

SINTESA NANO ZIRKON DARI PASIR ZIRKON LOKAL DENGAN METODE FUSI KAUSTIK SODA-PRESIPITASI-KALSINASI

Alvika Meta Sari¹, Efrizon Umar², Djoko Hadi Prajitno³, Rian Fitriana⁴, Anwar Ilmar Ramadhan^{5,*}, Firmansyah⁶, Istianto Budhi Rahardja⁷, Akmal Imam Faisal⁸, Fikriyansyah⁹

^{1,8,9}Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl.Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta 10510

^{2,3,4}Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Tamansari No 71 Bandung 40132

^{5,6}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta 10510

⁷Program Studi Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit, Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi, Jl. Gapura No. 8, Bekasi, Jawa Barat 17520

*anwar.ilmar@umj.ac.id

Diterima: 20 April 2023

Direvisi: 26 Juni 2023

Disetujui: 28 Juli 2023

ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi sumber daya alam mineral berupa pasir zirkon. Pasir zirkon merupakan salah bahan baku yang dapat berpotensi untuk disintesis menjadi nanozirkon karena kandungan utamanya adalah zirkon oksida (ZrO_2). Pada penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nano zirkon dari pasir zirkon lokal Kalimantan menggunakan metode modifikasi fusi-kaustik soda-presipitasi-kalsinasi. Nanozirkon dibuat dalam penelitian ini melalui modifikasi metoda yang sudah ada yaitu proses fusi kaustik, pencucian, pelindihan asam menggunakan asam klorida, presipitasi menggunakan amoniak dan proses kalsinasi sehingga dihasilkan nanozirkon dalam bentuk serbuk berwarna putih. Efisiensi proses dianalisa menggunakan perhitungan yield produk yang terbentuk kemudian dilakukan uji spektroskopi FTIR (Fourier Transform Infra-Red) untuk mengetahui gugus fungsi nanozirkon dan morfologi dianalisa menggunakan SEM (Scanning Electron Microscopy). Yield yang didapat adalah 2,7 % dengan ukuran nanozirkon 41,983 nm. Spektrum FTIR menunjukkan adanya gugus fungsi $-Zr-O_2$ pada bilangan gelombang 600 - 700 cm^{-1} .

Kata kunci: fusi kaustik soda, kalsinasi, nanozirkon, pasir zirkon, presipitasi

ABSTRACT

Indonesia is one of countries that has the potential of mineral natural resources in the form of zircon sand. Zircon sand is a raw material that has the potential to be synthesized into nano zircon because of its ingredients of zircon oxide (ZrO_2). In this study the aim was to study the aim to synthesize nano zircon from local zircon sand from Kalimantan using caustic soda-precipitation-calcination modification method. Nano zircon was prepared in this study by modifying existing methods, namely caustic fusion, washing, acid leaching using hydrochloric acid, precipitation using ammonia and calcination processes to produce nano zircon in the form of white powder. The efficiency of the process was analyzed by calculating the yield of the product formed, then the FTIR (Fourier Transform Infra-Red) spectroscopic test was performed to determine the functional groups of nano zircons and the morphology was analyzed using SEM (Scanning Electron Microscopy). Yield obtained is

2.7% with the size of nano zircon is 41.983 nm. The FTIR spectrum shows the presence of the-Zr-O₂ functional group at wave numbers 600 – 700 cm⁻¹.

Keywords: fusi caustic soda, calcination, nano zircon, zircon sand, precipitation

PENDAHULUAN

Pasir zirkon merupakan salah satu sumber daya alam mineral di Indonesia yang tersebar di beberapa wilayah yaitu Aceh, Sumatera Utara, Riau, Jambi, Bangka Belitung, Kepulauan Riau, Sumatera Selatan, Lampung, Sumbas, dan Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Sulawesi Selatan, dan Papua Barat [1]. Pasir Zirkon ini awalnya adalah limbah dari penambangan emas dan bijih timah tapi mempunyai kandungan utama ZrO₂ 58,66%, SiO₂ 30,76% dengan pengotor Al₂O₃ 1,33%, Fe₂O₃ 1,21%, TiO₂ 6,55% dan lainnya (Dahlan, 2010) [2]. Dengan kandungan mineral zirkon yang tinggi, maka pasir zirkon dapat dimanfaatkan secara langsung untuk berbagai industri yaitu frit, keramik, pengecoran logam dan bata tahan api [3]. Dimana pada tahun 2013, konsumsi pasir zirkon dunia didominasi oleh industri keramik seperti disajikan pada Tabel 1. Selain itu kandungan zirconium pada pasir zirkon ini juga dapat dimanfaatkan di industri nuklir sebagai material pelapis reaktor suhu tinggi karena sifat ketahanan temperatur tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta rendahnya penyerapan neutron [4].

Tabel 1. Konsumsi pasir zirkon oleh industri di dunia tahun 2019 [5]

Industri	Jenis produk	Konsumsi (%)
Keramik	Keramik lantai, sanitary ware, table ware	50
Refraktori dan Foundry	Pengecoran, gelas, baja dan semen	30
Kimia, Zirkonia	Elektronik, converter	20
Fusi dan Penggunaan khusus	katalitism fiber optic, nuclear fuel rods	

Pasir Zirkon ini mengandung mineral Zirkon (ZrSiO₄) yang berikatan dengan mineral

lainnya [6] yang merupakan limbah penambangan pasir timah. Hasil pengujian sampel limbah penambangan pasir timah dari 6 lokasi di Bangka didapatkan mineral yang terkandung bervariasi yaitu zirkon 1,33 – 62%, psudorutil 7,19 – 41,70%, kuarsa 17,80 – 24,65%, Rutil 1,55 – 19,97%, kasiterit 0,55 – 18,53% dan Ilmenit 2,35 – 16,90% [7].

Namun, saat ini pasir zirkon tidak dapat langsung diekspor karena ada Peraturan Menteri ESDM No. 8 Tahun 2015 bahwa hasil tambang timah wajib diolah/ dimurnikan kandungan zirkon, dan mineral lainnya. Pada permen ini juga diatur untuk konsentrasi minimal pengolahan produk konsentrat zirkon, ilmenite, rutil, monasit dan senotim menjadi produk lainnya untuk tujuan ekspor [8]. Hal ini tentunya menjadi tantangan bagi pengusaha pertambangan untuk melakukan pengolahan bahan tambah berbasis zirkon.

Beberapa metoda yang dimurnikan dengan batas kadar tertentu yang boleh diekspor. Jenis pengolahan pasir zirkon tergantung pada jenis dan kualitas zirkon. Beberapa jenis produk zirkon untuk industri berdasarkan kadar ZrO₂ dan HfO₂ tertinggi yaitu zirconia >99,5% untuk mesin jet, zirconia untuk reactor nuklir 99,5%, zirkon opacifier (ZrO₂.SiO₂) >66%, zirconium hydroxide (Zr(OH)₄ 44 – 55%, zirkonil klorid (ZrOCl₂.8H₂O) dan lain-lainnya [9].

Selain itu pasir zirkon dapat disintesa menjadi nanozirkon. Saat ini nanozirkon menarik para peneliti untuk melakukan penelitian tentang sintesa dan aplikasinya. Hal ini karena nanozirkon berada pada ukuran nano (1 – 100 nm) yang mempunyai luas permukaan yang tinggi serta sifat-sifat dengan warna alami yang baik, kekuatan tinggi, ketangguhan transformasi yang baik, stabilitas kimia tinggi, tahan korosi serta tahan kimia dan mikroba [10] [11]. Selain itu nano zirkon juga mempunyai sifat optikal yang baik karena bentuk kristal yang dihasilkan saat sintesis

[12]. Nano zirkon dari pasir zirkon dapat dimanfaatkan sebagai nanofluida untuk pendingin radiator [13]. Penambahan nano zirkon sebagai bahan keramik gigi akan menaikkan sifat mekanik dan juga sifat bionik, memperkuat kekuatan lentur, ketangguhan retak dan kekuatan geser material [14] [15]. Nanozirkon juga dapat ditambahkan dalam implant gigi dapat memperbaiki permasalahan yang ditimbulkan oleh bahan Ti implant sehingga menjadi integrasi yang baik antara gigi implant dan jaringan tubuh [16].

Beberapa metoda untuk mensintesis nano zirkon sudah dilakukan oleh beberapa peneliti. Beberapa metode yang digunakan adalah sol gel [17], presipitasi [18], gel-combustion [19], thermal proses [12], dan hidrotermal [20]. Dimana Metode sol gel dan presipitasi adalah metode yang paling sering digunakan karena kelebihanannya adalah kondisi operasi lebih rendah akan tetapi metode presipitasi menghasilkan ukuran yang lebih kecil. Namun, kekurangan metode ini adalah hasilnya kurang m Untuk mendapatkan zirkon yang lebih murni, sebelum metode presipitasi dilakukan proses untuk mengekstraksi zirkon dari pasir zirkon menggunakan metode fusi kaustik [21]. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan metode modifikasi untuk mensintesis nano zirkon yaitu dengan metode fusi kaustik soda untuk mengekstraksi ZrO_2 dari pasir zirkon, metode presipitasi untuk mensintesis nano zirkon dan metode kalsinasi untuk pembentukan fase padat.

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada proses sintesis nano zirkon dari pasir zirkon adalah: alu dan lumping, timbangan analitik, kertas saring (whatman), corong kaca, pH meter, beaker glass, pipet tetes, labu ukur, cawan nikel, cawan porselen, tungku pemanas, labu erlenmeyer, magnetic stirrer, hotplate, sentrifuge dan oven.

Bahan yang digunakan pada proses sintesis nano zirkon dari pasir zirkon adalah: pasir zirkon, NaOH 17,5%, HCl 5M, Aquadest dan ammonia.

Prosedur Penelitian

1) Ekstraksi zirkon dengan metode Fusi Kaustik

Pasir zirkon dan NaOH ditimbang dengan perbandingan 1 : 8 (pasir zirkon 50 gr dan NaOH 180 gr). Lalu dicampur dan digerus selama kurang lebih 2 menit dengan menggunakan mesin penggerus. Setelah digerus dilakukan pengayakan dengan ukuran 100 dengan waktu 15 menit. Campuran ZrO_2 NaOH dimasukkan ke dalam cawan nikel dengan menggunakan spatula sampai terisi $\frac{3}{4}$ penuh. Lalu dimasukkan di furnace dengan suhu 400 °C selama 1 jam (60 menit). Setelah dingin dikeluarkan dan digerus kembali campuran hingga halus.

2) Proses Pencucian

Serbuk hasil pembakaran dicuci dengan aquades sebanyak 200 ml, menggunakan hotplate dengan suhu 150 °C selama 15 menit, diaduk lalu diamkan sampai mengendap. Kemudian dipisahkan residu dari larutannya, dan itu dilakukan sebanyak 6 kali pencucian dengan proses yang sama. Air yang berada diatas endapan dibuang sebagian hingga tersisa residu dan sedikit air, diamkan satu malam. Lakukan kalibrasi pH pada pH meter agar pada saat proses penetralan stabil, ukur pH dengan menggunakan pH meter sampai kurang lebih menghasilkan pH 6-7, bila perlu tambahkan HCl 5M untuk penurunan pH. Panaskan larutan didalam tungku pemanas dengan suhu 200°C. Setelah sudah kelihatan mengering atau terlihat pecah-pecah, maka keluarkan gelas kimia yang berisi residu, didinginkan selama 1 jam.

3) Proses Pelindihan

Sebanyak 50 gram TKKS dimasukkan ke Residu yang telah dipanaskan, ditimbang sebanyak 10 gram, kemudian dilakukan pelindihan menggunakan larutan HCl 5M sebanyak 100 ml (1:10). Dipanaskan kembali dengan menggunakan hotplate dengan suhu 150 °C selama 30 menit, sambil diaduk-aduk menggunakan batang pengaduk. Simpan

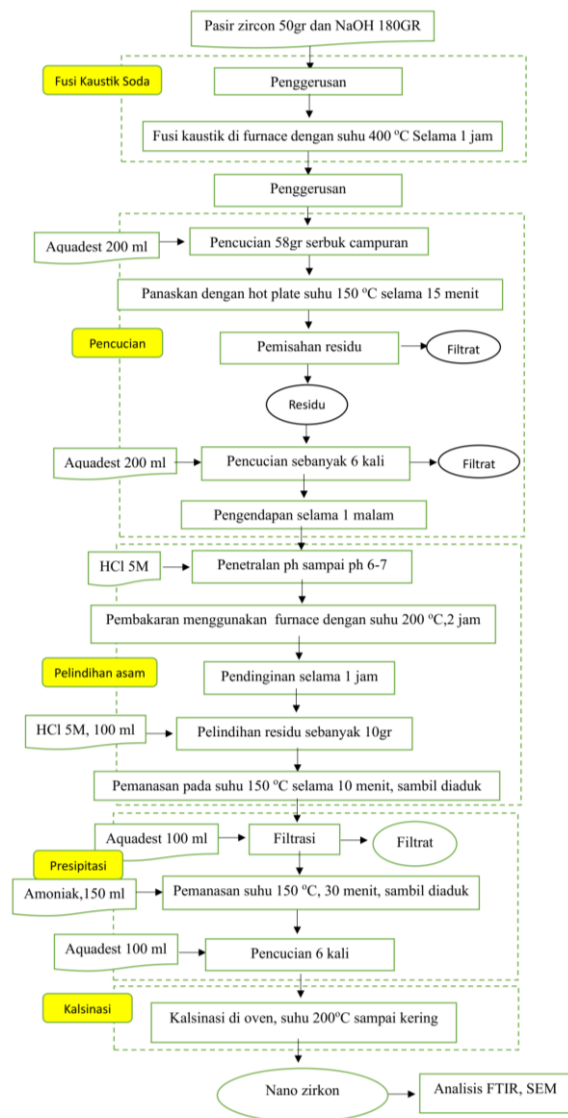
larutan yang telah dipanaskan di dalam ruang asam selama satu malam hingga mengendap dan teksturnya berubah menjadi seperti jelly. Setelah satu malam dan teksturnya berubah menjadi seperti jelly, kemudian tambahkan HCl 5M sebanyak 100 ml, panaskan kembali menggunakan hotplate selama 10 menit sambil diaduk-aduk menggunakan batang pengaduk atau menggunakan stirrer, simpan kembali didalam ruang asam selama satu malam.

4) Sintesa Nanozirkon dengan Metoda Presipitasi

Filtrat disaring dengan menggunakan kertas saring (wathman 42). Jika sudah mendapatkan filtrat dari hasil proses filtrasi maka ukur volume filtrat sebanyak 100 ml, masukan kedalam gelas kimia kemudian tambahkan aquades sebanyak 100 ml. Panaskan menggunakan hotplate selama kurang lebih 30 menit dengan suhu 150 °C. Tambahkan amonia sebanyak kurang lebih 150 ml, masukan amonia sedikit demi sedikit sambil diaduk menggunakan batang pengaduk kedalam gelas kimia yang berisi larutan yang telah dipanaskan. Pencucian dengan menggunakan aquades sebanyak 100 ml minimal 6 kali pencucian, lalu disimpan larutan di ruang asam selama satu malam hingga mengendap. dibuang sebagian air endapan hingga tersisa residu dan sedikit endapan.

5) Proses pembentukan fase padat menggunakan proses kalsinasi Endapan dibakar dengan suhu 200 °C sampai residu terlihat mengering atau pecah-pecah. Masukan hasil pembakaran kedalam wadah yang telah disediakan untuk ditimbang, diukur yield dan dianalisis FTIR, dan SEM.

Diagram alir penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.

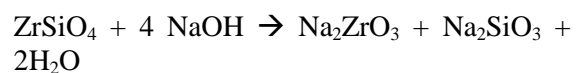


Gambar 1. Flowdiagram sintesis nanozirkon dari pasir zirkon dengan metode modifikasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Fusi Kaustik Soda

Pada proses ini, mineral zirconium akan terurai dan terbentuk air dari reaksi hidrolisis pada suhu 400 °C. Pada proses ini terbentuk natrium zirkonat (Na₂ZrO₃), natrium silikat (Na₂SiO₃) dan pelepasan air dari komponen ZrSiO₄ dan NaOH dengan reaksi sebagai berikut [4]:



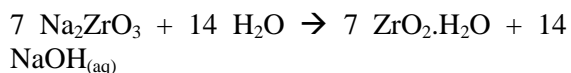
Produk fusi kaustik soda dalam cawan nikel pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Hasil peleburan dengan metode Fusi kaustik soda

Proses Pencucian

Proses pencucian dilakukan utk memisahkan natrium zirkonat dan natrium silikat karena natrium silikat akan larut pada air sedangkan natrium zirconia tidak larut. Sehingga setelah pH netral dengan pencucian menggunakan aquadest, akan terjadi reaksi hidrolisis natrium zircon dengan reaksi sebagai berikut [4]:



Proses Pelindihan

Proses pelindihan merupakan proses peleburan yang dilakukan untuk meningkatkan kadar zirkon oksida dari pasir zirkon [4]. HCl 5 M ditambahkan sebanyak 100 ml dengan perbandingan 1 : 100 pada **Gambar 3** sebagai berikut.



Gambar 3. Proses pelindihan dengan HCL 5M perbandingan 1: 10.

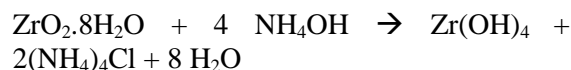
Reaksi yang terjadi sebagai berikut :



Produk $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ bentuknya gel kuning yang perlu dimurnikan dari natrium silikat. Hasilnya sama dengan penelitian Susilowati dkk [4] warnanya kuning tapi menggunakan HCl 4 N. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi HCl tidak memberikan dampak yang signifikan pada perubahan warna saat proses pelindihan.

Proses Presipitasi

Reaksi yang terjadi di proses presipitasi adalah pembentukan ZrO_2 dari $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ sebagai berikut [4].



Gel kuning yang terbentuk ditambahkan amoniak dan pengadukan untuk pemisahan natrium silikat yang masih terikut pada $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ sampai terbentuk endapan putih natrium silika.

Proses Kalsinasi

Proses kalsinasi merupakan tahapan terakhir untuk pembentukan fase padatan, dimana terjadi penguapan air dan senyawa lainnya pada suhu 200 °C. Suhu ini lebih rendah daripada penelitian Susilowati dkk yaitu sebesar 700 °C dengan hasil kadar ZrO_2 menjadi 85.022% yang meningkat 15.093% [4].

Yield Nano zirkon

Persentase yield pada penelitian ini dihitung berdasarkan penelitian Hendrawati dkk [22] sebagai berikut :

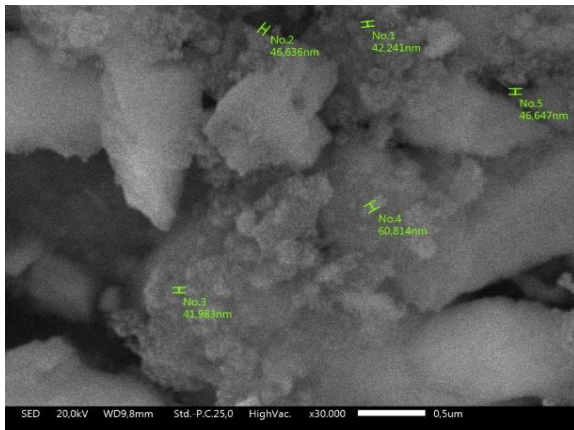
$$\text{yield} = \frac{\text{massa produk}}{\text{massa bahan baku}} \times 100$$

Berat masing-masing sampel pasir zirkon yang digunakan adalah 50 gram. Hasil yang didapat disajikan pada **Tabel 2** berikut.

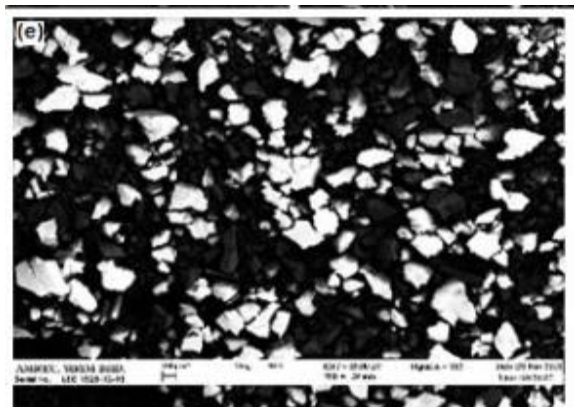
Suhu peleburan	Massa pasir zirkon	Massa Nano zirkon	Yield
400 °C	50 gr	0,27 gr	0,54 %

Analisis SEM EDX Nano zirkon

Pengujian SEM dilakukan terhadap permukaan dan topografi nanozirkon yang dihasilkan dan juga untuk mengetahui ukuran nanozirkon yang dihasilkan dari pasir zirkon menggunakan sebuah mikroskop elektron yang didesain untuk mengamati permukaan objek solid secara langsung. Hasil uji SEM dapat dilihat pada **Gambar 3**. Sedangkan uji SEM zirkonia komersial dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 3. Hasil SEM Nanozirkon pada suhu fusi 400 °C



Gambar 4. Hasil SEM komersial zirkonia [21]

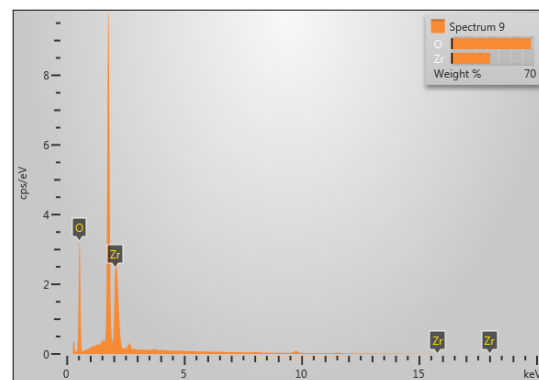
Dari **Gambar 3**, ukuran nanozirkon yang didapat disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Data Ukuran Nanozirkon dari Uji SEM

Suhu peleburan	Suhu kalsinasi akhir	Perbesaran (kali)	Ukuran Nanozirkon (nm)
400 °C	200 °C	30.000	41.98

Gambar 3 menunjukkan bahwa struktur produk nanozirkon yang dihasilkan dalam bentuk amorf, jika dibandingkan dengan produk zirkon komersial.

Pada penelitian terdahulu, dengan metode yang sama, tetapi berbeda suhu fusi dan kalsinasi akhir didapatkan hasil yang berbeda. Hasil penelitian Subuki et al [21] dengan suhu fusi rendah tapi kalsinasi akhir tinggi (500 – 700 °C) didapatkan bentuk struktur yang sama yaitu amorf dengan bentuk yang paling mendekati zirconia komersial pada suhu 600 °C. Apriyani dkk [23] mendapatkan ukuran zirconia bentuknya kristalin dengan struktur kubik dengan ukuran < 10 μm pada suhu kalsinasi akhir 800 °C selama 5 jam. Dari sini terlihat bahwa hasil penelitian ini yang dilakukan pada suhu kalsinasi yang lebih rendah menghasilkan ukuran yang lebih kecil daripada suhu kalsinasi akhir yang lebih tinggi, akan tetapi didapatkan struktur amorf. Dapat dilihat dari gambar 4 bahwa terjadi aglomerasi antar partikel nanozirkon dimana aglomerasi dapat dikurangi dengan kenaikan suhu kalsinasi akhir [23], sedangkan Rahmawati menyarankan menggunakan penggilingan untuk mengatasi aglomerasi [24].



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Standard Label
O	K series	43.55	0.14653	67.19	0.49	92.11	SiO2
Zr	L series	28.50	0.28503	32.81	0.49	7.89	Zr
Total:				100.00		100.00	

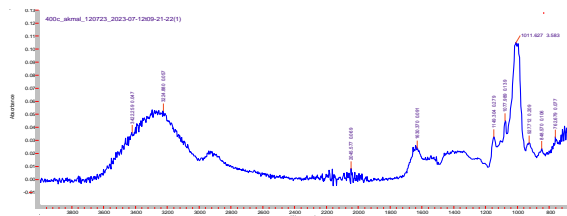
Gambar 5. Hasil EDX Produk Nanozirkon

Dari **Gambar 5** diatas mengkonfirmasi bahwa nano zirkon mengandung kadar Zr yang masih rendah yaitu 32,81% dengan impuritas beupa SiO₂ yang lebih tinggi kadarnya yaitu 67,19%. Hal ini disebabkan silika tidak meleleh pada suhu peleburan karena mempunyai titik leleh

yang tinggi yaitu 1600 °C. Hal ini berbeda dengan hasil penelitian Apriyani [23], hasil EDX menunjukkan kadar Zr yang tinggi yaitu 81,30% pada suhu kalsinasi 600 °C dan sintering 1500 °C. Oleh karena itu penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh suhu kalsinasi akhir pada kadar zircon, semakin tinggi suhu kalsinasi akhir maka kadar zircon akan semakin naik.

Analisis FTIR Nano zirkon

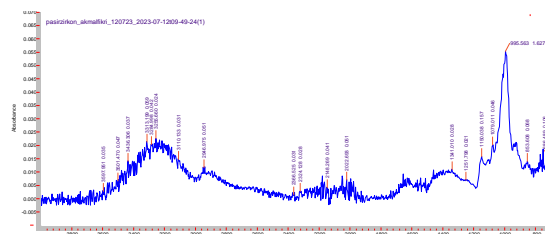
Hasil pengujian spektrofotometer FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan serapan khas yang terkandung dalam nanozirkon. Secara umum pasir zirkon memiliki komponen yaitu zirconia dan silika. Kedua komponen tersebut tersusun atas alkana, ester, aromatik dan alcohol. Rentang Panjang gelombang inframerah yang digunakan untuk tujuan analisis adalah $2,5 \times 10^6$ m sampai dengan 16×10^{-6} m. satuan yang digunakan dalam spektroskopi inframerah adalah mikrometer dan bilang gelombang. Namun para ahli kimia lebih banyak menggunakan satuan bilangan gelombang cm^{-1} .



Gambar 6. Spektroskopi FTIR Nanozirkon

Gambar 6 menunjukkan daerah serapan infra merah nanozirkon dari pasir silika setelah melewati proses fusi kaustik soda, pelindihan, presipitasi dan kalsinasi.. Perlakuan pertama yaitu fusi kaustik soda dengan menggunakan NaOH 17,5 % akan mengakibatkan tereduksinya ikatan hidrogen akibat penghilangan kelompok hidroksil karena terjadi reaksi dengan sodium hidroksida. Hasil dari *alkali treatment* yaitu adanya gugus -OH ditunjukkan dengan adanya puncak daerah serapan antara bilangan gelombang $3336,12 \text{ cm}^{-1}$ dan $3550,16 \text{ cm}^{-1}$. Gugus fungsi utama pada zirkon murni adalah $600 - 700 \text{ cm}^{-1}$. Jika dibandingkan hasil FTIR dengan pasir zirkon pada Gambar 7, banyak gugus yang sudah hilang yaitu gugus C-H pada $3000-2800 \text{ cm}^{-1}$,

C=N pada $2400-2200 \text{ cm}^{-1}$, N_3 dan >CO pada $2200-2000 \text{ cm}^{-1}$, C-NO₂ pada 1341.01 cm^{-1} , dan C-O-C pada $1200-1000 \text{ cm}^{-1}$. Dimana gugus-gugus ini hilang pada saat proses sintesis nanozirkon, sehingga nano zirkon yang dihasilkan lebih murni daripada pasir zirkon.



Gambar 7. Spektroskopi FTIR Pasir Zirkon

KESIMPULAN

Nanozirkon dapat disintesa dari pasir zirkon lokal Indonesia menggunakan metoda kombinasi fusi kaustik soda, pelindihan, presipitasi dan kalsinasi akhir. Ukuran nanozirkon yang didapat adalah 41,98 nm pada suhu peleburan (fusi) 400 °C selama 1 jam dan suhu kalsinasi 200 °C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta yang telah mendukung penelitian ini. Ucapan terima kasih kami haturkan juga kepada LPDP dan Badan Riset dan Inovasi Nasional Republik Indonesia yang telah memberikan pendanaan melalui program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) tahun 2022 dengan nomor kontrak 82/II.7/HK/2022.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Apriyani, K., Permadani, I., Syarif, D. G., Soepriyanto, S., & Rahmawati, F. (2016). Electrical conductivity of zirconia and yttrium-doped zirconia from Indonesian local zircon as prospective material for fuel cells. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 107, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
- [2] Athifah, T. A., Abrar, A., & Syarif, D. G. (2021). Sintesis Nanopartikel

- ZrO₂ Dari Pasir Zirkon Dengan Metode Presipitasi Untuk Adsorben Metilen Biru. *eProceedings of Engineering*, 8(1).
- [3] Dahlan, Y., Saleh, N., & Pramusanto, P. (2010). Pembuatan Zirkonia Semi Stabil Dari Pasir Zirkon Kalimantan Tengah Dengan Menggunakan Bahan Penstabil Campuran CaO Dan MgO. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 6(3), 146-155.
- [4] Gad, M. M., Rahoma, A., Al-Thobity, A. M., & ArRejaie, A. S. (2016). Influence of incorporation of ZrO₂ nanoparticles on the repair strength of polymethyl methacrylate denture bases. *International journal of nanomedicine*, 5633-5643.
- [5] Hardian, A., Hasnah, F. I., Syarif, D. G., & Budiman, S. (2017). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel ZrO₂ dengan metode Sol-Gel menggunakan amilum sebagai capping agent untuk aplikasi nanofluida. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2017* (pp. 338-44). Bandung: PSTNT-BATAN.
- [6] Hendrawati, T. Y., Umar, E., Ramadhan, A. I., Sari, A. M., Salsabila, M., Suryani, R., ... & Rahardja, I. B. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Nanoselulosa Serbuk Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Ultrasonifikasi. *Jurnal Teknologi*, 15(1), 159-166.
- [7] Hirvonen, A., Nowak, R., Yamamoto, Y., Sekino, T., & Niihara, K. (2006). Fabrication, structure, mechanical and thermal properties of zirconia-based ceramic nanocomposites. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(8), 1497-1505.
- [8] Hu, C., Sun, J., Long, C., Wu, L., Zhou, C., & Zhang, X. (2019). Synthesis of nano zirconium oxide and its application in dentistry. *Nanotechnology Reviews*, 8(1), 396-404.
- [9] Keiteb, A. S., Saion, E., Zakaria, A., & Soltani, N. (2016). Structural and optical properties of zirconia nanoparticles by thermal treatment synthesis. *Journal of nanomaterials*, 2016.
- [10] Lu, X., Xia, Y., Liu, M., Qian, Y., Zhou, X., Gu, N., & Zhang, F. (2012). Improved performance of diatomite-based dental nanocomposite ceramics using layer-by-layer assembly. *International Journal of Nanomedicine*, 2153-2164.
- [11] Pardiarto, B., & Islah, T. (2010). Potensi logam tanah jarang di Indonesia. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 5(3), 131-140.
- [12] Poernomo, H., Biyantoro, D., & Purwani, M. (2016). Kajian Konsep Teknologi Pengolahan Pasir Zirkon Lokal yang Mengandung Monasit, Senotim dan Ilmenit. *Eksplorium*, 37(2), 73-88.
- [13] Putri, A. K., Kirom, M. R., & Syarif, D. G. (2016). Sintesis ZrO₂ Nanopartikel Dari Pasir Zirkon Untuk Aplikasi Pada Model Radiator. *eProceedings of Engineering*, 3(2).
- [14] Rahmawati, F., Prijamboedi, B., Soepriyanto, S., & Ismunandar. (2012). SOFC composite electrolyte based on LSGM-8282 and zirconia or doped zirconia from zircon concentrate. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19, 863-871.
- [15] Ray, J. C., Park, D. W., & Ahn, W. S. (2006). Chemical synthesis of stabilized nanocrystalline zirconia powders. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12(1), 142-148.
- [16] Reddy, C. V., Babu, B., Reddy, I. N., & Shim, J. (2018). Synthesis and characterization of pure tetragonal ZrO₂ nanoparticles with enhanced photocatalytic activity. *Ceramics International*, 44(6), 6940-6948.
- [17] Rinanti, S. R., Pribadi, S. P., & Santosa, A. S. D. (2021). Peningkatan Kadar Zirkonium Oksida Dari Pasir Mineral Zirkon Dengan Cara Pelindian. *PIN Pengelolaan Instalasi Nuklir*, 13(24).

- [18] Subuki, I., Mohsin, M. F., Ismail, M. H., & Fadzil, F. S. M. (2020). Study of the Synthesis of Zirconia Powder from Zircon Sand obtained from Zircon Minerals Malaysia by Caustic Fusion Method. *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(4), 782-790.
- [19] Suseno, T., Suciyantri, M., & Suherman, I. (2015). Analisis prospek pemanfaatan zirkon dalam industri keramik, frit, bata tahan api dan pengecoran logam. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 11(2), 93-106.
- [20] Suseno, T. (2015). Analisis prospek pasir zirkon Indonesia di pasar dunia. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 11(1), 61-77.
- [21] Szamałek, K., Konopka, G., Zglinicki, K., & Marciniak-Maliszewska, B. (2013). New potential source of rare earth elements. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*.

