

## KEHILANGAN H<sub>2</sub>O SELAMA REAKSI PELINDIAN MINERAL ZIRCON DENGAN NaOH DI DALAM FURNACE

### LOSS OF H<sub>2</sub>O DURING THE LEACHING REACTION OF ZIRCON MINERALS WITH NaOH IN FURNACE

Triyono, Muzakky

PSTA - BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

E-mail: triyono793@gmail.com

Diterima 19 September 2018, diterima dalam bentuk perbaikan 21 Pebruari 2019, disetujui 4 April 2019

#### ABSTRAK

**KEHILANGAN H<sub>2</sub>O SELAMA REAKSI PELINDIAN MINERAL ZIRCON DENGAN NaOH DI DALAM FURNACE.** Telah dilakukan prediksi jumlah kehilangan H<sub>2</sub>O selama proses peleburan mineral zircon dengan NaOH di dalam furnace. Proses awal pemurnian zirkonium dimulai dari pelindian mineral zircon dengan NaOH. Selama proses peleburan akan dikeluarkan H<sub>2</sub>O yang diperkirakan akan membawa Rn-222 dan Rn-220 yang berbahaya bagi pekerja radiasi. Maka tujuan dari penelitian ini adalah melakukan prediksi jumlah kehilangan H<sub>2</sub>O pada reaksi pelindian mineral zircon dengan NaOH di dalam furnace dan keluar ke udara. Kehilangan H<sub>2</sub>O dihitung berdasarkan mol sebelum reaksi peleburan dikurangi dengan sesudah reaksi peleburan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dan lama waktu kontak, kehilangan mole H<sub>2</sub>O akan semakin besar. Besarnya kehilangan mole H<sub>2</sub>O akan dipengaruhi oleh mole rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH. Kecuali pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4), mol kehilangan H<sub>2</sub>O berharga sama dengan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2). Kehilangan mol H<sub>2</sub>O dicapai pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:8), pada temperatur 950 °C dan waktu kontak 60 menit sebesar 0,024 mole/gr. Pada kondisi tersebut sisa fase kristal ZrSiO<sub>4</sub> tidak terbentuk, tetapi sampel mengandung sisa NaOH yang tidak bereaksi dan bersifat pasta.

**Kata kunci :** mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH, mineral zircon, peleburan

#### ABSTRACT

**LOSS OF H<sub>2</sub>O DURING THE LEACHING REACTION OF ZIRCON MINERALS WITH NaOH IN FURNACE.** It has been predicted the amount of H<sub>2</sub>O loss during the leaching reaction of zircon mineral with NaOH in the furnace. The initial process of zirconium purification begins with the leaching of zirconium minerals with NaOH. During the leaching process, H<sub>2</sub>O is released which is expected to carry over Rn-222 and Rn-220 which are harmful to the radiation workers. So the objective of this investigation is to predict the amount of H<sub>2</sub>O loss in zircon mineral reactions with NaOH in the furnace and exit to the air. Loss ratio of H<sub>2</sub>O was calculated based on the mole before the reaction minus by the mole after the reaction. The results show that the increased both temperature and contact time, will be increased of loss moles ratio of H<sub>2</sub>O. The amount of H<sub>2</sub>O mole loss will be affected by the mole ratio of ZrSiO<sub>4</sub> / NaOH. Except for the mole ratio ZrSiO<sub>4</sub> / NaOH (1:4), losses of H<sub>2</sub>O mole value was the same as the mole ratio of ZrSiO<sub>4</sub> / NaOH (1:2). Loss ratio of H<sub>2</sub>O mole achieved in the mole ratio of ZrSiO<sub>4</sub> / NaOH (1:8), at 950 °C and 60 minutes contact time was 0.024 mole/g. Under those conditions the remaining phase of the ZrSiO<sub>4</sub> crystal was not formed, but the sample contains the residue of unreacted NaOH and paste-containing NaOH.

**Key words:** mole ratio ZrSiO<sub>4</sub> / NaOH, zircon minerals, roasting

#### PENDAHULUAN

Pada umumnya di dalam mineral zircon (ZrSiO<sub>4</sub>) terkandung beberapa unsur berharga lain seperti titanium dalam mineral ilmenit (FeTiO<sub>3</sub>), logam tanah jarang (LTJ) seperti (La, Ce, Nd, Pr, Sm, Y, Dy, Tb, Gd) dalam mineral monasit dan senotim yang mengandung naturally occurring radioactive materials (NORM) seperti U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> dan ThO<sub>2</sub>. Kebanyakan di dalam mineral zircon berasosiasi dengan mineral monasit yang merupakan mineral radioaktif. Dengan demikian mineral zircon dari Tumbang Titi Kalimantan Barat mengandung NORM sekitar 1587

g/g [1,2]. Walaupun begitu penelitian oleh Coble [3], Boehnke [4], Danisik [5] kandungan U+Th dalam zirkon berguna untuk melacak keberadaan deposit mineral zirkon serta umur dari mineral zirkon ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Mineral tersebut merupakan sumber utama senyawa zirkonium untuk industri nuklir maupun nonnuklir. Industri tersebut menggunakan senyawa zirkonium seperti zirkonium sulfat, zirkonium basic sulfat, zirkonium aksiklorid, zirkonium tetrahalida, zirkonium oksida yang semua itu merupakan bahan dasar pembuatan keramik, kimia, elektronik, militer dan industri lain [6,7]. Dalam industri nuklir zirkonium dengan kandungan Hafnium  $< 100 \mu\text{g/gr}$  yang berderajat nuklir, dipakai sebagai kelongsong bahan bakar uranium [7]. Secara alami kandungan U+Th di dalam mineral zirkon masing-masing akan meluruh menjadi anak luruhnya. Salah satu anak luruh U-238 adalah Rn-222 sedangkan Th-232 berupa Rn-220, dan masing-masing isotop tersebut berbentuk gas [8]. Walaupun berumur paruh pendek, dengan bentuk gas Rn-222 dan Rn-220 sangat mudah larut di dalam  $\text{H}_2\text{O}$  [9-11]. Berdasarkan Gevantman [12] kelarutan Rn-222 di dalam  $\text{H}_2\text{O}$  mencapai  $1,288 \times 10^{-4}$  mole/l, sementara Vogeltanz [13] telah meneliti penyakit kanker paru yang diakibatkan terpapar oleh radon.

Dalam industri pemurnian mineral zirkon sebagai bahan baku industri tersebut, harus melalui perlakuan kimia dengan kaustik soda terlebih dulu sebelum dimanfaatkan yang reaksinya [6,7,14,15]



Aplikasi pada reaksi 1 tersebut dilakukan di dalam *furnace* pada suhu  $600^\circ\text{C}$  [15,16] atau  $700^\circ\text{C}$  [17] akan dihasilkan  $\text{H}_2\text{O}$  yang menjadi uap dan sebagai *carrier* gas radon ke udara [8]. Berdasarkan data kelarutan gas radon ke dalam  $\text{H}_2\text{O}$  yang terlepas dari mineral zirkon [12], serta dampaknya terkena kanker paru bagi pekerja radiasi menarik untuk diteliti [13]. Proses pelepasan radon ke udara diperkirakan lewat pemanasan selama proses pengolahan alkali di dalam *furnace* [15]. Maka untuk keperluan proteksi radiasi diperlukan data berapa banyak  $\text{H}_2\text{O}$  yang hilang selama proses reaksi tersebut berlangsung [14]. Maka tujuan dari penelitian ini adalah melakukan prediksi kehilangan  $\text{H}_2\text{O}$  pada reaksi pelindian mineral zirkon dengan NaOH di dalam *furnace* dan keluar ke udara ruangan. Guna merealisasikan tujuan tersebut akan didahului kelayakan alat dengan melakukan kalibrasi kinerja *furnace* yang digunakan. Untuk merealisasikan tujuan tersebut dilakukan beberapa variasi seperti perbandingan molar  $\text{ZrSiO}_4/\text{NaOH}$ , waktu kontak dan variasi temperatur. Penelitian ini diharapkan akan melengkapi data pemurnian mineral zirkon menjadi produk industri yang komersial dan aman bagi pekerja radiasi.

## METODOLOGI

### Bahan

Mineral zirkon dari daerah Tumbang Titi Kalimantan Barat ukuran 100 mesh dan NaOH buatan E Merck

### Alat

*Furnace* buatan Nabertherm HT 04/17 dan cawan porselin kapasitas 300 gr.

### Metode penelitian

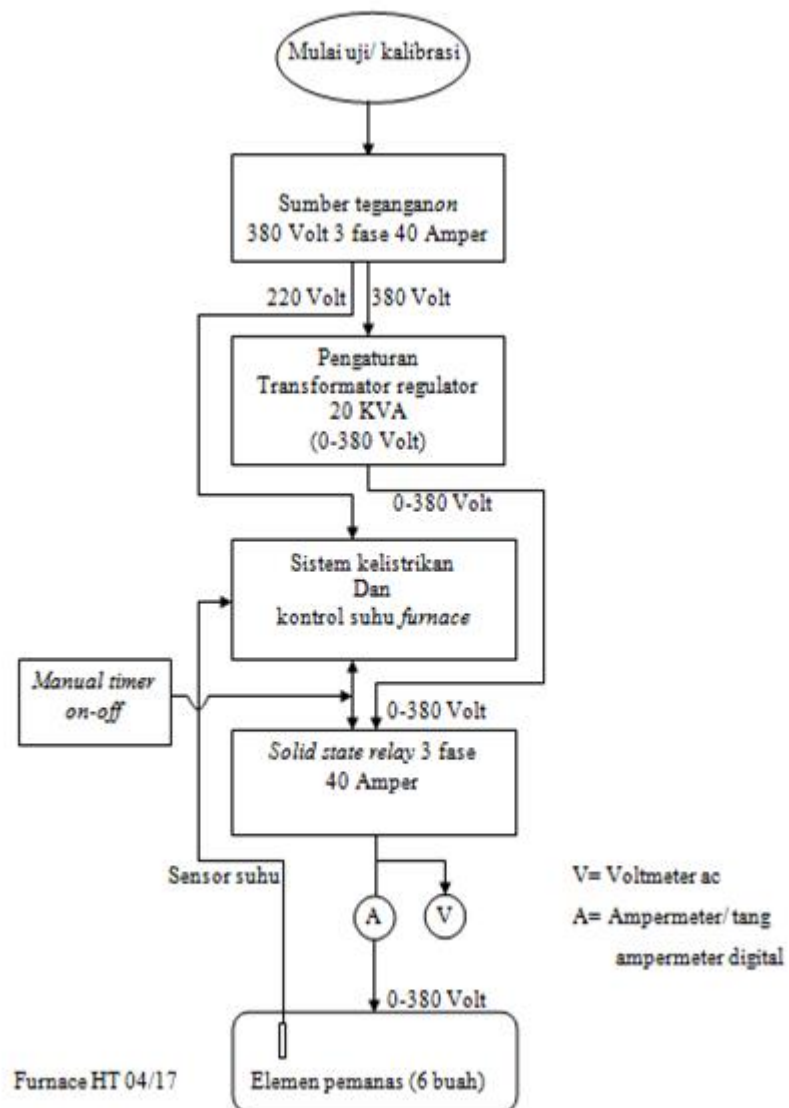
Dicampur antara mineral zirkon dengan NaOH ke dalam cawan porselin sedemikian rupa sehingga mempunyai perbandingan molar 1: 2. Dimasukan cawan ke dalam *furnace* suhu tinggi dan dipanaskan hingga temperatur  $600^\circ\text{C}$  selama 15 menit. Selanjutnya didinginkan dan ditimbang hingga berat tetap. Pekerjaan selanjutnya diulangi lagi dengan langkah berikut (1) perbandingan molar 1: 4, 1:6 dan 1:8 (2) variasi temperatur  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  dan  $900^\circ\text{C}$ , (3) waktu kontak 30 menit, 45 menit dan 60 menit. Selanjutnya masing-masing dilakukan pendinginan pada suhu kamar dan ditimbang hingga berat tetap. Kehilangan  $\text{H}_2\text{O}$  selama reaksi pelindian mineral zirkon dengan NaOH dihitung sebagai berikut:

$$\text{H}_2\text{O hilang} = \text{jumlah mole sebelum reaksi } (\text{ZrSiO}_4 + \text{NaOH}) - \text{jumlah mole setelah reaksi} \quad (2)$$

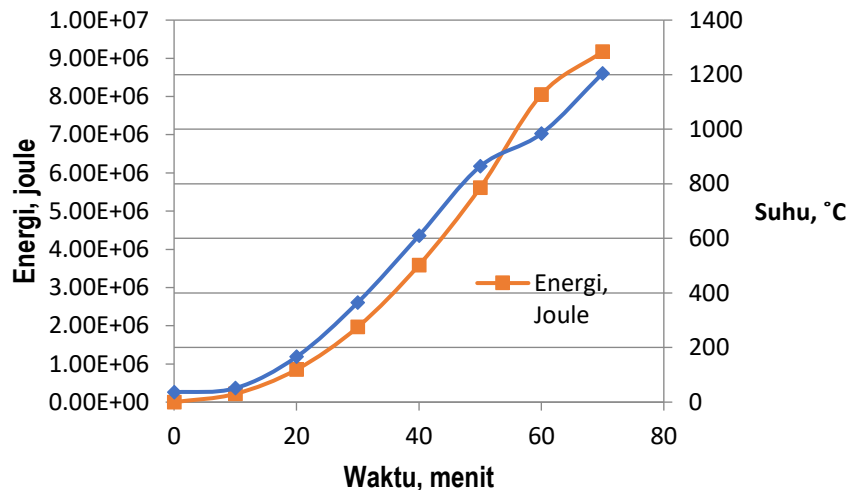
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kinerja Furnace *Nabertherm* HT 04/ 17

Penentuan kinerja alat dengan melakukan kalibrasi furnace dengan bagan alir sebagai berikut:



**Gambar 1.** Flow diagram kalibrasi/uji fungsi furnace *Nabertherm* HT 04/ 17.

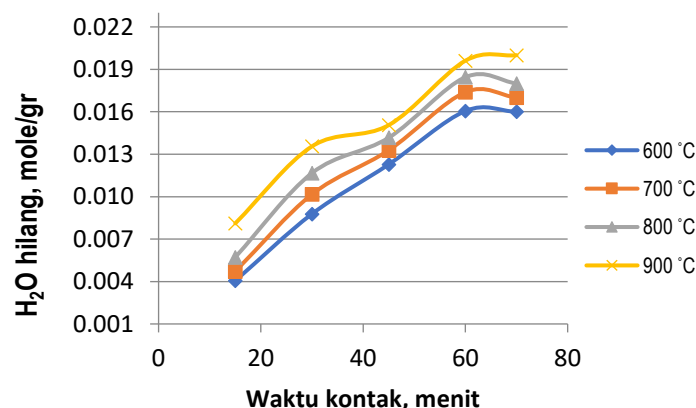


**Gambar 2.** Keluaran hasil kinerja furnace Nabertherm HT 04/ 17.

Dari Gambar 2, merupakan respon keluaran furnace dengan berdimensi volume ruang  $21 \times 21 \times 15,5$  cm. Pada Gambar 2 tampak bahwa kalibrasi suhu tertinggi dilakukan pada suhu  $1205^{\circ}\text{C}$ , yang dicapai pada waktu operasi selama 70 menit. Sebagai perbandingan dengan alat lain, Aminhar [18] telah melakukan kalibrasi muffle furnace sebagai fungsi waktu operasi dan temperatur. Ternyata untuk mencapai suhu  $1000^{\circ}\text{C}$  furnace Nabertherm HT 04/17 membutuhkan waktu 60 menit, sementara muffle furnace 90 menit. Perbedaan ini kemungkinan karena dimensi ruang furnace yang berbeda, maupun faktor umur heating element yang berbeda. Pada Gambar 2 tersebut ternyata dengan dimensi ruang furnace  $21 \times 21 \times 15,5$  cm pada suhu  $800^{\circ}\text{C}$ , menghasilkan energi panas sebesar  $5.61 \times 10^6$  joule. Pada keadaan energi panas tersebut mineral  $\text{ZrSiO}_4$  telah rapuh/labil secara struktur dan mudah tertreatment seperti NaOH [19]

#### Kehilangan $\text{H}_2\text{O}$ selama reaksi pelindian

Berdasarkan Biswas [14] dan Liu [6], bahwa perbandingan molar rasio  $\text{ZrSiO}_4/\text{NaOH}$  akan mempengaruhi kontrol pembentukan struktur senyawa zirkonium zirkonat yang terjadi selama reaksi. Demikian pula Abdel-Rehim [20] bahwa temperatur dan waktu kontak akan mempercepat terhadap reaksi pembentukan senyawa zirkonium zirkonat yang reaksi (1). Sementara Lubbe [16] merubah perbandingan mole  $\text{ZrSiO}_4/\text{NaOH}$  (1:6), sehingga dikeluarkan produk  $\text{H}_2\text{O}$  yang menguap dan keluar ke udara bebas dan membawa gas radon yang beracun [8]. Pada Gambar 3 berikut dapat disajikan hasil prediksi kehilangan  $\text{H}_2\text{O}$  melalui hubungan antara waktu kontak dengan kehilangan  $\text{H}_2\text{O}$  di setiap perubahan temperatur pada perbandingan mole rasio  $\text{ZrSiO}_4/\text{NaOH}$  (1:2).



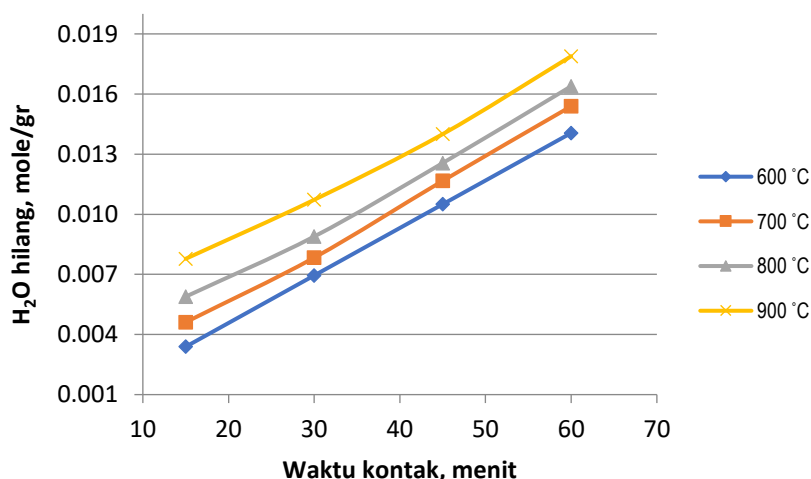
**Gambar 3.** Perbandingan mole rasio  $\text{ZrSiO}_4/\text{NaOH}$  (1:2) pada peleburan zirkon.

Pada Gambar 3 dapat diperlihatkan bahwa semakin tinggi temperatur dan lama waktu kontak, kehilangan mole H<sub>2</sub>O akan semakin besar. Pada Gambar 3 bahwa kehilangan H<sub>2</sub>O tertinggi dicapai pada suhu 900 °C pada waktu kontak 60 menit dengan 0,020 mol/gr. Berdasar pengamatan hasil pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2) akan menghasilkan produk yang berbentuk padat yang sangat sulit larut padaproses pelindian air. Berdasarkan Lubbe [16,14], reaksi pelindian dengan mole rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2) masih didominasi oleh Na<sub>2</sub>ZrSiO<sub>5</sub> yang sulit larut dalam air dan tidak bisa digunakan pada proses berikutnya yang reaksinya,



Pada persamaan reaksi (3) di atas dengan sendirinya masih mengandung ZrSiO<sub>4</sub> dan NaOH yang tidak bereaksi dan hanya kehilangan H<sub>2</sub>O yang menguap [15]. Ternyata pada mole rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2) prediksi kehilangan H<sub>2</sub>O paling tinggi pada waktu kontak 60 menit dengan suhu 900 °C sebesar 0,02 mole/gr.

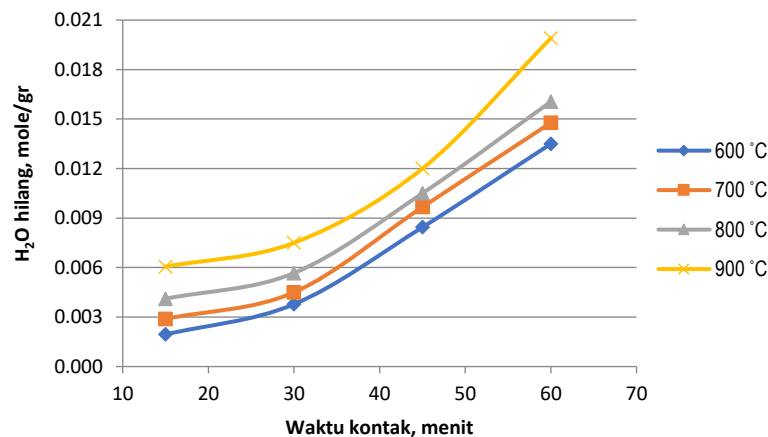
Selanjutnya proses peleburan dinaikkan dengan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4), dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4. Ternyata pada Gambar 4, dapat ditampilkan bahwa semakin lama waktu kontak dan semakin tinggi temperatur tampak kehilangan H<sub>2</sub>O akan semakin tinggi. Fenomena ini sesuai dengan penelitian Biswas [14], yang menyatakan bahwa semakin lama waktu kontak dan tingginya temperatur pembentukan Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> semakin tinggi



**Gambar 4.** Perbandingan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4) pada peleburan zirkon.

Pada Gambar 4 diperlihatkan bahwa mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4) diperlihatkan bahwa kehilangan H<sub>2</sub>O tertinggi dicapai pada waktu kontak 60 menit dengan temperatur 900 °C sebesar 0,018 mol/gr. Jumlah kehilangan H<sub>2</sub>O tersebut ternyata masih lebih rendah dari pelindian dengan perbandingan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2). Hal ini karena jumlah molkul oksigen reaktan dipakai untuk pembentukan produk Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang dapat dilihat pada persamaan reaksi (1). Dari perbandingan dengan persamaan reaksi (3) terlihat bahwa walupun jumlah mol NaOH lebih tinggi dari reaksi (1), tetapi jumlah molkul oksigen dipakai untuk membentuk produk Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Berdasarkan Lubbe [16] meskipun reaksi (1) diatas tampak stokiometri, tetapi menghasilkan produk padat (Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dan keras. Dengan demikian persamaan reaksi (1) masih menyisakan ZrSiO<sub>4</sub> yang tidak bereaksi dengan NaOH, akibatnya jumlah kehilangan H<sub>2</sub>O menjadi lebih kecil dibandingkan dengan reaksi (3). Selanjutnya pada pelindian pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:6) dapat diperlihatkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5, dapat diperlihatkan fenomena lamanya waktu kontak dan tingginya temperatur akan meningkatkan mol kehilangan H<sub>2</sub>O. Pada Gambar (5) terlihat bahwa pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:6) kehilangan H<sub>2</sub>O tertinggi dicapai pada waktu kontak 60 menit dengan temperatur 900 °C sebesar 0,020 mol/gr. Ternyata hal ini telah terjadi peningkatan mol kehilangan H<sub>2</sub>O dibandingkan dengan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4), tetapi berharga sama dengan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2).



**Gambar 5.** Perbandingan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:6) pada peleburan zirkon

Fenomena kenaikan mol kehilangan H<sub>2</sub>O dapat dilihat pada persamaan reaksi berikut [14,21]



Pada persamaan reaksi (4) tersebut walaupun jumlah mol NaOH besar, tetapi kenaikan mol kehilangan H<sub>2</sub>O tidak begitu meningkat. Hal ini karena kebutuhan membentuk produk Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> akan membutuhkan lebih banyak NaOH. Pada suasana temperatur tinggi (>600 °C) senyawaan produk Na<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> tersebut ini sangat dibutuhkan untuk bereaksi dengan ZrSiO<sub>4</sub> yang tidak bereaksi selama proses pelindian yang reaksinya [21]

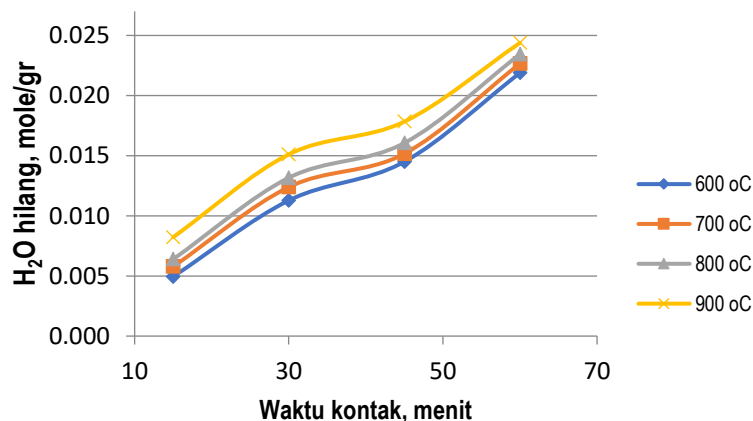


Berdasarkan Liu [6], persamaan reaksi no (5) tersebut tidak mudah terjadi bila mineral ZrSiO<sub>4</sub> yang digunakan berukuran besar, sehingga untuk memperoleh produk Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> yang besar sebaiknya partikel mineral tersebut berukuran kecil. Partikel berukuran besar mempunyai energi aktivasi yang lebih tinggi, sehingga kontrol pembentukan senyawa Na<sub>2</sub>ZrSiO<sub>5</sub> biasanya dikontrol dengan ukuran partikel yang optimal.

Selanjutnya bila mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH dinaikan menjadi (1:8), dengan persamaan reaksi sebagai berikut [14],



Pada Gambar 6, terlihat bahwa mol kehilangan H<sub>2</sub>O pada waktu kontak 60 menit dengan temperatur 900 °C akan meningkat dibandingkan pada ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4), yaitu sebesar 0,024 mol/gr.



**Gambar 6.** Perbandingan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:8) pada pelindian zirkon

Berdasar Biswas [14] kenaikan mol H<sub>2</sub>O yang hilang tersebut karena sumbangan dari reaktan NaOH yang tidak bereaksi. Hal ini terlihat dengan keadaan struktur produk yang lembab pada hasil pelindian setelah bersentuhan dengan udara pada suhu kamar. Sementara masa leburan yang konstan pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:8), kemungkinan reaksi peleburan mineral ZrSiO<sub>4</sub> dengan NaOH telah selesai dan meninggalkan sisa NaOH.

Hal ini ternyata sesuai dengan penelitian Liu [6], bahwa pada suasana ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:8), temperatur 950 °C, fase kristal yang terbentuk di dominasi oleh Na<sub>2</sub>ZrO<sub>3</sub> dengan tidak dipengaruhi oleh ukuran partikel. Dengan kondisi peleburan tersebut dapat dikatakan bahwa fase kristal ZrSiO<sub>4</sub> dan Na<sub>2</sub>ZrSiO<sub>5</sub> tidak terbentuk.

## KESIMPULAN

Dengan didahului kinerja *furnace Nabertherm HT 04/ 17*, ternyata semakin tinggi temperatur dan lama waktu kontak, kehilangan mol H<sub>2</sub>O akan semakin besar. Fenomena ini terjadi di setiap mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH, dan besarnya kehilangan mol H<sub>2</sub>O akan dipengaruhi oleh stokiometri pelindian atau mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH. Kecuali pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:4), mol kehilangan H<sub>2</sub>O berharga sama dengan mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:2). Kehilangan mol H<sub>2</sub>O dicapai pada mol rasio ZrSiO<sub>4</sub>/NaOH (1:8), pada temperature 950 °C dan waktu kontak 60 menit sebesar 0,024 mol/gr. Pada kondisi tersebut sisa fase kristal ZrSiO<sub>4</sub> tidak terbentuk, tetapi sampel mengandung sisa NaOH yang tidak bereaksi dan bersifat pasta.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya pembuatan makalah ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Ir. Puradwi I.W, DEA, Suyanti, S.ST dan Ir. Herry Poernomo, MT. Masing-masing sebagai Plt. Kapus PSTA-Batan, Kabid BTP/pembimbing dan Kapok TPZ/pembimbing yang banyak membantu hingga selesainya makalah dengan pendanaan melalui DIPA 2017. Penulis juga sangat berterimakasih kepada saudara Fuad Hanif yang telah banyak membantu di laboratorium.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. H. Poernomo, 'Prospek bisnis pengolahan pasir zircon lokal menjadi produk zirkonium dan oksida logam tanah jarang bebas radioaktif badan tenaga nuklir nasional', 2014.
- [2]. M. M. Zaman *et al.*, 'Presence of uranium and thorium in zircon assemblages separated from beach sands of Cox's Bazar, Bangladesh', *J. Sci. Technol. Environ. Informatics*, vol. 3, no. 1, pp. 161–169, 2016
- [3]. M. A. Coble, S. D. Burgess, and E. W. Klemetti, 'New zircon (U-Th)/He and U/Pb eruption age for the Rockland tephra, western USA', *Quat. Sci. Rev.*, vol. 172, pp. 109–117, 2017.
- [4]. P. Boehnke, M. Barboni, and E. A. Bell, 'Zircon U/Th model ages in the presence of melt heterogeneity', *Quat. Geochronol.*, vol. 34, pp. 69–74, 2016.
- [5]. M. Danišik, A. K. Schmitt, D. F. Stockli, O. M. Lovera, I. Dunkl, and N. J. Evans, 'Application of combined U-Th-disequilibrium/U-Pb and (U-Th)/He zircon dating to tephrochronology', *Quat. Geochronol.*, vol. 40, pp. 23–32, 2017.
- [6]. J. Liu, J. Song, T. Qi, C. Zhang, and J. Qu, 'Controlling the formation of Na<sub>2</sub>ZrSiO<sub>5</sub> in alkali fusion process for zirconium oxychloride production', *Adv. Powder Technol.*, vol. 27, no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [7]. E. Zolfonoun, A. B. Monji, M. Taghizadeh, and S. J. Ahmadi, 'Selective and direct sorption of zirconium from acidic leach liquor of zircon concentrate by rice bran', *Miner. Eng.*, vol. 23, no. 9, pp. 755–756, 2010.
- [8]. M. Abo-Elmagd, 'Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion – Evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile', *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 390–398, 2014.

- [9]. V. Moreno, J. Bach, M. Zarroca, L. Font, C. Roqué, and R. Linares, 'Characterization of radon levels in soil and groundwater in the North Maladeta Fault area (Central Pyrenees) and their effects on indoor radon concentration in a thermal spa', *J. Environ. Radioact.*, vol. 189, no. March, pp. 1–13, 2018.
- [10]. H. Keramati *et al.*, 'Radon 222 in drinking water resources of Iran: A systematic review, meta-analysis and probabilistic risk assessment (Monte Carlo simulation)', *Food Chem. Toxicol.*, vol. 115, no. January, pp. 460–469, 2018.
- [11]. Telahigue, B. Agoubi, F. Soudi, and A. Kharroubi, 'Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia', *J. Environ. Radioact.*, vol. 182, no. November 2017, pp. 74–84, 2018.
- [12]. L. H. Gevantman, 'Solubility of Selected Gases in Water', *CRC Handb. Chem. Phys.*, pp. 5–8, 2015.
- [13]. N. Vogeltanz-Holm and G. G. Schwartz, 'Radon and lung cancer: What does the public really know?', *J. Environ. Radioact.*, vol. 192, no. January, pp. 26–31, 2018.
- [14]. R. K. Biswas, M. A. Habib, A. K. Karmakar, and M. R. Islam, 'A novel method for processing of Bangladeshi zircon: Part I: Baking, and fusion with NaOH', *Hydrometallurgy*, vol. 103, no. 1–4, pp. 124–129, 2010.
- [15]. R. J. F. Da Silva, A. J. B. Dutra, and J. C. Afonso, 'Alkali fusion followed by a two-step leaching of a Brazilian zircon concentrate', *Hydrometallurgy*, vol. 117–118, pp. 93–100, 2012.
- [16]. S. Lubbe, R. Munsami, and D. Fourie, 'Beneficiation of zircon sand in South Africa', *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 112, no. 7, pp. 583–588, 2012.
- [17]. N. Van Tuyen, V. T. Quang, T. G. Huong, and V. H. Anh, 'Preparation of High Quality Zirconium', *VAEC-Anual Rep.*, vol. 7, no. 43, pp. 286–291, 2007.
- [18]. D. . Aminhar, 'Kalibrasi muffle furnace', *Urania*, vol. VI, no. 21–22, pp. 9–13, 2000.
- [19]. A. Kaiser, M. Lobert, and R. Telle, 'Thermal stability of zircon (ZrSiO<sub>4</sub>)', *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 28, no. 11, pp. 2199–2211, 2008.
- [20]. A. M. Abdel-Rehim, 'A new technique for extracting zirconium form Egyptian zircon concentrate', *Int. J. Miner. Process.*, vol. 76, no. 4, pp. 234–243, 2005.
- [21]. C. Yamagata, J. B. Andrade, V. Ussui, N. B. de Lima, and J. O. A. Paschoal, 'High Purity Zirconia and Silica Powders via Wet Process: Alkali Fusion of Zircon Sand', *Mater. Sci. Forum*, vol. 591–593, pp. 771–776, 2008.