



Artikel Penelitian

Penerapan Metode Sonikasi terhadap Adsorpsi Fe(III) pada Zeolit Alam Teraktivasi

Zuri Rismiarti*, Yuyun Yuniati, Rokiy Alfanaar

Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ma Chung, Malang, Indonesia

INFO ARTIKEL

Sejarah artikel:

Revisi 26 September 2016

Diterima 8 November 2016

Tersedia online 12 November 2016

*Penulis korespondensi

Email: zuri.rismiarti@machung.ac.id

ABSTRAK

Iron(III) is widely used in the industries such as water treatment, sugarcane industry, concrete industry and coal mining. Industrial activity using Fe(III) has potential impact to environmental pollution problems due to some industries produced Fe waste that is one of the hazardous waste. Fe content excess might toxic effect to human health and the environment. Zeolite as adsorbent has been evaluated extensively for Fe and other heavy metals. Sonication method has been widely developed in polymer preparation. The method is more effective in operation time because the reaction rate increased and also more efficient on the usage of chemical reagents. However, these methods have not been applied in the adsorption process. The optimization of pH, the ratio of Fe(III) with activated zeolite, the influence sonication time and temperature has been assessed for Fe(III) adsorption with an activated zeolite by sonication method. The formation of Fe(III)-SCN complex assay was used for determination of Fe(III) adsorbed with using spectrophotometry method. The results showed a relatively short operation time (15 minutes), pH 4, T=30°C with the ratio of 1:50 (g/mL) for the activated zeolite and Fe(III).

Keywords: zeolite, iron, adsorption, sonication

Besi(III) banyak digunakan dalam industri pengolahan air, pabrik tebu, industri beton dan pertambangan batu bara. Aktivitas industri yang menggunakan Fe(III) berpotensi menimbulkan masalah pencemaran lingkungan karena menghasilkan limbah Fe. Limbah ini berbahaya karena kelebihan kadar Fe dalam tubuh dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pemanfaatan zeolit sebagai adsorben Fe dan logam berat lain telah dikembangkan secara luas. Metode sonikasi telah banyak digunakan dalam pengolahan polimer karena lebih efektif dalam waktu operasi karena meningkatkan laju reaksi dan efisien dalam penggunaan bahan kimia. Akan tetapi, metode tersebut belum diterapkan dalam proses adsorpsi. Oleh sebab itu, penelitian ini fokus pada optimasi pH, rasio Fe(III) dengan zeolit teraktivasi, pengaruh waktu sonikasi dan suhu adsorpsi Fe(III) dengan zeolit teraktivasi menggunakan metode sonikasi. Penentuan adsorpsi Fe(III) tersebut dilakukan dengan spektrofotometri melalui pembentukan kompleks Fe(III)-SCN. Hasil penelitian menunjukkan hasil optimum pada waktu yang relatif singkat (15 menit), pada pH 4, T=30°C dengan perbandingan 1:50 (g/mL) antara zeolit teraktivasi dan Fe(III).

Kata Kunci: zeolit, besi, adsorpsi, sonikasi

1. Pendahuluan

Besi (Fe) di alam terdapat dalam dua bentuk, yaitu Fe(II) dan Fe(III). Fe(III) banyak digunakan dalam industri, misalnya senyawa Fe(III) sulfat dimanfaatkan sebagai koagulan dalam proses penjernihan air, bahan aditif semen pada industri beton, untuk menurunkan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) limbah cair pabrik tebu yang mengandung pigmen cokelat gelap (melanoidin). Selain itu, Fe(III) digunakan sebagai oksidator dalam reduksi sulfur anorganik (pirit) batu bara (Aladin, Syarif, Wiyani, & Rasyid, 2010).

Limbah Fe merupakan salah satu jenis limbah berbahaya. Kadar Fe dalam tubuh yang berlebihan dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia seperti gangguan pada susunan syaraf, insomnia, kaki dan otot wajah. Selain itu, limbah ini dapat menyebabkan pembengkakan pada hati dan mengurangi kemampuan tubuh untuk menyerap zat tembaga. Dosis Fe yang besar dalam tubuh dapat merusak dinding usus yang sehingga dapat menyebabkan kematian. Kadar Fe yang lebih dari 1 mg/L akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit. Berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 113 tahun 2003 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi Usaha bahwa kandungan Fe total di dalam limbah cair dibatasi adalah 7 mg/L (ppm) (Kundari, Susanto, & Prihatiningsih, 2010).

Industri yang menggunakan Fe(III) sebagai bahan baku yang berpotensi menghasilkan limbah sehingga dapat menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, perlu dilakukan tindakan penanganan limbah. Ada beberapa metode pengolahan limbah dan salah satunya adsorpsi berupa penyerapan suatu senyawa (adsorbat) dengan senyawa penyerap (adsorben).

Zeolit merupakan mineral alam dengan kandungan dominan SiO_4 dan AlO_4 serta memiliki kemampuan dalam penukar ion, adsorpsi, katalis dan dehidrasi serta penyaring atau pemisah (Wang, & Peng, 2010). Pemanfaatan zeolit sebagai adsorben Fe telah dikembangkan secara luas (Oztas, Karabakan, & Topal, 2008; Kundari et al., 2010; Aladin et al., 2010; Munandar, Krisdiyanto, Khamidinal, & Artsanti, 2014). Kemampuan adsorpsinya dapat ditingkatkan melalui proses aktivasi. Proses

aktivasi secara fisika dilakukan dengan pemanasan (kalsinasi) hingga 450°C untuk menguapkan air yang terperangkap dalam pori-pori kristal zeolit sehingga jumlah pori dan luas permukaan spesifiknya bertambah. Aktivasi secara kimia dilakukan dengan HF 1%, HCl 6 M dan NH_4Cl 1 M yang dapat menghasilkan lebih banyak pori dan kristal zeolit tertata lebih rapi (Buchori & Budiyo, 2003; Lestari, 2010).

Teknik sonikasi merupakan penggunaan ultrasonik dengan frekuensi 20 KHz–10 MHz, dan telah berhasil digunakan dalam proses preparasi zeolit sintesis. Teknik ini dinilai lebih efektif dan efisien dalam preparasi zeolit sintesis karena memerlukan waktu yang relatif lebih singkat dan tidak banyak bahan kimia yang terbuang. Dari segi keamanan, metode ini tergolong aman karena menggunakan frekuensi yang tidak terlalu tinggi. Selain itu, pada reaksi yang menggunakan bahan padat, ultrasonik dapat memecah padatan dari energi yang ditimbulkan akibat pecahnya kavitas. Efeknya adalah memberikan komponen reaktan padat luas permukaan yang lebih besar untuk meningkatkan laju reaksi (Suslick, 1989; Purnama, Musthofa, Akhwan, & Dewi, 2014).

Metode spektrofotometri dalam penentuan Fe(III) dapat menggunakan reagen tiosianat (SCN^-) sebagai agen pengompleks. Senyawa kompleks tersebut adalah $\text{Fe}(\text{SCN})_6^{3-}$ yang berwarna merah jingga dan stabil dalam asam (HCl, HNO_3 dan H_2SO_4). Pengukuran kompleks tersebut pada panjang gelombang 480 nm (Rusmawan, Onggo, & Mulyani, 2011).

Berdasarkan studi literatur tersebut, maka penelitian ini menggunakan teknik sonikasi terhadap proses adsorpsi Fe(III) dengan zeolit yang telah teraktivasi dan difokuskan pada optimasi waktu kontak, rasio Fe(III) dengan zeolit, dan pengaruh pH, serta suhu. Penentuan Fe(III) yang teradsorpsi oleh zeolit dengan menggunakan metode spektrofotometri melalui pembentukan kompleks Fe(III)-SCN. Sonikasi diharapkan dapat menjadi metode alternatif yang efektif dan efisien dalam adsorpsi logam berat menggunakan zeolit teraktivasi.

2. Bahan dan metode

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pro analisis (p.a.) antara lain zeolit alam dari Sumbermanjing Wetan Kabupaten Malang. Bahan lain yang digunakan adalah FeCl_3 (E-Merck), KSCN (E-Merck), H_2SO_4 (E-Merck), HCl (E-Merck), HF (E-Merck), NH_4Cl , (E-Merck) dan akuades.

2.2. Preparasi zeolit

Zeolit ditumbuk halus menggunakan mortar kemudian diayak dengan ukuran 100 mesh. Selanjutnya dicuci dengan akuades dan dikeringkan dalam oven (Binder ED/BD) pada suhu 110°C selama 2 jam dan digunakan dalam percobaan selanjutnya

2.3. Aktivasi zeolit

Zeolit hasil preparasi sebesar 20 g direndam dalam 200 mL larutan HF 1% lalu diaduk dengan pengaduk elektrik selama 120 menit. Selanjutnya, campuran disaring dengan kertas saring Whatman No.40 dan dicuci dengan akuades hingga pH 7. Setelah itu, zeolit diaktivasi kembali dengan larutan HCl 6 M kemudian NH_4Cl 1 M dengan masing-masing perlakuan sama dengan aktivasi menggunakan larutan HF 1%. Kemudian, zeolit dipanaskan dalam tanur pada suhu 450°C selama 4 jam.

2.4. Optimasi pH

Zeolit hasil aktivasi ditimbang sebesar 0,1 g lalu dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Kemudian, ditambah 10 mL larutan Fe(III) 1000 ppm. Lalu, masing-masing larutan dikondisikan dengan pH media 2; 4; 7; 10; dan 13 menggunakan larutan HNO_3 dan NaOH . Selanjutnya, dilakukan adsorpsi dengan menggunakan sonikator (Mosinix, USA) selama 15 menit pada frekuensi 32 kHz. Campuran disaring dengan kertas saring Whatman No.40. Kemudian, filtrat diambil dan dimasukkan ke dalam labu ukur 10 mL dan ditambah dengan 1 mL SCN 1000 ppm, 1 mL HNO_3 1 M. Setelah itu, diencerkan dengan akuades hingga tanda batas dan dikondisikan larutan hingga pH 2.

Absorbansi Fe(III) diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Lab Tech) pada panjang gelombang 460 nm. pH optimum ditunjukkan dari konsentrasi optimum Fe(III)

yang teradsorpsi oleh zeolit dan hasil ini digunakan untuk perlakuan selanjutnya.

2.5. Penentuan rasio Fe(III) dan zeolit

Pengaruh rasio Fe(III) dan zeolit dilakukan dengan melakukan variasi volume (mL) Fe(III) 100 ppm dan massa zeolit sebesar 0,1 g dengan rasio 1:10; 1:30; 1:50; 1:70; 1:100 (g/mL) berdasarkan hasil dari optimasi pH (2.4).

2.6. Optimasi waktu sonikasi

Optimasi waktu sonikasi dilakukan dengan melakukan variasi waktu dari 0,5, 1, 5, 10, 15, dan 20 menit berdasarkan hasil dari optimasi pH (2.4) dan penentuan rasio Fe(III) -zeolit (2.5).

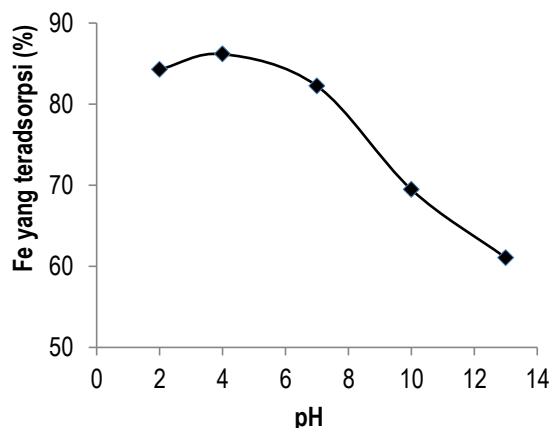
2.7. Pengaruh suhu

Pengaruh suhu dilakukan dengan memvariasi suhu dari 25, 30, 40, 50, dan 60°C berdasarkan hasil optimasi pH (2.4), penentuan rasio Fe(III) -zeolit (2.5) dan optimasi waktu sonikasi (2.6).

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Optimasi pH

Keberadaan spesi Fe(III) pada berbagai pH adalah Fe^{3+} pada $\text{pH} < 5$; Fe(OH)^{2+} pada $\text{pH} < 6$; Fe(OH)_2^+ pada $\text{pH} 2-9$ sedangkan endapan Fe(OH)_3 pada $\text{pH} > 8$ (Millero, 1998). Pengaruh pH terhadap adsorpsi Fe oleh zeolit ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 menunjukkan semakin besar pH (semakin basa) maka logam Fe(III) yang teradsorpsi semakin turun. Pada pH yang sangat asam (pH 2) maka semakin banyak ion hidrogen (H^+) dalam larutan. Aktivitas H^+ yang terdapat di dalam larutan uji dapat berpotensi menjadi pengganggu untuk adsorpsi Fe(III) oleh zeolit. Semakin banyak jumlah H^+ dalam larutan sampel maka akan berkompetensi dengan Fe(III) untuk teradsorpsi dalam pori-pori zeolit. Semakin kecil ukuran ion dan semakin banyak jumlah H^+ maka cenderung teradsorpsi oleh permukaan zeolit. Pada pH yang terlalu asam pH 2 daya serap Fe(III) oleh zeolit yang teraktivasi lebih rendah dibandingkan pH 4. Oleh karena itu, pH 4 diambil sebagai pH optimum dan digunakan untuk percobaan selanjutnya.



Gambar 1. Pengaruh pH terhadap Fe(III) yang teradsorpsi oleh zeolit teraktivasi.

Pada rentang pH 7-13 terjadi penurunan kemampuan adsorpsi. Kenaikan pH mengakibatkan bertambahnya ion OH^- dalam larutan analit yang dapat mengganggu mobilitas kation Fe(III) menuju permukaan zeolit. Selain itu, pada pH netral (pH 7), spesi Fe(III) hanya berada dalam bentuk $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ yang dapat terikat oleh zeolit akibat gaya elektrostatis tarik menarik yang sangat kuat antara bagian negatif dari permukaan adsorben zeolit (AlO_4^-) sehingga proses adsorpsi masih dapat terjadi.

Penurunan kemampuan adsorpsi terjadi sangat signifikan pada pH 10 dan 13. Hal ini dikarenakan pada pH sangat basa ($\text{pH} > 8$) terbentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dalam larutan analit. Akibatnya, spesi ion Fe(III) dominan berada dalam bentuk endapan hidroksida sehingga menghambat proses adsorpsi. Pada kondisi ini efisiensi penghilangan ion Fe(III) dalam bentuk kation sangat tinggi. Hal ini berhubungan dengan kemampuan pertukaran ion dalam bentuk Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ sangat rendah.

3.2. Penentuan rasio Fe(III) 100 ppm : zeolit aktivasi

Penentuan rasio Fe(III) 100 ppm dan zeolit disajikan pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan perbandingan Fe(III) 100 ppm dengan zeolit teraktivasi pada 10:1 hingga 50:1 (mL/g) terjadi penurunan sisa hasil Fe(III) yang telah teradsorpsi oleh zeolit sehingga terjadi peningkatan kemampuan adsorpsi. Adsorpsi ion Fe(III) merupakan akibat dari gaya elektrostatis tarik menarik yang sangat kuat antara bagian negatif dari permukaan adsorben zeolit dengan bagian positif dari kation Fe(III).

Semakin besar jumlah ion Fe(III) dalam larutan analit, maka semakin banyak ion Fe(III) yang berinteraksi dengan situs zeolit (AlO_4^-). Oleh sebab itu, dengan meningkatnya volume (mL) dalam larutan analit maka semakin banyak jumlah ion Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$. Akibatnya, ion-ion tersebut dapat mudah terikat dalam zeolit yang mempunyai situs AlO_4^- sehingga terjadi peningkatan kemampuan adsorpsi. Rasio Fe(III) 100 ppm dengan zeolit teraktivasi 50:1 (mL/g) merupakan komposisi optimum dan digunakan sebagai acuan pada percobaan selanjutnya.

Tabel 1.

Penentuan rasio Fe(III) 100 ppm : zeolit aktivasi

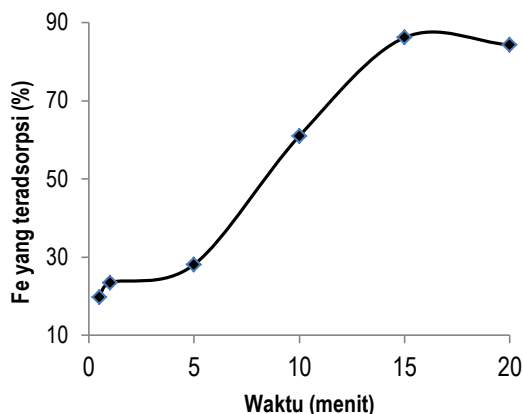
Rasio Fe(III) 100 ppm : zeolit aktivasi (mL/g)	Fe setimbang (ppm)	Fe yang teradsorpsi zeolit (%)
10	19,84	80,16
30	14,13	85,87
50	13,83	86,17
70	20,80	79,20
100	33,56	66,44

Pada rasio 70:1 hingga 100:1 antara Fe(III) 100 ppm dengan zeolit teraktivasi terjadi penurunan kemampuan adsorpsi Fe(III) (Tabel 1). Hal ini dikarenakan jumlah zeolit sebagai situs aktif adsorben sangat sedikit (situs AlO_4^-) dibandingkan ion Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ yang sangat banyak dalam larutan analit. Jumlah maksimum ion Fe(III) yang ditranspor dapat ditentukan oleh jumlah muatan (AlO_4^-) dalam zeolit. Dengan demikian, semakin banyak komponen zeolit maka semakin banyak situs AlO_4^- yang tersedia untuk mengikat ion Fe(III) sehingga dapat terserap ke dalam zeolit.

3.3. Optimasi waktu sonikasi

Penentuan waktu sonikasi disajikan pada Gambar 2 yang menunjukkan bahwa semakin lama waktu adsorpsi maka semakin banyak Fe(III) yang teradsorpsi oleh zeolit hingga menit ke-15 dan mengalami penurunan pada menit ke-20. Pada menit ke-0,5 hingga menit ke-15 mengindikasikan kemampuan adsorpsi Fe(III) oleh zeolit semakin meningkat sebanding dengan bertambahnya waktu sonikasi. Waktu adsorpsi yang terlalu singkat dapat diduga

bahwa ion Fe(III) yang masuk untuk berasosiasi dengan situs AlO_4^- pada zeolit masih sedikit sehingga mempengaruhi kemampuan adsorpsi dan pertukaran kationnya. Waktu kesetimbangan pada penelitian ini adalah 15 menit yang ditunjukkan dari nilai Fe(III) yang terserap sebesar 86,17%.



Gambar 2. Optimasi waktu kontak adsorpsi

Medan ultrasonik akan menghasilkan efek kimia dan fisika yang diakibatkan oleh meledaknya gelembung kavitas mikro yang disebabkan getaran ultrasonik sehingga efek tersebut berdampak pada terjadinya proses sonokimia. Proses ini berdampak pada kinetika kimia. Ultrasonik dapat meningkatkan kereaktifan kimia pada suatu sistem yang secara efektif bertindak sebagai katalis untuk lebih mereaktifkan atom-atom dan molekul dalam sistem. Oleh sebab itu, terjadi peningkatan Fe(III) yang teradsorpsi dengan bertambahnya waktu sonikasi.

Pada menit ke-20, kemampuan adsorpsi sudah mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan dengan bertambahnya waktu adsorpsi, laju transfer massa semakin kecil dan akhirnya konstan (Emelda, Putri, & Ginting, 2013). Fenomena tersebut menjelaskan bahwa kemampuan zeolit dalam menyerap ion Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ semakin menurun hingga pada waktu tertentu zeolit tidak dapat menyerap ion tersebut yang ditunjukkan dari penurunan persentase Fe yang terserap oleh zeolit teraktivasi. Hal ini disebabkan oleh sisi aktif zeolit teraktivasi sudah terisi oleh ion Fe(III) hingga kemampuan zeolit sebagai adsorben telah jenuh dan tidak mampu lagi menyerap Fe(III).

3.4. Pengaruh suhu

Pengaruh suhu adsorpsi ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, kenaikan suhu akan menurunkan kemampuan adsorpsi ion Fe(III) terhadap zeolit. Proses aktivasi secara fisika dengan kalsinasi pada suhu 450°C dan aktivasi secara kimia dengan penambahan HF 1%, HCl 6 M dan NH_4Cl 1 M dapat menghasilkan lebih banyak pori dan kristal zeolit tertata lebih rapi (Buchori & Budiyo, 2003; Lestari, 2010). Akibatnya, ketika pemanasan hingga 60°C , zeolit tidak akan mengalami degradasi termal. Hal ini karena zeolit memiliki ketahanan terhadap suhu atau memiliki stabilitas termal yang tinggi.

Tabel 2.

Optimasi suhu adsorpsi

Suhu ($^\circ\text{C}$)	Fe setimbang (ppm)	Fe yang teradsorpsi zeolit (%)
25	13,83	86,17
30	13,78	86,22
40	14,08	85,92
50	15,90	84,10
60	17,86	82,14

Pada suhu $25\text{-}30^\circ\text{C}$ terlihat bahwa terjadi peningkatan kemampuan adsorpsi Fe(III) yang tidak terlalu signifikan atau bahkan hampir konstan. Hal ini dapat dijelaskan bahwa kenaikan suhu dapat memutuskan interaksi antara pelarut-terlarut yaitu ikatan van der Waals, ikatan hidrogen dan interaksi dipol sehingga difusi ion-ion Fe(III) dalam larutan analit lebih cepat (Ali et al., 2014). Dengan peningkatan suhu larutan analit maka mobilitas ion-ion Fe(III) juga semakin meningkat karena ion-ion dalam larutan menyerap energi panas. Oleh sebab itu, suhu adsorpsi optimum adalah pada $25\text{-}30^\circ\text{C}$.

Pada suhu $40\text{-}60^\circ\text{C}$ terjadi penurunan daya serap adsorpsi Fe(III) oleh zeolit. Hal ini disebabkan oleh sifat adsorpsi eksotermis (penurunan ΔG dan ΔH) oleh ion Fe(III) ke dalam zeolit sehingga jumlah ion Fe(III) yang terserap pada kondisi setimbang semakin sedikit dengan meningkatnya suhu (Emelda et al., 2013). Selain itu, dorongan penyerapan antara situs aktif zeolit dengan ion logam Fe(III) semakin melemah akibat adsorpsi berlangsung secara eksotermis. Selain itu, pada suhu tinggi

juga dimungkinkan terjadi desorpsi, yaitu pelepasan kembali ion Fe(III) yang sudah terikat pada situs aktif zeolit (AlO_4^-). Akibatnya, kemampuan adsorpsi Fe(III) oleh zeolit mengalami penurunan.

Faktor lain yang mempengaruhi adalah terbentuknya kavitasasi penguapan yang merupakan peleburan antara gelembung akustik dengan gelembung dari uap sehingga terjadi penurunan efek efisiensi ultrasonik (Ali, 2014). Disamping itu, peningkatan suhu akan meningkatkan molekul bebas air. Akibatnya, proses mobilitas dan transpor ion Fe(III) menuju adsorben zeolit terhambat oleh adanya molekul air bebas tersebut.

4. Kesimpulan

Sonikasi dapat menjadi metode alternatif dalam proses adsorpsi Fe(III) dengan zeolit yang telah teraktivasi dengan waktu yang relatif singkat (15 menit), pada pH 4, $T=30^\circ\text{C}$ dengan perbandingan 1:50 (g/mL) antara zeolit teraktivasi dan Fe(III). Teknik ini diharapkan juga dapat diaplikasikan pada adsorpsi logam berat lain.

5. Ucapan terima kasih

Terima kasih ditujukan kepada Universitas Ma Chung atas dukungan dana penelitian melalui program Penelitian Dosen Pemula.

6. Daftar pustaka

- Aladin, A., Syarif, T., Wiyani, L., & Rasyid, R. (2010). Pengolahan serbuk limbah besi menjadi besi(III): tinjauan kinetika model *quasi steady state*. *Reaktor*, 13(2), 74-80.
- Ali, F., Reinert, L., Leveque, J.M., Duclaux, L., Muller, F., Saeed, S., & Shah, S.S. (2014). Effect of sonication conditions: solvent, time, temperature and reactor type on the preparation of micron sized vermiculite particles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 1002-1009.
- Buchori, L., & Budiyo. (2003). Aktivasi zeolit dengan menggunakan perlakuan asam dan kalsinasi. *Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia*. Yogyakarta.
- Emelda, L., Putri, S.M., & Ginting, S. (2013). Pemanfaatan zeolit alam teraktivasi untuk adsorpsi logam krom (Cr^{3+}). *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, 9(4), 166-172.
- Kundari, N.A., Susanto, A., & Prihatiningsih, M.C. (2010). Adsorpsi Fe dan Mn dalam limbah cair dengan zeolit alam. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*, (pp. 705-710). Yogyakarta.
- Lestari, D. Y. (2010). Kajian modifikasi dan karakterisasi zeolit alam dari berbagai negara. *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Millero, F. J. (1998). Solubility of Fe(III) in seawater. *Earth and Planetary Science Letters*, 154(1-4), 323-329.
- Munandar, A., Krisdiyanto, D., Khamidinal, & Artsanti, P. (2014). Adsorpsi logam Pb dan Fe dengan zeolit alam teraktivasi asam sulfat. *Seminar Nasional dan Pendidikan Kimia VI* (pp. 138-146). Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Oztas, N.A., Karabakan, A., & Topal, O. (2008). Removal of Fe(III) ion from aqueous solution by adsorption raw and treated clinoptilolite samples. *Microporous and Mesoporous Materials*, 111(1-3), 200-205.
- Purnama, H., Musthofa, M., Akhwan, A.H., & Dewi, I.K. (2014). Effect of ultrasound on zeolite preparation from rice husk ash. *Proceedings of the 3rd Applied Science for Technology Innovation, ASTECHNOVA*, (pp. 24-30). Yogyakarta.
- Rusmawan, C.A., Onggo, D., & Mulyani, I. (2011). Analisis kolorimetri kadar besi(III) dalam sampel air sumur dengan metoda pencitraan digital. *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains*. Bandung.
- Suslick, K. S. (1989). *The chemical effects of ultrasound*. Encyclopedia Britannica.
- Wang, S., & Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11-24.