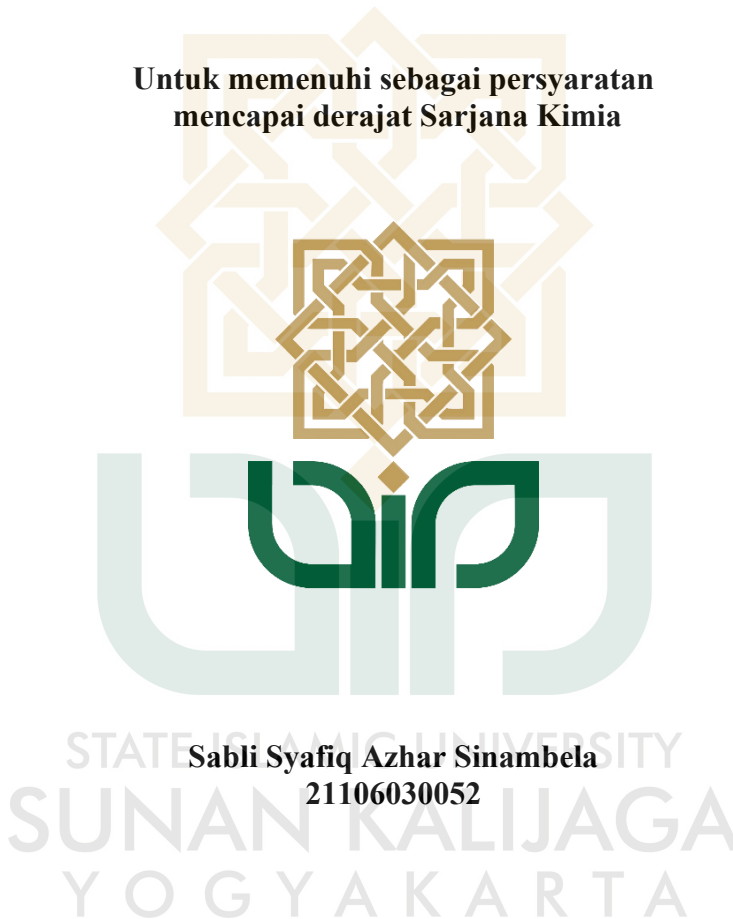


**SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL
MAGNESIA STABILIZED ZIRCONIA (MSZ) RENDAH
TENORM BERBASIS ZIRKONIUM OKSIKLORIDA
MENGUNAKAN TEMPLAT PEG-6000**

SKRIPSI

**Untuk memenuhi sebagai persyaratan
mencapai derajat Sarjana Kimia**



**Sabli Syafiq Azhar Sinambela
21106030052**

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-2545/Un.02/DST/PP.00.9/12/2025

Tugas Akhir dengan judul : SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL MAGNESIA STABILIZED ZIRCONIA (MSZ) RENDAH TENORM BERBASIS ZIRKONIUM OKSIKLORIDA MENGGUNAKAN TEMPLAT PEG-6000

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : SABL SYAFIQ AZHAR SINAMBELA
Nomor Induk Mahasiswa : 21106030052
Telah diujikan pada : Rabu, 10 Desember 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc
SIGNED

Valid ID: 694904f786a2e



Penguji I

Herry Poernomo
SIGNED

Valid ID: 694ac02b99170



Penguji II

Karmanto, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 69460da7c6b0c



Yogyakarta, 10 Desember 2025
UIN Sunan Kalijaga

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 694b562b39b7d

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi/ Tugas Akhir

Lamp :-

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

Di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Sabli Syafiq Azhar Sinambela
NIM : 21106030052
Judul Skripsi : Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel *Magnesia Stabilized Zirconia (MSZ)* Rendah TENORM Berbasis Zirkonium Oksiklorida Menggunakan Templat PEG-6000.

sudah dapat diajukan kembali kepada Fakultas Sains dan Teknologi Program Studi Kimia UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Kimia.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Pembimbing I


Didik Kristiyanto, S.Si., M.Sc
NIP. 198111112011011007

Yogyakarta, 20 Oktober 2025
Pembimbing II


Ir. Herry Poernomo, M.T
NIP. 195701051984021001

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Sabli Syafiq Azhar Sinambela
NIM : 21106030052
Jurusan : Kimia
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Zirkonia Terstabilkan Magnesium (MSZ) Rendah Tenorm Berbasis Zirkonium Oksiklorida Menggunakan Templat PEG-6000”** merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjana di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 23 Oktober 2025



Sabli Syafiq Azhar Sinambela
21106030052

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji Syukur kepada Allah SWT. karya kecil ini saya persembahkan
sebagai rasa terimakasih untuk:



Almamater tercinta
Jurusan Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta

Bapak, Ibu, Kakak, Adik, Keluarga Masa Depan yang selalu
memberikan doa, motivasi, dan dukungan untuk menyelesaikan tugas
akhir ini.

MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ۖ إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ۖ

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.
Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
(QS. Al-Insyirah: 5-6).
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat, taufik dan hidayah-Nya kepada kita semua. Sholawat serta salam tidak lupa kita haturkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW. yang telah membimbing kita dari zaman kegelapan menuju zaman terang-benderang. Alhamdulillah, penulis dapat dengan lancar melaksanakan dan menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel *Magnesia Stabilized Zirconia* (MSZ) Rendah TENORM Berbasis Zirkonium Oksiklorida Menggunakan Templat PEG-6000” dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Sains (S.Si) Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga.

Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi banyak rintangan dan cobaan yang dihadapi. Namun segala rintangan dan cobaan tersebut dapat dihadapi secara baik berkat dukungan, do'a dan motivasi yang diberikan oleh orang-orang terdekat. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT. Yang telah memberikan kelimpahan Rahmat, Nikmat, rezekinya dan memberikan keteguhan serta kesabaran dalam proses penyusunan skripsi.
2. Bapak Prof. Noorhaidi, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D sebagai Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
3. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. Selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
4. Ibu Prof. Dr. Maya Rahmayanti, S.Si. M.Si. Selaku Ketua Program Studi Kimia Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
5. Bapak Didik Krisdiyanto, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I Skripsi yang senantiasa meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan dan memberikan masukan selama proses penyusunan skripsi dapat berjalan dengan lancar.
6. Bapak Ir. Herry Poernomo, M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 Skripsi yang senantiasa meluangkan waktu untuk membimbing,

- mengarahkan dan memberikan masukan selama proses penyusunan skripsi sehingga dapat berjalan dengan lancar.
7. Seluruh Dosen Kimia Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga yang sudah memberikan ilmunya.
 8. Seluruh Staff Pengajar, Laboran dan karyawan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
 9. Seluruh civitas akademik UIN Sunan Kalijaga yang membantu mengembangkan keilmuan dan pengetahuan bagi peneliti.
 10. Seluruh staff karyawan, peneliti, dan teman-teman di Laboratorium BRIN Tanjung Bintang, Lampung yang telah memberikan arahan, saran, serta semangat dalam penyelesaian riset ini.
 11. Orang tua tercinta Bapak Ahmad dan Ibu Tri, terima kasih atas semua kerja keras, motivasi, kasih sayang, dukungan, dan do'a yang tiada henti engkau berikan. Semoga jerih payah Bapak, Ibu dibalas oleh Allah SWT. Dengan kesehatan, kenikmatan, dan kebahagiaan yang tiada hentinya.
 12. Kedua adikku tersayang Ikram dan Aska yang selalu memberikan semangat, dukungan dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi.
 13. Kekasihku tercinta dan tersayang dimanapun kamu berada, yang mau mendengarkan curhat keluh kesahku serta selalu memotivasi, memberikan dukungan dan semangat untuk segera menyelesaikan skripsi.
 14. Teman RZIS yang selalu memberikan semangat bagi penulis
 15. Anak abah teman satu bimbingan (Rafdi, Ridwan, Dina, Dewi, Endah, dan Sofi) yang senantiasa memberikan semangat, dukungan, serta motivasi.
 16. Adik tingkatku Aryas Hakim Indrajaya yang selalu memberikan motivasi dan semangat dalam penyusunan skripsi.
 17. Teman-teman scandium kimia 2021 yang telah berjuang bersama-sama, terima kasih atas kenangan yang telah kita ukir.
 18. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dalam proses penyusunan skripsi.

Penulis berharap dengan disusunnya skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi banyak orang dan menambah wawasan. Penulis menyadari dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Semoga Allah memberikan

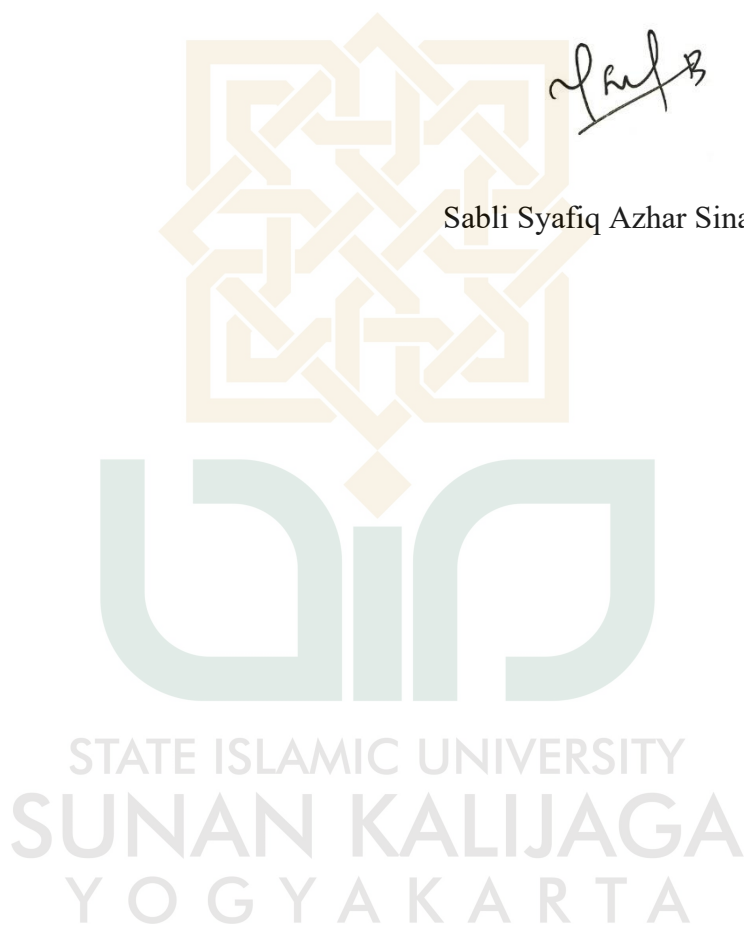
kemudahan untuk kita semua, *Aamiin Ya Rabbal 'Aalamiin*. Terima kasih.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 20 Oktober 2025



Sabli Syafiq Azhar Sinambela



DAFTAR ISI

SKRIPSI	i
HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
MOTTO	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
INTISARI	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Batasan Masalah	4
C. Rumusan Masalah	5
D. Tujuan Penelitian.....	5
E. Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
A. Tinjauan Pustaka	7
B. Landasan Teori	10
1. Nanopartikel.....	10
2. Zirkonium (Zr).....	12
3. Zirkonia (ZrO ₂).....	13
4. Zirkonium Oksiklorida	17
5. Magnesium Karbonat (MgCO ₃).....	19
6. Polietilen Glikol (PEG) 6000.....	20
7. <i>Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Material (TENORM)</i>	21
8. Metode Sonikasi	23
9. Karakterisasi Sampel	27
10. XRD (<i>X-Ray Diffraction Spectroscopy</i>).....	28
11. XRF (<i>X-Ray Fluorescence Spectroscopy</i>).....	31
12. FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>).....	32
13. SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	34
14. Spektrometer Alpa.....	36
15. Spektrometer Beta.....	37
C. Kerangka Berfikir dan Hipotesis Penelitian.....	38

BAB III METODE PENELITIAN	41
A. Waktu dan Tempat Penelitian	41
B. Alat-Alat Penelitian	41
C. Bahan Penelitian	41
D. Cara Kerja Penelitian.....	41
E. Teknik Analisis Data	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
A. Preparasi Zirkonil Hidroksida	44
B. Sintesis Nanopartikel MSZ.....	50
1. Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i>	52
2. Karakterisasi XRF	54
3. Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>	55
4. Karakterisasi Spektrometer Alpa Beta.....	57
C. Pengaruh Variasi Penambahan PEG terhadap Sifat dan Struktur Nanopartikel MSZ	58
1. Karakterisasi XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	59
2. Hasil Karakterisasi SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)..	61
3. Karakterisasi FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>)	63
4. Karakterisasi XRD (<i>X-Ray Diffraction Spectroscopy</i>)	65
D. Pengaruh Variasi Suhu Kalsinasi terhadap Sifat dan Struktur Nanopartikel MSZ	67
1. Karakterisasi XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	68
2. Karakterisasi SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>).....	70
3. Karakterisasi FTIR (<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>)	71
4. Karakterisasi XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	76
A. Kesimpulan.....	76
B. Saran	77
DAFTAR PUSTAKA.....	78
LAMPIRAN	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Struktur Kristal Pada Fase Zirkonia	16
Tabel 2.2 Penggunaan Zirkonia di Beberapa Bidang (Aldila, 2015) ..	16
Tabel 4. 1 XRF Zirkonium Oksiklorida ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) merk Sigma-Aldrich.....	45
Tabel 4.2 Hasil XRF Zirkonium Hidroksida	48
Tabel 4.3 Hasil Analisis XRF Magnesium Karbonat (MgCO_3).....	50
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil XRF ZOC dan MSZ.....	55
Tabel 4.5 Hasil Analisis FTIR ZOC dan MSZ.....	56
Tabel 4.6 Hasil Analisis Radioaktivitas Spektrometer Alpa Beta ZOC dan MSZ Semua Variasi.....	58
Tabel 4.7 Hasil XRF MSZ Variasi Penambahan PEG	59
Tabel 4.8 Hasil Analisis FTIR Variasi Penambahan PEG	63
Tabel 4.9 Hasil Analisis XRF Berdasarkan Variasi Suhu Kalsinasi ...	68
Tabel 4.10 Hasil Analisis FTIR Perbandingan Suhu.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram fasa ZrO dan Bentuk Struktur Kristal ZrO ₂ Fasa Kubik pada Suhu Tinggi (ht 2), Fasa Tetragonal pada Suhu Tinggi (ht 1), dan Fasa Monoklinik pada Suhu Ruang (rt) (Aldila, 2015).....	14
Gambar 2.2 Zirkonium Oksiklorida (Ristiyani, 2021).	18
Gambar 2.3 Skema Gaya Geser, Temperatur, dan Tekanan yang Timbul Saat Terjadi Ketidakstabilan Gelembung	25
Gambar 2. 4 Tipe Kaviasi Ultrasonik.....	27
Gambar 2.5 Skema Prinsip XRD (Setiabudi, et al., 2012).	29
Gambar 2.6 Proses Kerja X-Ray Fluorescence	32
Gambar 2.7 Prinsip Kerja Teknik FTIR (Setiabudi, et al., 2012).....	33
Gambar 2.8 Skema Fungsi Dasar dan Cara Kerja SEM (Anggraeni, 2008).....	35
Gambar 2.9 Skema Cacah Alpha.....	37
Gambar 2.10 Skema Cacah Beta (Prayitno, 2004).....	38
Gambar 4.1 Pola Difraksi XRD ZOC dan MSZ	53
Gambar 4.2 Spektrum FTIR ZOC dan MSZ	56
Gambar 4.3 Hasil Karakterisasi SEM Rasio 1:0	61
Gambar 4.4 Hasil Karakterisasi SEM a) Rasio 1:1 dan b) Rasio 1:3..	62
Gambar 4.5 Spektra IR MSZ variasi Penambahan PEG	64
Gambar 4.6 Pola Difraksi XRD variasi Penambahan PEG	66
Gambar 4.7 Hasil Karakterisasi SEM a) Suhu 900 °C dan b) Suhu 1000 °C	70
Gambar 4.8 Spektrum FTIR Suhu 900 °C dan 1000 °C	73
Gambar 4.9 Pola Difraksi XRD Perbandingan Suhu Kalsinasi.....	74

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan	84
Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian	85
Lampiran 3 Data Hasil Pengujian.....	86
Lampiran 4. Daftar Riwayat Hidup	89



INTISARI

SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL MAGNESIUM STABILIZED ZIRCONIA (MSZ) RENDAH TENORM BERBASIS ZIRKONIUM OKSIKLORIDA MENGUNAKAN TEMPLAT PEG-6000

Oleh:

Sabli Syafiq Azhar Sinambela
NIM 21106030052

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis nanopartikel *Magnesium Stabilized Zirconia* (MSZ) rendah TENORM berbasis zirkonium oksiklorida menggunakan templat polietilen glikol (PEG-6000), serta mengkaji pengaruh variasi perbandingan massa PEG-6000 dan suhu kalsinasi terhadap karakteristik material yang dihasilkan. Penambahan magnesium sebagai dopan berfungsi untuk menstabilkan fasa kristal zirkonia, khususnya mempertahankan fasa tetragonal–kubik pada suhu ruang melalui mekanisme substitusi ion Mg^{2+} ke dalam kisi ZrO_2 yang menghasilkan kekosongan oksigen, sehingga meningkatkan kestabilan struktur dan sifat mekanik material. Sintesis MSZ dilakukan melalui proses pengendapan, pemurnian, penambahan dopan magnesium, dan kalsinasi pada suhu 900 °C dan 1000 °C dengan variasi perbandingan massa PEG-6000 sebesar 1:0, 1:1, dan 1:3. Produk MSZ yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *X-ray diffraction* (XRD), *X-ray fluorescence* (XRF), *Fourier transform infrared* (FTIR), *scanning electron microscopy* (SEM), serta spektrometer alfa-beta untuk mengevaluasi struktur kristal, komposisi unsur, gugus fungsi, morfologi partikel, dan tingkat radioaktivitas. Hasil XRD menunjukkan bahwa pembentukan zirkonia terstabilkan magnesium ditandai dengan dominasi fasa tetragonal–kubik ZrO_2 dan kemunculan senyawa MgO – ZrO_2 , dengan peningkatan kristalinitas pada suhu kalsinasi 1000 °C. Analisis SEM memperlihatkan bahwa penambahan PEG-6000 berperan dalam mengendalikan pertumbuhan partikel dan menurunkan tingkat aglomerasi, sehingga menghasilkan ukuran partikel rata-rata di bawah 100 nm, khususnya pada variasi PEG-6000 1:3. Berdasarkan hasil XRF

dan spektrometer alfa-beta, kandungan ThO_2 dan UO_2 serta aktivitas radioaktif pada MSZ mengalami penurunan dibandingkan bahan baku awal, yang menunjukkan keberhasilan sintesis material zirkonia terstabilkan magnesium dengan karakteristik rendah TENORM. Dengan demikian, variasi perbandingan PEG-6000 dan suhu kalsinasi berpengaruh signifikan terhadap struktur kristal, morfologi, dan karakteristik radiologis nanopartikel MSZ.

Kata Kunci: MSZ, Zirkonia, TENORM, Polietilen Glikol 6000



ABSTRACT

Synthesis and Characterization of Low Tenorm Magnesium Stabilized Zirconia (MSZ) Nanoparticles Based on Zirconium Oxychloride Using PEG-6000 Template

By Sabli Syafiq Azhar Sinambela
NIM 21106030052

This study aims to synthesize low TENORM Magnesium Stabilized Zirconia (MSZ) nanoparticles based on zirconium oxychloride using polyethylene glycol (PEG-6000) as a template, and to study the effect of variations in the mass ratio of PEG-6000 and calcination temperature on the characteristics of the resulting material. The addition of magnesium as a dopant serves to stabilize the zirconia crystal phase, specifically maintaining the tetragonal-cubic phase at room temperature through the substitution mechanism of Mg^{2+} ions into the ZrO_2 lattice which produces oxygen vacancies, thereby increasing the structural stability and mechanical properties of the material. The synthesis of MSZ was carried out through the process of precipitation, purification, addition of magnesium dopant, and calcination at temperatures of 900 °C and 1000 °C with variations in the mass ratio of PEG-6000 of 1:0, 1:1, and 1:3. The resulting MSZ product was characterized using X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and alpha-beta spectrometer to evaluate the crystal structure, elemental composition, functional groups, particle morphology, and radioactivity levels. The XRD results showed that the formation of magnesium-stabilized zirconia was characterized by the dominance of the tetragonal-cubic ZrO_2 phase and the appearance of MgO-ZrO_2 compounds, with increasing crystallinity at a calcination temperature of 1000 °C. SEM analysis showed that the addition of PEG-6000 played a role in controlling particle growth and reducing the agglomeration rate, resulting in an average particle size below 100 nm, especially at the PEG-6000 1:3 variation. Based on the results of XRF and alpha-beta spectrometer, the ThO_2 and UO_2 content and radioactive activity in MSZ

decreased compared to the initial raw material, which indicates the successful synthesis of magnesium-stabilized zirconia material with low TENORM characteristics. Thus, variations in the PEG-6000 ratio and calcination temperature significantly affect the crystal structure, morphology, and radiological characteristics of MSZ nanoparticles.

Keywords: MSZ, Zirconia, TENORM, Polyethylene Glycol 6000



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pasir zirkon (ZrSiO_4) merupakan salah satu mineral strategis yang banyak ditemukan di Indonesia, khususnya di wilayah Bangka Belitung dan Kalimantan, sebagai mineral ikutan dari endapan timah dan emas aluvial. Keberadaan pasir zirkon ini memiliki nilai ekonomi tinggi karena dapat diolah menjadi berbagai produk turunan berbasis zirkonium, seperti zirkonia, bahan kimia zirkon, hingga material maju untuk industri nuklir dan non-nuklir (Suseno, 2015). Sejalan dengan hal tersebut, Peraturan Menteri ESDM No. 25 Tahun 2018 mewajibkan pemegang izin usaha pertambangan untuk melakukan pengolahan dan pemurnian produk samping pertambangan, termasuk konsentrat zirkon, guna meningkatkan nilai tambah dan pemanfaatannya di dalam negeri (Poernomo, et al., 2016)

Namun demikian, pemanfaatan pasir zirkon tidak terlepas dari permasalahan kandungan TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) yang berasal dari radionuklida deret uranium dan thorium. Selama proses pengolahan mineral zirkon, kandungan radionuklida tersebut dapat terakumulasi dan meningkatkan potensi paparan radiasi. Oleh karena itu, pengendalian radioaktivitas menjadi aspek penting dalam pengolahan zirkon dan turunannya. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) No. 9 Tahun 2009 menetapkan bahwa material dengan konsentrasi aktivitas radionuklida lebih dari 1 Bq/g harus mendapat perhatian khusus dan intervensi pengendalian. Kondisi ini menuntut pengembangan material berbasis zirkonium yang tidak hanya memiliki

performa tinggi, tetapi juga memenuhi kriteria rendah TENORM agar aman digunakan secara luas (BAPETEN, 2009).

Salah satu produk turunan zirkon yang banyak dikembangkan adalah zirkonia (ZrO_2), terutama dalam bentuk nanopartikel. Nanozirkonia memiliki berbagai aplikasi penting, mulai dari industri keramik, biomedis, hingga teknologi nuklir, karena sifatnya yang tahan korosi, stabil pada suhu tinggi, dan memiliki penampang serapan neutron yang rendah. Namun demikian, zirkonia murni memiliki keterbatasan utama berupa ketidakstabilan fasa kristal, di mana pada suhu ruang cenderung berada pada fasa monoklinik yang rapuh dan mudah mengalami retak akibat transformasi fasa selama pemanasan dan pendinginan (Nielsen, 2005). Ketidakstabilan ini menjadi kendala dalam pemanfaatan zirkonia untuk aplikasi lanjut yang memerlukan ketahanan mekanik dan termal tinggi.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, zirkonia umumnya distabilkan menggunakan dopan oksida logam, salah satunya magnesium oksida (MgO). Penambahan magnesium berfungsi sebagai stabilizer yang mampu mempertahankan fasa tetragonal atau kubik zirkonia pada suhu ruang melalui mekanisme substitusi ion Mg^{2+} ke dalam kisi ZrO_2 dan pembentukan kekosongan oksigen (Biyantoro, et al., 2017). *Magnesium Stabilized Zirconia* (MSZ) diketahui memiliki stabilitas termal dan mekanik yang lebih baik dibandingkan zirkonia murni, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi struktural dan fungsional. Meskipun demikian, keberhasilan stabilisasi sangat dipengaruhi oleh metode sintesis, homogenitas pencampuran dopan, ukuran partikel, serta kondisi perlakuan termal (Septawendar & Maryani, 2020).

Selain aspek stabilisasi fasa, sintesis nanopartikel zirkonia juga

menghadapi permasalahan aglomerasi partikel dan ketidakterkendalian ukuran. Ukuran partikel yang tidak seragam dapat menurunkan kualitas material dan mempengaruhi sifat fisikokimianya. Berbagai metode sintesis telah dikembangkan, seperti hidrotermal, sol-gel, mikroemulsi, dan pembakaran, namun sebagian metode tersebut memerlukan kondisi operasi yang kompleks atau berpotensi menghasilkan aglomerasi partikel. Oleh karena itu, penggunaan metode templat menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk mengontrol pertumbuhan partikel (Septawendar & Maryani, 2020)

Polietilen glikol (PEG-6000) merupakan salah satu agen templat yang banyak digunakan karena bersifat larut air, tidak toksik, mudah terdekomposisi saat kalsinasi, serta mampu membungkus partikel selama proses sintesis sehingga menghambat aglomerasi. Penambahan PEG-6000 diharapkan dapat menghasilkan nanopartikel MSZ dengan ukuran lebih kecil, distribusi lebih seragam, serta meningkatkan homogenitas distribusi dopan magnesium. Namun demikian, variasi perbandingan massa PEG-6000 yang digunakan dapat memberikan pengaruh berbeda terhadap struktur kristal, morfologi, dan komposisi material, sehingga perlu dikaji secara sistematis (Sofiyarningsih, et al., 2020)

Zirkonia untuk aplikasi biomedis telah diatur oleh standar ISO 13356 dan ASTM F1873 dengan batas aktivitas massa < 200 Bq/kg, sehingga menuntut material yang stabil dan aman secara radiologis. Stabilizer seperti yttrium oxide (Y_2O_3) umum digunakan untuk menghasilkan Y-TZP yang memiliki stabilitas fasa tetragonal, ketahanan retak tinggi, serta tingkat radioaktivitas lebih rendah dibandingkan jaringan tulang manusia (Vangkopoulou et al., 2009).

Dosis radiasi dari implan zirkonia murni bahkan dilaporkan hanya sekitar 0,01 mSv per tahun atau 1% dari batas paparan normal ICRP. Selain bidang biomedis, nano zirkonia juga dimanfaatkan dalam teknologi nuklir sebagai material adsorben pada sistem produksi radioisotop ^{99}Mo dan $^{99\text{m}}\text{Tc}$, salah satunya melalui pengembangan Poly Zirconium Compound (PZC) oleh PTRR BATAN bersama JAEA/Chiyoda. Berbagai nanomaterial berbasis zirkonia berukuran $< 20\text{ nm}$ dilaporkan mampu meningkatkan kapasitas penyerapan molibdenum akibat luas permukaan yang lebih besar dan interaksi ionik yang lebih efektif (Marlina et al., 2016).

Seiring meningkatnya kebutuhan terhadap nano zirkonia dan perlunya mitigasi dampak lingkungan dan kesehatan dari kandungan TENORM dalam pasir zirkon, para peneliti terus mencari metode sintesis yang ramah lingkungan dan efektif untuk memperoleh zirkonia berkualitas tinggi. Berbagai metode sintesis nano ZrO_2 telah dikembangkan, di antaranya metode hidrotermal, mikroemulsi, pembakaran, solvothermal, sol-gel, templat, biosintesis ramah lingkungan, serta teknik aging ultrasonik (Septawendar & Maryani, 2020).

B. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis nanopartikel Zirkonia Terstabilkan Magnesium (MSZ) menggunakan bahan dasar ZrOCl_2 dan templat PEG-6000.
2. Konversi zirkonium oksiklorida menjadi zirkonium hidroksida hanya dengan konsentrasi pH 9 menggunakan NH_4OH .
3. Penstabil yang digunakan yaitu magnesium karbonat dengan

konsentrasi MgO 5% dengan perbandingan massa ZrO_2 dari $\text{ZrO}(\text{OH})_2$.

4. Penggunaan *template* polimer PEG-6000 sebagai pengontrol ukuran partikel.
5. Variasi perbandingan massa penggunaan PEG-6000 meliputi 1:0, 1:1, dan 1:3.
6. Sintesis zirkonia menggunakan metode sonikasi sebagai produksi partikel berukuran nano.
7. Suhu sonikator yang digunakan yaitu 60 °C.
8. Variasi suhu kalsinasi yang digunakan meliputi 900°C dan 1000°C.

C. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana proses sintesis dan karakterisasi nanopartikel *Magnesia Stabilized Zirconia* (MSZ) rendah TENORM dengan basis zirkonium oksiklorida menggunakan templat PEG-6000 dengan instrumen XRD, XRF, FTIR, SEM, dan Spektrometer Alpa Beta ?
2. Bagaimana pengaruh variasi penambahan perbandingan massa PEG-6000 terhadap karakteristik nanopartikel MSZ ?
3. Bagaimana pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap struktur dan sifat nanopartikel MSZ ?

D. Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang ada, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis dan mengkarakterisasi nanopartikel *Magnesia*

Stabilized Zirconia (MSZ) rendah TENORM dengan basis zirkonium oksiklorida menggunakan templat PEG-6000 dengan instrumen XRD, XRF, FTIR, SEM, dan Spektrometer Alfa Beta.

2. Mengkaji pengaruh variasi penambahan perbandingan massa PEG-6000 terhadap karakteristik nanopartikel MSZ.
3. Mengkaji pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap struktur dan sifat nanopartikel MSZ.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif metode sintesis nanopartikel zirkonia terstabilkan magnesium (MSZ) berbasis zirkonium oksiklorida dengan tingkat radioaktivitas rendah.
2. Menjadi sumber informasi ilmiah mengenai pengaruh variasi rasio PEG dan suhu kalsinasi terhadap struktur kristal, morfologi, dan sifat fisis MSZ.
3. Memberikan referensi untuk penelitian yang memiliki arah yang sama.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil proses penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa

1. Sintesis nanopartikel *Magnesia Stabilized Zirconia* (MSZ) rendah TENORM berhasil dilakukan dengan basis zirkonium oksiklorida menggunakan metode templat PEG-6000. Hasil karakterisasi menggunakan XRD, XRF, FTIR, SEM, dan spektrometer alfa-beta menunjukkan bahwa material hasil sintesis telah mengalami transformasi sempurna dari prekursor klorida terhidrasi menjadi oksida zirkonia terstabilkan magnesium, memiliki struktur kristalin yang jelas, ukuran partikel skala nano, serta aktivitas radioaktivitas gross alfa dan beta yang berada di bawah batas TENORM.
2. Variasi penambahan perbandingan massa PEG-6000 berpengaruh signifikan terhadap karakteristik nanopartikel MSZ. Penambahan PEG-6000 mampu mengontrol pertumbuhan partikel dan meningkatkan homogenitas pencampuran dopan magnesium, yang tercermin dari ukuran partikel yang lebih seragam, distribusi MgO yang lebih homogen, serta kestabilan fasa kristal zirkonia. Rasio PEG-6000 1:3 memberikan karakteristik terbaik dibandingkan rasio 1:1 dan tanpa PEG.
3. Variasi suhu kalsinasi memengaruhi struktur kristal dan sifat nanopartikel MSZ. Peningkatan suhu kalsinasi dari 900 °C ke 1000 °C meningkatkan derajat kristalinitas dan kestabilan fasa zirkonia terstabilkan magnesium, yang ditunjukkan oleh dominasi fasa tetragonal–kubik dan berkurangnya fasa monoklinik. Suhu kalsinasi

1000 °C menghasilkan MSZ dengan struktur kristal yang lebih stabil dan sifat material yang lebih optimal.

B. Saran

Setelah melakukan penelitian ini, ada beberapa hal yang dapat dijadikan saran untuk penelitian selanjutnya, saran tersebut meliputi:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimalisasi tahapan proses pemurnian awal bahan baku zirkonium oksiklorida agar diperoleh kadar impuritas yang lebih rendah, sehingga proses sintesis dapat menghasilkan produk dengan kestabilan fasa dan morfologi yang lebih seragam.
2. Proses kalsinasi dan pengeringan sebaiknya dikontrol secara ketat pada waktu dan suhu yang konsisten untuk menjaga kestabilan fasa tetragonal dan menghindari terbentuknya fasa monoclinic yang dapat menurunkan sifat mekanik material.
3. Diperlukan analisis lebih lanjut mengenai hubungan antara tingkat radioaktivitas (nilai gross alpha dan beta) dengan kemurnian serta struktur kristal hasil sintesis, guna memperkuat dasar ilmiah bahwa material MSZ yang diperoleh benar-benar tergolong rendah TENORM dan aman untuk aplikasi industri maupun biomedis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdassah, M., 2020. Nanopartikel dengan Gelasi Ionik. Fakultas Farmasi Universitas Padjajaran, 15(1), (45-51).
- Abdullah, M., Yudistira, V., Juber, N. F. & Khairurrijal., &., 2008. Review : Sintesis Nanomaterial. Nanosains & Teknologi, 1(2), 33-57.
- Alaeian, 2014. *An Introduction to β -Ray Spectroscopy*. Stanford University.
- Aldila, H., 2015. Sintesis dan Karakterisasi Zirkonia dari Pasir Zirkon Alam dengan Variasi pH Pengendapan Menggunakan Metode Alkali Fusion Kopresipitasi. In Tesis.
- Anggraeni, N. D., 2008. Analisa SEM (Scanning Electron Microscopy) dalam Pemantauan Proses Oksidasi Magnetite Menjadi Hematite. Seminar Nasional-VII dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri.
- Anwer, et al., 2018. Scanning Electron Microscopy Analysis of Argon Plasma Treated Jute Fibre. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(7).
- Arifin, N. L., 2014. Pengaruh Sonikasi Bertahap dalam Proses Degradasi Kitosan terhadap Komposisi dan Properti Produk. Thesis: Magister Bidang Keahlian Teknologi Proses, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Aytimur, A., Uslu, I., Kocyigit, S. & Ozcan, F., 2012. Magnesia stabilized zirconia doped with boron, ceria and gadolinia. Ceramics International, 38(6), 3851-3856.
- Biyantoro, D., Sukarna, I. M. & Suyanto, A., 2017. Pemisahan Zirkonium (Zr) dan Hafnium (Hf) Memakai Campuran Solven TBP-D2EHPA dan Amberlite XAD-16.. Ganendra Majalah IPTEK Nuklir, 20(1), 9-21
<https://doi.org/10.17146/gnd.2017.20.1.3044>
- Borchert, H. et al., 2007. *Pd nanoparticles with highly defined structure on MgO as model catalysts: an FTIR study of the interaction with CO, O₂, and H₂ under ambient conditions*. J Catal, 247(2), 145-154.
<https://doi.org/10.1016/J.JCAT.2007.02.002>
- Candani, D., Ulfah, M., Noviana, W. & Zainul, R., 2018. Pemanfaatan Teknologi Sonikasi. In Physical Chemistry Laboratory, 26, 1-21.

- Chevalier, J. & Gremillard, L., 2009. Ceramics for Medical Applications: A Review. *Journal of the European Ceramics Society*, 29(7), 1245-1255.
- Conelly, D., 2014. *Options for removing uranium and thorium from zircon mineral sands*. Mineral Engineering Technical Services (METS).
- Garvie, R. C., Hannink, R. H. J. & Pascoe, R. T., 1975. Ceramic Steel? *Nature*. 258, 703-704.
- Gawende, M. B. et al., 2011. *Synthesis and Characterization of Versatile MgO-ZrO₂ Mixed Metal Oxide Nanoparticles and Their Application*. *Catalysis Sci Technol*, 1(9).
<https://doi.org/10.1039/c1cy00259g>
- Greenwood, N. N. & Earnshaw, A., 1997. *Chemistry of the Elements*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Hannink, R. H. J., Kelly, P. M. & Muddle, B., 2000. Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J Am Ceramic Soc*, 8(3).
- Hussein, A. I. et al., 2020. *Synthesis and properties of novel calcia-stabilized zirconia (Ca-SZ) with nano calcium oxide derived from cockle shells and commercial source for dental application*. *Applied Science (Switzerland)*, 10(17), 10-11.
<https://doi.org/10.3390/APP10175751>
- Isik, M. & Gasanly, N., 2018. Trap Characterization by Photo-Transferred Thermoluminescence in MgO Nanoparticles.. *Physica B* 537:301-305.
<https://doi.org/10.1016/J.PHYSB.2018.02.041>
- Lopez, J. A. O., Cruz Pérez, A. E., Hernández Cruz, M. G., Morales, M. E. O., Meraz, E. A. del Á., & Gómez, C. E. (2025). *Synthesis and characterization of MgO-ZrO₂ mixed oxides prepared by the sol-gel method*. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20:63.
<https://doi.org/10.1186/s40712-025-00275-y>
- Manhique, A., 2003. OPTIMISATION OF ALKALI-FUSION PROCESS FOR ZIRCON SANDS: A KINETIC STUDY OF THE PROCESS.. Department of Chemistry :Faculty of Natural and Agricultural Sciences.
- Meilia, N., 2019. Penetapan Kadar Asam Mefenamat dalam Tablet dengan Metode Spektroskopi FTIR (Fourier Transform Infrared) Kombinasi Kemometrik. Universitas Muhammadiyah Purwokerto.

- Mohanraj, V. & Chen, Y., 2006. Nanoparticles : A Review. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 5:1.
- Nandiyanto, A. B. D., 2017. *Pengantar Sains dan Teknologi Nano*. Bandung: UPI Press.
- Nielsen, R., 2005. "Zirconium and Zirconium Compounds" in *Ullmann's Encyclopedian of Industrial Chemistry*. Weinheim.
- Nikoofar, K. & Khademi, Z., 2015. A review on green Lewis acids: zirconium(IV) oxydichloride octahydrate ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) and zirconium(IV) tetrachloride (ZrCl_4) in organic chemistry.. *Research on Chemical Intermediates*, 42(5), 3929-3977.
- Novianti, H. R. et al., 2023. Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Zirkonia Terstabilkan Kalsium (CSZ) Berbasis Prekursor Zirkonium Hidroksida dari Pasir Zirkon Menggunakan Templat Etilen Glikol.. *Chimica et Natura Acta*, 11(1).
- Nuryadin, A., 2015. SINTESIS ZrO_2 DARI PASIR ZIRKON ALAM KERENG PANGI DENGAN METODE ALKALI FUSION-KOPRESIPITASI. Thesis Magister Program Study On Material Physics, 1-175.
- Piconi, C. & Maccauro, G., 1999. Zirconia as a Ceramic Biomaterial. *Biomaterials*, 20(1), 1-25.
- Poernomo, H., Biyantoro, D. & Purwani, M. V., 2016. Kajian Konsep Teknologi Pengolahan Pasir Zirkon Lokal yang Mengandung Monasit, Senotim, dan Ilmenit. *Eksplorium*, 37(2), 73-88.
<https://doi.org/10.17146/eksplorium.2016.37.2.3054>
- Prayitno, T. A., 2004. STUDI DISTRIBUSI RADIOAKTIVITAS GROSS α DAN β PADA SAMPEL LINGKUNGAN PERAIRAN SUNGAI SEMENANJUNG MURIA MENGGUNAKAN ALPHA DAN BETHA COUNTER. Skripsi: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
- Rachmawati, H. et al., 2007. Chemical Modification of Interleukin10 with Mannose 6-Phosphate Groups Yield a Liver-Selective Cytokine. *DMD*, 35, 814-821.
- Rahman, R., 2008. Pengaruh Proses Pengeringan, Anil, dan Hidrotermal Terhadap Kristalinitas Nanopartikel TiO_2 Hasil Proses Sol-Gel. Fakultas Teknik Departemen Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
- Rajesh, G., Akilandeswari, S., Senthil Kumar, P., Uma Shankar, V., Ramya, M., & Nirmala, K. (2023). The consequence of Mg and Mn doping on the structure, photoluminescence, morphology, and photocatalytic performance properties of t,m- ZrO_2

- nanoparticles fabricated by the co-precipitation method. *Applied Nanoscience*, 13, 3839–3851.
<https://doi.org/10.1007/s13204-022-02579-3>
- Rapperpart, E. J., 1995. Determination Process in Zirconium. *Acta Metallurgi*, 3, 162-163.
- Ristiyani, M., 2021. Sintesis Prototipe Produk Zirkonil Klorida Lokal Derajat Industri. Skripsi: Jurusan Kimia, Universitas Islam Indonesia, 9-10.
- Ristiyani, M., 2021. Sintesis Prototipe Produk Zirkonil Klorida Lokal Derajat Industri. Skripsi: Program Studi Kimia UII, 1-59.
- Rochman, A., 2021. Spektroskopi Vibrasional Teori dan Aplikasinya untuk Analisis Farmasi. Yogyakarta: UGM PRESS.
- Sa'adah, N., 2020. Pengaruh Ultrasonikasi Terhadap Karakteristik Nanopartikel Ekstrak Pegagan (*Centella asiatica* L.)
<http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Sakinah, 2019. PENGGUNAAN METODE SONIKASI DALAM EKSTRAKSI PEKTIN KULIT BUAH NAGA (*Hylocereus polyrhizus*) DENGAN KONSENTRASI PELARUT ASAM ASETAT DAN LAMA WAKTU EKSTRAKSI. In Skripsi Teknologi Hasil Pertanian.
- Samin, D., 2022. Synthesis and Characterization of TENORM Free Nano Zirconia from Zircon Sand. *Journal of the Indian Chemical Society. Journal of the Indian Chemical Society*.
- Sarjono, Rahmadi, G., Yusnitha, E. & Sukarsono., 2017. PREPARASI KERNEL CeO₂-STABILIZED ZrO₂ TERSINTER SEBAGAI MATERIAL ANALOG KERNEL UO₂. Hasil - Hasil Penelitian EBN, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, 1-15.
- Septawendar, R. & Maryani, E., 2020. Sintesis Bahan Monoklinik Zirkonia Berukuran Nano dari Prekursor Zirkonium Klorida Menggunakan Templat Polietilen Glikol. *Chimica et Natura Acta*, 8(1), 17-25.
- Setiabudi, A., Hardian, R. & Muzakir, A., 2012. Karakterisasi Material Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia. Bandung: UPI Press.
- Setyadji, M. & Sulistyono, B., 2013. Migrasi Zirkonium pada Proses Desorpsi dalam Tumpukan Diam Resin Anion DOWEX-1X8. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 9, 1-54.
- Setyati, P., 2016. Sintesis dan Karakterisasi Zirkonia (ZrO₂) dari Pasir Zirkon Belitung Sebagai Keramik. Skripsi: Fakultas Matematika

dan Ilmu Pengetahuan Alam.

- Sofiyarningsih, N., Suhandi & dan Septawendar, R., 2020. Pengaruh Jenis Prekursor terhadap Karakteristik Mineralogi dan Mikrostruktur Zirkonia Nano dengan Metode Templat.. *Keramik Dan Gelas Indonesia*, 29, 45-46.
- Sofiyarningsih, S., Maryani, E. & Marlina, L., 2020. Sintesis Nanopartikel Zirkonia (ZrO_2) dari Zirkon Alam dengan Metode Sol-Gel Menggunakan PEG-6000 sebagai Templat. *Jurnal Kimia Valensi*, 6(1).
- Subuki, I., Mohsin, M. F., Ismail, M. H. & Suriani, F., 2020. Study of the Synthesis of Zirconia Powder from Zircon Sand obtained from Zircon Minerals Malaysia by Caustic Fusion Method. *Indones. J. Chem*, 20(4), 782-790
<https://doi.org/10.22146/ijc.43936>
- Suseno, T., 2015. ANALISIS PROSPEK PASIR ZIRKON INDONESIA DI Prospect Analysis of Indonesian Zircon Sand in the World Market. *Teknologi Mineral dan Batubara*, 11, 61-77.
- Tatinting, G. D., Aritonang, H. F. & Wuntu, A. D., 2022. Sintesis Nanopartikel Fe_3O_4 -Polietilen Glikol (PEG) 6000 dari Pasir Besi Pantai Sebagai Adsorben Logam Kadmium (Cd).. *Chemistry Progress*, 14(2).
- Thoms, H., Epple, M. & Reller, A., 1997. The Thermal Decomposition of Magnesium Alcohollates to Magnesia (MgO): Studies by IR and Thermal Analysis. *Solid State Ionic*, 101-103.
[https://doi.org/10.1016/s0167-2738\(97\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0167-2738(97)00230-0)
- Turning, S., Handini, T., Biyantoro, D. & Samin., &, 2016. Ekstraksi Zr Dan Hf Menggunakan Campuran Ekstraktan TBP dan Cyanex 921.. *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, 19(1), 27-35.
- Utami, Z. K., 2023. Sintesis dan Karakterisasi Nano Zirkonia Rendah TENORM Menggunakan Templat Polietilen Glikol 4000. Skripsi: Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia.
- Venable, F. P., 1922. Zirconium and its Compounds. Chemical Catalogue Company.
- Vangkopoulou, T., Koutayas, S. O., Koidis, P., Strub, R., 2009. Zirconia in Dentistry: Part 1: Discovering the Nature of an Upcoming Bioceramic. *Clinical Research*.
- Wahyudi, K. et al., 2021. Low-calcination temperatures of magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ) nanoparticles derived from local zirconium silicates. *Material Research Express*,

8(045022).

<https://doi.org/10.1088/2053-1591/abf9ce>

Wang, X. M. & Xiao, P., 2006. Solvothermal synthesis of titania-zirconia composite. *Journal of Material Research*, 21(2).

Wijayanti, R. B. et al., 2021. Preparation of Magnesia Partially Stabilized Zirconia Nanomaterials from Zirconium Hydroxide and Magnesium Carbonate Precursors Using PEG as a Template. *Crystal*, 11(635), 1-12.

<https://doi.org/10.3390/cryst11060635>

Zawrah, M. F., Khattab, R. M. & El-Kheshen, A. A., 2018. Stabilization of tetragonal zirconia using magnesia. *Ceramics International*, 44(8), 9522-9528.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.172>

