

AKTIVASI ZEOLIT ALAM JENIS *CLINOPTILOLITE* MENGGUNAKAN MEDAN LISTRIK SEARAH UNTUK MENINGKATKAN ADSORPTIVITAS TERHADAP ION GARAM DALAM AIR LAUT

ACTIVATION OF NATURAL ZEOLIT TYPE *CLINOPTILOLITE* USING DIRECT ELECTRICAL FIELD TO INCREASE THE ADSORPTIVITY CAPABILITIES FOR REDUCE SALT CONTENT IN SEAWATER

Rahman Aditya¹, Edy Wibowo^{2,3}, Mamat Rokhmat³

^{1,2,3}Prodi S1Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

adhitsya@gmail.com¹, edyw.phys@gmail.com², mamatrokhmat76@gmail.com³

Abstrak

Telah dilakukan aktivasi zeolit alam jenis *clinoptilolite* dengan menggunakan medan listrik searah. Aktivasi dilakukan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi zeolit terhadap ion garam terlarut dalam air. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil pengurangan besar salinitas antara zeolit teraktivasi dan zeolit tidak teraktivasi. Air yang digunakan adalah sampel air garam 35,20 ppt yang dibuat dengan cara mencampurkan 400 ml air mineral dengan 14,80 gram garam. Perlakuan aktivasi dengan pemberian medan listrik searah terbukti dapat meningkatkan efisiensi sebesar 5,39% untuk pada zeolit dengan ukuran serbuk dan 2 mm, yang diberi tegangan 8 volt selama 15 menit. Selain variasi ukuran zeolit, pada penelitian ini dilakukan variasi besar tegangan dan lama waktu aktivasi. Penambahan besar tegangan dan lama waktu aktivasi cenderung menurunkan efisiensi zeolit. Selain itu, pada penelitian ini teramati bahwa nilai salinitas mempengaruhi daya efisiensi adsorpsi zeolit.

Kata kunci: zeolit alam, *clinoptilolite*, medan listrik, adsorptivitas, ion garam.

Abstract

In this study the activation of clinoptilolite zeolite by using unidirectional electric field was carried out. Activation is done to improve the ability of the zeolite to ion adsorption of dissolved salts in water. In this study, testing was carried out by comparing the results of the reduction in salinity between activated zeolites and non-activated zeolites. The water used is a sample of salt water 35,20 ppt which is made by mixing 400 ml mineral water with 14,80 gram salt. The treatment of activation using the unidirectional electric field method has been shown to increase the efficiency of zeolite adsorption against dissolved salt ions, with an efficiency of 5.39% in activated zeolites with powder size and 2 mm, which is given a voltage of 8 volts and 15 minutes activation time. In addition to variations in zeolite size, in this study variations in stress values and length of activation were carried out. Addition of voltage and activation time tends to reduce zeolite efficiency. Additionally, in this study it was observed that the value of salinity affect the zeolite adsorption efficiency.

Keywords: natural zeolite, *clinoptilolite*, electric field, adsorptivity, salt ion.

1. Pendahuluan

Air merupakan salah satu kebutuhan manusia untuk bertahan hidup, populasi manusia yang semakin meningkat, menyebabkan kebutuhan manusia akan air bersih semakin tinggi. Selain kebutuhan akan air bersih, manusia juga memiliki kebutuhan lain seperti barang atau benda yang menunjang kehidupan manusia. Di sisi lain kegiatan pada bidang industri yang memproduksi barang atau benda tersebut berdampak merusak lingkungan yang menyebabkan pencemaran pada sumber air, dan seiring waktu ketersediaan air bersih akan berkurang. Jika masalah ini tidak ditanggulangi maka, pada masa yang akan datang manusia akan kesulitan untuk mencari pasokan air bersih yang menunjang kehidupan manusia. Salah satu metode yang dapat memecahkan masalah tersebut adalah desalinasi air laut untuk mendapatkan pasokan air bersih. Ada beberapa metode desalinasi air laut yang telah dikembangkan seperti *multi-stage flash distillation* (MSF), *multiple effect distillation* (MED), *vapor compression distillation* (VCD), *reverse osmosis* (RO), *electrodialysis* (ED), dan *freezing* [1,2]. Dua metode desalinasi yang paling sering digunakan adalah MSF dan RO [3-5] Kedua metode tersebut dapat menghasilkan air bersih dengan kapasitas besar, akan tetapi kedua alat tersebut memerlukan biaya yang sangat tinggi. Hal ini disebabkan oleh mahalnya harga perangkatnya dan biaya pemeliharannya, serta besarnya konsumsi energi yang dibutuhkan untuk pengoperasian alat tersebut. Selain itu, penggunaan minyak bumi sebagai sumber energi pengoperasiannya menyebabkan kerusakan lingkungan yang berdampak pada

pemanasan global. Untuk itu pada penelitian kali ini akan digunakan teknologi desalinasi yang ramah lingkungan serta mempunyai biaya pengadaan alat dan perawatan yang relatif lebih terjangkau.

Metode yang dipakai pada penelitian ini adalah desalinasi menggunakan material pengikat ion (*adsorbent*). Desalinasi menggunakan material adsorben tidak bergantung pada penggunaan minyak bumi sehingga biaya operasionalnya menjadi murah dan ramah lingkungan [6-9]. Ada bermacam-macam material alam dengan harga terjangkau seperti karbon aktif, *clay*, abu terbang dan zeolit telah diteliti untuk dikembangkan menjadi material adsorben [10-15]. Di antara material tersebut, zeolit alam dilaporkan memiliki potensi paling besar dalam mereduksi kandungan logam berat dalam air [16-21]. Telah dilaporkan zeolit alam juga digunakan dalam banyak aplikasi industri, seperti untuk pemurnian air, perbaikan tanah, produksi hewan, pemurnian dan pemisah gas, serta suplemen makanan. Keunggulan lain dari zeolit adalah struktur kristal 3 dimensi yang memiliki rongga-rongga seperti sarang lebah, yang menyebabkan air dapat bergerak bebas masuk dan keluar, namun tidak menyebabkan penyusutan atau pembesaran pada struktur zeolit [22-24].

Zeolit alam memiliki kapasitas pertukaran ion relatif rendah dan perlu di tingkatkan [6]. Efisiensi pengolahan air dengan menggunakan zeolit alam dan modifikasi bergantung pada jenis dan jumlah zeolit yang digunakan, distribusi ukuran partikel zeolit, konsentrasi awal kontaminan (kation/anion), nilai pH larutan, kekuatan ionik larutan, suhu, tekanan, waktu kontak sistem zeolit/larutan dan adanya senyawa organik lainnya [25]. Dengan alasan tersebut, zeolit alam perlu dimodifikasi agar zat-zat terlarut dalam air laut dapat dihilangkan dan bisa menjadi salah satu sumber air. Zeolit alam dapat dimodifikasi dengan melakukan pemanasan atau secara kimiawi (asam, basa dan garam anorganik). Perlakuan kimia dan termal pada zeolit dapat menyebabkan pindahnya kation sehingga mempengaruhi lokasi kation dan pembukaan pori-pori yang dinamakan "Rekayasa Pori-Pori". Dengan berpindahnya ion-ion dan pembukaan pori-pori dapat mempengaruhi sifat adsorben. Pada penelitian kali ini metode medan listrik akan digunakan sebagai aktivator zeolit agar daya adsorbennya meningkat. Faktor lain yang mempengaruhi penelitian ini adalah jarak antar plat, besar tegangan yang digunakan dan ukuran zeolit yang optimal dengan metode ini. Harapan pada penelitian ini menggunakan metode medan listrik dapat mengisi atau menambahkan ion negatif dipermukaan zeolit yang dapat mengubah sifat adsorben untuk menyaring kadar garam pada air laut.

2. Prosedur eksperimen

Pada penelitian ini, dilakukan pengurangan salinitas pada air garam menggunakan metode adsorpsi. Sampel air garam yang digunakan memiliki salinitas sebesar 35.2 ppt. Material adsorben yang digunakan adalah zeolit jenis *clinoptilolite*, yang berukuran serbuk, 2 mm, dan 3 mm. Sebelum digunakan zeolit diaktivasi terlebih dahulu dengan metode pengaliran listrik. Terdapat variasi pada tegangan dan lama waktu aktivasi yaitu, tegangan yang digunakan sebesar 8 Volt dan 15 Volt, lama waktu aktivasi 15 menit, 30 menit, 45 menit, dan 60 menit. Zeolit tersebut dimasukkan ke dalam air garam selama satu hari, setelah itu akan diamati perubahan salinitas pada air garam tersebut.

3. Zeolit

Unsur utama zeolit adalah tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 . Pergantian *Si* oleh *Al* mendefinisikan muatan negatif dari kerangka zeolit, yang dikompensasikan dengan kation logam alkali dan alkali tanah, oleh karena itu zeolit alam muncul sebagai pertukaran ion karena memiliki muatan negatif di permukaan [25] dan zeolit telah banyak digunakan sebagai penyerap dalam proses pemisahan dan pemurnian air [8]. Adapun persamaan untuk menentukan efisiensi adsorben, berikut persamaannya:

$$\eta = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad [1]$$

$$R_s = C_i - C_e \quad [2]$$

$$q_e = R_s \frac{V}{m} \quad [3]$$

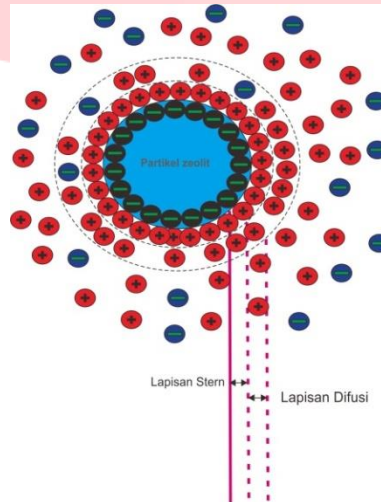
η menunjukkan presentase efisiensi dari zeolit C_i merupakan salinitas air laut sebelum penambahan zeolit (*part per trillion*), C_e merupakan salinitas setelah penambahan zeolit (*part per trillion*), R_s merupakan penurunan salinitas (*part per trillion*), q_e merupakan adsorptivitas zeolit (Liter/Kg), V menyatakan volume air laut (Liter) dan m menyatakan massa zeolit (Kg).

4. Mekanisme Adsorpsi

Proses adsorpsi terjadi akibat interaksi muatan antara ion-ion fluida dan muatan listrik zeolit. Zeolit memiliki permukaan yang bersifat negatif, dikarenakan ketidakseimbangan muatan SiO_4 dan AlO_4 sebagai penyusun utama kerangka zeolit [26,27]. Saat zeolit diterapkan pada penukar ion pada desalinasi, zeolit tersebut akan menarik ion-ion positif dan membentuk lapisan yang terikat kuat pada permukaan zeolit yang disebut lapisan Stern (*Stern layer*). Ketika zeolit mengikat sejumlah ion-ion positif yang membentuk lapisan pertama,

mengakibatkan muatan zeolit menjadi lebih lemah, yang sebelumnya zeolit memiliki daya tolak yang cukup besar kepada ion-ion negatif menjadi melemah. Akibatnya, ion-ion negatif mendapat gaya tarik oleh ion-ion positif yang berada pada lapisan pertama, yang memungkinkan lapisan ke dua ini terdapat ion-ion negatif yang ikut tertarik [28].

Pada lapisan kedua, baik ion-ion positif dan ion-ion negatif mendapatkan gaya tolak dan gaya tarik secara bersamaan. Ion-ion positif akan mendapat gaya tarik oleh muatan zeolit dan menerima gaya tolak oleh ion-ion positif yang berada pada lapisan pertama. Sebaliknya, ion-ion negatif mendapat gaya tarik oleh ion-ion positif yang berada pada lapisan pertama dan menerima gaya tolak oleh ion-ion negatif pada permukaan zeolit [28]. Kondisi tersebut mengakibatkan ikatan pada lapisan kedua lebih lemah dibandingkan ikatan pada lapisan pertama. Lapisan kedua ini disebut lapisan difusi (*diffuse layer*). Proses pengikatan ion pada lapisan difusi akan terus berlangsung sampai ion-ion pada permukaan zeolit sudah tidak mampu mengikat ion-ion lagi [28].



Gambar 4.1 Ilustrasi mekanisme adsorpsi pada zeolit

5. Hasil dan Pembahasan

Pengamatan terhadap perubahan salinitas pada proses pengurangan salinitas pada air garam oleh zeolit dilakukan dengan cara mengukur tingkat salinitas pada sampel menggunakan alat ukur salinometer. Pada percobaan ini, dilakukan perbandingan antara zeolit aktivasi dan zeolit tanpa aktivasi, zeolit diaktivasi dengan menggunakan sumber tegangan searah yang memiliki tegangan 8 volt dan 15 volt, yang diaktivasi selama 15 menit, 30 menit, 45 menit, dan 60 menit, selain itu zeolit yang digunakan memiliki ukuran serbuk, 2 mm, dan 3 mm. gambar 5.1 memperlihatkan 27 sampel yang sedang di uji.



Gambar 5.1 Sampel Penelitian

Berikut data yang diperoleh dari hasil pengambilan salinitas pada sampel yang telah di uji

Tabel 5.1 Data hasil percobaan zeolit serbuk

Tabel 5.2 Data hasil percobaan zeolit 2 mm

Zeolit berukuran serbuk			Zeolit berukuran 2 mm		
Waktu (menit)	Salinitas (ppt)		Waktu (menit)	Salinitas (ppt)	
	Tegangan			Tegangan	
	8V	15V		8V	15V
0	33,7	33,7	0	33,8	33,8
15	33,3	33,5	15	33,3	33,5
30	33,4	33,5	30	33,4	33,6
45	33,4	33,6	45	33,5	33,6
60	33,5	33,6	60	33,5	33,7

Tabel 5.3 Data hasil percobaan zeolit 3 mm

Zeolit berukuran 3 mm		
Waktu (menit)	Salinitas (ppt)	
	Tegangan	
	8V	15V
0	34,1	34,1
15	33,4	33,8
30	33,6	33,9
45	33,8	34
60	34	34

Dari data pengurangan salinitas yang diperoleh tersebut, dapat mengetahui efisiensi dan adsorptivitas speisifk pada zeolit. Berikut tabel dan gambar nilai efisiensi dan adsorptivitas spesifik zeolit:

Tabel 5.4 efisiensi zeolit serbuk

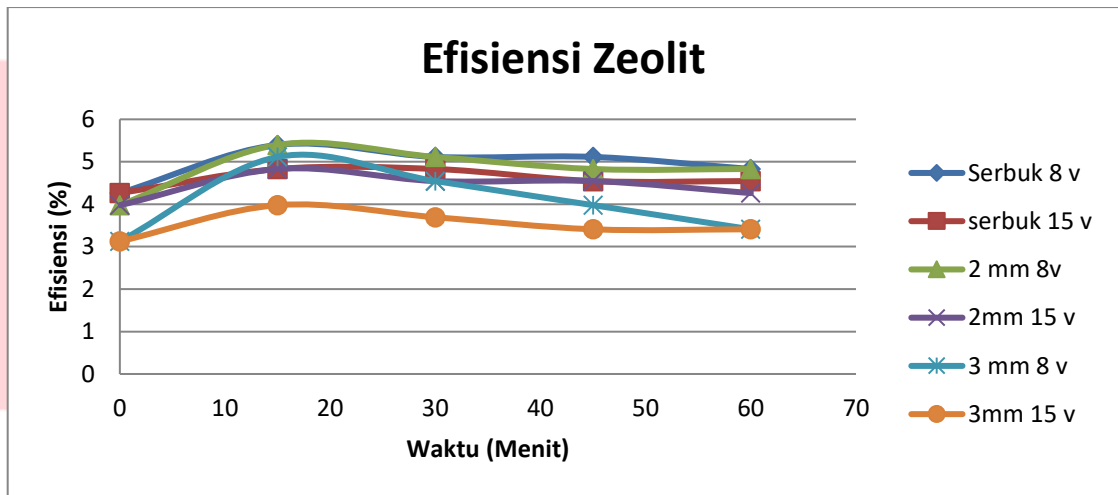
Zeolit berukuran serbuk		
Waktu (Menit)	η (%)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	4,261364	4,261364
15	5,397727	4,829545
30	5,113636	4,829545
45	5,113636	4,545455
60	4,829545	4,545455

Tabel 5.5 efisiensi zeolit 2 mm

Zeolit berukuran 2 mm		
Waktu (Menit)	η (%)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	3,977273	3,977273
15	5,397727	4,829545
30	5,113636	4,545455
45	4,829545	4,545455
60	4,829545	4,261364

Tabel 5.6 efisiensi zeolit 3 mm

Zeolit berukuran 3 mm		
Waktu (Menit)	η (%)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	3,125	3,125
15	5,113636	3,977273
30	4,545455	3,693182
45	3,977273	3,409091
60	3,409091	3,409091



Gambar 4.2 Grafik presentase efisiensi zeolit

Dapat dilihat dari tabel dan gambar diatas bahwa zeolit yang memiliki efisiensi paling besar adalah zeolit aktivasi bertegangan 8 volt dan lama waktu aktivasi 15 menit berukuran serbuk dan 2 mm sebesar 5.113636 %. Zeolit memiliki daya tampung maksimal yang dapat disebut dengan adsorptivitas spesifik, pada tabel dan gambar berikut dapat dilihat perbedaan adsorptivitas spesifik antar zeolit.

Tabel 5.7 nilai adsorptivitas spesifik zeolit serbuk

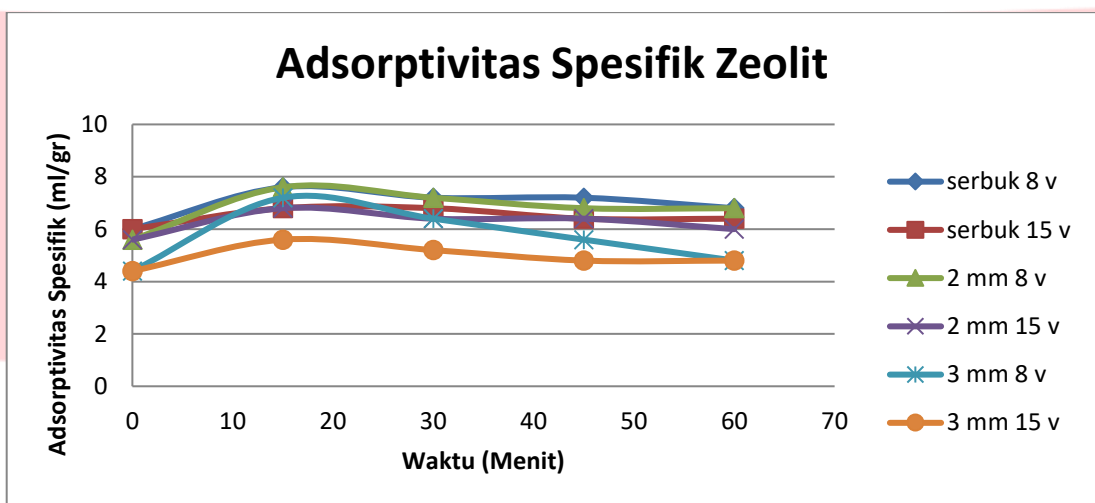
Zeolit berukuran serbuk		
Waktu (Menit)	q_e (ml/gr)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	6	6
15	7,6	6,8
30	7,2	6,8
45	7,2	6,4
60	6,8	6,4

Tabel 5.8 nilai adsorptivitas spesifik zeolit 2 mm

Zeolit berukuran 2 mm		
Waktu (Menit)	q_e (ml/gr)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	5,6	5,6
15	7,6	6,8
30	7,2	6,4
45	6,8	6,4
60	6,8	6

Tabel 5.9 nilai adsorptivitas spesifik zeolit serbuk 3 mm

Zeolit berukuran 3 mm		
Waktu (Menit)	q_e (ml/gr)	
	Tegangan	
	8 v	15 v
0	4,4	4,4
15	7,2	5,6
30	6,4	5,2
45	5,6	4,8
60	4,8	4,8



Gambar 4.3 Grafik nilai adsorptivitas spesifik zeolit

Pada Gambar 4.3 diatas, merupakan grafik adsorptivitas spesifik zeolit terhadap air garam. Zeolit aktivasi yang diberi tegangan sebesar 8 volt memiliki adsorptivitas spesifik lebih besar dengan zeolit aktivasi yang diberi tegangan sebesar 15 volt, dan zeolit yang diaktivasi memiliki adsorptivitas spesifik lebih besar dibandingkan dengan zeolit yang tidak diaktivasi. Aktivasi dengan metode memberikan tegangan searah pada zeolit mempengaruhi adsorptivitas spesifik pada zeolit dan cenderung meningkatkan adsorptivitas spesifik pada zeolit. Dari hasil pengujian, zeolit yang diaktivasi dengan tegangan sebesar 8 volt dan waktu aktivasi selama 15 menit memiliki adsorptivitas spesifik lebih besar. Dapat disimpulkan bahwa aktivasi dengan memberikan tegangan sebesar 8 volt dan waktu aktivasi 15 menit memiliki daya adsorpsi lebih tinggi, dan zeolit berukuran serbuk dan 2 mm, memiliki adsorptivitas spesifik sebesar 7,6 ml/gram. Dapat diartikan bahwa zeolit berukuran serbuk dan 2 mm yang diaktivasi selama 15 menit dapat menjerap 7,6 ml kadar garam terlarut setiap satu gram zeolit. Pemberian perlakuan aktivasi dengan medan listrik searah pada zeolit dapat meningkatkan sifat adsorpsi zeolit tersebut, dengan catatan waktu ideal yang digunakan untuk aktivasi selama 15 menit, besar tegangan sebesar 8 volt, dan untuk ukuran zeolit serbuk, dan 2 mm yang memiliki nilai pengurangan salinitas 1,9 ppt, efisiensi sebesar 5,39 % dan adsorptivitas spesifik sebesar 7,6 ml/gram. Hasil ini sesuai dengan penelitian Wibowo dan Korkuna [28,29], bahwa “kapasitas adsorpsi dapat ditingkatkan dengan cara aktivasi”. Selain itu, metode pengaliran listrik untuk aktivasi zeolit alam dapat mengubah sifat adsorpsi zeolit, yang disimpulkan juga oleh Gashimov [30], dengan memberikan tegangan listrik kepada zeolit dapat mengubah sifat *electrophysical* dan proses pengaliran listrik pada zeolit dapat memicu persilangan dan atau menghancurkan muatan unsur-unsur pada zeolit [30], yang dipengaruhi juga oleh medan listrik yang mengakibatkan muatan arus listrik dapat menembus permukaan zeolit [30].

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Swenson, P., Tanchuk, B., Gupta, A., Weizhu An, Kuznicki, S. M. (2012): Pervaporative desalination of water using natural zeolite membranes, *Desalination*, 285, 68-72.
- [2] Goh, P. S., dan Ismail, A.F. (2013): Carbon nanotubes for desalination: Performance evaluation and current hurdles, *Desalination*, 308, 2-14.
- [3] He, T., dan Yan, L. (2009): Application of alternative energy integration technology in seawater desalination, *Desalination*, 249, 104-108.
- [4] Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I.K., dan Wie, J.M. (2008): Advances in seawater desalination technologies, *Desalination*, 221, 47-69.
- [5] Mezher, T., Fath, H., Abbas, Z., dan Khaled, A. (2011): Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies, *Desalination*, 266, 263-273.
- [6] Taffarel, S.R., dan Rubio, J. (2009): On the removal of Mn²⁺ ions by adsorption onto natural and activated Chilean zeolites, *Minerals Engineering*, 22, 336-343.
- [7] Gupta, S. S., dan Bhattacharyya, K. G. (2006): Removal of Cd(II) from aqueous solution by kaolinite, montmorillonite and their poly(oxo zirconium) and tetrabutylammonium derivatives, *Journal of Hazardous Materials*, 128, 247-257.
- [8] Wang, S dan Peng, Y. (2010): Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment, *Chemical Engineering Journal*, 156, 11-24.
- [9] Inglezakis, V. J., Doula, M.K., Aggelatou, V., dan Zorpas, A.A. (2010): Removal of iron and manganese from underground water by use of natural minerals in batch mode treatment, *Desalination and Water Treatment*, 18, 341-346.
- [10] Qin, C., Wang, R., Ma, W. (2010): Adsorption kinetic studies of calcium ions onto Ca-selective zeolite, *Desalination*, 259, 156-160.
- [11] Chakraborty, S., Sirshendu De, DasGupta, S., dan Basu, J.K. (2005): Adsorption study for the removal of a basic dye: experimental and modeling, *Chemosphere*, 58, 1079-1086.
- [12] Hu, Q.H., Qiao, S Z., Haghseresh, F., Wilson, M.A., dan Lu, G.Q. (2006): Adsorption study for removal of basic red dye using Bentonite, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 733-738.
- [13] Yousef, R.I., El-Eswed, B., Al-Muhtaseb, A. H. (2011): Adsorption characteristics of natural zeolites as solid adsorbents for phenol removal from aqueous solutions: Kinetics, mechanism, and thermodynamics studies, *Chemical Engineering Journal*, 171, 1143-1149.
- [14] Yang, X., dan Al-Duri, B. (2005): Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon, *J. Colloid Interface Sci.*, 287, 25-34.
- [15] Romero-González, J., Peralta-Videa, J.R., Rodríguez, E., Ramirez, S.L., dan Gardea-Torresdey, J.L. (2005): Determination of thermodynamic parameters of Cr(VI) adsorption from aqueous solution onto Agave lechuguilla biomass, *Journal of Chemical Thermodynamics*, 37, 343-347.
- [16] Kučić, D., Markić, M., dan Briški, F. (2012): Ammonium adsorption on natural zeolite (clinoptilolite): adsorption isotherms and kinetics modeling, *The Holistic Approach to Environment*, 2, 145-158.
- [17] Ivanova, E., Karsheva, M., dan Koumanova, B. (2010): Adsorption of ammonium ions onto natural zeolite, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 45, 295-302.
- [18] Mansouri, N., Rikhtegar, N., Panahi, H.A., Abati, F., dan Shahraki, B.K. (2013): Porosity, characterization and structural properties of natural zeolite-clinoptilolite as a sorbent, *Environment Protection Engineering*, 39, 139-152.
- [19] Günay, A., Arslankaya, E., dan Tosun, I. (2007): Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: Adsorption equilibrium and kinetics, *Journal of Hazardous Materials*, 146, 362-371.
- [20] Kyziol-Komosinska, J., Rosik-Dulewska, C., Franus, M., Antoszczyszyn-Szpicka, P., Czupiol, J., dan Krzyewska, I. (2015): Sorption capacities of natural and synthetic zeolites for Cu(II) Ions, *Polish Journal of Environmental Studies*, 24, 1111-1123.
- [21] Inglezakis, V.J., Stylianou, M.A., Loizidou, M., dan Zorpas, A.A. (2016): Experimental studies and modeling of clinoptilolite and vermiculite fixed beds for Mn²⁺, Zn²⁺, and Cr³⁺ removal, *Desalination and Water Treatment*, 57, 11610-11622.
- [22] Bekkum, V.H., Flanigen, E.M., Jacobs, P.A., dan Jansen, J.C. (1991): Jansen. Introduction to zeolite science and practice, 2nd revised Ed. Elsevier, Amsterdam.
- [23] Balci, S. (1999): Effect of heating and acid pre-treatment on pore size distribution of sepiolite, *Clay Minerals*, 34, 647-655.

- [24] Lenarda, M., Da Ros, M., Casagrade, M., Storaro, L., dan Ganzerla, R. (2003): Post-synthetic thermal and chemical treatments of H-BEA zeolite: effects on the catalytic activity, *Inorganica Chimica Acta*, 349, 195-202.
- [25] Margeta, K., Logar, N. Z., Siljeg, M., dan Farkas A. (2013): Natural zeolites in water treatment-how effective is their use (Chapter 5), InTech.
- [26] Xue, Z., Li, Z., Ma, J., Bai, X., Kang, Y., Ho, W., dan Li, R. (2014): Effective removal of Mg²⁺ and Ca²⁺ ions by mesoporous LTA zeolite, *Desalination*, 341, 10-18.
- [27] Chojnacki, K., Chojnacka, J., Hoffmann, H., dan Gorecki (2004): The application of natural zeolites for mercury removal: from laboratory tests to industrial scale, *Minerals Engineering*, 17, 933-937.
- [28] Wibowo, E., Rokhmat, M., Sutisna, Khairurrijal, dan Abdullaha, M. (2017): Reduction of seawater salinity by natural zeolite (Clinoptilolite): Adsorption isotherms, thermodynamics and kinetics, *Desalination*, 409, 146–156.
- [1] Korkuna, O., Leboda, R., Skubiszewska-Zieba, J., Vrublevs'ka, T., Gun'ko, V.M., dan Ryzkowski, J. (2006): Structural and physicochemical properties of natural zeolite: clinoptilolite and mordenite, *Microporous and Mesoporous Materials*, 87, 143-254.
- [2] Gashimov, A.M., dan Zakieva, I.G. (2016): Dielectric Parameters of Composites Based on Electric Discharge Processed Natural Zeolite, 1-4.