



ARTIKEL PENELITIAN

Pengaruh variasi suhu dan waktu pemanasan terhadap struktur kristal, komposisi kimia, morfologi dan kadar logam pada sintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode hidrotermal

Widya Hardiantika¹, Suprihatin¹, Widi Astuti^{2,*}, Tri Haryono², Istihanah Nurul Eskani³

¹Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro, Bandar Lampung, Lampung, 35141, Indonesia

²Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Ir. Sutami Km. 15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

³Balai Besar Kerajinan dan Batik, Jl. Kusumanegara No.7, Semaki, Kec. Umbulharjo, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta 55166

Disubmit 21 Agustus 2022; direvisi 19 Desember 2022; diterima 23 Desember 2022



OBJECTIVES Synthesis of ZnO nanoparticles from steel industry waste has been carried out using the hydrothermal method. This study aims to determine the effect of temperature (120, 150, and 200 °C) and heating time (1, 3, and 6 hours) of hydrothermal process on the chemical composition, crystal structure, particle size, and morphology of product. **METHODS** The characterizations used are Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES), X-Ray Fluorescence (XRF) X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). **RESULTS** The hydrothermal process produces nanoparticles with high purity and particle size 100 nm with an optimum hydrothermal temperature of 150°C for a holding time of 3 hours. **CONCLUSIONS** From the results of XRF characterization, it is known that the Zn content is the most dominant, which is 98.434%. Furthermore, the XRD characterization obtained a pure phase of ZnO, namely zincite with a value of 2θ of 36.23 ° and a particle size of 33.36 nm with a morphology of hexagonal rods (nanorods) as obtained in the FE-SEM characterization.

KEYWORDS hydrothermal; nanoparticle; synthesis; ZnO

TUJUAN Sintesis nanopartikel ZnO dari limbah industri baja telah dilakukan menggunakan metode hidrotermal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu (120,

150 dan 200 °C) dan waktu pemanasan (1, 3, dan 6 jam) terhadap komposisi kimia, struktur kristal, ukuran partikel dan morfologi dari produk ZnO yang dihasilkan. **METODE** Karakterisasi yang digunakan ialah *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES), *X-Ray Fluorescence* (XRF) *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). **HASIL** Proses hidrotermal menghasilkan produk nanopartikel dengan kemurnian tinggi dan ukuran partikel 100nm dengan suhu hidrotermal yang optimum adalah 150 °C selama waktu penahanan 3 jam. **KESIMPULAN** Dari hasil karakterisasi XRF diketahui bahwa kadar Zn adalah yang paling dominan yaitu sebesar 98,434%. Selanjutnya, pada karakterisasi XRD diperoleh fasa murni ZnO yaitu *zincite* dengan nilai 2θ sebesar 36,23 ° dan ukuran partikel sebesar 33,36 nm dengan morfologi yang terbentuk batang heksagonal (*nanorods*) seperti yang diperoleh pada karakterisasi FE-SEM.

KATA KUNCI hidrotermal; nanopartikel; sintesis; ZnO

1. PENDAHULUAN

ZnO merupakan salah satu bahan semikonduktor berbasis oksida logam yang cukup menarik karena memiliki sifat yang unik seperti memiliki radiasi UV yang tinggi, memiliki stabilitas kimia yang sangat baik dan kemudahan dalam pembuatannya (Vaseem dkk. 2010). Oksida logam ini memiliki sifat yang ramah lingkungan, tidak beracun dan tahan terhadap korosi. Material ini telah banyak diteliti aktivitasnya sebagai antijamur, antibakteri, antiinflamasi, antimikroba dan antioksidan, antikanker, tabir surya, fotoanode pada sel surya, fotokatalis, antikorosi dan sensor gas. Material ZnO kebanyakan digunakan pada aplikasi elektronik seperti LED, sensor, dan juga sel surya. Karakteristik dan kinerja ZnO sangat bergantung pada ukuran partikel, bentuk, dan morfologi.

Seng oksida dapat disintesis dengan berbagai metode yaitu metode sol-gel, hidrotermal, presipitasi, *chemical vapor*

*Korespondensi: widi.mineral@gmail.com

deposition (CVD), dip coating, mechanochemical-milling, electro chemical deposition, metode ablasi laser, reduksi menggunakan ekstrak tanaman dan metode lainnya (Siswanto dkk. 2017; Xia dkk. 2003). Metode sintesis ZnO secara umum dilakukan dengan metode *bottom-up*, yaitu metode sintesis partikel secara kimia yang akan menghasilkan partikel dari sejumlah material awal (prekursor). Secara umum sintesis nanopartikel ZnO menggunakan prekursor berupa senyawa garam seng seperti seng nitrat ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$), seng klorida (ZnCl_2), dan seng asetat ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$), serta menggunakan plat logam seng.

Sumber seng sebagai bahan baku sintesis ZnO terdapat pada berbagai macam material sebagai bahan baku tidak murni. Salah satunya berasal dari limbah industri baja galvanis yang pada produksinya menggunakan tanur busur listrik yang menghasilkan limbah padat berupa debu yang biasa disebut sebagai *electric arc furnace dust* (EAFD) yang mengandung seng dengan kadar yang beragam tetapi potensial untuk diolah kembali. Kandungan seng (Zn) dalam EAFD dapat mencapai 50 - 60% (Astuti dkk. 2020).

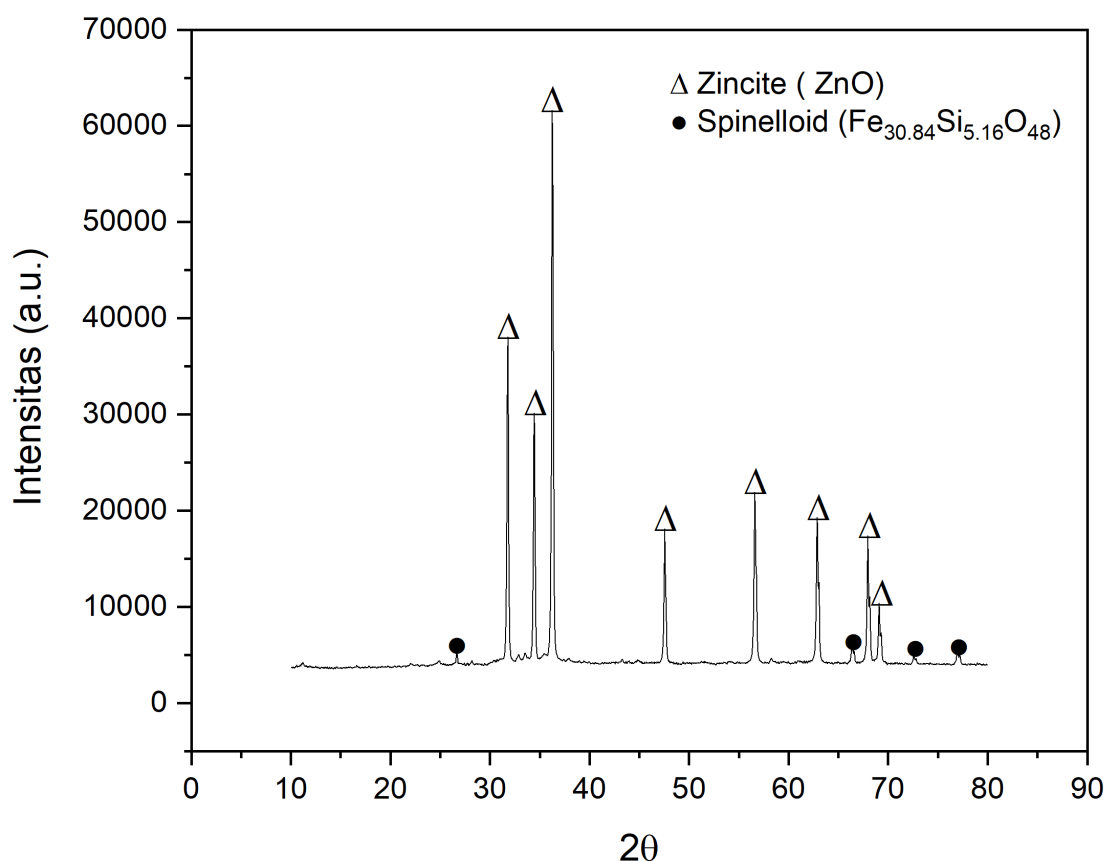
Proses sintesis nanopartikel ZnO dari EAFD sebagai bahan baku dapat dilakukan melalui beberapa metode, salah satunya adalah metode hidrotermal. Metode hidrotermal dilakukan untuk mensintesis nanopartikel ZnO dari prekursor Zn yang berasal dari hasil pelindian EAFD. Metode hidrotermal memiliki beberapa keunggulan dalam preparasi ya-

itu nanopartikel dapat dibentuk langsung dari larutan, bahannya berbentuk kristal atau amorf tergantung pada suhu, ukuran partikel dikendalikan oleh suhu hidrotermal, sintesis dapat dilakukan pada suhu rendah dan dalam kasus tertentu membentuk bubuk yang tidak memerlukan penggilingan dan kalsinasi (Dawson 1988). Penelitian tentang sintesis nanopartikel ZnO dari EAFD menggunakan metode hidrotermal belum banyak ditemukan di literatur pada penelitian sebelumnya, sehingga pada penelitian ini dilakukan sintesis nanopartikel ZnO dari EAFD menggunakan kombinasi proses hidrometalurgi melalui pelindian EAFD menggunakan asam asetat dan pengendapan alkali yang dilanjutkan dengan sintesis ZnO dari larutan hasil pelindian dan pengendapan alkali menggunakan metode hidrotermal untuk mempelajari pengaruh waktu dan suhu hidrotermal terhadap karakteristik nanopartikel ZnO yang dihasilkan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah industri baja yaitu EAFD yang berasal dari industri peleburan baja galvanis di daerah Jawa Barat. Bahan kimia yang digunakan adalah CH_3COOH (Merck), NaOH (Merck) dan aquadest (teknis).



GAMBAR 1. Pola XRD EAFD

TABEL 1. Data hasil pengamatan kondisi operasi pada saat *abrasive perforation*.

Bahan Baku	Unsur (%)							
	Zn	P	K	Ca	Mn	Fe	Er	Pb
EAFD	94,53	0,28	0,10	0,34	0,31	2,56	0,10	1,56

2.2 Sintesis nanopartikel ZnO

Sintesis nanopartikel ZnO dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu pelindian, pengendapan dan pemanasan dengan metode hidrotermal. EAFD yang digunakan sebagai bahan baku dikarakterisasi terlebih dahulu menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF, PANalytical μ psilon3^{XLE}) untuk mengetahui kandungan seng dan logam lainnya di dalam EAFD dan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD, PANalytical X'Pert3 Powder) untuk mengetahui jenis senyawa seng dan logam lainnya yang terdapat dalam EAFD.

Selanjutnya, proses pelindian dilakukan menggunakan asam asetat (CH_3COOH) 1 M yang dipanaskan di atas kompor listrik putar magnetik pada suhu 80°C selama 5 jam. Setelah itu dilakukan pemisahan filtrat dan residu hasil pelindian. Kemudian dilakukan proses pengendapan menggunakan NaOH 10% sehingga diperoleh pH 7 dengan tujuan untuk menghilangkan unsur Fe dan pengotor lainnya yang ada di dalam larutan hasil pelindian tersebut melalui pengendapan alkali. Setelah diperoleh pH 7, campuran larutan dan padatan dari pengendapan alkali tersebut disaring dan diambil filtratnya kemudian ditambahkan kembali larutan NaOH 10% sehingga mencapai pH 8. Setelah diperoleh pH 8, maka dilakukan sintesis nanopartikel ZnO menggunakan metode hidrotermal terhadap campuran larutan dan padatan hasil pengendapan pH 8 menggunakan *teflon autoclave*.

Proses hidrotermal dilakukan dengan variasi suhu 120, 150 dan 200°C serta variasi waktu 1, 3 dan 6 jam. Setelah waktu yang ditentukan tercapai, dilakukan pemisahan padatan cair dengan penyaringan menggunakan kertas saring Whatman No. 42. Padatan ZnO yang diperoleh dari metode hidrotermal dikarakterisasi menggunakan XRF, XRD dan Field Emission-Scanning Electron Microscopy (FESEM, Quattro S).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi EAFD

Bahan material yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah industri baja yang didalamnya terdapat kandungan seng (Zn) yang tinggi yaitu sebesar 94,53% dan beberapa logam lainnya seperti Fe, Pb dan logam lainnya yang memiliki kandungan unsur yang tidak terlalu besar seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Dari data XRD yang terlihat pada Gambar 1 diperoleh bahwa seng (Zn) yang terkandung di dalam bahan baku EAFD dalam bentuk *zincite* (ZnO). Selain ZnO, terdapat senyawa lain yaitu *spinelloid* ($\text{Fe}_{30,84}\text{Si}_{5,16}\text{O}_{48}$).

3.2 Pelindian seng dari EAFD menggunakan asam asetat dan pengendapan $\text{Zn}(\text{OH})_2$ dari filtrat pelindian

Proses pelindian seng dari EAFD dilakukan menggunakan asam asetat (CH_3COOH) 1 M dan pulp density 10% w/v (100 gram EAFD dalam 1 liter reagen pelindian) pada suhu 80 °C selama 5 jam dengan kecepatan pengadukan sebesar 500

rpm. Pada pelindian seng dari EAFD dilakukan perhitungan persen *recovery* pelindian unsur Zn yaitu persentase berat unsur Zn yang terlarut dalam reagen pelindian dibandingkan dengan berat unsur Zn yang terkandung di dalam EAFD.

Setelah pelindian, dilakukan proses pengendapan sebanyak dua kali. Pengendapan pertama pada pH 7 dilakukan untuk menghilangkan kandungan unsur pengotor seperti Fe dan Pb. Terlihat seperti Tabel 2 diperoleh persen ekstraksi sebesar 80,40% pada unsur Zn yang terlarut saat proses pelindian dengan asam asetat. Rekoveri pelindiannya masih belum begitu besar disebabkan oleh beberapa parameter pelindian yang digunakan. Suhu, waktu, konsentrasi reagen pelindian dan *pulp density* merupakan parameter yang berpengaruh terhadap rekoveri pelindian.

Namun, pada saat dilakukan pengendapan pH 7 persen ekstraksi unsur Zn menurun menjadi sebesar 29,61% unsur Zn yang tersisa dari hasil pengendapan pH 7 tersebut. Hal ini menyatakan bahwa jumlah kandungan logam unsur Zn dari dua perlakuan tersebut mengalami penurunan dikarenakan adanya ion Zn yang akhirnya terendapkan menjadi $\text{Zn}(\text{OH})_2$. Rekoveri Zn setelah pengendapan pertama sangat kecil, hal ini terjadi karena unsur Zn merupakan unsur yang paling dominan dalam filtrat sehingga proses pengendapan pengotor pasti membutuhkan kehati-hatian pada saat mengatur pH pengendapan. pH 7 masih memungkinkan untuk mengendapkan Zn bersama pengotornya.

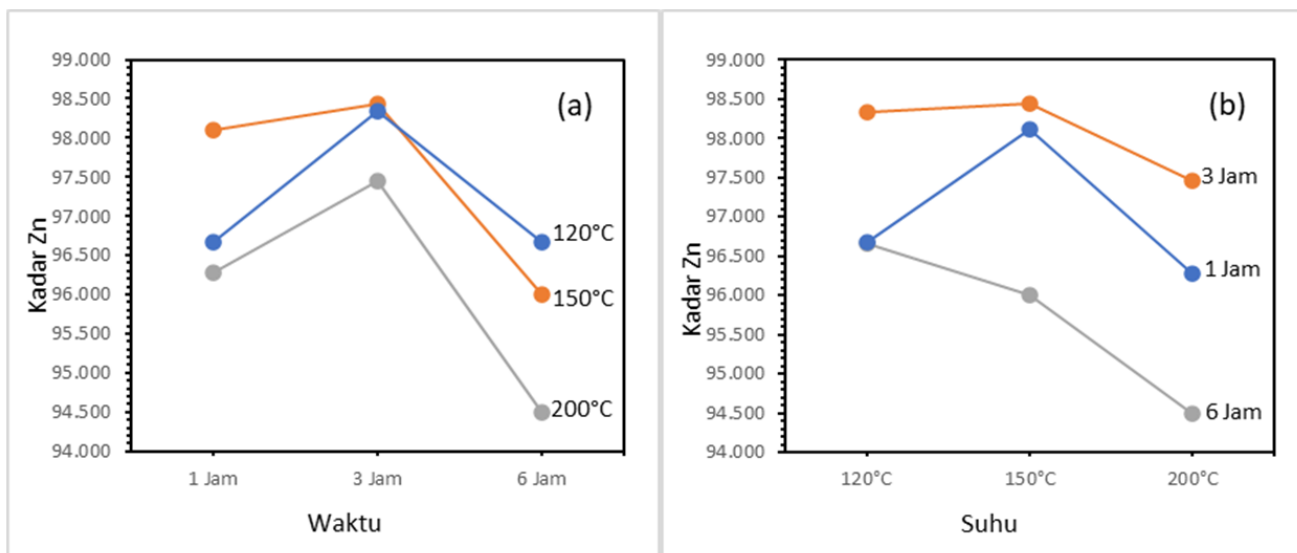
3.3 Pengaruh suhu dan waktu hidrotermal pada komposisi kimia nanopartikel ZnO

Pada Gambar 2 terlihat bahwa variasi suhu dan waktu pemanasan juga berpengaruh pada jumlah komposisi kimia unsur Zn di dalam sampel. Kurva relatif menurun di waktu 6 jam pada semua suhu seperti Gambar 2 (a), namun jumlah komposisi kimia Zn terlihat meningkat pada waktu 3 jam di setiap suhunya. Hal ini menyatakan bahwa variasi waktu selama 3 jam merupakan waktu yang optimum untuk sintesis nanopartikel ZnO dengan metode hidrotermal (El-Rafei dan Zawrah 2014).

Kadar produk ZnO juga dapat diketahui dari warna produk yang dihasilkan. Produk nanopartikel ZnO seperti terlihat pada Gambar 3 berwarna putih dan coklat muda. Produk dengan kadar ZnO yang lebih tinggi berwarna lebih putih dibandingkan dengan produk dengan kadar ZnO yang lebih rendah.

TABEL 2. Analisis data hasil pengamatan kondisi operasi pada saat *abrasive perforation* bagian 1.

Sampel	Recovery Zn (%)
Filtrat Pelindian	80,40
Filtrat setelah pengendapan pH 7	29,61



GAMBAR 2. Hubungan variasi suhu dan waktu pemanasan pada komposisi kimia unsur Zn dengan (a) perbandingan suhu terhadap semua waktu (b) perbandingan waktu terhadap semua suhu

3.4 Pengaruh suhu dan waktu hidrotermal pada struktur kristal nanopartikel ZnO

Pada hasil karakterisasi XRD didapatkan dua fasa yang terkandung pada sampel yang diteliti, yaitu fasa *zincite* (ZnO) dengan nomor *Powder Diffraction File Database* (PDF) 36-1451 (Mc Murdie 1986) dengan kode referensi *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) 10137 dan fasa *hematite* (Fe₂O₃) dengan nomor PDF 33-0664 (Natl. Bur. Stand. 1981) dengan kode ICSD 14856. Digunakannya nomor PDF dan kode referensi ICSD tersebut karena memiliki puncak yang sesuai antara hasil penelitian dengan standar. Hasil difraktogram pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 terlihat semua sampel menghasilkan senyawa ZnO yaitu *zincite* (ZnO) dengan intensitas tertinggi 2θ sebesar 36,31° pada suhu 120 °C; 36,13° pada suhu 150 °C dan 36,36° pada suhu 200 °C. Serta terlihat puncak senyawa

pengotor *hematite* (Fe₂O₃) dengan intensitas 2θ sebesar 69,05° pada suhu 120 °C; 69,16° pada suhu 150 °C dan 69,10° pada suhu 200 °C.

Pada Gambar 5 (a) dan (b) terlihat bahwa semua sampel menghasilkan puncak senyawa ZnO murni yaitu *zincite* (ZnO). Pada waktu 3 jam dihasilkan intensitas tertinggi 2θ sebesar 36,36° pada suhu 120 °C; 36,23° pada suhu 150 °C dan 36,21° pada suhu 200 °C, sedangkan pada waktu 6 jam dihasilkan intensitas tertinggi 2θ sebesar 36,31° pada suhu 120 °C; 36,31° pada suhu 150 °C dan 36,36° pada suhu 200 °C.

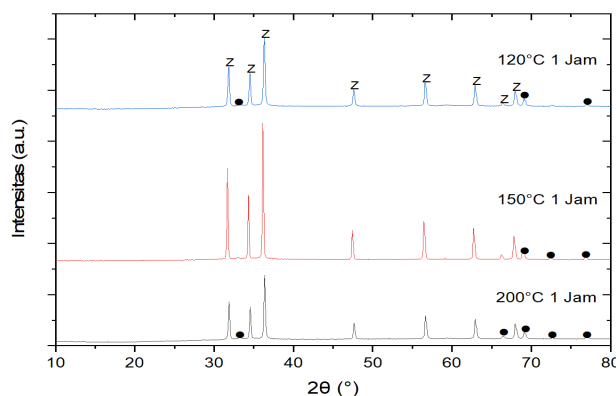
3.5 Pengaruh suhu dan waktu hidrotermal pada ukuran partikel ZnO

Hasil analisis XRD juga dapat digunakan untuk mengetahui ukuran partikel dari *zincite* yaitu dengan cara menganalisis puncak tertinggi menggunakan *microsoft excel*. Puncak-puncak tersebut digunakan untuk mencari nilai FWHM dimana nilai FWHM digunakan untuk menghitung ukuran partikel menggunakan persamaan *Scherrer*. Hasil analisis ukuran partikel menggunakan persamaan *Scherrer* dapat dilihat pada Tabel 3.

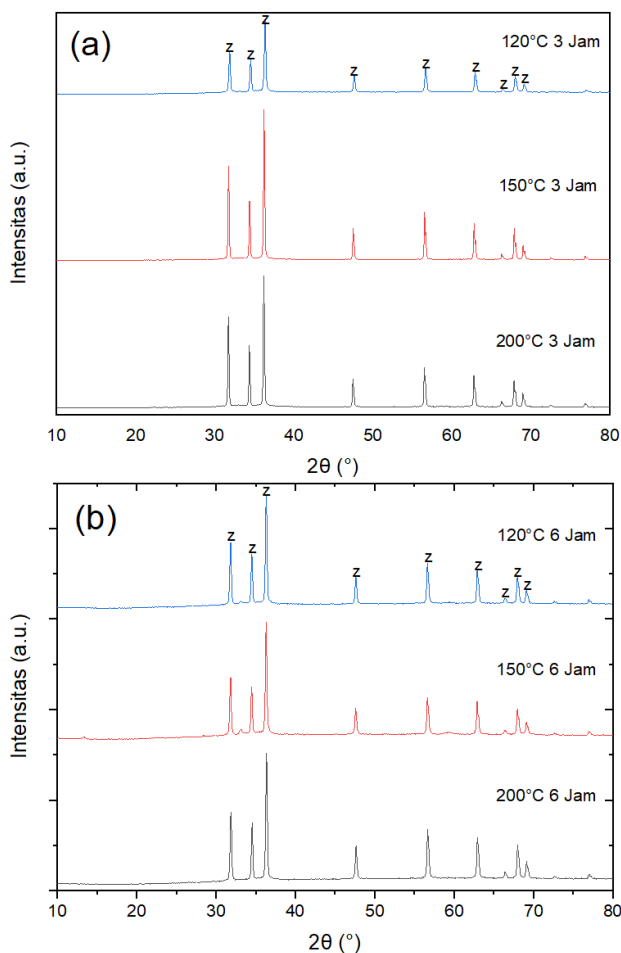
Berdasarkan Tabel 3 memperlihatkan bahwa nilai FWHM terbesar terdapat pada sampel dengan suhu 200 °C



GAMBAR 3. Produk nanopartikel ZnO



GAMBAR 4. Grafik XRD metode hidrotermal selama 1 jam, suhu 120, 150 dan 200 °C dengan Z = *zincite* (ZnO) dan • = *hematite* (Fe₂O₃)



GAMBAR 5. Grafik XRD (a) metode hidrotermal selama 3 jam, suhu 120, 150 dan 200 °C, (b) metode hidrotermal selama 6 jam, suhu 120, 150 dan 200 °C dengan Z = zincite (ZnO)

selama 3 jam yaitu sebesar 0,28 dan nilai FWHM terkecil terdapat pada sampel dengan suhu 150 °C selama 6 jam yaitu sebesar 0,19. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin kecil nilai FWHM yang diperoleh maka ukuran partikel akan semakin besar. Untuk fasa *zincite* ukuran partikel yang dihasilkan relatif sama dengan nilai ukuran partikel terkecil sebesar 30,93 pada sampel dengan suhu 200 °C selama 3 jam. Hasil pengukuran partikel terhadap suhu dan waktu cukup berpengaruh. Semakin tinggi suhu dan semakin lama proses pemanasan dengan metode hidrotermal maka semakin besar ukuran partikelnya (Ramahdita 2011).

3.6 Pengaruh suhu dan waktu hidrotermal pada morfologi nanopartikel ZnO

Nanopartikel ZnO yang dihasilkan dapat diketahui ukurannya menggunakan *software* ImageJ versi 64-bit java 1.8.0_172. *Software* ini dapat mengukur rata-rata ukuran partikel dengan cara menarik garis secara horizontal ataupun vertikal pada diameter sampel untuk mengukur partikel yang terbentuk pada hasil SEM.

Gambar 6 memperlihatkan partikel yang terbentuk berupa batang heksagonal (*nanorods*). Ukuran nanopartikel yang didapatkan memiliki rentang ukuran sebesar 175 - 255 nm. Ukuran nanopartikel yang diperoleh masih terlalu besar karena melebihi 100 nm. Hal tersebut diperkirakan ka-

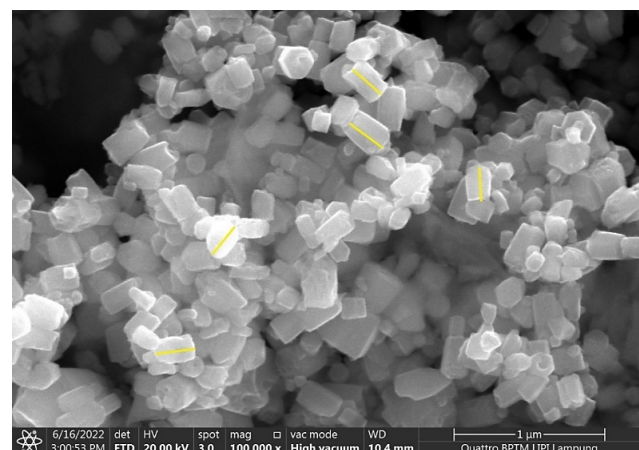
TABEL 3. Hasil Analisis Ukuran Partikel dengan persamaan Scherrer

Sampel	2θ (°)	FWHM (rad)	Ukuran Partikel (nm)
120°C, 1 Jam	36,36	0,23	36,25
120°C, 3 Jam	36,36	0,25	33,35
120°C, 6 Jam	36,37	0,22	39,34
150°C, 1 Jam	36,16	0,19	43,86
150°C, 3 Jam	36,36	0,25	33,36
150°C, 6 Jam	36,21	0,19	43,87
200°C, 1 Jam	36,32	0,25	33,34
200°C, 3 Jam	36,35	0,28	30,93
200°C, 6 Jam	36,33	0,25	33,33

rena adanya penggumpalan (aglomerasi) yang menyebabkan ukuran partikel menjadi tidak seragam (Famia dan Muldarisnur 2019). Terdapat perbedaan antara hasil perhitungan menggunakan persamaan Scherrer dengan pengukuran secara langsung menggunakan SEM. Adanya perbedaan hasil pengukuran antara SEM dan XRD disebabkan oleh bedanya metode pengukuran serta kemungkinan adanya perbedaan besaran yang terukur. SEM menggunakan prinsip *scanning electron* yang memperlihatkan morfologi permukaan saja sebagai parameter pengukurannya, sedangkan XRD memungkinkan adanya pengukuran kristal sebenarnya dikarenakan orde gelombang sinar-X dapat terdifraksi oleh jarak antar atom pada butir-butir kristalnya (Didik 2020).

4. KESIMPULAN

EAFD merupakan salah satu limbah yang sangat potensial untuk diolah kembali karena mengandung unsur Zn yang tinggi yaitu sebesar 94,53%. Proses hidrotermal menghasilkan produk nanopartikel dengan kemurnian tinggi dan ukuran partikel 100nm dengan suhu hidrotermal yang optimum adalah 150 °C selama waktu penahanan 3 jam. Dari hasil karakterisasi XRF diketahui bahwa kadar Zn adalah yang paling dominan yaitu sebesar 98,434%. Selanjutnya, pada karakterisasi XRD diperoleh fasa murni ZnO yaitu *zincite* dengan nilai 2θ sebesar 36,23° dan ukuran partikel sebesar 33,36 nm dengan morfologi yang terbentuk batang heksagonal (*nanorods*) seperti yang diperoleh pada karakterisasi FE-SEM. Proses hidrotermal dapat menghasilkan produk nanopartikel ZnO



GAMBAR 6. Hasil morfologi uji SEM

dengan suhu rendah dan tidak memerlukan proses kalsinasi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung dan Pusat Riset Teknologi Pertambangan - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Lampung Selatan yang telah menyediakan bahan penelitian, peralatan karakterisasi dan peralatan proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti W, Haerudin A, Eskani IN, Tri Yuda AP, Nurjaman F, Setiawan J, Lestari DW, Petrus HTBM. 2020. Pengaruh reagen pelindian pada sintesis ZnO dari debu tungku busur listrik. *Jurnal Reayasa Proses*. 14(1). doi:10.22146/jrekpros.50739.
- Dawson WJ. 1988. Hydrothermal synthesis of advanced ceramic powder. *Journal of the American Ceramic Society Bulletin*. 67(10):1673–1678. <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/journal/15512916>.
- Didik LA. 2020. Penentuan ukuran butir kristal Cu-Cr_{0,98}Ni_{0,02}O₂ dengan menggunakan x-ray diffraction (XRD) dan scanning electron microscope (SEM). *Indonesian Physical Review*. 3(1):6–14. doi:10.29303/ipr.v3i1.37.
- El-Rafei AM, Zawrah MF. 2014. Effect of alkali concentration and reaction time on the morphology of ZnO nanoparticles prepared by hydrothermal method. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 5(3):193–198. doi:10.4416/JCST2014-00002.
- Famia AM, Muldarisnur M. 2019. Pengaruh temperatur sintesis hidrotermal terhadap diameter nanopartikel seng oksida. *Jurnal Fisika Unand*. 8(2):127–132. doi:10.25077/jfu.8.2.127-132.2019.
- Mc Murdie H. 1986. Zincite (Zinc Oxide). Technical report. Natl Bur Stand. 1981. Hematite (Iron Oxide). Technical report.
- Ramahdita G. 2011. Karakterisasi nanopartikel ZnO hasil sintesis dengan metode presipitasi dan perlakuan pra-hidrotermal. Technical report. Universitas Indonesia. Depok.
- Siswanto, Yuliati A, Hariyanto M. 2017. Synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticle by mechano-chemical method. *Physics Synthesis of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticle By Mechano-Chemical Method*:174–176.
- Vaseem M, Umar A, Hahn Y. 2010. Metal oxide nanostructures and their applications chapter IV: ZnO nanoparticles: growth, properties, and applications. California, USA: American Scientific Publishers.
- Xia Y, Yang P, Sun Y, Wu Y, Mayers B, Gates B, Yin Y, Kim F, Yan H. 2003. One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications. *Advanced Materials*. 15(5):353–389. doi:10.1002/adma.200390087.