

## Extraction of Zr in Gold Mine Tailings to Produce TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials) Free Zirconium Oxychloride Octahidrate (ZOC)

Erlin Purwita Sari<sup>✉</sup>, Sajima, Devi Swasti Prabasiwi, dan Herry Poernomo

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – Badan Teknologi Atom Nasional (BATAN)  
Jln. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

### Info Artikel

Diterima Juli 2021

Disetujui Agustus 2021

Dipublikasikan Agustus  
2021

#### Keywords:

zirkonium oksiklorida  
oktahidrat  
tailing tambang emas  
TENORM  
ZOC

### Abstrak

Tailing tambang emas menimbulkan permasalahan lingkungan jika dibuang tanpa pengolahan. Penelitian ini bertujuan untuk mengambil kandungan mineral berharga pada tailing tambang emas untuk disintesis menjadi ZOC (Zirconium Oxychloride Octahidrate). Penelitian diawali dengan proses fusi alkali menggunakan NaOH. Pelindian dengan air dilakukan pada leburan alkali dengan perbandingan massa padatan terhadap volume air yaitu 1:30. Padatan difiltrasi kemudian dikeringkan untuk digunakan sebagai umpan pada sintesis ZOC. Sejumlah ZOC direaksikan dengan HCl pada perbandingan massa padatan terhadap volume HCl yaitu 1:20, konsentrasi HCl 4N, dan temperatur 60 °C selama 1,5 jam. Pada larutan hasil reaksi dilakukan kristalisasi untuk memperoleh padatan ZOC tanpa melalui proses sentrifugasi. Reaksi ini dilakukan dengan metode sintesis ZOC 1 tahap tanpa melewati fase pembuatan zirkonium basis sulfat (ZBS). Kristal ZOC yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan spektrometer FTIR, XRD dan XRF untuk interpretasi senyawa produk. Hasil analisis dan interpretasi data menunjukkan bahwa produk hasil sintesis teridentifikasi sebagai zirkonium oksiklorida oktahidrat ( $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ). Senyawa  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  yang dihasilkan dari sintesis menunjukkan kandungan  $ThO_2$  dan  $U_3O_8$  0% atau dapat disebut bebas TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa % pemulihan Zr adalah sebesar 85,94%.

### Abstract

Gold mine tailings cause environmental problems if disposed of without previous processing. Nowadays, secondary resources recycling has become people's worldwide consideration because of the increasing awareness of the sustainable development urgency. This study aims to extract the valuable mineral content in gold mine tailings to produce ZOC. The research began with an alkaline fusion process using NaOH. The water leaching process was performed to the smelted alkaline with a ratio of solid mass to water volume at 1:30. The resulting solid was dried for further use in the synthesis of ZOC. Several ZOCs were reacted with HCl with a ratio of solid mass to HCl volume at 1:20, HCl 4N, and temperature of 60 °C for 1.5 hours. The solution then was crystallized to obtain ZOC solid without centrifugation process. This reaction was done using the 1-step ZOC synthesis method, overstepped zirconium base sulfate (ZBS) manufacturing phase. The ZOC crystals were analyzed using FT-IR, XRD, and XRF. The data indicated that the synthesized product was identified as zirconium oxychloride octahydrate ( $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ). The compound showed 0% of  $ThO_2$  and  $U_3O_8$  content or could be called TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) free. The calculation results showed that the % recovery of Zr was 85.94%.

© 2021 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:  
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN  
Jln. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281  
E-mail: [erlin.purwitasari@batan.go.id](mailto:erlin.purwitasari@batan.go.id)

## Pendahuluan

Pertambangan merupakan sektor industri yang sampai saat ini masih menjadi salah satu pilar ekonomi paling penting di Indonesia. Indonesia memiliki peranan penting dalam industri pertambangan global dengan produksi batu bara, tembaga, emas, timah, bauksit yang signifikan. Namun di sisi lain tidak dapat dipungkiri bahwa sektor pertambangan telah memberikan dampak terhadap pencemaran lingkungan (Okereafor, *et al.*, 2006). Hasil samping tambang atau sering disebut sebagai *tailing* tambang merupakan masalah utama dalam industri ini. Pembuangan *tailing* tambang tanpa melalui pengolahan yang sesuai serta memakan area lahan yang luas, memberi kontribusi pada terganggunya ekosistem. Limbah dalam bentuk cair maupun padat yang dihasilkan dari industri pertambangan mengakibatkan risiko lingkungan yang serius (Tchounwou *et al.*, 2014; Ali *et al.*, 2019). *Tailing* tambang emas pada umumnya berupa pasir dengan beragam komposisi (Beno *et al.*, 2019). *Tailing* yang merupakan limbah hasil samping pengolahan batuan yang mengandung mineral umumnya masih mengandung berbagai mineral berharga (Zhai *et al.*, 2020). Dalam beberapa tahun terakhir, kesadaran akan pentingnya pembangunan berkelanjutan semakin menjadi perhatian seluruh dunia berkaitan dengan perlindungan terhadap lingkungan dan semakin terbatasnya cadangan sumber daya alam (Oliveira *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2016). Berbagai teknik remediasi untuk mengurangi permasalahan yang timbul akibat *tailing* telah dilakukan, namun pengolahan ini menyebabkan hilangnya beberapa kandungan mineral yang berharga (Ramos *et al.*, 2016; Khan & Jones, 2009). Proses daur ulang sumber daya sekunder untuk mengambil dan mengolah kandungan mineral berharga yang terdapat dalam *tailing* memiliki peranan yang penting (Raghupathy & Chaturvedi, 2013).

*Tailing* tambang emas berupa pasir zirkon memiliki kandungan terbesar berupa zirkonia yang merupakan material berharga dan dapat diolah lebih lanjut menjadi produk turunannya dengan nilai jual tinggi. Namun, kandungan TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*) dalam hasil *tailing* merupakan bagian yang tidak terpisahkan dan harus dilakukan penanganan untuk menghilangkannya (Rozana, *et al.*, 2021). TENORM merupakan bahan radioaktif alam yang terkonsentrasi atau naik kandungannya dikarenakan hasil samping dari kegiatan industri non nuklir yang menggunakan bahan baku dari dalam kulit bumi. Radionuklida dalam TENORM berasal dari peluruhan radionuklida primordial dari peluruhan  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  dan  $^{40}\text{K}$  (Bunawas and Syarbaini, 2005). Kandungan TENORM dalam produk zirkonium komersial secara umum tidak boleh melebihi 500 ppm (Cornelly, 2014). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengambil kandungan Zr dalam *tailing* tambang emas Kalimantan dan melakukan konversi menjadi zirkonium oksiklorida bebas TENORM. Perhitungan *recovery* pasir zirkon menjadi produk turunannya menggunakan rumus sebagai berikut (Trisnawati, *et al.*, 2020):

$$\text{Zr recovery (\%)} = \frac{X_0 \cdot m_0 - X_i \cdot m_i}{X_0 \cdot m_0} \times 100\% \quad (1)$$

dimana,  $X_0$  adalah kadar Zr pada umpan (%),  $m_0$  adalah massa awal (g),  $X_i$  adalah kadar Zr pada produk (%), dan  $m_i$  adalah massa produk hasil sintesis (g).

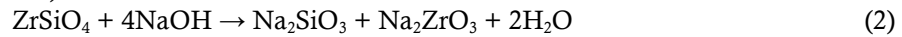
Zirkonium oksiklorida (ZOC) merupakan produk kimia turunan pertama dari pasir zirkon yang dapat menjadi bahan awal pada berbagai industri kimia berbasis zirkonium atau pembuatan zirkonium dioksida dengan kemurnian yang tinggi. Produk ZOC juga dapat diaplikasikan secara langsung seperti pada penggunaan pelapisan pigmen  $\text{TiO}_2$ . Selain itu, produk ini juga memiliki konduktivitas termal yang rendah, fleksibilitas yang tinggi, dan tahan terhadap korosi sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan baku pembuatan sensor oksigen. Kajian terhadap rantai nilai telah menunjukkan bahwa aplikasi produk zirkon di industri non nuklir konsisten mengalami kenaikan dengan enam kelompok besar yaitu industri *zircon chemicals*, *refractory*, zirkonia keramik, paduan, dan *TV glass*. Karakteristik ZOC yang aplikatif pada berbagai industri tersebut membuatnya banyak diminati sehingga bernilai ekonomi tinggi (Poernomo, 2012).

## Metode

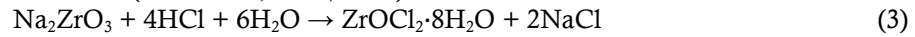
Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir zirkon dari *tailing* tambang emas Kalimantan dengan kadar  $\text{ZrO}_2$  60,574%. Bahan-bahan lain yaitu NaOH sebagai reaktan dalam proses peleburan, air untuk proses pencucian, serta HCl untuk *leaching* dan sintesis zirkonium oksiklorida. Alat-alat yang digunakan yaitu furnace *muffle* Hareus, oven Mettler, satu set reaktor pelindian air dilengkapi pengukur temperatur dan pengaduk, FTIR Alpha II Bruker, XRF (Malvern Panalitical, Epsilon 4 dan Ortec), dan XRD (Malvern Panalitical, Aeris Research DY 844).

Pasir hasil *tailing* yang sebelumnya telah dibenefisiari sehingga diperoleh kadar  $\text{ZrO}_2$  lebih dari 60% dilebur bersama dengan NaOH dengan perbandingan massa 1:1,1 pada temperatur 800 °C dengan waktu tahan selama 2 jam. Hasil leburan selanjutnya dicuci menggunakan air secara bertingkat pada reaktor pelindian air dengan rasio massa leburan terhadap volume air yaitu 1:30. Hasil leburan yang telah melalui proses pencucian kemudian dikeringkan dan dianalisis kadar Zr di dalamnya (Supriadi, Sari & Poernomo,

2015; Sajima, Handini & Suyanti, 2019). Reaksi yang kemungkinan terjadi pada proses ini adalah sebagai berikut (Poernomo, *et al.*, 2020):



Pada proses pencucian, silikat diharapkan tercuci dan terbawa pada filtrat air sedangkan  $\text{Na}_2\text{ZrO}_3$  terpisah dalam fase padat. Padatan  $\text{Na}_2\text{ZrO}_3$  kemudian direaksikan dengan HCl untuk menghasilkan zirkonium oksiklorida ( $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) dengan konsentrasi HCl 4N dan rasio massa  $\text{Na}_2\text{ZrO}_3$  terhadap volume HCl 1:20 selama 1,5 jam pada temperatur 60 °C (Supriadi, *et al.*, 2015; Sajima, *et al.*, 2019). Reaksi yang mungkin terjadi seperti berikut (Poernomo, *et al.*, 2020):



### Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini digunakan *tailing* tambang emas yang telah dilakukan benefisiasi. Benefisiasi adalah proses pemisahan pengotor dalam mineral seperti *quartz*, *ilmenite*, rutil, pirit, monasit, dan senotim dari pasir zirkon berdasarkan perbedaan gravitasi spesifik menggunakan peralatan berupa meja goyang dan pemisahan berdasarkan sifat kemagnetan menggunakan *magnetic separator* (Poernomo, *et al.*, 2020), yang dilakukan di Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara (tekMIRA), Bandung. Hasil benefisiasi kemudian disebut sebagai konsentrat zirkon.

**Tabel 1.** Komposisi kimia konsentrat zirkon.

Senyawa	Kadar (%)	Senyawa	Kadar (%)
ZrO <sub>2</sub>	60,5740	SnO <sub>2</sub>	0,0772
SiO <sub>2</sub>	28,5850	TeO <sub>2</sub>	0,0119
TiO <sub>2</sub>	6,1350	CeO <sub>2</sub>	0,0643
HfO <sub>2</sub>	1,7900	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0025
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0260	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0075
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4350	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0064
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4460	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0377
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3290	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0003
CaO	0,2710	WO <sub>3</sub>	0,00001
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0204	PbO	0,0046
MnO	0,0084	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0124
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0014	ThO <sub>2</sub>	0,0619
SeO <sub>2</sub>	0,0013	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,0728

Tabel 1 menunjukkan komposisi konsentrat zirkon dari *tailing* tambang emas di mana kandungan utama dalam material ini adalah ZrO<sub>2</sub> dan SiO<sub>2</sub>. Persyaratan produk zirkonium komersial di pasar dunia adalah dengan kandungan TENORM tidak boleh melebihi 500 ppm (Cornelly, 2014). Hasil *tailing* tambang emas yang telah dibenefisiasi sebagai langkah awal pada penelitian ini menghasilkan konsentrat pasir zirkon dengan kandungan TENORM berupa ThO<sub>2</sub> dan U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> total adalah 1347 ppm. Kandungan bahan radioaktif <sup>232</sup>Th dan <sup>238</sup>U pada material zirkon tidak akan sama antara satu daerah dengan daerah lain (Poernomo, *et al.*, 2014). Poernomo, *et al.* (2014) melaporkan bahwa pasir zirkon dari daerah Tumbangtiti Kalimantan Barat (Kalbar) mengandung kadar U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> = 0,0447% dan ThO<sub>2</sub> = 0,1140%. Sedangkan contoh pasir zirkon dari daerah Landak Kalbar mengandung kadar U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> = 0,0844% dan ThO<sub>2</sub> = 0,0940%. Selanjutnya untuk contoh pasir zirkon dari daerah Katingan Kalimantan Tengah (Kalteng) yang dianalisis di Australia mengandung kadar U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> = 267,5 ppm dan ThO<sub>2</sub> = 138,5 ppm.

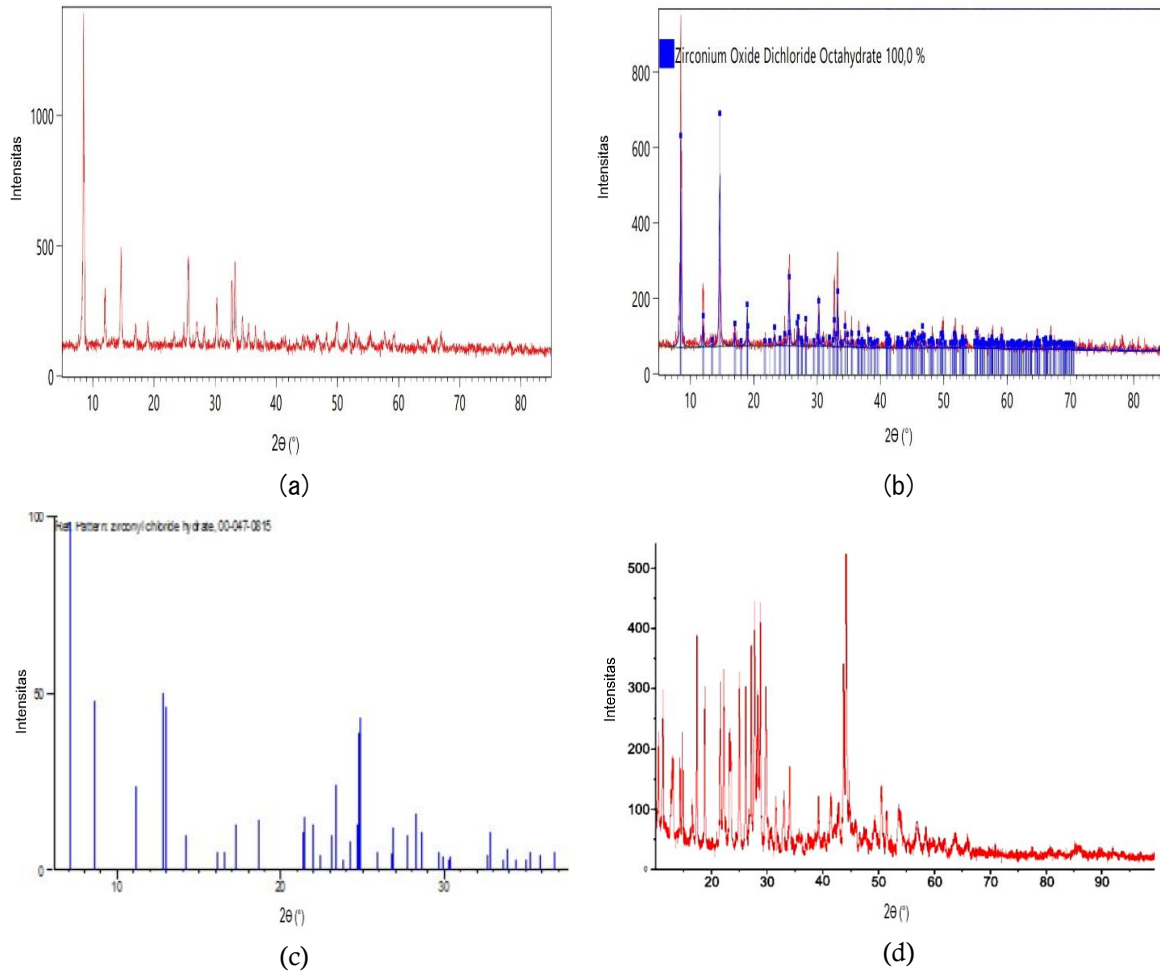
### Pelindihan melalui media air

Produk dari hasil alkali fusi selanjutnya dilindi menggunakan air di dalam suatu tangki reaktor secara berulang. Pencucian minimal dilakukan sebanyak tiga kali untuk membuang residu basa dalam hasil leburan. Sudjoko, *et al.* (2008) menyebutkan bahwa kandungan Zr paling optimal didapatkan pada pelindihan air 3 tingkat dengan kadar Zr mencapai 54,59%. Proses pencucian ini menghasilkan natrium zirkonat, zirkon oksida terhidrasi, residu natrium silikat, asam silikat, serta sisa dari reaksi antara mineral zirkon pada *tailing* magentik dengan soda kaustik (Silva, *et al.*, 2012). Pada penelitian ini, kadar Zr hasil pelindihan air sebesar 88,64% dengan hasil perhitungan *recovery* Zr sebesar 37,82%.

### Sintesis Zirkonium Oksiklorida (ZOC)

#### Hasil Analisis XRD

Pada penelitian ini dilakukan sintesis ZOC dalam satu kali tahap tanpa menggunakan metode sentrifugasi. Identifikasi produk dilakukan menggunakan spektrometer XRD. Analisis XRD ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Difraktogram produk ZOC (a) hasil sintesis, (b) Interpretasi data menggunakan *HighscorePlus*, (c) data ICSD pdf no. 00-047-0815, (d) hasil penelitian lain (Poernomo, et al., 2020).

Karakterisasi hasil analisis XRD dilakukan dengan mencocokkan pola difraksi dengan basis data *PDF Number 00-047-0815* yang merupakan data ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) untuk senyawa *zirconium oxide chloride hydrate*. Daftar puncak-puncak pada difraktogram senyawa ZOC hasil sintesis yang teridentifikasi berdasarkan data ICSD ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Daftar puncak-puncak tertinggi pada difraktogram senyawa ZOC hasil sintesis.

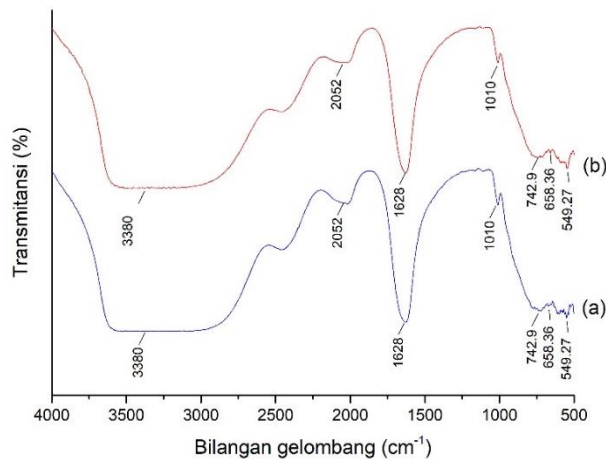
No.	Sudut $2\theta$ ( $^{\circ}$ )	$d$ ( $\text{\AA}$ )	$d_{hkl}$
1	8,57	10,29	$d_{020}$
2	12,82	6,89	$d_{011}$
3	14,18	6,23	$d_{200}$
4	17,21	5,14	$d_{040}$
5	18,63	4,75	$d_{-140}$
6	24,88	3,57	$d_{-151}$
7	30,36	2,94	$d_{070}$
8	32,84	2,72	$d_{-171}$

Gambar 1 (a) menunjukkan bahwa puncak-puncak pada difraktogram senyawa hasil sintesis memiliki pola yang mirip dengan pola difraksi senyawa ZOC menurut *PDF Number 00-047-0815* yang

ditunjukkan oleh Gambar 1 (c). Hasil pengamatan tersebut didukung dengan hasil karakterisasi dan pengolahan data menggunakan *database* pada perangkat lunak *HighscorePlus*. Hasil pengolahan data yang ditampilkan pada Gambar 1 (b) menunjukkan bahwa produk hasil sintesis terkonfirmasi sebagai *Zirconium Oxide Dichloride Octahydrate* 100%. Dengan kata lain produk hasil sintesis terkonfirmasi sebagai senyawa dengan rumus molekul  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  atau zirkonium oksiklorida oktahidrat. Hasil analisis XRD untuk senyawa ZOC dari penelitian lain ditampilkan pada Gambar 1 (d). Pada gambar tersebut dapat terlihat pola spektra yang mirip dengan hasil penelitian ini, namun dengan intensitas yang berbeda. Hal ini dapat terjadi karena metode sintesis dan bahan baku material yang digunakan berbeda.

### Hasil Analisis FTIR

Analisis menggunakan spektrometer FTIR dilakukan pada produk ZOC sintesis dan produk komersial *E-Merck* untuk memberikan komparasi dan mendukung data XRD yang telah ada. Hasil analisis FTIR disajikan pada Gambar 3. Pola spektra FTIR pada Gambar 2 menunjukkan hasil yang identik antara produk ZOC hasil sintesis dengan ZOC komersial *E-Merck*. Pada spektra tersebut juga dapat diidentifikasi beberapa puncak yang sesuai dengan pola puncak-puncak yang muncul pada spektra FTIR untuk senyawa  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  dalam *spectral database* (Wiley & Sons, 2021). Puncak pada daerah  $3500-3000\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi ulur gugus OH (Patel, *et al.*, 2013). Vibrasi tekuk H-O-H yang terkoordinasi dengan material ditunjukkan pada bilangan gelombang  $1628\text{ cm}^{-1}$  (Ardizzzone *et al.*, 2004). Daerah  $750-500\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi ulur ikatan Zr-O-Zr atau Zr=O (Kuwahara, *et al.*, 2014). Vibrasi Zr=O umumnya terdeteksi pada daerah  $896-915\text{ cm}^{-1}$ , adanya pergeseran pada  $1010\text{ cm}^{-1}$  dapat dimungkinkan terjadi akibat adanya pengaruh keberadaan Cl (Majid, *et al.*, 2019).

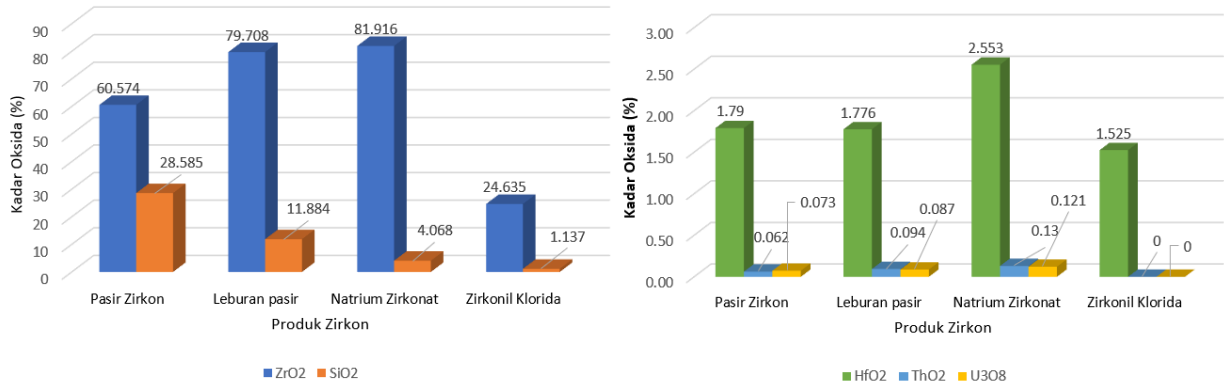


**Gambar 2.** Pola spektra vibrasi FTIR pada (a) ZOC hasil sintesis (b) ZOC komersial *E-Merck*

### Hasil Analisis Kadar Oksida

Diagram hasil analisis kadar oksida pada produk-produk zirkonium yang disajikan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa kadar  $SiO_2$  dalam pasir zirkon dapat tereduksi mencapai 96% pada produk turunannya yaitu  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ . Melalui pembentukan ZOC satu tahap dengan bahan baku *tailing* tambang emas dari Kalimantan pada penelitian ini diperoleh produk dengan kadar  $U_3O_8$  dan  $ThO_2$  0%.

Berikut ini disajikan gambaran perbandingan kadar ZOC hasil sintesis satu tahap yang telah dilakukan dengan produk standar komersial berdasarkan standar *Hicharms* (HiCharms Ltd., 2006). Berdasarkan komparasi terhadap produk standar dari *Hicharm* tersebut dapat dilihat bahwa beberapa parameter terkait  $Na_2O$ ,  $ThO_2$ , dan  $U_3O_8$  telah terpenuhi. Namun, kadar  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ , dan  $TiO_2$  masih belum memenuhi spesifikasi. Dalam hal ini, penggunaan bahan baku *tailing* tambang emas dari Kalimantan untuk pembuatan ZOC dalam sekali tahap dan tanpa sentrifugasi belum dapat memenuhi keseluruhan spesifikasi dari produk komersial (*Hicharms*). Metode sintesis ZOC satu tahap dan tanpa melalui sentrifugasi telah mampu mengeliminasi kandungan  $ThO_2$  dan  $U_3O_8$ , namun masih menyisakan kandungan  $SiO_2$  dan  $TiO_2$ . Pemurnian ZOC dalam dua tahap reaksi serta penggunaan tahap sentrifugasi kemungkinan dapat meningkatkan kemurnian ZOC sehingga dapat memenuhi keseluruhan kriteria produk standar komersial. Sementara itu, hasil perhitungan menunjukkan bahwa sintesis satu tahap yang dilakukan pada penelitian ini dapat menghasilkan ZOC dengan recovery Zr sebesar 85,94%.



**Gambar 3.** Kadar ZrO<sub>2</sub> dan beberapa oksida lain dalam produk zirkonium hasil penelitian

**Tabel 3.** Perbandingan komposisi ZOC sintesis dan ZOC standar *Hicharms* (HiCharms Ltd., 2006).

ZOC sintesis		ZOC standar <i>Hicharms</i>	
Senyawa	Kadar (%)	Senyawa	Kadar (%)
(ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub> )	26,16	(ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub> )	35,500
SiO <sub>2</sub>	1,137	SiO <sub>2</sub>	0,005
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,060	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,002
TiO <sub>2</sub>	0,402	TiO <sub>2</sub>	0,002
Na <sub>2</sub> O	0,000	Na <sub>2</sub> O	0,003
ThO <sub>2</sub>	0,000	ThO <sub>2</sub>	-
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	0,000	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-

### Simpulan

Pengambilan Zr dari *tailing* tambang emas Kalimantan dan pengolahannya menjadi senyawa zirkonium oksiklorida oktahidrat (ZrOCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O) telah berhasil dilakukan. Senyawa tersebut terkonfirmasi melalui analisis dan interpretasi data XRD dan FTIR dengan penggunaan *database* dan perbandingan dengan produk komersial. Produk hasil sintesis menunjukkan kandungan ThO<sub>2</sub> dan U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> masing-masing sebesar 0% dari kadar awal pada *tailing* tambang emas yang telah dibenefisi (berupa konsentrat pasir zirkon) sebesar 620 ppm (ThO<sub>2</sub>) dan 730 ppm (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>). Hasil perhitungan menunjukkan % *recovery* Zr sebesar 85,94%.

### Daftar Referensi

- Ali, H., Khan, E. and Ilahi, I. 2019. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation, 2019(Cd).
- Ardizzone, S., Bianchi, C.L., Cappelletti, G., & Porta, F. 2004. Liquid-phase catalytic activity of sulfated zirconia from sol-gel precursors: The role of the surface features', *Journal of Catalysis*, 227(2): 470–478. doi: 10.1016/j.jcat.2004.07.030.
- Beno, J., Adamusová, K., Merta, V & Bajer, T. 2019. Influence of Silica Sand on Surface Casting Quality. *Archives of Foundry Engineering*, 19(2): 5–8.
- Cornelly, D. 2014. Options For Removing Uranium & Thorium From Zircon Mineral Sands, *Mineral Engineering Technical Services Pty Ltd*.
- <https://www.hicharms.com/zirconiumoxychloride.html>, diakses pada 28/07/2021.
- Khan, M. J. and Jones, D. L. 2009. Effect of Composts, Lime and Diammonium Phosphate on the Phytoavailability of Heavy Metals in a Copper Mine Tailing Soil, *Pedosphere: An International Journal*, 19(5): 631–641. doi: 10.1016/S1002-0160(09)60158-2.
- Kuwahara, Y., Fujitani, T. and Yamashita, H. 2014. Esterification of levulinic acid with ethanol over sulfated mesoporouszirconosilicates: Influences of the preparation conditions on the structural

- properties and catalytic performances. *Catalysis Today*, 237: 18–28. doi: 10.1016/j.cattod.2013.11.008.
- Majid, A., Jabeen, A. and Khan, S. U. 2019. First principles investigations of vibrational properties of titania and zirconia clusters. pp. 1–15.
- Okereafor, U., Makhatha, M. and Mekuto, L. 2006. Gold Mine Tailings : A Potential Source of Silica Sand for Glass Making'.
- Marcos L.S.Oliveira, M.L.S., Izquierdo, M., Querol, X., Lieberman, R.N., Saikia, B.K., & Silva, L.F.O. 2019. Nanoparticles from construction wastes : A problem to health and the environment. *Journal of Cleaner Production*, 219: 236–243. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.096.
- Patel, A., Brahmkhatri, V. and Singh, N. 2013. Biodiesel production by esterification of free fatty acid over sulfated zirconia. *Renewable Energy*, 51: 227–233. doi: 10.1016/j.renene.2012.09.040.
- Poernomo. H. 2012. *Informasi umum zirkonium*. Yogyakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional, Pusat Teknologi Akselerator Dan Proses Bahan.
- Poernomo, H., Kismolo, E. and Supriyatni, E. 2014. Konsep Pengolahan Limbah TENORM pada Proses Pembuatan Zirkonium Oksiklorid dari Pasir Zirkon. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 9: 379–390.
- Poernomo, H., Sajima and Pusporini, N. D. 2020. Synthesis of Zirconium Oxychloride and Zirconia Low TENORM by Zircon Sand from Landak West Kalimantan Synthesis of Zirconium Oxychloride and Zirconia Low TENORM by Zircon Sand from Landak West Kalimantan. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(012106): 1-12. doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012106.
- Raghupathy, L. and Chaturvedi, A. 2013. Science of the Total Environment Secondary resources and recycling in developing economies, *Science of the Total Environment*, 461–462: 830–834. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.041.
- Ramos, C.G., Querol, X., Dalmora, A.C., Pires, K.C.J., Schneider, I.A.H., Oliveira, L.F.S., Kautzmann, R.M. 2016. Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 142: 2700-2706. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.006.
- Rozana, K., Prabasiwi, D. S. and Ariany, D. P. 2021. Identification of TENORM in Zirconium Oxychloride with Gamma Spectrometry, 2(1): 61–67. doi: 10.20885/EKSAKTA.vol2.iss1.art.
- Sajima, Handini, T. and Suyanti. 2019. Dekomposisi Konsentrat Zirkon Hasil Sampung Tambang Timah Menggunakan Natrium Hidroksida. *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pembelajarannya*, 05: 267–275.
- Silva, R. J. F. da, Dutra, A. J. B. and Alfonso, J. C. 2012. Hydrometallurgy Alkali fusion followed by a two-step leaching of a Brazilian zircon concentrate. *Hydrometallurgy*, 117–118: 93–100. doi: 10.1016/j.hydromet.2012.02.011.
- Wiley, J and Sons. 2021. *Zirconyl chloride octahydrate FTIR SpectraBase*.
- Sudjoko, D. and Triyono. 2008. Peningkatan Kualitas Zirkonia Hasil Olah Pasir Zirkon', Ganendra Vol. XI No. 1. ISSN 1410-6957.
- Supriadi, H., Sari, E. P. and Poernomo, H. 2015. Penggunaan refluks pada pelindian asam untuk meningkatkan sintesis zoc. (November).
- Bunawas dan Syarbaini. 2005. Penentuan Potensi Risiko Tenorm Pada Industri Non Nuklir. *Buletin Alara*, 6:143–150.
- Tchounwou, P. B. Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J. 2014. Heavy Metals Toxicity and the Environment. *Experientia supplementum*, 101:133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4.
- Zhai, J., Wang, H., Chen, P., Hu, Y., Sun, W. 2020. Chemosphere Recycling of iron and titanium resources from early tailings : From fundamental work to industrial application, *Chemosphere*, 242: 125178. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125178.