



Pengaruh Reagen Pelindian pada Sintesis ZnO dari Debu Tungku Busur Listrik

Widi Astuti^{1*}, Agus Haerudin², Istihanah Nurul Eskani², Aulia Pertiwi Tri Yuda¹, Fajar Nurjaman¹, Joni Setiawan², Dwi Wiji Lestari², dan Himawan Tri Bayu Murti Petrus³

¹Balai Penelitian Teknologi Mineral, LIPI

Jl. Ir. Sutami Km. 15 Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Lampung 35361

²Balai Besar Kerajinan dan Batik, Kementerian Perindustrian

Jl Kusumanegara, Yogyakarta

³Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55283

* Alamat korespondensi: widi.mineral@gmail.com

(Submisi: 21 Oktober 2019; Revisi: 3 Maret 2020; Penerimaan: 14 Maret 2020)

ABSTRACT

ZnO nanoparticle was synthesized by a simple hydrometallurgical method using raw material of electric arc furnace dust (EAFD), which is a solid waste in the stainless steel industry. Electric arc furnace dust contains 68.81% Zn in the form of zincite (ZnO) and simonkolleite ($H_{10}Cl_2O_9Zn_5$). The synthesis was carried out in two main steps, i.e., leaching and alkaline precipitation. In this study, the effect of leaching reagent, leaching temperature, and leaching reagent concentration on the percent extraction of Zn in the leaching process from electric arc furnace dust and the characteristics of the resulting ZnO product were studied. The experimental results showed that leaching reagent of acetic acid gives the highest percent extraction of Zn. The results also showed that the increase of temperature and acid concentration could improve the Zn extraction percentage. At 2M acid concentration, Zn extraction percentage already achieved 100%; hence the process is independent of temperature. The ZnO product has a purity of 96%. The XRD data confirmed the nano sizes of the ZnO product.

Keywords: alkaline precipitation; electric arc furnace dust; hydrometallurgy; leaching; ZnO nanoparticle

ABSTRAK

ZnO nanopartikel disintesis dengan metode hidrometalurgi sederhana menggunakan bahan baku berupa debu tungku busur listrik yang merupakan limbah padat industri baja tahan karat. Debu busur listrik mengandung 68,81% Zn dalam bentuk *zincite* (ZnO) dan *simonkolleite* ($H_{10}Cl_2O_9Zn_5$). Proses sintesis dilakukan dalam dua tahap utama yaitu pelindian

dan pengendapan alkali. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh reagen pelindian, suhu pelindian, dan konsentrasi reagen pelindian pada proses pelindian terhadap persen ekstraksi Zn dari debu tungku busur listrik dan karakteristik produk ZnO yang dihasilkan. Hasil percobaan menunjukkan bahwa asam asetat adalah reagen pelindian yang memberikan persen ekstraksi Zn tertinggi. Hasil percobaan juga menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu dan konsentrasi asam yang digunakan, maka semakin meningkat persen ekstraksi Zn yang diperoleh. Tetapi pada konsentrasi asam 2M, suhu pelindian tidak terlalu berpengaruh karena dengan konsentrasi asam asetat 2M pada semua kondisi suhu pelindian, persen ekstraksi Zn yang diperoleh adalah 100%. Hasil pelindian menggunakan asam asetat pada kondisi optimum menghasilkan produk ZnO dengan kemurnian sekitar 96%. Data XRD juga menunjukkan bahwa ZnO yang terbentuk memiliki ukuran nano.

Kata kunci: debu tungku busur listrik; hidrometalurgi; pelindian; pengendapan alkali; nanopartikel ZnO

1. Pendahuluan

Debu dari tungku busur listrik merupakan limbah padat yang dihasilkan oleh industri penghasil baja tahan karat (*stainless steel*) (de Buzina dkk., 2017). Debu tungku busur listrik ini mengandung beberapa logam berharga, di antaranya adalah seng (Zn). Kandungan seng dalam material ini bisa mencapai 50–60% sehingga sangat potensial diolah kembali (*recycle*) untuk menghasilkan logam seng atau senyawa seng seperti seng oksida (ZnO). Senyawa ZnO dibutuhkan pada berbagai kegunaan, antara lain pada sensor gas, biosensor, sensor kimia, farmasi, kosmetik, antibakteri dan antimikroba. Selain itu, ZnO memiliki sifat fisika dan kimia yang unik sehingga disebut sebagai material multifungsi (Darvishi dkk., 2019; Kołodziejczak-Radzimska dan Jesionowski, 2014).

Berbagai metode dapat digunakan untuk mengolah kembali debu tungku busur listrik. Metode yang paling umum digunakan adalah metode pirometalurgi yaitu teknologi Waelz (Mager dkk., 2003; Quijorna dkk., 2014; Sinclair, 2005). Secara umum, metode pirometalurgi dilakukan dengan mereduksi

logam yang terkandung dalam debu tungku busur listrik seperti Zn, Pb, dan Fe dengan agen pereduksi berupa gas CO dari batubara atau kokas untuk mendapatkan kembali logam tersebut dalam bentuk logam. Metode hidrometalurgi juga telah banyak dikembangkan untuk mengolah debu tungku busur listrik (Nakamura dkk., 2008). Berbagai metode hidrometalurgi telah dikembangkan sesuai dengan target produk yang diinginkan dan karakteristik bahan baku yang diolah (Geetha dkk., 2017; Jha dkk., 2001; Krol dkk. 2017; Matinisea dkk., 2016; Tsakiridis dkk., 2010; Xia dan Pickles, 1999; Dutrizac dan Chen, 1998; Havlik dkk., 2006). Perbedaan metode dan reagen pelindian serta pengendapan akan berpengaruh pada produk yang dihasilkan.

Metode hidrometalurgi lebih menguntungkan untuk diterapkan karena tidak membutuhkan energi dan biaya operasional yang besar serta menguntungkan diterapkan pada berbagai skala produksi. Pada penelitian ini akan dilakukan percobaan sintesis ZnO dari debu tungku busur listrik dengan metode hidrometalurgi yang sederhana yaitu proses

pelindian dan pengendapan alkali. Tujuan penelitian yang dilakukan adalah untuk mempelajari pengaruh reagen pelindian, suhu pelindian dan konsentrasi reagen pelindian pada proses pelindian terhadap persen ekstraksi Zn dari debu tungku busur listrik dan karakteristik produk ZnO yang dihasilkan. Reagen pelindian berpengaruh pada efektivitas dan selektivitas proses pelindian, sedangkan suhu pelindian dan konsentrasi reagen pelindian berpengaruh pada laju reaksi dan kinetika proses pelindian. Kebaruan dalam penelitian ini adalah penggunaan asam organik pada pelindian Zn dari debu tungku busur listrik, mengingat reagen yang paling efektif untuk melindi Zn pada proses sintesis nanopartikel ZnO belum banyak dipelajari.

2. Metode Penelitian

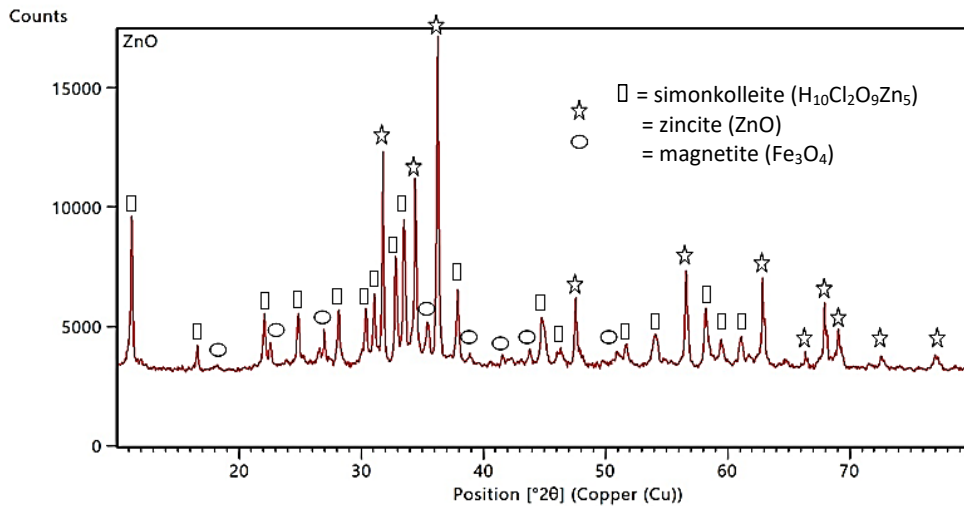
2.1 Bahan dan Alat Penelitian

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah debu tungku busur listrik (*electric arc furnace dust*) dari industri besi baja sebagai sumber ZnO dengan ukuran partikel <100 mesh. Reagen pelindian yang digunakan adalah HCl 37% (Merck), H₂SO₄ 98% (Merck), asam oksalat (Merck), asam sitrat (Merck), asam Asetat 100% (Merck). Pengendapan dilakukan dengan NaOH (Merck). Semua bahan kimia yang digunakan adalah standar analisis. Peralatan proses sintesis yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengaduk magnetik, pH meter (Oaklon 45), oven, *muffle furnace*, dan peralatan gelas serta kertas saring Whatman No 42. Karakterisasi produk pelindian dan produk ZnO nanopartikel menggunakan peralatan *Atomic Adsorption Spectroscopy* (AAS, Shimadzu

AA6000, Jepang), *X-ray fluorescence* (XRF, Epsilon 3 XLE, PANalytical, Belanda), dan *X-ray diffraction* (XRD, X'pert 3 Powder, PANalytical, Belanda).

2.2 Cara Penelitian

Sintesis ZnO dari debu tungku busur listrik dilakukan menggunakan dua tahap proses yaitu pelindian dan pengendapan dengan alkali. Debu tungku busur listrik sebagai bahan baku proses sintesis dikarakterisasi menggunakan XRF dan XRD untuk mengetahui kadar Zn dalam bahan baku, kemudian dilakukan pengayakan untuk mendapatkan ukuran butiran debu sebesar <75 µm (lolos ayakan 200 mesh). Proses pelindian dilakukan dengan kondisi operasi bervariasi untuk mengetahui pengaruh beberapa variabel proses yaitu jenis reagen pelindian (asam sulfat, asam klorida, asam oksalat, asam sitrat, dan asam asetat), suhu pelindian (30, 60, 80°C), dan konsentrasi asam asetat (0,5; 1; 2M) yang digunakan. Selanjutnya, pengendapan alkali menggunakan larutan NaOH 10% dilakukan pada larutan hasil pelindian setelah pemisahan padat cair dengan penyaringan menggunakan kertas Whatman No. 42. Selama proses pengendapan juga dilakukan perlakuan sonikasi menggunakan peralatan ultrasonik untuk membentuk ZnO dengan ukuran nanopartikel. Padatan yang terbentuk pada proses pengendapan selanjutnya didiamkan selama 24 jam dan dipisahkan dengan penyaringan, kemudian dipanaskan menggunakan oven. Padatan ZnO yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan XRF dan XRD.



Gambar 1. Pola XRD debu tungku busur listrik

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakterisasi Debu Tungku Busur Listrik

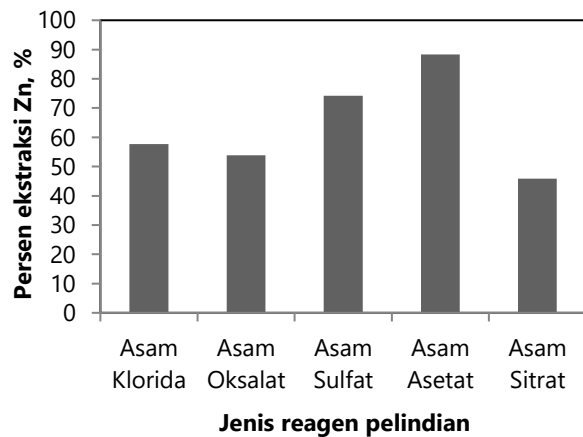
Debu tungku busur listrik yang merupakan limbah padat industri logam mengandung beberapa logam berharga yang dapat diambil kembali dengan metode hidrometalurgi. Tabel 1 mengindikasikan bahwa debu tungku busur listrik yang digunakan pada penelitian ini mengandung Zn dengan konsentrasi sekitar 68,81% dan beberapa logam lain seperti Fe dan Pb dengan konsentrasi yang tidak terlalu besar. Dari data XRD (Gambar 1) diperoleh bahwa seng yang terkandung dalam bahan baku dalam bentuk *zincite* (ZnO), *simonkolleite* (H₁₀Cl₂O₉Zn₅), dan *magnetite* (Fe₃O₄).

Tabel 1. Komposisi kimia debu tungku busur listrik (analisis XRF)

Bahan Baku	Komposisi kimia(% w/w)						
	Zn	Fe	Cl	Si	Pb	S	Ca
Debu tungku busur listrik	68,81	5,93	15,94	0,41	3,57	1,30	1,34

3.2 Pengaruh Reagen Pelindian terhadap Ekstraksi Zn dan Produk ZnO

Pelindian Zn dari debu tungku busur listrik diawali dengan mempelajari pengaruh reagen pelindian terhadap persen ekstraksi Zn. Reagen pelindian yang dipelajari adalah asam sulfat, asam klorida, asam oksalat, asam asetat, dan asam sitrat. Kondisi tetap pelindian adalah konsentrasi asam yaitu 1M, suhu pelindian 80°C, waktu pelindian 5 jam, rasio padat terhadap cair (*pulp density*) yaitu 5 g/50 ml, dan kecepatan pengadukan selama pelindian yaitu 200 rpm. Hasil pelindian Zn dari debu tungku busur listrik disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh jenis reagen pelindian terhadap persen ekstraksi Zn

Pada percobaan pelindian Zn dari debu busur listrik dilakukan perhitungan persen ekstraksi Zn yaitu persentase berat Zn yang terlarut dalam reagen pelindian dibandingkan dengan berat Zn yang terkandung dalam debu busur listrik. Gambar 2 menunjukkan bahwa asam asetat adalah reagen pelindian yang menghasilkan persen ekstraksi Zn yang paling tinggi yaitu sekitar 90%, diikuti dengan asam sulfat (sekitar 80%), asam klorida (60%), asam oksalat (55%), dan asam sitrat (45%). Hal ini terjadi karena kelarutan Zn pada asam asetat lebih besar daripada asam-asam yang lain.

Setelah pelindian, dilakukan proses pengendapan dengan pengaturan pH yaitu dengan menambahkan larutan NaOH hingga diperoleh pH 6. Pada percobaan sebelumnya, pH yang digunakan divariasikan menjadi pH 8, 10 dan 12, tetapi produk yang dihasilkan tidak berwarna putih seperti ZnO melainkan berwarna kemerahan. Warna kemerahan diketahui berasal dari endapan Fe yang ikut mengendap karena pH yang tinggi. Untuk menghindari adanya Fe yang ikut mengendap, pengendapan dilakukan pada pH 6. Hasil pengendapan pada pH 6 dapat dilihat pada Gambar 3 di mana terlihat bahwa filtrat hasil pelindian asetat menghasilkan endapan berwarna putih dengan kandungan Zn sekitar 94%. Hasil pelindian dengan HCl juga menghasilkan endapan berwarna putih tetapi agak kemerahan (merah muda) dengan kandungan Zn 96%. Hasil pelindian dengan asam sulfat menghasilkan endapan berwarna coklat kemerahan dengan kandungan Zn sekitar 83%. Sedangkan pelindian dengan asam sitrat dan asam oksalat tidak menghasilkan endapan bahkan ketika ditambahkan larutan NaOH hingga pH 12.

Endapan berwarna coklat kemerahan yang dihasilkan dari pelindian menggunakan asam sulfat berasal dari ikut mengendapnya Fe (besi) dari larutan filtrat hasil pelindian. Konsentrasi Fe yang ada pada larutan hasil pelindian menggunakan asam sulfat lebih tinggi dari hasil pelindian menggunakan reagen yang lain karena Fe sangat mudah terlarut oleh asam sulfat. Hal ini terlihat pada komposisi Fe (disajikan pada Tabel 2) yang terdapat pada endapan yang diperoleh dari pelindian dengan asam sulfat sebesar sekitar 5,9%, sedangkan pada endapan yang diperoleh dari asam asetat hanya sekitar 142 ppm dan dari asam klorida tidak ada kandungan Fe. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Astuti dkk. (2016) yang menunjukkan bahwa Fe sangat mudah larut pada asam sulfat, dan sedikit larut pada asam klorida, asam nitrat, dan asam sitrat.



Gambar 3. Pengaruh jenis reagen pelindian terhadap produk ZnO dengan pH pengendapan 6

Tabel 2 menunjukkan bahwa ZnO yang dihasilkan dari pelindian menggunakan asam asetat dan asam klorida memiliki kemurnian yang tinggi yaitu sekitar 94–96%. Dari data pola XRD yang disajikan pada Gambar 4a dan 4b juga terlihat bahwa senyawa yang terdapat pada produk endapan hasil pelindian menggunakan asam asetat dan

asam klorida adalah ZnO dengan ukuran nanopartikel. Tidak ditemukan puncak-puncak senyawa lainnya selain ZnO nanopartikel pada pola XRD tersebut sehingga dapat dikatakan bahwa ZnO yang dihasilkan memiliki kemurnian yang tinggi. Sedangkan dari Gambar 4c terlihat bahwa endapan yang dihasilkan dari pelindian menggunakan asam sulfat mengandung senyawa *zincite* (ZnO) dan *magnetite* (Fe₃O₄).

Karakterisasi produk ZnO yang dihasilkan menggunakan difraksi sinar-X (*X-ray diffraction*/XRD) yang dapat memperlihatkan kualitas kristal bahan pada setiap sudut 2θ yang berbeda (Alfarisa dkk., 2018). *X-ray diffraction* adalah metode untuk mengetahui struktur kristal, perubahan fase dan derajat kristalinitas (Bindu dan Thomas, 2014).

Intensitas yang tinggi menunjukkan bahwa kristal tersebut memiliki keteraturan kristal yang baik atau semakin banyak atom-atom yang tersusun dengan rapi. Setiap bahan memiliki pola difraksi yang unik seperti pola sidik jari pada manusia. Analisis puncak XRD merupakan metode sederhana untuk mengevaluasi dan menghitung ukuran partikel. Ukuran rata-rata partikel dapat dihitung dari informasi yang diperoleh dari data-data XRD dengan berdasarkan persamaan Debye-Scherrer. Estimasi ukuran kristal menurut Debye-Scherrer dihitung menggunakan persamaan berikut (Bindu dan Thomas, 2014).

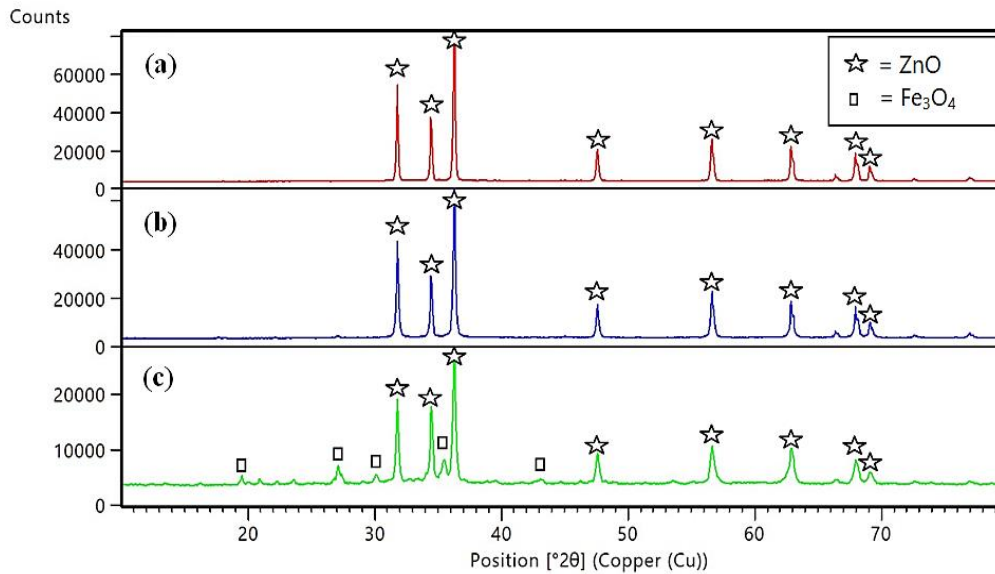
$$D(nm) = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \tag{1}$$

Tabel 2. Estimasi ukuran kristal ZnO menggunakan persamaan Debye-Scherrer

Sampel	2θ (°)	d (Å)	Intensitas (cps)	FWHM (°)	h k l	Ukuran kristal (nm)
Nanopartikel	31,7903	2,8149	38870,63	0,1968	1 0 0	41,97
ZnO hasil sintesis dengan asma asetat	34,4445	2,6038	32255,82	0,1968	0 0 2	42,26
	36,2778	2,4763	65617,80	0,1968	1 0 1	42,48
	47,5675	1,9116	14069,23	0,1968	1 0 2	44,11
	56,6091	1,6259	20040,41	0,2460	1 1 0	36,68
	62,8561	1,4785	17707,77	0,2460	1 0 3	37,85
	66,3709	1,4085	2813,95	0,1968	2 0 0	48,23
	67,9411	1,3797	14365,99	0,2460	1 1 2	38,94
	69,0843	1,3597	6949,24	0,1968	2 0 1	49,01
	72,5636	1,3028	1079,46	0,1476	0 0 4	66,77
	76,9555	1,2390	1946,73	0,1968	2 0 2	51,57

Tabel 3. Komposisi kimia produk ZnO (analisis XRF)

Reagen pelindian	Komposisi kimia (%)						
	Zn	Fe	Al	Si	Pb	S	Ca
Asam Asetat	94,20	142 ppm	588 ppm	224 ppm	3,66	-	0,85
Asam Klorida	96,35	-	0,10	757 ppm	0,23	-	1,92
Asam Sulfat	83,69	5,97	0,33	0,17	590 ppm	5	0,79



Gambar 4. Pola XRD produk ZnO hasil pelindian dengan (a) asam asetat; (b) asam klorida; dan (c) asam sulfat

β adalah lebar keseluruhan dari puncak difraksi maksimum (FWHM), λ adalah panjang gelombang yang digunakan yaitu 0,1541 nm, dan k adalah konstanta yang nilainya bervariasi. Estimasi ukuran kristal nanopartikel ZnO hasil penelitian yang disajikan pada Tabel 2 terlihat bahwa rata-rata ukuran partikel ZnO yang dihasilkan adalah sekitar 40-50 nm. Ukuran ini memenuhi syarat partikel disebut nanopartikel yaitu <100 nm.

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa asam asetat dan asam klorida merupakan reagen pelindian yang terbaik yang dapat digunakan untuk sintesis ZnO nanopartikel dari debu tungku busur listrik yang dapat menghasilkan ZnO berukuran nanopartikel dengan kemurnian tinggi (Tabel 3 dan Gambar 4). Tetapi jika dilihat dari *recovery* pelindian atau persen ekstraksi Zn diketahui bahwa asam asetat memiliki kemampuan melindi Zn yang lebih baik dan menghasilkan persen ekstraksi Zn yang lebih tinggi dari asam klorida. Oleh karena itu, pada percobaan berikutnya digunakan asam asetat sebagai reagen

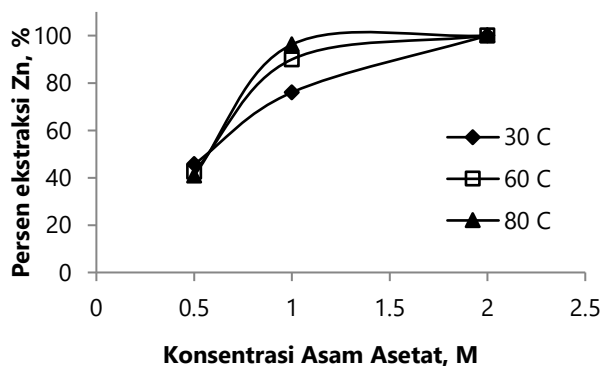
pelindian untuk mempelajari kondisi operasi pelindian yang paling optimum dan memberikan persen ekstraksi Zn yang tertinggi.

3.3 Pengaruh Suhu dan Konsentrasi Asam pada Pelindian dengan Asam Asetat

Asam asetat memberikan persen ekstraksi Zn pada proses pelindian yang tertinggi dibandingkan reagen pelindian yang lain. Untuk mengetahui kondisi operasi pelindian yang paling optimum yaitu yang memberikan persen ekstraksi Zn tertinggi perlu dilakukan penelitian tentang pengaruh beberapa variabel kondisi operasi pelindian terhadap persen ekstraksi Zn. Pada penelitian ini dilakukan percobaan untuk mempelajari pengaruh suhu pelindian (30, 60, 80°C) dan konsentrasi asam asetat (0,5; 1; 2M) yang digunakan dengan kondisi operasi tetap adalah waktu pelindian selama 5 jam, rasio padat terhadap cair yaitu 5 g/50 ml, ukuran partikel bahan baku <75 μm , dan kecepatan *shaker incubator* adalah 200 rpm.

Hasil percobaan yang disajikan pada Gambar 5. Hasil menunjukkan bahwa suhu

pelindian dan konsentrasi asam sangat berpengaruh terhadap persen ekstraksi Zn yang dihasilkan. Semakin tinggi suhu dan konsentrasi asam yang digunakan, maka semakin meningkat persen ekstraksi Zn yang diperoleh. Suhu dan konsentrasi pelarut dalam hal ini asam merupakan parameter yang penting dalam proses pelindian karena suhu dan konsentrasi pelarut memengaruhi laju kinetika dari proses ini, baik laju difusi dan laju reaksi yang terjadi. Tetapi pada konsentrasi asam 2M, suhu pelindian tidak terlalu berpengaruh karena dengan konsentrasi asam asetat 2M pada semua kondisi suhu pelindian, persen ekstraksi Zn yang diperoleh adalah 100%. Pada konsentrasi 2M, ion H^+ yang tersedia pada pelarut cukup untuk melarutkan ion Zn yang ada pada bahan baku yang ada. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi asam 2M, kecepatan reaksi pelindian yang terjadi dikontrol oleh reaksi kimia.



Gambar 5. Pengaruh suhu dan konsentrasi asam terhadap persen ekstraksi Zn pada pelindian menggunakan asam asetat

Dari hasil percobaan yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa kondisi operasi pelindian yang optimum adalah pelindian menggunakan asam asetat 2M pada suhu 30°C, dengan waktu pelindian selama 5 jam, rasio padat terhadap cair yaitu 5 g/50 ml,

ukuran partikel bahan baku $<75 \mu m$, dan kecepatan *shaker incubator* adalah 200 rpm.

4. Kesimpulan

Debu tungku busur listrik dari industri baja mengandung Zn dengan kadar 68,81% dan sangat potensial untuk diolah kembali menghasilkan ZnO. Proses pelindian dan pengendapan alkali dapat digunakan untuk sintesis ZnO dari debu tungku busur listrik dengan reagen pelindian terbaik adalah asam asetat dan pH pengendapan terbaik adalah 6 pada temperatur kamar. Setelah proses pengendapan dengan NaOH 10%, ZnO yang dihasilkan menunjukkan kadar Zn sekitar 96% dengan kemurnian ZnO tinggi yang dibuktikan dari data XRD. Pola XRD menunjukkan bahwa ZnO yang terbentuk berukuran nano.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Program Insinas Kemitraan antara BPTM LIPI dengan BBKB Kemenperin dari Kemenristekdikti atas dukungan pembiayaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Alfarisa, Suhufa, Rifai, D.A., dan Toruan, P.L., 2018, Studi difraksi sinar-X struktur nano seng oksida (ZnO) [X-ray diffraction study on ZnO nanostructures], *Risalah Fisika*, 2 (2), 53-57
- Astuti, W., Hirajima, T., Sasaki, K., and Okibe, N., 2016, Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores, *Minerals Engineering*, 85, 1-16.
- Bindu, P., and Thomas, S., 2014, Estimation of lattice strain in ZnO nanoparticles: X-ray

- peak profile analysis, *J. Theor. Appl. Phys.*, 8, 123–34.
- de Buzina, PJWK, Heckb, N.C., and Vilela, A.C.F, 2017, EAF dust: An overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes, *J. Mater. Res. Technol*, 6(2), 194–202.
- Dutrizac, J.E. and Chen, T.T., 1998, The role of hydrometallurgy in the recycling of zinc, copper and lead, *Acta Metall Slovaca*, 1, 5–28.
- Darvishi, E., Kahrizi, D., Arkan, E., 2019, Comparison of different properties of zinc oxide nanoparticles synthesized by the green (using *Juglans regia L.* leaf extract) and chemical methods, *J. Mol. Liq.*, 286, 110831.
- Geetha, M.S., Nagabhushana, H., and Shivananjaiah, H.N., 2016, Green mediated synthesis and characterization of ZnO nanoparticles using *Euphorbia Jatropa* latex as reducing agent, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1, 301-310.
- Havlik, T., Souza, B.V., Bernardes, A.M., Schneider, I.A.H., and Miskufova A., 2006, Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust., *J. Hazard Mater. B*, 135, 311–8.
- Jha, M.K., Kumar, V., and Singh, R.J., 2001, Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes, *Resour. Conserv. Recycl.*, 33, 1–22.
- Kołodziejczak-Radzimska, A. and Jesionowski, T., 2014, Zinc oxide—from synthesis to application: A review, *Materials*, 7, 2833-2881
- Król, A., Pomastowski, P., Rafińska, K., Railean-Plugaru, V., Buszewski, B., 2017, Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism, *Advances in Colloid and Interface Science*, 249, 37–52
- Mager, K., Meurer, U., and Wirling, J., 2003, Minimizing dioxin and furan emissions during zinc dust recycle by the Waelz process, *JOM*, 55(8), 21–5.
- Matinisea, N., Fukua, X.G., Kaviyarasua, K., Mayedwa, N., and Maazaa, M., 2016, ZnO nanoparticles via *Moringa oleifera* green synthesis: Physical properties & mechanism of formation, *Applied Surface Science*, 406, 339–347.
- Nakamura, T., Shibata, E., Takasu, T., and Itou, H., 2008, Basic consideration on EAF dust treatment using hydrometallurgical processes, *Resour. Process*, 55(3), 144–8.
- Quijorna, N., de Pedro, M., Romero, M., and Andrès, A., 2014, Characterisation of the sintering behaviour of Waelz slag from electric arc furnace (EAF) dust recycling for use in the clay ceramics industry, *J. Environ. Manag.*, 132, 278–86.
- Sinclair, R.J., 2005, *The Extractive Metallurgy of Zinc. Spectrum Series, Vol. 13, 1st ed.*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Victoria
- Tsakiridis, P.E., Oustadakis, P., Katsiapi, A., and Agatzini-Leonardous, S., 2010, Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: Downstream processing and zinc recovery by electrowinning, *J. Hazard. Mater.*, 179, 8–14.
- Xia, D.K. and Pickles, C.A., 1999, Caustic roasting and leaching of electric arc furnace dust, *Can. Metall. Q.*, 38 (3), 175–86.