

# ANALISIS POTENSI LOGAM TANAH JARANG ABU BATUBARA LIMBAH PLTU MULUT TAMBANG PT. WANATIARA PERSADA KAWASI OBI

Said Hi. Abbas<sup>a</sup> Firman Firman<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>Prodi Teknik Mesin Universitas Khairun, Ternate, Indonesia

<sup>b</sup>Prodi Teknik Pertambangan Universitas Khairun, Ternate, Indonesia

Email: [saidhabbas@unkhair.ac.id](mailto:saidhabbas@unkhair.ac.id)

## Article history

Received

20 Agustus 2020

Received in revised form

27 September 2020

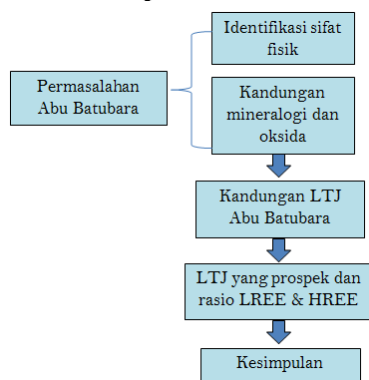
Accepted

1 Oktober 2020

\*Corresponding author

[firmam@unkhair.ac.id](mailto:firmam@unkhair.ac.id)

## Graphical abstract



## Abstract

Coal combustion product (CCP) is the residual waste from burning coal at the power plant, both in the form of fly ash and bottom ash. PT. Wanatiara Persada Power Plant is categorized as Mine Mouth Power Plant because it is located in the mining area. The remaining coal ash from its combustion is still categorized as B3 waste so it is necessary to identify its potential utilization (one of which is the source of REEs) in order to reduce its large volume. Fly ash grain size is finer (76.15% passes 200 mesh sieve) than bottom ash (only 6.75% passes 200 mesh sieve) according to the results of wet sieve and grain morphological observations using an ore microscope. The mineral content of bottom ash is quartz, aragonite, siderite and hematite, while fly ash contains quartz, muscovite, periclase, hematite, magnetite and pyrite. The dominant oxides for the two samples are SiO<sub>2</sub> (50.6-67.9%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8.15-21.9%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7.76-10.8), and CaO (2.55-7, 54%). The coal combustion product (CCP) is categorized as class F. The content of rare earth elements for fly ash is 190.07 ppm while for bottom ash it is 142.64 ppm. The dominant content of REEs in the fly ash sample is Ce (61.8 ppm), Nd (31.8 ppm), Y (26.3 ppm), La (23.9 ppm) while in bottom ash the 4 elements are also dominant, where Ce (46.2 ppm), Nd (24.1 ppm), Y (21 ppm), and La (18.6 ppm). The dominant REE is light REEs (LREE) compared to heavy REEs (HREE), the ratio is 175.27 ppm : 14.8 ppm or 11.84 : 1 (fly ash sample) while the bottom ash sample is 131.04 ppm : 11, 6 ppm or 11.3 : 1.

**Keywords:** CCP, bottom ash, fly ash, REEs

## Abstrak

Abu batubara merupakan limbah sisa pembakaran batubara pada PLTU, baik berupa *fly ash* maupun *bottom ash*. PLTU PT. Wanatiara Persada terkategori PLTU Mulut Tambang karena letaknya dalam lokasi wilayah izin penambangannya. Abu batubara sisa pembakarannya masih terkategori limbah B3 sehingga perlu diidentifikasi potensi pemanfaatannya (salah satunya sumber LTJ) guna mengurangi volumenya yang besar. *Fly ash* ukuran butirnya lebih halus (76,15% lolos ayakan 200 mesh) dibandingkan *bottom ash* (hanya 6,75% lolos ayakan 200 mesh) sesuai dengan hasil ayak basah dan pengamatan morfologi butir dengan menggunakan mikroskop bijih. Kandungan mineral *bottom ash* adalah kuarsa, aragonite, siderite dan hematit sedangkan *fly ash* kandungannya kuarsa, muskovit, periclase, hematit, magnetit dan pirit. Oksida dominannya untuk kedua sampel adalah SiO<sub>2</sub> (50,6-67,9%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,15-21,9%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,76-10,8), dan CaO (2,55-7,54%). Abu batubaranya terkategori kelas F. Kandungan logam tanah jarang untuk *fly ash* sebesar 190,07 ppm sedangkan pada *bottom ash* sebesar 142,64 ppm. Kandungan LTJ yang dominan pada sampel *fly ash* adalah Ce (61,8 ppm), Nd (31,8 ppm), Y (26,3 ppm), La (23,9 ppm) sedangkan pada *bottom ash* 4 unsur tersebut juga dominan, dimana Ce (46,2 ppm), Nd (24,1 ppm), Y (21 ppm), dan La (18,6 ppm). LTJ yang dominan adalah LTJ ringan (LREE) dibandingkan LTJ berat (HREE), perbandingannya adalah 175,27 ppm : 14,8 ppm atau 11,84 : 1 (sampel *fly ash*) sedangkan sampel *bottom ash* perbandingannya 131,04 ppm : 11,6 ppm atau 11,3 : 1.

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

© 2020 Penerbit Fakultas Teknik Unkhair. All rights reserved

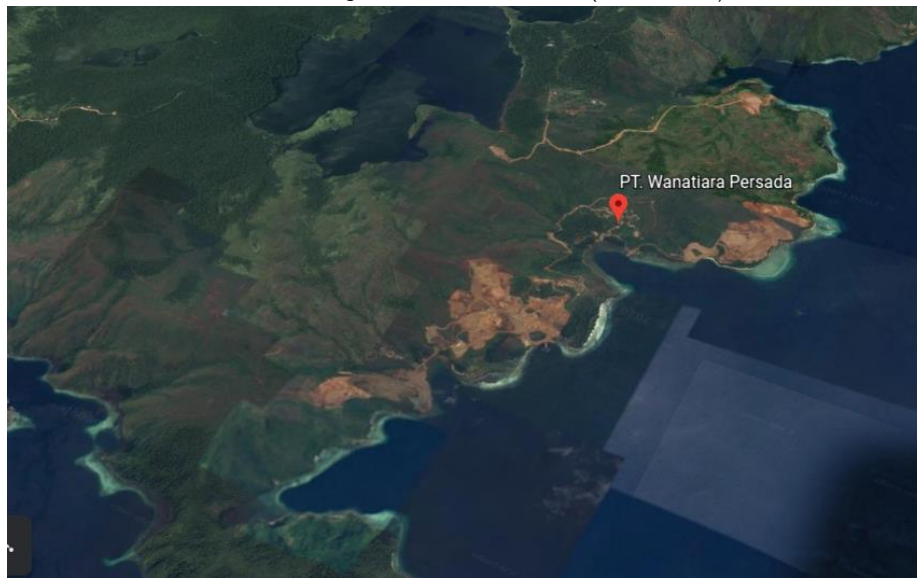
## 1.0 PENDAHULUAN

Pembangunan PLTU di industri pertambangan untuk memasok kebutuhan energi listrik bagi operasional pertambangan, salah satunya smelter pengolahan bijih nikel, seperti pada PT. Wanatiara Persada *Site* Haul Sagu Obi Halmahera Selatan. PLTU menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya untuk memanaskan air untuk menggerakkan turbin hingga menghasilkan listrik. Buangan dari pembakaran tersebut adalah abu batubara atau *coal combustion product* (CCP), baik berupa *fly ash* dan *bottom ash* [1]. Limbah *fly ash*nya sekitar 75% sedangkan sisanya adalah *bottom ash* [2]. CCP hingga saat ini masih diklasifikasikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) kategori 2 dari sumber spesifik khusus sesuai Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 sehingga perlu diketahui kandungannya untuk dimanfaatkan dan volumenya bisa direduksi [3]. Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah sebagai sumber logam tanah jarang (LTJ) karena potensinya ada.

Berbagai penelitian terkait kandungan LTJ pada abu batubara sudah dilakukan, khususnya pada PLTU Ombilin Sumatera Barat [4], PLTU Banjarsari di Sumatera Selatan [5], PLTU di Kalimantan Timur [1] dan PLTU di kawasan Indonesia Timur [6]. Penelitian kandungan LTJ pada abu batubara limbah PLTU di luar negeri sudah banyak, misalnya di China, PLTU di Jepang salah satunya kandungan LTJ totalnya adalah 420 mg/kg [7], PLTU Kentucky di AS 1.213,6-1.667,6 mg/kg [8], PLTU di US kandungan LTJ-nya lebih dari 700 ppm [9], PLTU lain di AS kandungan rata-rata logam La, Y dan Sc sebesar 591 mg/kg [10] dan berbagai PLTU lainnya. Kandungan LTJ pada abu batubara sangat dipengaruhi input batubara serta tipe pembakaran pada PLTU sehingga masing-masing PLTU bersifat spesifik. Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan analisis kandungan LTJ sisa pembakaran PLTU PT. Wanatiara Persada sehingga bisa diketahui kandungan LTJ yang potensial untuk menjadi sumber LTJ dimasa depan.

## 2.0 METODOLOGI

Langkah awal adalah dilakukan preparasi sampel abu batubara atau CCP, baik *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) dilakukan di Laboratorium Geologi Dasar sedangkan pengujian sifat fisik (distribusi ukuran butir dan morfologi butir) dilakukan di Laboratorium Hidrogeologi dan Geokimia. Pengujian XRD untuk mengetahui kandungan mineral, uji XRF untuk mengetahui kandungan oksida dominan serta uji ICP-MS untuk mengetahui kandungan LTJ dari abu batubara juga dilakukan di laboratorium tersebut. Lokasi pengambilan sampel abu batubara pada PLTU Mulut Tambang PT. Wanatiara Persada *Site* Haul Sagu Obi, yang secara administratif terletak di Kabupaten Halmahera Selatan, Propinsi Maluku Utara (Gambar 1).



Gambar 1. Lokasi PLTU Mulut Tambang PT. Wanatiara Persada Obi (*Google Earth*)

Peralatan yang digunakan dalam analisis kandungan LTJ sampel *fly ash* dan *bottom ash* dari CCP PLTU Mulut Tambang PT.WP adalah ayakan standar terdiri dari berbagai ukuran mulai dari No. 30, 40, 60, 80, 100, 140,

200 dan 270; oven atau pengering; alat *X-Ray Diffraction* (XRD); alat *X-Ray Fluorescence* (XRF); alat *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS); mikroskop bijih; plastik alas ayakan; eksikator; neraca analitik, kantong sampel uji; *splitter box* dan GPS (*Global Positioning System*). Prosedur Penelitian adalah sebagai berikut:

### 2.1. Preparasi Sampel

Sampel CCP baik *fly ash* maupun *bottom ash* dilakukan preparasi untuk menyiapkan sampel sehingga siap dilakukan pengujian selanjutnya, khususnya uji kandungan mineral, oksida dan LTJ. Preparasi yang dilakukan meliputi, sampling abu batubara (*fly ash* dan *bottom ash*) menggunakan metode *qoning* dan *quartering* dikombinasikan dengan alat *splitter box* sehingga mendapatkan sampel yang homogen dan representatif, baik *fly ash* (FA) maupun *bottom ash* (BA).

### 2.2. Pengujian Sifat Fisik

Pengujian sifat fisik CCP dilakukan dengan metode ayak basah untuk mengetahui distribusi ukuran butir yang sesungguhnya. Ayakan yang digunakan yaitu ayakan No. 30, 40, 60, 80, 100, 140, 200 dan 270. Hasil ayak basah diovenkan selama 24 jam setelah itu disimpan dalam eksikator hingga dingin lalu dilakukan pengukuran massa menggunakan neraca analitik untuk setiap fraksinya lalu dibuatkan kurva distribusi ukuran butir CCP. Selain itu, dilakukan pula uji morfologi butir untuk melihat bentuk butir abu batubara di bawah mikroskop bijih sehingga bisa kelihatan adanya batubara yang belum terbakar sempurna.

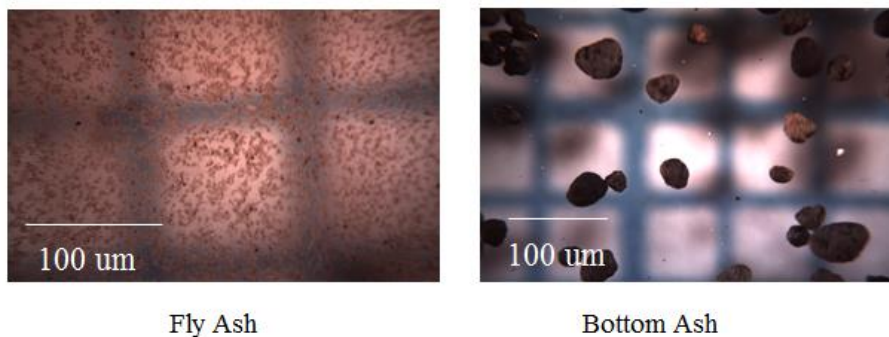
### 2.3. Pengujian Sifat Kimia

Pengujian sifat kimia sampel CCP dilakukan dengan alat XRD untuk mengetahui kandungan mineral, alat XRF untuk melihat kandungan oksida serta menggunakan alat ICP-MS untuk melihat kandungan LTJ dari abu batubara/CCP. Sampel CCP yang diuji dengan alat XRD, XRF dan ICP-MS adalah sampel hasil sampling dan telah dipreparasi serta lolos ayakan No. 200 atau 0,074 mm.

## 3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

### a) Morfologi Butir CCP

Bentuk morfologi butir CCP sisa pembakaran PLTU PT.WP sesuai hasil pengamatan dengan mikroskop bijih terlihat seperti Gambar 2, dimana bentuknya *sub-rounded*. Sampel *fly ash* ukurannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan *bottom ash*. Bentuk butir *sub-rounded* karena merupakan hasil pembakaran pada suhu tinggi dengan waktu yang relatif cepat. Masih terlihat adanya batubara yang belum terbakar sempurna sesuai Gambar 2. Butiran yang berwarna hitam merupakan sisa-sisa batubara yang belum terbakar sempurna. PLTU Mulut Tambang PT.WP memiliki kapasitas 3 x 50 MW untuk memenuhi kebutuhan listrik perusahaan khususnya smelter pengolahan bijih nikel laterit.



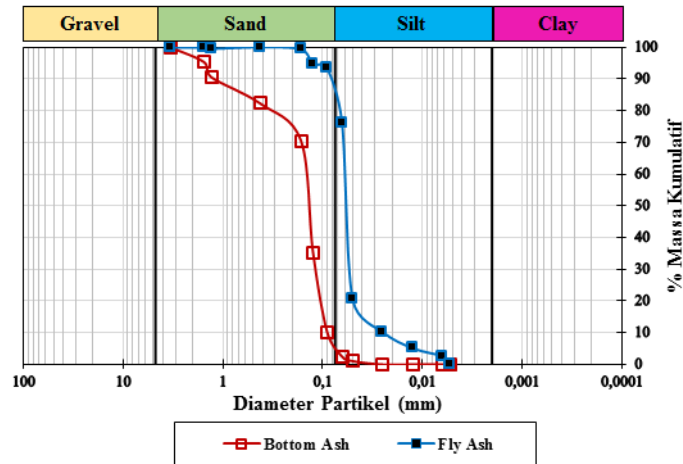
Gambar 2. Bentuk Morfologi CCP PLTU Mulut Tambang PT.WP

### b) Distribusi Ukuran Butir CCP

Distribusi ukuran butir CCP sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PT.WP, baik *fly ash* maupun *bottom ash* seperti ditampilkan pada Gambar 3. Distribusi ukuran butir ditentukan dengan ayak basah untuk mengetahui ukuran butir yang sesungguhnya dari abu batubara. Penggunaan ayak basah (*wet sieve*) karena CCP bersifat higroskopis. Sifat higroskopis merupakan kemampuan suatu zat untuk menyerap molekul air dari lingkungannya, baik melalui absorpsi atau adsorpsi. Ukuran butir yang halus menjadikan CCP dimanfaatkan sebagai material *blending* atau *layering overburden* yang bersifat asam karena mengurangi laju infiltrasi air dalam

timbunan serta memiliki kandungan alkalinitas sebagai penetral material *potentially acid forming* (PAF). Aplikasi *layering* dan *blending* ini tidak dilakukan pada lokasi penambangan nikel laterit karena overburdennya tidak mengandung mineral sulfida (khususnya pirit) seperti pada tambang batubara. Oleh karena itu, umumnya *fly ash* dan *bottom ash* cenderung hanya ditimbun setelah mendapatkan izin dari KLHK.

Sampel *fly ash* (FA) dengan ayak basah yang lolos ayakan 200 mesh atau 0,074 mm sebanyak 76,15%. Sampel *bottom ash* (BA) yang lolos ayakan No. 200 dengan ayak basah hanya 6,75%. Perbandingan jumlah yang lolos ayakan 200 mesh sampel *fly ash* dan *bottom ash* adalah 11,28 : 1 atau 11 kali lebih banyak *fly ash*.

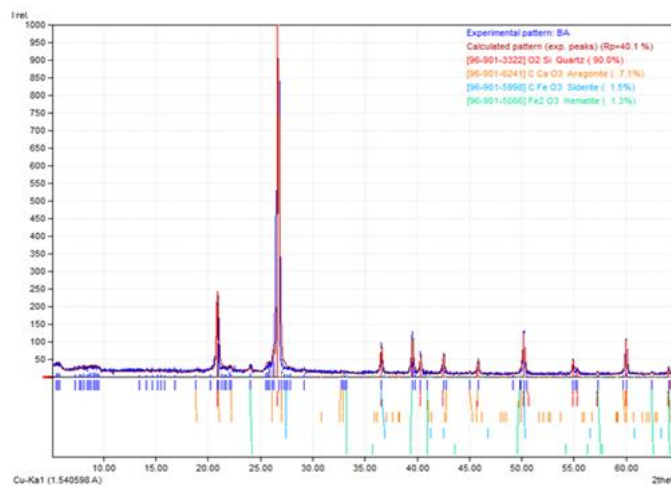


Gambar 3. Distribusi ukuran butir CCP

Berdasarkan kurva distribusi ukuran butir ini memperlihatkan bahwa ukuran butir CCP jenis *fly ash* lebih halus/lebih kecil ukuran butirnya dibandingkan dengan CCP jenis *bottom ash*. Hal ini sejalan dengan hasil pengamatan dengan mikroskop bijih yang memperlihatkan *fly ash* lebih kecil ukuran butirnya dibandingkan dengan *bottom ash*. Sampel *fly ash* termasuk material berbutir halus (kategori *clay and silt*) karena lebih dari 50% lolos ayakan No. 200 atau 0,074 mm sedangkan *bottom ash* terkategori material berbutir kasar jenis pasir karena lebih dari 50% tertahan diayakan No.200, tetapi lebih dari 50% lolos ayakan No.4 [11].

### c) Kandungan Mineralogi dan Oksida Sampel CCP

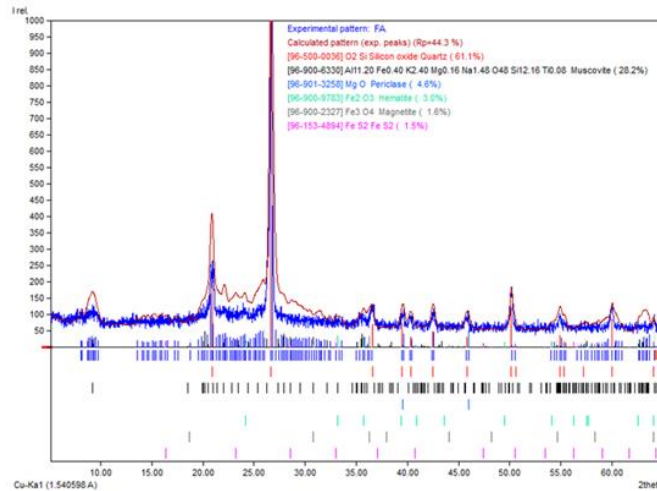
Kandungan mineralogi CCP sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PT.WP seperti ditampilkan pada Gambar 4 dan 5. Hasil analisis kandungan mineral CCP jenis *bottom ash*, kandungan dominannya adalah kuarsa ( $\text{SiO}_2$ ) ditandai dengan bentuk peak yang besar dan intensitasnya kuat. Kandungan mineral yang lain adalah pembawa logam besi seperti siderite dan hematit serta pembawa logam kalsium (Ca) yaitu aragonite.



Gambar 4. Hasil analisis uji XRD sampel *bottom ash*

Kandungan mineral dominan CCP jenis *fly ash* dari sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PT.WP masih sama, kuarsa ( $\text{SiO}_2$ ). Kandungan dominan lainnya adalah mineral liat jenis muskovite, pembawa logam

magnesium dalam bentuk periclase ( $\text{MgO}$ ) serta pembawa logam besi seperti magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dan pirit ( $\text{FeS}_2$ ). Hasil uji XRD ini menunjukkan material CCP ini tidak mengandung mineral berbahaya, hanya dikategorikan limbah B3 karena volumenya yang besar, sehingga perlu direduksi volumenya dengan dimanfaatkan sebagai bahan substitusi atau pemanfaatan lain seperti sumber logam tanah jarang.



Gambar 5. Hasil analisis uji XRD sampel *fly ash*

Kandungan oksida dominan CCP sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PT.WP, baik *fly ash* maupun *bottom ash* seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Kandungan oksida dominannya adalah  $\text{SiO}_2$ , dimana pada *fly ash* 50,6% sedangkan pada *bottom ash* mencapai 67,9%. Oksida dominan yang lain adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kadarnya 8,15% pada *bottom ash* dan 21,9% dalam *fly ash* serta  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kandungannya dalam BA dan FA berturut-turut 10,8% dan 7,76%. Kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  menjadi salah satu indikator pengklasifikasian abu batubara. Kandungan tiga (3) oksida tersebut pada BA dan FA berturut-turut 86,85% dan 80,26. Kandungan 3 oksida tersebut melebihi 70% (minimalnya 70%) terkategori abu batubara Kelas F. Kriteria kelas F yang lain kandungan  $\text{SO}_3$  maksimal 5%, yang memenuhi sampel BA sedangkan FA terlampaui. Kriteria yang lain misalnya kadar air (maksimal 3%) dan LoI atau *Loss on Ignition* (maksimal 6%) keduanya memenuhi.

Tabel 1. Kandungan Oksida sampel CCP PT.WP

Oksida	% Massa	
	<i>Bottom Ash</i> (BA)	<i>Fly Ash</i> (FA)
$\text{Na}_2\text{O}$	0,0328	0,64
$\text{MgO}$	0,565	1,04
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8,15	21,9
$\text{SiO}_2$	67,9	50,6
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,123	0,0598
$\text{SO}_3$	0,0285	12,2
Cl	0,0086	0,0052
$\text{K}_2\text{O}$	1,18	2,02
CaO	7,54	2,55
$\text{TiO}_2$	0,92	0,901
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,0446	0,023
MnO	0,171	0,223
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	10,8	7,76
ZnO	0,255	0,0231
$\text{Rb}_2\text{O}$	-	0,0106
SrO	0,176	0,017
$\text{ZrO}_2$	0,146	0,0546
Ni	0,0283	-
CoO	0,112	-
$\text{WO}_3$	1,84	-

#### d) Kandungan LTJ Abu Batubara

Abu batubara atau CCP sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PT.WP, baik *fly ash* maupun *bottom ash* berdasarkan hasil uji dengan ICP-MS memiliki kandungan logam tanah jarang (LTJ). Ada 16 unsur LTJ yang terdeteksi dengan uji ICP-MS hanya satu unsur yang tidak terdeteksi, yaitu Pm. Unsur LTJ di alam sebanyak 17 unsur [12][13]. LTJ dari grup lantanida (nomor atom 57-71) dan 2 unsur logam transisi, yaitu skandium (Sc) dan yttrium (Y). Grup lantanida, yaitu La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, dan Lu [14][15]. Hasil uji menunjukkan kandungan LTJ sampel *fly ash* lebih tinggi dibandingkan dengan *bottom ash*, kandungannya berturut-turut 190,07 ppm dan 142,64 ppm. Kandungan LTJ yang dominan pada kedua sampel adalah cerium (Ce), neodimium (Nd), lantanida (La), dan yttrium (Y). Kandungan unsur LTJ yang dominan ini yang diharapkan dimasa depan dapat diekstraksi terlebih dahulu sebelum sisanya digunakan sebagai bahan substitusi atau ditimbun.

Tabel 2. Kandungan LTJ CCP sisa PLTU Mulut Tambang PT.WP

Sampel	Kadar (ppm)																
	Sc	Y	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Dy	Tb	Er	Tm	Yb	Lu	Eu	La	Ho	Total
FA	16,6	26,3	61,8	7,5	31,8	6,2	4,7	3,6	0,7	2	0,3	2,3	0,4	1,17	23,9	0,8	190,07
BA	9,8	21	46,2	5,5	24,1	4,9	3,8	2,8	0,6	1,6	0,2	1,7	0,3	0,94	18,6	0,6	142,64

Kandungan LTJ ada 2 jenis, yaitu logam tanah jarang ringan atau *light rare earth elements* (LREE) dan LTJ berat atau *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 ke bawah sedangkan LTJ berat adalah logam tanah jarang yang memiliki nomor atom 64-71. Logam tanah jarang yang dominan pada kedua CCP tersebut adalah LTJ ringan. Perbandingan LTJ ringan dan LTJ berat pada sampel *fly ash* adalah 11,84 : 1 sedangkan pada sampel *bottom ash* adalah 11,3 : 1 (relatif sama kedua sampel). Kandungan LTJ ringannya lebih dominan dibandingkan LTJ berat. LTJ ringan terkonsentrasi dalam sampel, khususnya *fly ash* akibat massanya yang ringan. Awalnya dalam batubara input bahan bakar PLTU kadar LTJ-nya rendah setelah terkonsentrasi menjadi dominan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan Suganal dkk [4] pada PLTU Ombilin dan penelitian Firman dkk [5] pada PLTU Banjarsari Sumatera Selatan.

#### 4.0 KESIMPULAN

CCP sisa pembakaran PLTU Mulut Tambang PLTU PT.WP memiliki kandungan unsur LTJ sebanyak 16 unsur, yaitu skandium (Sc), lantanum (La), yttrium (Y), cerium (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), kandungan unsur yang dominan adalah cerium dan paling rendah kadarnya adalah tulium. *Fly ash* memiliki kandungan unsur LTJ total sebesar 190,07 ppm sedangkan *bottom ash* kandungannya hanya 142,64 ppm. Kandungan unsur LTJ *fly ash* dan *bottom ash* yang dominan adalah cerium (46,2-61,8 ppm), neodimium (24,1-31,8 ppm), yttrium (21-26,3 ppm) dan lantanum (18,6-23,9 ppm). 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 karena setiap PLTU bersifat spesifik.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada LPPM Universitas Khairun yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian Kompetitif Unggulan Perguruan Tinggi (PKUPT) Fakultas Teknik serta kepada PT. Wanatiara Persada Site Haul Sagu Obi atas perkenanya untuk pengambilan sampel abu batubara.

#### Daftar Pustaka

- [1] F. Firman, A. Haya, and A. Sahidi, "Identifikasi Kandungan Logam Tanah Jarang pada Abu Batubara PLTU Mulut Tambang," vol. 1, no. 1, pp. 18-24, 2020.
- [2] 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.
- [3] Firman, F. (2020). Analisis Kandungan Logam Berat Abu Batubara PLTU Bangko Barat Kab. Muara Enim Sumatera Selatan. *Journal Of Science And Engineering*, 3(1).
- [4] S. Suganal, D. F. Umar, and H. E. Mamby, "Identifikasi keterdapatan 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.
- [5] F. Firman and A. Haya, "Study on the Potential Rare Earth Elements in Coal Combustion Product from Banjarsari Power Plant , South Sumatera," *IJCST*, 2020.
- [6] 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.
- [7] S. Kashiwakura, Y. Kumagai, H. Kubo, and K. Wagatsuma, "Dissolution of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash Particles in a Dilute  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Solvent," *Open J. Phys. Chem.*, vol. 03, no. 02, pp. 69–75, 2013.
- [8] 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.
- [9] M. Peiravi *et al.*, "Chemical extraction of rare earth elements from coal ash," vol. 34, no. 4, pp. 170–177, 2018.
- [10] R. K. Taggart, J. C. Hower, G. S. Dwyer, and H. Hsu-kim, "Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.-Based Coal Combustion Fly Ashes," 2016.
- [11] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering, Seventh Edition*, Sevent. CENGAGE Learning, 2010.
- [12] K. Binnemans, P. T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven, and Y. Pontikes, "Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 99, pp. 17–38, 2015.
- [13] K. Binnemans *et al.*, "Recycling of rare earths: A critical review," *J. Clean. Prod.*, vol. 51, pp. 1–22, 2013.
- [14] F. Firman, "Kajian Pencampuran Abu Batubara Limbah PLTU Dengan Material Pembentuk Asam untuk Pencegahan Air Asam Tambang," Intitut Teknologi Bandung, 2017.
- [15] L. V. Resende and C. A. Morais, "Study of the recovery of rare earth elements from computer monitor scraps - Leaching experiments," *Miner. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 277–280, 2010.