



Identifikasi Kandungan Logam Tanah Jarang pada Abu Batubara PLTU Mulut Tambang

Firman Firman^{1*}, Arbi Haya² dan Abdul Azis Sahidi³

^{1,2}Dosen Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Unkhair, Ternate

³Mahasiswa Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Unkhair, Ternate

Corresponding author: firman@unkhair.ac.id

Article History

Received : 23 Februari 2020

Revised : 20 Maret 2020

Accepted : 1 April 2020

Abstrak

Logam tanah jarang (LTJ) merupakan material maju yang sangat potensial untuk dikembangkan. Inventarisasi sumber-sumber LTJ sebagai sumber daya dan cadangan dimasa depan sangat penting dilakukan. Abu batubara sebagai sisa pembakaran PLTU mulut tambang memiliki potensi kandungan LTJ. Abu batubara sangat dipengaruhi oleh input batubara dan sistem pembakaran pada PLTU sehingga bersifat spesifik untuk setiap PLTU. Analisis kandungan LTJ dilakukan melalui tahapan: preparasi sampel, uji morfologi butir, uji XRD, uji XRF dan uji ICP-MS. Hasil analisis kandungan LTJ abu batubara dari PLTU di Kalimantan Timur sebanyak 16 unsur terdeteksi, baik pada sampel *fly ash* maupun *bottom ash*. Kandungan dominan LTJ tersebut meliputi serium (Ce), neodimium (Nd), lantanum (La), itrium (Y) dan skandium (Sc). Kelima logam tersebut kandungan LTJ totalnya > 60 ppm. Kandungan LTJ total sampel *bottom ash* sebesar 193,11 ppm sedangkan *fly ash* kandungannya hanya 72,15 ppm. LTJ yang potensial untuk diekstraksi dari *bottom ash* adalah Ce (64,2 ppm), Nd (31,2 ppm), La (25,4 ppm), Y (23,3 ppm) dan Sc (20,1 ppm) sedangkan dari sampel *fly ash* hanya Ce (22,2 ppm).

Kata kunci: *bottom ash, fly ash, LTJ*

Abstract

Rare earth element (REE) is an advanced material with great potential to be developed. Inventory of REE sources as future resources and reserves is very important. Coal combustion product (CCP) as residue from the burning of mine mouth power plant has the potential to contain REE. CCP is strongly influenced by coal input and the combustion system at the power plant so that it is specific for each power plant. The analysis of REE content was carried out through the stages: sample preparation, grain morphology test, XRD test, XRF test and ICP-MS test. The results of the analysis of REE content of CCP from East Kalimantan as many as 16 elements were detected, both in fly ash and bottom ash samples. The dominant content of REE includes cerium (Ce), neodymium (Nd), lanthanum (La), yttrium (Y) and scandium (Sc). The dominant content of REE includes cerium (Ce), neodymium (Nd), lanthanum (La), yttrium (Y) and scandium (Sc). The five metals have a total REE content of >60 ppm. The total REE content of the bottom ash sample was 193.11 ppm while the fly ash content was only 72.15 ppm. REE that has the potential to be extracted from bottom ash are Ce (64.2 ppm), Nd (31.2 ppm), La (25.4 ppm), Y (23.3 ppm) and Sc (20.1 ppm) while from fly ash sample is only Ce (22.2 ppm).

Keywords: *bottom ash, fly ash, REE*

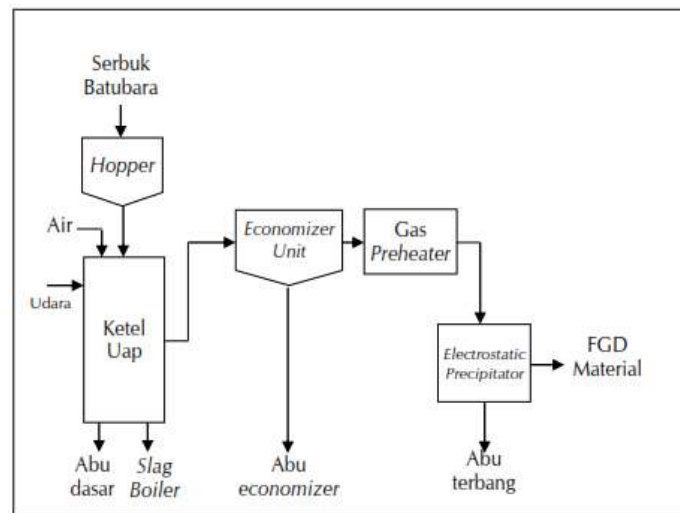
1. Pendahuluan

Abu batubara sisa pembakaran PLTU mulut tambang produksinya sangat besar dan belum dimanfaatkan dengan baik. Pemanfaatan batubara pada PLTU berfungsi sebagai bahan bakar untuk boiler. Boiler akan menghasilkan uap yang digunakan sebagai penggerak turbin untuk membangkitkan listrik. Abu batubara hasil pembakaran batu bara di PLTU dan cerobong-cerobong asap pabrik industri menghasilkan sisa pembakaran berupa limbah padat abu dasar 25% (*bottom ash*) dan abu terbang 75% (*fly ash*) [1]. Abu terbang merupakan partikel abu yang terbawa gas buang, sedangkan abu dasar adalah abu yang tertinggal dan dikeluarkan dari bawah tungku. Skema pembentukan abu batubara pada PLTU seperti Gambar 1.

Produksi abu batubara sekitar 6,15-8,5 juta ton/tahun dari konsumsi batubara untuk PLTU 85 juta ton/tahun dan akan meningkat menjadi 100 juta ton saat program 35.000 MW yang dicanangkan pemerintah tercapai. Pemanfaatan abu batubara yang sudah diupayakan dan diujicobakan adalah

digunakan pada enkapsulasi *overburden* yang bersifat PAF (*potentially acid forming*) untuk pencegahan terbentuknya air asam tambang (AAT) di *site* Lati PT. Berau Coal [2], pelapisan batuan sampung (*waste rock*) pada tambang batubara di PT. Kaltim Prima Coal [3] dan eksperimen skala lapangan uji kolom untuk pencegahan AAT [4], *treatment* AAT dari pH 2,5 menjadi 6,5 dalam waktu 30 menit [5], pencampuran dengan tailing tambang emas Musselwhite untuk peningkatan pH air lindian [6]. Selain itu digunakan sebagai bahan *blending material overburden* yang bersifat PAF untuk menaikkan pH air lindian guna mencegah terbentuknya AAT [7]. Pemanfaatan lain dari abu batubara sisa pembakaran PLTU adalah digunakan sebagai bahan pembuatan bata beton berlubang yang ramah lingkungan dan dapat digunakan untuk dinding non struktural [8]. *Fly ash* dimanfaatkan sebagai campuran semen portland sehingga menjadi semen portland pozzolan yang sebelumnya diaktifkan pada suhu 400°C, 500°C dan 600°C [9]. *Fly ash* digunakan sebagai campuran media tanaman tomat, tetapi kandungan logam Cu melebihi baku mutu [10].

Abu batubara merupakan material yang mengandung logam tanah jarang (LTJ). Sampel *fly ash* dari salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Jepang mengandung 420 mg/kg total LTJ [11]. Abu batubara dari PLTU Kentucky, AS memiliki kadar LTJ total antara 1.213,6 – 1.667,6 mg/kg [12]. Kadar LTJ di Indonesia dari abu batubara sisa pembakaran PLTU Ombilin kurang dari 100 ppm. Namun, apabila abu batubara tersebut dilakukan pengolahan awal terlebih dahulu, dengan mengeliminasi senyawa yang dominan antara lain berupa silika dan alumina, maka kadar LTJ dalam abu batubara akan meningkat [13]. Hasil karakterisasi unsur pada *bottom ash* dan *fly ash* dari hasil pembakaran PLTU di Kawasan Indonesia Timur menggunakan analisis aktivasi neutron instrumental mampu mendeteksi beberapa unsur seperti Al, As, Ce, Co, Cr, Fe, K, La, Mn, Na, Sc, Sm, Ti dan V pada kedua sampel. Unsur Ce pada *fly ash* sebesar $40,3 \pm 4,5$ mg/kg sedangkan pada *bottom ash* lebih tinggi yaitu $68,75 \pm 6,1$ mg/kg. Sedangkan unsur LTJ yang lain, seperti Sc, Sm dan La kandungannya lebih sedikit berkisar antara 1,9-23,3 mg/kg [14].



Gambar 1. Skema Pembentukan Abu Batubara pada PLTU [15]

Abu batubara sisa pembakaran PLTU mulut tambang sangat spesifik tergantung input batubara yang dijadikan bahan bakar serta sistem pembakaran pada PLTU. Potensi abu batubara yang akan dihasilkan terus bertambah serta hingga saat ini abu batubara, baik *fly ash* maupun *bottom ash* masih terkategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) kategori 2 dari sumber spesifik khusus sesuai Peraturan Pemerintah No. 101 tahun 2014. Limbah B3 dari sumber spesifik khusus adalah limbah B3 yang memiliki efek tunda (*delayed effect*), berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan hidup, memiliki karakteristik beracun tidak akut, dan dihasilkan dalam jumlah yang besar per satuan waktu. Kondisi tersebut menjadi peluang untuk memanfaatkan abu batubara sebagai sumber logam tanah jarang (LTJ) yang saat ini menjadi salah satu material maju. LTJ bisa digunakan sebagai sistem radar dan peralatan militer, lampu hemat energi, perangkat *night vision*, fasilitas pembangkit listrik tenaga angin, perangkat identifikasi kesehatan (*scanner, MRI, X-Ray, contrast agent*), LCD, *hard drive* komputer, mobil hibrid dan lain-lain. Dalam bentuk oksida, logam tanah jarang memegang peranan yang sangat penting, yaitu sebagai superkonduktor, laser, optik elektronik,

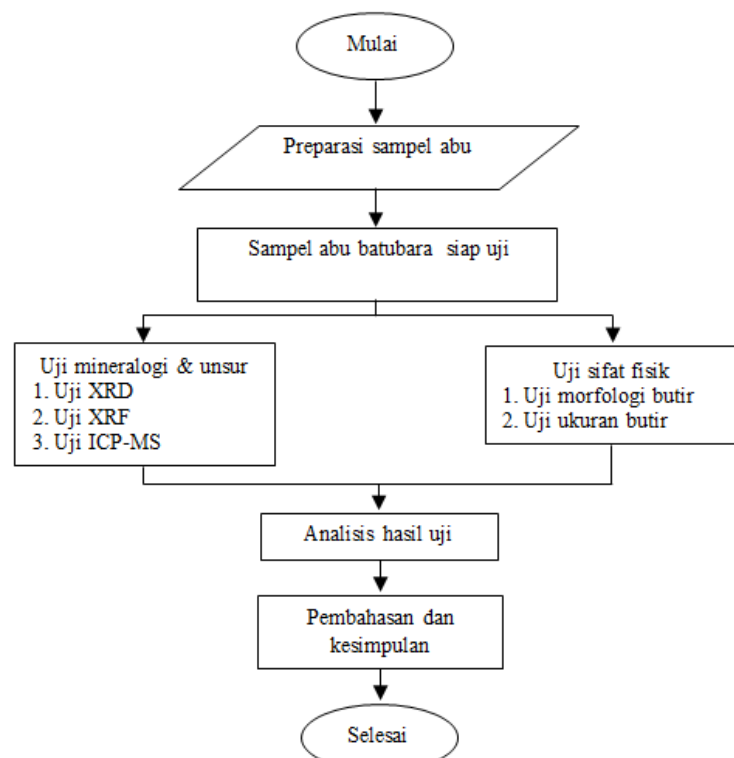
aplikasi LED dan iPad, glass dan keramik. Perannya yang begitu penting menjadikan LTJ dicari sumber daya dan cadangannya untuk diekstrak. Salah satu yang potensial adalah abu batubara sisa pembakaran PLTU mulut tambang.

2. Material dan Metode

Sampel penelitian ini adalah abu batubara sisa pembakaran PLTU di Kalimantan (2 x 7 MW), baik *fly ash* (FA) maupun *bottom ash* (BA). PLTU tersebut merupakan PLTU mulut tambang yang berada dalam wilayah izin usaha pertambangan (IUP) suatu perusahaan tambang batubara di Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia. PLTU tersebut menggunakan batubara dengan kalori $\pm 5.000-6.000$ kkal dan membutuhkan batubara $\pm 80-110$ ton/hari. Abu batubara sisa pembakaran PLTU yang dibuang sebanyak $\pm 6-10$ ton/hari. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *splitter box*, neraca analitik, ayakan gantung, mikroskop polarisasi, XRD, XRF, dan ICP-MS.

Penelitian ini dilakukan melalui pengujian sampel di laboratorium, melalui tahapan preparasi sampel untuk menyiapkan sampel agar siap uji. Preparasi dimulai dengan melakukan sampling terhadap sampel FA dan BA agar sampel yang akan diuji representatif. Sampling dilakukan dengan metode *qoning & quartering* yang dikombinasikan dengan *splitter box*. Metode *qoning & quartering* dilakukan dengan cara, sampel abu batubara dibuat gundukan kemudian ditekan dan dibagi empat, selanjutnya diambil bagian yang diagonalnya. Sampel hasil sampling dibagi menjadi 3 bagian yaitu untuk keperluan uji sifat fisik, sifat kimia dan arsip.

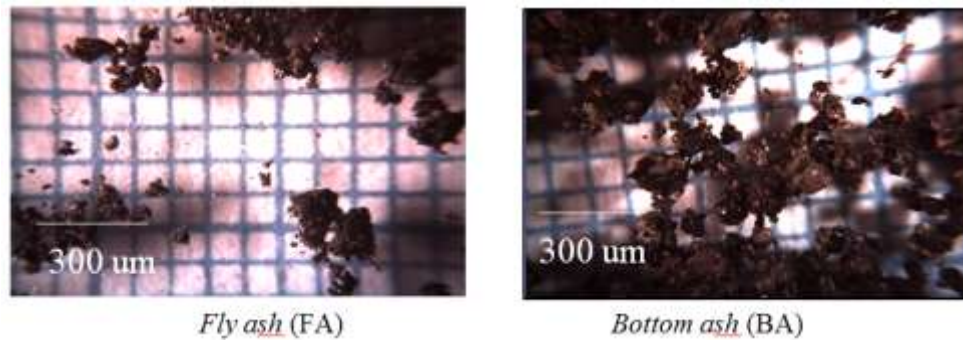
Sampel untuk uji *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy* (ICP-MS) dihaluskan untuk mendapatkan material yang lolos 200 mesh (0,074 mm). Sampel untuk uji sifat fisik dibagi 2 untuk keperluan pengujian morfologi butir menggunakan mikroskop dan analisis ukuran butir dengan metode ayakan. Pengujian sifat kimia dilakukan dengan uji XRD untuk mengetahui kandungan senyawa atau mineral dari abu batubara. Selain itu, dilakukan uji XRF untuk mengetahui kandungan oksida dominan dari sampel *fly ash* dan *bottom ash* serta berguna untuk mengetahui kelas dari abu batubara sisa pembakaran PLTU mulut tambang. Uji ICP-MS dilakukan untuk mengetahui potensi kandungan logam tanah jarang dalam *fly ash* dan *bottom ash* sisa pembakaran PLTU. Selain kandungan LTJ, analisis dengan ICP-MS juga dapat mengetahui kandungan unsur penyusun dari abu batubara, baik unsur makro maupun minor. Tahapan analisis kandungan logam tanah jarang abu batubara seperti Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan analisis potensi LTJ dari abu batubara

3. Hasil dan Pembahasan

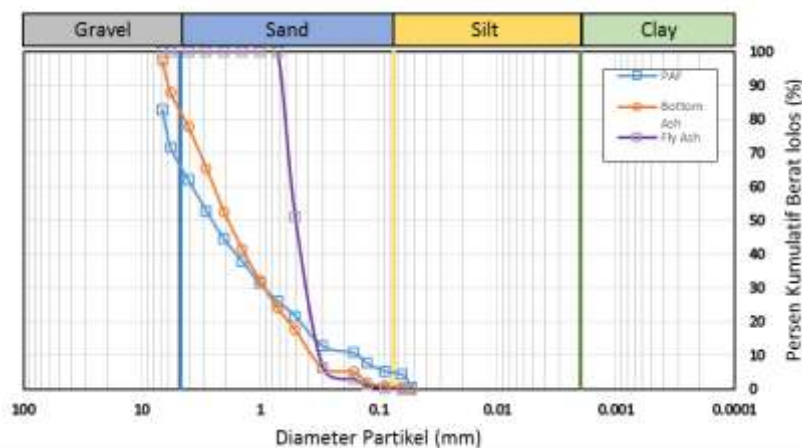
Hasil analisis morfologi butir abu batubara, baik *fly ash* maupun *bottom ash* seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Morfologi butir abu batubara

Material *fly ash* ukurannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan *bottom ash*, terlihat adanya batubara yang belum terbakar dan sebagian terbakar serta bentuk butirnya *sub-rounded* (hasil pembakaran pada suhu tinggi dan waktu yang cepat). Abu batubaranya masih saling menyatu akibat penanganan setelah proses pembakaran.

Analisis ukuran butir abu batubara yang dilakukan dengan metode ayak kering seperti pada Gambar 4. Material *fly ash* memiliki fraksi ukuran pasir (*sand*) sebanyak 99,5% dan fraksi ukuran lanau (*silt*) hanya 0,5%. Material *bottom ash* memiliki fraksi ukuran kerikil (*gravel*) sebanyak 18%, fraksi ukuran pasir (*sand*) sebanyak 81,5% dan fraksi ukuran lanau (*silt*) sebanyak 0,5%. Hasil ayak kering mengkonfirmasi ukuran butir pada morfologi butir bahwa *fly ash* memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan dengan *bottom ash*.



Gambar 4. Distribusi ukuran butir

Hasil uji XRD sampel *fly ash* mengandung mineral kuarsa dan mineral lainnya seperti basanit dan halit. Sedangkan *bottom ash* mengandung mineral kuarsa (silikon oksida) dan mineral lainnya seperti grafit, mulit (alumina silikat), hematit dan magnetit (oksida besi). Hasil uji XRD ini mirip dengan yang didapatkan dari analisis abu batubara sisa pembakaran PLTU di Brasil, dimana kandungan utamanya adalah kuarsa, mulit dan magnetit [16][17][18]. Hasil uji XRD belum memperlihatkan mineral pembawa logam tanah jarang.

Hasil uji XRF abu batubara seperti pada Tabel 1. Berdasarkan hasil uji XRF, abu batubara PLTU di Kalimantan Timur belum bisa diklasifikasikan masuk kelas F, C atau N karena kandungan total SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 untuk sampel FA dan BA berturut-turut 29,89% dan 41,58%. Parameter lain berupa kandungan SO_3 dari sampel FA dan BA adalah 29,47% dan 41,66% sedangkan kelas F dan C maksimal 5% dan 4% untuk kelas N. Kandungan *Loss on Ignition* (LoI) sampel FA dan BA adalah 6,38% dan 0,42% sedangkan untuk dikategorikan kelas F dan C maksimal 6% serta kelas N maksimal 10%. Kandungan oksida yang dominan adalah SO_3 , baik pada *fly ash* maupun *bottom ash*, kandungannya masing-masing yaitu 29,47% dan 41,66%. Kandungan silikon oksidanya relatif sedikit hanya 11,97% pada FA dan 4,05% pada BA. Kandungan oksida pembawa alkalinitas seperti Na_2O , K_2O , MgO dan CaO relatif tinggi untuk kedua sampel, dimana pada FA kadar keempat oksida tersebut

adalah 32,5% sedangkan pada BA hanya 12,67%. Inilah yang menjadi penyebab abu batubara dijadikan penetral air asam tambang [19].

Tabel 1. Hasil uji XRF abu batubara

Oksida	Massa (%)	
	FA	BA
Na ₂ O	1,39	1,19
MgO	2,38	0,92
Al ₂ O ₃	8,81	22,18
SiO ₂	11,97	4,05
P ₂ O ₅	0,02	0,8
SO ₃	29,47	41,66
K ₂ O	1,48	2,78
CaO	27,25	7,78
TiO ₂	0,77	1,71
MnO	0,05	0,07
Fe ₂ O ₃	9,11	15,35
CoO	0	0,04
CuO	0,02	0,02
ZnO	0	0
RbO	0,55	0,03
SrO	0,29	0,71
ZrO ₂	0,06	0
WO ₃	0	0,29
LoI	6,38	0,42

Hasil analisis dengan metode ICP-MS, 16 unsur logam tanah jarang terdeteksi pada semua sampel abu batubara sisa pembakaran PLTU. Logam tanah jarang tersebut, yaitu skandium (Sc), lantanum (La), itrium (Y), serium (Ce), praseodimium (Pr), neodimium (Nd), samarium (Sm), gadolinium (Gd), disprosium (Dy), terbium (Tb), erbium (Er), tulium (Tm), itterbium (Yb), lutetium (Lu), europium (Eu) dan holmium (Ho) sesuai Tabel 2. Sampel dengan kadar LTJ tertinggi adalah *bottom ash (total content)*, yaitu 193,11 ppm sedangkan *fly ash* LTJ totalnya hanya 72,15 ppm. Abu batubara PLTU di Kalimantan yang prospek untuk diekstraksi kandungan logam tanah jarangnya adalah *bottom ash*. Logam tanah jarang yang paling tinggi kadarnya dalam sampel adalah Ce sedangkan yang paling rendah kadarnya adalah Tm dan Lu. Sampel FA, urutan kandungan logam tanah jarangnya adalah Ce > Nd > Y > Sc > La > Pr > Sm > Gd > Dy > Yb > Er > Eu > Tb = Ho > Tm = Lu. Sampel BA, urutan kandungan logam tanah jarangnya adalah Ce > Nd > La > Y > Sc > Pr > Sm > Gd > Dy > Yb > Er > Eu > Ho > Tb > Tm = Lu.

Tabel 2. Kandungan LTJ *fly ash* dan *bottom ash*

Sampel	Kadar (ppm)															
	Sc	La	Y	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Dy	Tb	Er	Tm	Yb	Lu	Eu	Ho
FA	8,5	8	10,7	22,2	2,7	11,3	2,4	1,8	1,4	0,3	0,9	0,1	1	0,1	0,45	0,3
BA	20,1	25,4	23,3	64,2	7,6	31,2	6	3,9	3,4	0,6	2,2	0,4	2,7	0,4	1,01	0,7

Logam tanah jarang dikelompokkan menjadi LTJ ringan (*Light Rare Earth Elements*, LREE) dan LTJ berat (*Heavy Rare Earth Elements*, HREE). LTJ ringan terdiri dari Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm dan Eu sedangkan sisanya termasuk LTJ berat. LTJ ringan adalah LTJ yang memiliki nomor atom 63 kebawah sedangkan LTJ berat adalah logam tanah jarang yang memiliki nomor atom 64-71. Perbandingan LTJ ringan dan LTJ berat adalah 134 ppm : 14,3 ppm atau 9:1. Sampel FA

perbandingan kandungan LTJ ringan dan LTJ berat adalah 66,25 ppm : 5,9 ppm atau 11: 1 sedangkan sampel BA perbandingan kandungan LTJ ringan dan LTJ berat adalah 178,81 ppm : 14,3 ppm atau 13:1. Kandungan LTJ ringan lebih banyak dibandingkan dengan kandungan LTJ beratnya.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dan rekomendasi dari penelitian ini adalah:

- a. Abu batubara PLTU di Kalimantan Timur memiliki kandungan LTJ sebanyak 16 unsur, yaitu La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y dan Sc, dengan kandungan dominan unsur Ce dan paling rendah unsur Tm.
- b. *Bottom ash* memiliki kandungan LTJ yang lebih besar, yaitu 193,11 ppm dibandingkan dengan *fly ash* hanya 72,15 ppm.
- c. Kandungan LTJ sampel *bottom ash* potensial untuk diekstraksi, yaitu Ce (64,2 ppm), Nd (31,2 ppm), La (25,4 ppm), Y (23,3 ppm) dan Sc (20,1 ppm) sedangkan *fly ash* hanya Ce (22,2 ppm).
- d. Penelitian perlu dilakukan terhadap abu batubara sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang atau PLTU yang lain untuk menjadi sumber daya dan cadangan LTJ dimasa depan serta melihat logam yang potensial untuk diolah.

5. Referensi

- [1] F. Goodarzi, F. E. Huggins, and H. Sanei, "Assessment of elements, speciation of As, Cr, Ni and emitted Hg for a Canadian power plant burning bituminous coal," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 74, no. 1, pp. 1–12, 2008.
- [2] R. S. Gautama *et al.*, "Reliable Mine Water Technology ' Study on Capping Options For Overburden Encapsulation to Prevent Acid Mine Drainage in Lati Coal Mine , Kalimantan , Indonesia," 2013, pp. 341–346.
- [3] G. J. Kusuma *et al.*, "An Evaluation on the Physical and Chemical Composition of Coal Combustion Ash and Its Co-Placement with Coal-Mine Waste Rock," vol. 2012, no. July, pp. 589–596, 2012.
- [4] G. J. Kusuma *et al.*, "Study on Co-placement of Coal Combustion Ash-coal Waste Rock for Minimizing Acid Mine Drainage Generation: A Preliminary Result of Field Column Test Experiment," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 6, pp. 251–261, 2013.
- [5] A. Pradhan and J. P. Deshmukh, "Utilization of Fly Ash for Treatment of Acid Mine Water," *J. Environ. Res. Dev.*, vol. 3, no. 1, pp. 137–142, 2007.
- [6] M. B. Yeheyis, J. Q. Shang, and E. K. Yanful, "Long-term evaluation of coal fly ash and mine tailings co-placement: A site-specific study," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 1, pp. 237–244, 2009.
- [7] Firman; A. Haya; and H. Alkatiri, "Study of Blending Fly Ash with Potentially Acid Forming Material to Prevent Acid Mine Drainage," in *International Joint Conference on Science and Technology (IJCST)*, 2019, p. 7.
- [8] Nurul Aini Sulistyowati, "Bata Beton Berlubang Dari Abu Batubara (Fly Ash Dan Bottom Ash) Yang Ramah Lingkungan," *J. Tek. Sipil dan Perenc.*, vol. 15, no. 1, pp. 87–96, 2016.
- [9] dan S. H. R. A., "Pemanfaatan Fly Ash (Abu Batubara) yang Diaktifkan Untuk Komposisi Semen Portland Pozzolan," in *Prosiding Snija*, 2015, p. 6.
- [10] E. K. A. Wardhani, M. Sutisna, and A. H. Dewi, "Evaluasi Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) Batubara Sebagai Campuran Media Tanam pada Tanaman Tomat (Solanum lycopersicum)," no. 1, pp. 44–56, 2012.
- [11] S. Kashiwakura, Y. Kumagai, H. Kubo, and K. Wagatsuma, "Dissolution of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Particles in a Dilute H₂SO₄ Solvent," *Open J. Phys. Chem.*, vol. 03, no. 02, pp. 69–75, 2013.
- [12] D. B. Mayfield and A. S. Lewis, "Environmental Review of Coal Ash as a Resource for Rare Earth and Strategic Elements," *2013 World Coal Ash Conf.*, no. April 2013, pp. 22–25, 2013.
- [13] S. Suganal, D. F. Umar, and H. E. Mamby, "Identifikasi keterdapatn unsur logam tanah jarang dalam abu batubara Pusat Listrik Tenaga Uap Ombilin, Sumatera Barat," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 14, no. 2, pp. 111–125, 2018.
- [14] D. D. Lestiani, Muhayatun, and N. Adventini, "Karakteristik Unsur Pada Abu Dasar dan Abu

- Terbang Batu Bara Menggunakan Analisis Aktivasi Neutron Instrumental,” *Sains dan Teknol. Nukl. Indones.*, vol. 11, pp. 27–34, 2010.
- [15] D. A. N. Coal, T. Keausan, and F. Ash, “Pengaruh Penambahan Fly Ash Melalui Proses Separasi Iron Oxide Dan Coal Terhadap Keausan Aluminium,” *Rotasi (Semarang)*, vol. 8, no. 4, pp. 18–26, 2006.
- [16] L. Silva *et al.*, “Mineralogy and Leaching Characteristics of Coal Ash from a Major Brazilian Power Plant,” *Coal Combust. Gasif. Prod.*, vol. 2, no. 1, pp. 51–65, 2010.
- [17] F. Haya, Arbi, Conoras, Wawan Ak, Firman, “Penyebaran endapan nikel laterit pulau obi kabupaten halmahera selatan provinsi maluku utara,” vol. 05, pp. 25–33, 2019.
- [18] A. Haya, W. A. K. Conoras, and R. Ahar, “Studi Produktifitas Alat Muat Kobelco 380 Pada Penambangan Nikel di PT . Fajar Bakti Lintas Nusantara Kecamatan Pulau Gebe Kabupataen Halmahera Tengah Provinsi Maluku Utara,” vol. 2, no. 1, pp. 19–29, 2019.
- [19] Firman, A. Haya, and H. Alkatiri, “Study of Blending Fly Ash with Potentially Acid Forming Material to Prevent Acid Mine Drainage,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1569, p. 042075, 2020.