56 (1-3), 199-209.
- [38] Byrappa, K., Haber, M., 2001. *Hydrothermal Technology for Crystal Growth*. Noyes Publications.
- [39] Wu, H.M., Tu, J.P., Yuan, Y.F., Chen, X.T., Xiang, J.Y., Zhao, X.B., Cao, G.S., 2006. One-step synthesis LiMn₂O₄ cathode by a hydrothermal method. *J. Power Source* 161, 1260-1263.
- [40] Wang, P., Shen, B., Shen, D., Peng, T., Gao, J., 2007. Synthesis of ZSM-5 zeolite from expanded perlite/kaolin and its catalytic performance for FCC naphtha aromatization. *Catal. Commun.* 8, 1452-1456.
- [41] Yao, G., Lei, J., Zhang, X., Sun, Z., Zheng, S., 2018. One-step hydrothermal synthesis of zeolite X powder from natural low-grade diatomite. *Materials* 11, 906.
- [42] Tsujiguchi, M., Kobashi, T., Utsumi, Y., Kakimori, N., Nakahira, A., 2014. Synthesis of zeolite A from aluminoborosilicate glass used in glass substrates of liquid crystal display panels and evaluation of its cation exchange capacity. *J. Am. Ceram. Soc.* 97, 114-119.
- [43] Terzano, R., D'Alessandro, C., Spagnuolo, M., Romagnoli, M., Medici, L., 2015. Facile zeolite synthesis from municipal glass and aluminum solid waste. *Clean Soil Air Water* 43, 133-140.
- [44] Rao, K.J., Vaidhyanathan, B., Ganguli, M., Ramakrishnan, P.A., 1999. Synthesis of inorganic solids using microwaves. *Chem. Mater.* 11 (4), 882-895.
- [45] Bukhari, S.S., Behin, J., Kazemian, H., Rohani, S., 2015. Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: a review. *Fuel* 140, 250-266.
- [46] Chen, Q., Long, L., Liu, X., Jiang, X., Chi, Y., Yan, J., Zhao, X., Kong, L., 2020. Low toxic zeolite fabricated from municipal solid waste incineration fly ash via microwave-assisted hydrothermal process with fusion pretreatment. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 22, 1196-1207.
- [47] Jusoh, N., Yeong, Y.E., Mohamad, M., Lau, K.K., Shariff, A.M., 2017. Rapid synthesis of zeolite T via sonochemical-assisted hydrothermal growth method. *Ultrason. Sonochem.* 34, 273-280.
- [48] Petrus, R., Warchot, J.K., 2005. Heavy metal removal by clinoptilolite. An equilibrium study in multicomponent systems. *Water Res.* 39, 819-830.
- [49] Nascimento, M., Soares, P.S.M., Souza, V.P.d., 2009. Adsorption of heavy metal cations using coal fly ash modified by hydrothermal method. *J. Fuel* 88, 1714-1719.
- [50] Lee, M.G., Yi, G., Ahn, B.J., Roddick, F., 2000. Conversion of coal fly ash into zeolite and heavy metal removal characteristics of the products. *Korean J. Chem. Eng.* 17, 325-331.
- [51] Ji, X., Zhang, M., Wang, Y., Song, Y., Ke, Y., Wang, Y., 2015. Immobilization of ammonium and phosphate in aqueous solution by zeolites synthesized from fly ashes with different compositions. *J. Ind. Eng. Chem.* 22, 1-7.
- [52] Dyer, A., Amini, S., Enamy, H., El-Naggar, H., Anderson, M., 1993. Cation-exchange in synthetic zeolite L: the exchange of hydronium and ammonium ions by alkali metal and alkaline earth cations. *Zeolites* 13, 281-290.
- [53] Cardoso, A.M., Horn, M.B., Ferret, L.S., Azevedo, C.M.N., Pires, M., 2015. Integrated synthesis of zeolites 4A and Na-Pl using coal fly ash

for application in the formulation of detergents and swine wastewater treatment. *J. Hazard. Mater.* 287, 69-77.

- [54] Barrer, R.M., Munday, B.M., 1971. Cation exchange in the synthetic zeolite KF. *J. Chem. Soc. A* 2914-2921. [55] Kidney Disease Improved Global Outcomes (KDIGO). KDIGO 2012 Clinical Practice Guideline for the Evaluation and Management of Chronic Kidney Disease. *Off. J. Int. Soc. Nephrol.* 2013; 3(1): 1–163.
- [55] Gibb, N.P., Dynes, J.J., Chang, W., 2017. Synergistic desalination of potash brine-impacted groundwater using a dual adsorbent. *Sci. Total Environ.* 593-594, 99-108.
- [56] Amin, N.A.S., Akhtar, J., Rai, H.K., 2010. Screening of combined zeolite-ozone system for phenol and COD removal. *Chem. Eng. J.* 158, 520-527.
- [57] Peng, S., Hao, K., Han, F., Tang, Z., Niu, B., Zhang, X., Wang, Z., Hong, S., 2015. Enhanced removal of bisphenol-AF onto chitosan modified zeolite by sodium cholate in aqueous solutions. *Carbohydr. Polym.* 130, 364-371.
- [58] Tri, N.L.M., Thang, P.Q., Van Tan, L., Huong, P.T., Kim, J., Viet, N.M., Phuong, N.M., Al Tahtamouni, T.M., 2020. Removal of phenolic compounds from wastewater by using synthesized Fe-nano zeolite. *J. Water Process Eng.* 33, 101070.
- [59] Ahmedzeki, N.S., Rashid, H.A., Alnaama, A.A., Alhasani, M.H., Abdhussain, Z., 2013. Removal of 4-nitro-phenol from wastewater using synthetic zeolite and kaolin clay. *Korean J. Chem. Eng.* 30, 2213-2218.
- [60] Xie, J., Meng, W., Wu, D., Zhang, Z., Kong, H., 2012. Removal of organic pollutants by surfactant modified zeolite: Comparison between ionizable phenolic compounds and non-ionizable organic compounds. *J. Hazard. Mater.* 231, 57-63.