



**OPTIMASI PRESIPITASI LOGAM TANAH JARANG DARI CAMPURAN
KONSENTRAT LOGAM TANAH JARANG DENGAN METODE "RESPONSE
SURFACE METHODOLOGY"**

***OPTIMIZATION OF RARE EARTH PRECIPITATION FROM MIXED RARE EARTH
CONCENTRATES WITH RESPONSE SURFACE METHODOLOGY***

**Akbar Yulandra¹, Iga Trisnawatia^{1,2}, I Made Bendiyasa^{1,3}, Wahyu Rachmi pusparini²,
Himawan Tri Bayu Murti Petrus*^{1,3}**

¹Departemen Teknik Kimia (*Sustainable Mineral Processing Research Group*),
Faculty of Engineering, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta, 55281

²Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta

³Unconventional Geo-resources Research Group, Faculty of Engineering,
Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281

Email: *bayupetrus@ugm.ac.id

Abstrak

Dua sumber LTJ berasal dari mineral seperti monasit dan senotim. Ketersediaan LTJ di kerak bumi relatif sedikit, tersebar dan jarang terjadi dalam bentuk bijih. Dalam penelitian ini bahan baku yang digunakan adalah campuran konsentrat LTJ yang berasal dari PT. Monokem Surya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi $H_2C_2O_4$, kecepatan pengadukan dan suhu terhadap kemurnian dan pemungutan LTJ dari campuran konsentrat LTJ. Percobaan dilakukan dalam lima langkah: (1) Fusi alkali, proses dilakukan selama 3 jam pada suhu $450^\circ C$, dengan rasio padatan NaOH terhadap campuran konsentrat LTJ sebesar 1:1, untuk memutuskan ikatan fosfat; (2) Pelindian fosfat dalam produk fusi alkali menggunakan *aquadest* pada suhu $80^\circ C$; (3) Residu pelindian *aquadest* dilakukan proses pelindian menggunakan 6 M HCl selama 2 jam untuk melarutkan LTJ pada $90^\circ C$; (4) Menghilangkan kotoran seperti uranium dan thorium dengan mengendapkannya menggunakan NH_4OH pada pH 1; (5) Presipitasi LTJ dari filtrat yang dihasilkan dari butir (4) menggunakan $H_2C_2O_4$. Didapatkan hasil LTJ dengan kemurnian 96% dan pemungutan sebesar 95% pada konsentrasi $H_2C_2O_4$ 8,11%, kecepatan putar pengaduk 500 rpm, dan suhu $70^\circ C$.

Kata kunci: Fusi alkali, Pelindian, presipitasi, Logam Tanah Jarang, $H_2C_2O_4$

Abstract

Two sources of REEs are from mineral monazite and xenotime. The availability of REEs is relatively abundant in the earth's crust, typically dispersed, and rarely occur in ores. In this study as raw material was a mixed rare earth concentrate from Monokem Surya Ltd. The purposes of this research were to determine the effect of concentration $H_2C_2O_4$, stirring speed, and temperature regarding to purity and recovery REEs from the mixed rare earth concentrate. The experiments were conducted in five steps: (1) Alkaline fusion, the process was performed about 3 hours at $450^\circ C$, with ratio of NaOH solid to the mixed rare earth concentrate sand was 1:1, in order to break phosphate bonds; (2) Leaching of phosphate in

alkaline fusion product using aquadest at 80 °C; (3) Aquadest leaching residue was leached using 6 M HCl for 2 hours to dissolve REEs at 90 °C; (4) Removal of impurities such as uranium and thorium by precipitating them using NH₄OH at pH 1; (5) Precipitation of REEs from filtrate produced from point (4) using H₂C₂O₄. The results of REEs with 96% purity and 95% recovery was obtained at concentration H₂C₂O₄ 8,11%, stirring speed 500 rpm, and temperature 70°C.

Keywords: Alkali fusion, leaching, precipitation, rare earth elements, H₂C₂O₄

PENDAHULUAN

Logam tanah jarang (LTJ) merupakan elemen yang sangat penting dalam industri seperti pembuatan katalis dan super konduktor. Sejalan dengan perkembangan teknologi, maka LTJ semakin dibutuhkan misalnya: (1) Yttrium (Y), yang digunakan pada bahan semikonduktor, pembuatan keramik maju dan layar televisi berwarna; (2) Cerium (Ce) yang digunakan untuk katalis pada industri perminyakan; (3) Lantanum (La) digunakan untuk katalis dan superkonduktor; (4) Neodimium (Nd) dan Dysprosium (Dy) digunakan untuk pembuatan komputer dan *Magnetic Resonance Imaging*; (5) Thorium (Th) dapat digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir (Virhdian dan Afrilinda, 2018; Harjanto dkk., 2013; Hoshino dkk., 2016). Karena berbagai aplikasi LTJ yang luas, faktor politik, fluktuasi harga, ketersediaannya yang sedikit dan permintaan pasar yang tinggi maka pengolahan LTJ menjadi sangat prospektif (Binnemans dkk., 2013).

Kandungan LTJ dalam kerak bumi relatif sedikit dan bersifat menyebar, tetapi jarang sekali dalam bentuk konsentrat. Secara umum LTJ memiliki tivalen kation pada karbonat, oksida, fosfat dan silikat. Mineral LTJ juga dapat membentuk mineral campuran konsentrat LTJ, seperti mineral paragenetik dari bastnasit ((Ce,La)(CO₃)F), monasit ((Ce,La)(PO₄), senotim (YPO₄). Mineral bastnasit, monasit dan senotim merupakan sumber daya alam utama dalam produksi LTJ di dunia (Prameswara dkk., 2020; Krishnamurthy dan Gupta, 2015; Xie dkk., 2014; Jordens dkk., 2013).

Menurut Krishnamurthy dan Gupta (2015) LTJ sulit diekstraksi karena LTJ memiliki sifat kimia yang hampir sama satu sama lainnya. Proses pengolahan LTJ secara umum terbagi menjadi 3 langkah: (1) Dekomposisi konsentrat mineral senyawa asam atau basa; (2) Proses *leaching* LTJ dengan menggunakan senyawa asam baik organik maupun anorganik; (3) Proses

pemisahan dan pemurnian LTJ dengan metode misalnya presipitasi bertingkat dan ekstraksi.

Galvin dan Safarzadeh (2018) melakukan pengolahan konsentrat LTJ dari monasit melalui 3 tahapan proses dekomposisi campuran LTJ melalui proses roasting dengan KOH padat suhu 150-250°C selama 1-4 jam; (2) Proses leaching menggunakan HNO₃ 30% (v/v) pada suhu 70°C selama 30 menit; (3) presipitasi LTJ dengan menggunakan asam oksalat 6,2% b/v diperoleh *recovery* LTJ sebanyak 90%. Silva dkk. (2019) melakukan presipitasi LTJ dari *liquor sulfuric* yang mengandung pengotor terlarut dengan menggunakan asam oksalat. Konsentrasi asam oksalat yang digunakan 5% b/v dan diperoleh *recovery* LTJ 96%. Pada percobaan ini raw material yang digunakan merupakan campuran konsentrat LTJ dari pulau Bangka.

Baru-baru ini banyak metode desain eksperimental statistik digunakan untuk optimasi parameter proses. Optimasi system multivariable dalam teknik konvensional mengikuti satu faktor pada satu waktu. Banyak percobaan diperlukan untuk teknik konvensional dan metode seperti ini tidak mewakili efek gabungan (Bahera dkk., 2018). Tujuan utama dari teknik desain eksperimental adalah untuk memahami interaksi antar parameter, yang dapat membantu dalam optimasi parameter eksperimental dan menyediakan model statistik.

Dalam penelitian-penelitian yang berkaitan dengan optimasi proses dewasa ini telah dikembangkan penggunaan suatu metode yang disebut *response surface methodology* (RSM). Metode ini merupakan suatu kumpulan teknik penyelesaian masalah dengan menggunakan matematika dan statistik dalam bentuk model matematika dan menganalisis masalah tersebut sehingga respons tersebut berada pada titik optimumnya. RSM banyak digunakan untuk menentukan pengaruh tiap faktor dan interaksi antar faktor serta membuat proses optimasi menjadi lebih efektif (Myers dkk., 2016)

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai optimum kemurnian dari campuran konsentrat LTJ, dengan mempelajari pengaruh suhu, konsentrasi asam oksalat dan kecepatan putar pengadukan. Parameter proses dioptimalkan dengan menggunakan metode RSM.

METODE PENELITIAN

Bahan

Campuran konsentrat LTJ didapatkan dari PT Monokem Surya, NaOH padat teknis yang diproduksi oleh PT Asahimas Chemical, HCl yang diproduksi oleh Merck dengan kadar 37%, NH₄OH yang diproduksi oleh Merck dengan kadar 25%, asam oksalat (H₂C₂O₄) yang diproduksi oleh Merck dengan kadar 99,5%, Air yang digunakan adalah air destilasi.

Proses Fusi Alkali

Proses fusi alkali diawali dengan mencampurkan NaOH padat dan campuran LTJ konsentrat ukuran -120 mesh dengan perbandingan berat 1:1 dalam cawan porselen. Proses fusi alkali dilakukan didalam *furnace* dengan suhu dijaga tetap 450°C selama 3 jam dengan tujuan untuk memecah ikatan fosfat.

Proses Leaching Dengan Aquadest

Hasil proses fusi alkali dilanjutkan dengan proses pelindian dengan aquadest suhu 80°C selama 1 jam dalam gelas beker. Tujuannya adalah untuk melarutkan fosfat dari proses fusi alkali. Selanjutnya dilakukan penyaringan untuk memisahkan residu dan filtrat. Hasil residu kemudian dikeringkan dalam oven suhu 110°C sampai didapatkan berat konstan. Residu kemudian dianalisis dengan Spektroskopi (*X-ray fluorescence*) XRF (Epsilon 4) di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA-BATAN) untuk menganalisis kandungan LTJ.

Proses Leaching dengan HCl

Residu dari proses *leaching* dengan *aquadest* selanjutnya dilakukan proses pelindian HCl 6 M dengan perbandingan berat residu dan volume HCl (S/L) 1:10 pada suhu 90°C selama 2 jam dalam labu leher tiga yang dilengkapi pendingin balik. Tujuan proses pelindian dengan HCl adalah untuk melarutkan LTJ. Selanjutnya dilakukan penyaringan untuk memisahkan filtrat dan residu. Residu yang telah terpisah dicuci

dengan *aquadest* hingga filtrat cucian mendekati pH 7 lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C hingga mendapat berat konstan. Residu yang telah kering kemudian dianalisis dengan Spektroskopi (*X-ray fluorescence*) XRF (Epsilon 4) di PSTA-BATAN untuk menganalisis kandungan LTJ.

Penghilangan Pengotor (Uranium dan Thorium)

Filtrat hasil *leaching* HCl dikenakan proses presipitasi dengan menambahkan larutan NH₄OH sampai pH 1 dalam gelas beker. Selanjutnya disaring untuk memisahkan filtrat dan presipitat. Presipitat kemudian dicuci dengan *aquadest* hingga filtrat cucian mendekati pH 7 lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C hingga mendapat berat konstan. Presipitat yang telah kering kemudian dianalisis dengan Spektroskopi (*X-ray fluorescence*) XRF (Epsilon 4) di PSTA-BATAN untuk menganalisis kandungan uranium dan thorium.

Presipitasi LTJ dengan H₂C₂O₄

Filtrat dari proses penghilangan pengotor (uranium dan thorium) kemudian dilakukan presipitasi LTJ di dalam gelas beker. Proses diawali dengan menambahkan H₂C₂O₄ 9% (b/v) pada suhu 30°C sambil diaduk kecepatan putar pengaduk 250 rpm selama 30 menit. Setelah 30 menit lalu didiamkan supaya terjadi proses pengendapan kemudian dilakukan penyaringan untuk memisahkan hasil presipitat dengan filtrat. Hasil presipitat kemudian dicuci dengan aquadest hingga filtrat cucian mendekati pH 7 lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C hingga mendapat berat konstan. Hasil presipitat dianalisis dengan spektroskopi (*X-ray fluorescence*) XRF (Epsilon 4) di PSTA-BATAN untuk menganalisis kandungan LTJ, spektroskopi (*X-ray diffraction*) XRD (*Aeris Research* DY 844) di PSTA-BATAN untuk menganalisis kristal LTJ dan spektroskopi (*Fourier-transform infrared spectroscopy*) FTIR (Bruker, ALPHA II) di PSTA-BATAN untuk menganalisis gugus fungsi LTJ. Proses presipitasi LTJ dengan H₂C₂O₄ dengan cara yang sama seperti diuraikan sebelumnya dipelajari pada suhu (30, 50, 70°C), kecepatan putar pengaduk (250, 350, 500 rpm) dan konsentrasi H₂C₂O₄ (1, 5 dan 9%)(b/v).

Optimasi dengan Metode *Response Surface Methodology*

Response Surface Methodology (RSM) adalah sekumpulan metode-metode matematika dan statistika yang digunakan dalam pemodelan dan analisis, yang bertujuan untuk melihat pengaruh beberapa variabel kuantitatif terhadap suatu variabel respon dan untuk mengoptimalkan variabel respon tersebut. Tri dkk., (2018) menggunakan model matematika-kuadratik dan analisis varians (ANOVA) untuk pengujian data. Persamaan yang digunakan adalah polynomial orde 2 ditunjukkan pada Persamaan. (1)

$$y = \beta + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Dengan x_i dan x_j mewakili nilai kode dari faktor input yang menentukan respons (y). Selain itu, β , β_i , β_{ii} dan β_{ij} mewakili koefisien dari persamaan regresi. Pada percobaan ini jumlah faktor adalah 3 ($k=3$) sehingga Persamaan (1) menjadi Persamaan (2).

$$y = \beta + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (2)$$

Pada percobaan ini digunakan rancangan adalah *Box-Behnken Design* (BBD). BBD membutuhkan setidaknya tiga level untuk setiap faktor dalam percobaannya (Honary dkk., 2014). Jumlah rancangan percobaan untuk BBD ditentukan dengan Persamaan (3).

$$N = 2k(k-1) + C_o \quad (3)$$

Dengan N adalah jumlah percobaan yang dilakukan, k adalah jumlah faktor dan C_o adalah jumlah titik tengah. Pada penelitian ini memiliki tiga variabel bebas (faktor) yaitu konsentrasi $H_2C_2O_4$, kecepatan putar pengaduk dan suhu. Berdasarkan tiga faktor tersebut, maka rancangan percobaan disajikan pada Tabel 1 Dan Tabel 2. Hasil percobaan dioptimasi dengan bantuan *software Minitab 18*.

Tabel 1. Faktor dan kode level perlakuan pada rancangan percobaan

Faktor	Simbol	Kode level		
		-1	0	1
Suhu (°C)	x_1	30	50	70
Kecepatan putar pengaduk (rpm)	x_2	250	350	500
Konsentrasi $H_2C_2O_4$ % (b/v)	x_3	1	5	9

Tabel 2. Rancangan percobaan dan respon kemurnian LTJ

Percobaan	Faktor (x)			Respon (y)
	x_1	x_2	x_3	% kemurnian LTJ
1	-1	-1	0	93
2	1	-1	0	92
3	-1	1	0	92
4	1	1	0	92
5	-1	0	-1	83
6	1	0	-1	82
7	-1	0	1	88
8	1	0	1	95
9	0	-1	-1	81
10	0	1	-1	79
11	0	-1	1	90
12	0	1	1	95
13	0	0	0	93
14	0	0	0	93
15	0	0	0	93

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis of Variance (ANOVA)

Hasil estimasi koefisien persamaan model dari output Minitab 18 ditunjukkan pada Tabel 3, menunjukkan nilai $P >$ dari α (5%) pada x_1 , x_2 , x_1^2 , x_2^2 dan $x_1 \cdot x_2$ yang artinya faktor tersebut tidak signifikan secara statistik. Model yang diperoleh dari percobaan ini disajikan dalam Persamaan (4).

$$y = 93,120 - 0,561x_1 - 0,288x_2 + 5,709x_3 - 0,060x_1 \cdot x_2 + 1,882x_1 \cdot x_3 + 2,038x_2 \cdot x_3 + 0,048x_1^2 - 0,736x_2^2 - 6,250x_3^2 \quad (4)$$

Tabel 3. Estimasi koefisien persamaan model dari Minitab 18

Estimasi koefisien kuadrat	Koefisien	Nilai P
Konstanta	93.120	0.000
x_1	0.561	0.283
x_2	0.288	0.560
x_3	5.709	0.000
x_1^2	0.048	0.947
x_2^2	-0.736	0.350
x_3^2	-6.250	0.000
$x_1 x_2$	0.060	0.929
$x_1 x_3$	1.882	0.034
$x_2 x_3$	2.038	0.025

$R^2 = 0,98$; R^2 (adj)=0, 94; R^2 (pred)=0,68;
 $P < 0,05$ (5%) berpengaruh secara signifikan

Hasil ANOVA yang ditunjukkan Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa model orde kedua untuk kasus ini adalah model yang tepat. Hal ini dilihat dari nilai nilai P untuk model lebih besar dari $\alpha = 5\%$ sedangkan untuk model orde kedua nilai P kurang dari α . Untuk memeriksa signifikansi model orde kedua, dapat dilihat nilai P dari model pada Tabel 4. Nilai P = 0,001 lebih kecil dari derajat signifikansi $\alpha = 5\%$, hal ini berarti variabel-variabel *independen* x_i memberikan sumbangan yang berarti dalam model.

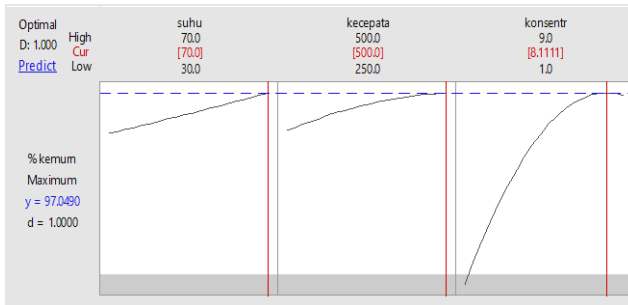
Perhitungan untuk optimasi ditampilkan pada Gambar 1 dan didapatkan nilai optimal kemurnian LTJ pada nilai 97,0490. Penentuan daerah optimasi dapat digunakan grafik secara *Contour* dan *Surface*. Respon dari hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2 terlihat bahwa kontur yang dihasilkan terdiri dari berbagai variasi warna. Masing-masing warna menunjukkan kisaran besarnya respon yang dihasilkan. Kondisi maksimal untuk Gambar 2 berada di warna hijau

tua dengan kemurnian LTJ sebesar 97% dengan nilai *recovery* 95% pada suhu 70°C dan kecepatan putar pengaduk 500 rpm. Silva dkk. (2019) juga melakukan percobaan presipitasi LTJ dengan $H_2C_2O_4$ dengan kemurnian 99,2% dan *recovery* sebanyak 96%. Dengan demikian hasil penelitian ini memberikan hasil belum lebih baik dari percobaan Silva dkk. (2019). Dari kisaran warna inilah yang akan memberikan garis besar petunjuk letak titik optimum variabel. Penentuan kondisi optimum dibuktikan dengan bentuk kurva tiga dimensi yang membentuk puncak seperti Gambar 3.

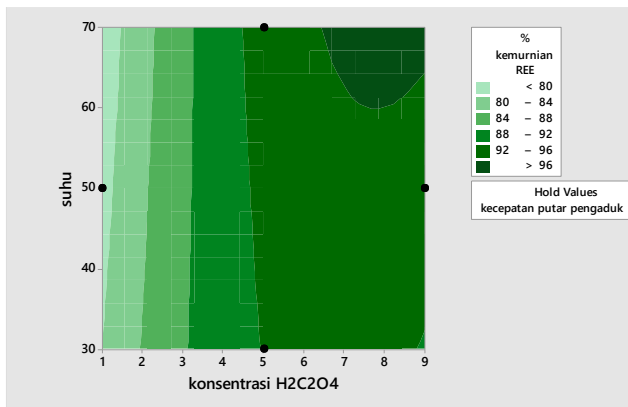
Tabel 4. *Analysis of Variance* dari Minitab 18

Source	Degree of Freedom	Sum Square	Mean Square	Nilai P
	Model	9	422.108	
<i>Linier</i>	3	258.816	86.272	0.000
x_1	1	2.466	2.466	0.283
x_2	1	0.662	0.662	0.560
x_3	1	255.687	255.687	0.000
<i>Square</i>	3	145.531	48.510	0.001
x_1^2	1	0.008	0.008	0.947
x_2^2	1	1.809	1.809	0.350
x_3^2	1	144.239	144.239	0.000
<i>2-Way Interac</i>	3	31.134	10.378	0.040
$x_1 x_2$	1	0.015	0.015	0.929
$x_1 x_3$	1	14.169	14.169	0.034
$x_2 x_3$	1	16.950	16.950	0.025
<i>Error</i>	5	8.517	1.703	
<i>Lack-of-Fit</i>	3	8.517	2.839	*
<i>Pure Error</i>	2	0.000	0.000	
Total	14	430.625		

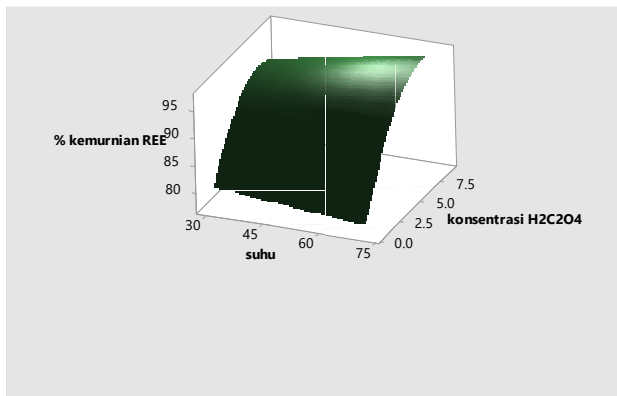
$P < 0,05$ (5%) berpengaruh secara signifikan



Gambar 1. Grafik optimasi Suhu, kecepatan putar pengadukan, dan konsentrasi $H_2C_2O_4$ untuk presipitasi LTJ



Gambar 2. *Response Contour Plot* menunjukkan pengaruh perbedaan konsentrasi $H_2C_2O_4$ dan suhu presipitasi terhadap kemurnian LTJ

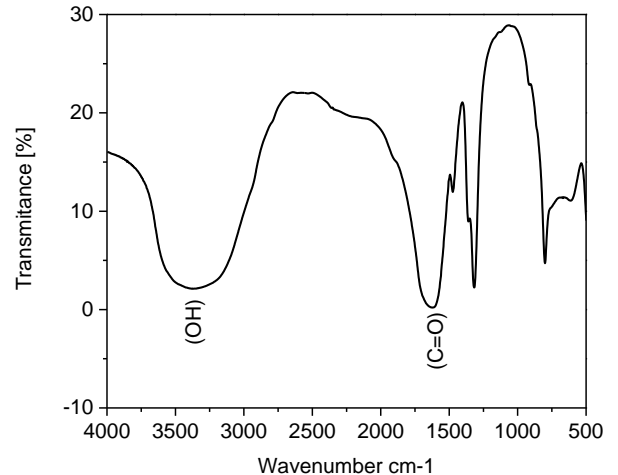


Gambar 3. *Response Surface* terhadap kemurnian LTJ

Karakterisasi hasil presipitat LTJ

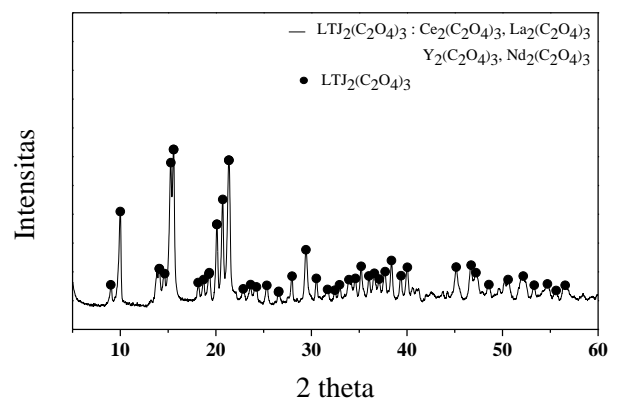
Karakterisasi hasil presipitasi LTJ dilakukan dengan bantuan spektroskopi FTIR dan XRD. Hasil analisis FTIR presipitasi LTJ dan XRD dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Gambar 4 menunjukkan puncak spektrum panjang gelombang 3393,14; 3382,41; 3368,13; 3350,14;

3335,89. cm^{-1} yang menandakan adanya ikatan gugus (O-H); 1633,64; 1625,03; menandakan adanya ikatan gugus fungsi (C=O) (Bellamy dan Pace, 1963).



Gambar 4. Karakterisasi FTIR Presipitat LTJ pada konsentrasi 9%, kecepatan putar pengadukan 500 rpm, suhu 70°C

Gambar 5 menunjukkan pola difraksi dari presipitat oksalat posisi 2 theta tertinggi pada 9,97°, 15,64° dan 21,31° dengan fase kristal $LTJ_2(C_2O_4)_3$. Hasil penelitian ini mendekati hasil penelitian yang diperoleh oleh Liu dkk. (2020), Gambar 6 menunjukkan hasil penelitian Liu dkk. (2020) dan terlihat puncak 2 *theta* tertinggi pada 10°, 15° dan 22°.



Gambar 5. Karakterisasi XRD hasil percobaan presipitasi LTJ, konsentrasi $H_2C_2O_4$ 9 %, kecepatan putar pengaduk 500 rpm, suhu 70°C

KESIMPULAN DAN SARAN

Proses presipitasi LTJ terutama dipengaruhi oleh konsentrasi $H_2C_2O_4$ dan suhu.

Kondisi optimum proses presipitasi: konsentrasi $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 8,11% (b/v), kecepatan putar pengaduk 500 rpm dan suhu 70°C. Kemurnian LTJ yang didapat sebesar 97% dan *recovery* 95%. Penelitian ini akan dilanjutkan dengan proses pemurnian untuk menghasilkan LTJ dengan kemurnian tinggi. Larutan yang dihasilkan dimurnikan lebih lanjut dengan ekstraksi pelarut menggunakan ekstraktan organik dalam minyak tanah. Ekstraksi pelarut biasanya digunakan untuk memisahkan LTJ individu

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA BATAN), yang telah menyediakan bahan dan fasilitas yang dibutuhkan untuk melakukan penelitian serta kepada para pegawainya yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Behera, S.K., Meena, H., Chakraborty, S., dan Meikap, B.C. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of leaching parameters for ash reduction from low-grade coal. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 2018;28(4):621–629
- Bellamy, L.J., dan Pace, R.J. Hydrogen bonding in carboxylic acids—I. Oxalic acids. *Spectrochim Acta.* 1963;19(2):435–42
- Binnemans, K., Tom, P., Blanpain, B., Gerven, T. V., Yang, Y., dan Walton, A. Recycling of rare earths : a critical review. *J. Clean Prod.* 2013;51:1–22.
- Galvin, J., dan Safarzadeh, M.S. Decomposition of monazite concentrate in potassium hydroxide solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2018;6:1353–63.
- Harjanto, S., Virdhian, S., dan Afrilinda, E. Characterization of Indonesia rare earth minerals and their potential processing techniques, Proceedings of the 52nd Conference of Metallurgists (COM) (Montreal), 2013.
- Honary, S., Ebrahimi, P., dan Hadianamrei, R. Optimization of particle size and encapsulation efficiency of vancomycin nanoparticles by response surface methodology, *Pharmaceutical Development and Technology.* 2014;19(8):987–998.
- Hoshino, M., Sanematsu, K., dan Watanabe, Y. REE Mineralogy and Resources. In: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths.* 1 ed. Tsukuba: Elsevier B.V. 2016;129–291.
- Jordens, A., Cheng, Y.P., dan Waters, K.E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Miner Eng.* 2013;41:97–114
- Krishnamurthy, N., dan Gupta, C.K. Extractive metallurgy of rare earths, second edition. *Extractive Metallurgy of Rare Earths.* 2015;1–809
- Liu, F., Porvali, A., Wang, J., Wang, H., Peng, C., dan Wilson, B.P. Recovery and separation of rare earths and boron from spent Nd-Fe-B magnets. *Miner Eng.* 2020;145:106097
- Myers, R.H., Montgomery, D.C., dan Anderson-Cook, C.M. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons. 2016
- Petrus, H.T.B.M, Wijaya, A., Iskandar, Y., Bratakusuma, D., Setiawan, H., Wiratni, dan Astuti, W. Pengambilan Lantanum dan Nikel dari Katalis Bekas Menggunakan Asam Sitrat: Peninjauan Performa secara Kuantitatif Menggunakan Response Surface Method. *Metalurgi.* 2018;33(2):91–100.
- Prameswara, G., Trisnawati, I., Poernomo, H., Mulyono, P., Prasetya, A., dan Petrus, H.T.B.M. Kinetics of Yttrium Dissolution from Alkaline Fusion on Zircon Tailings. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2020.
- Silva, R.G., Morais, C.A., Teixeira, L.V., dan Oliveira, É.D. Selective Precipitation of High-Quality Rare Earth Oxalates or Carbonates from a Purified Sulfuric Liquor Containing Soluble Impurities. *Mining, Metall Explor.* 2019;36(5):967–77.
- Virdhian, S., dan Afrilinda, E. Karakterisasi Mineral Tanah Jarang Ikutan Timah dan Potensi Pengembangan Industri Berbasis Unsur Tanah Jarang. *Metal Indonesia.* 2018;36(2):61-69.
- Xie, F., An, T., Dreisinger, D., dan Doyle, F. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Miner Eng.* 2014;56:10–28.