

ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT ABU BATUBARA PLTU BANGKO BARAT KAB. MUARA ENIM SUMATERA SELATAN

Article history

Received

5 Maret 2020

Received in revised form

17 April 2020

Accepted

25 April 2020

Firman Firman^{a*}, Muhammad Rizhan^b, dan Abdul Azis Sahidi^a

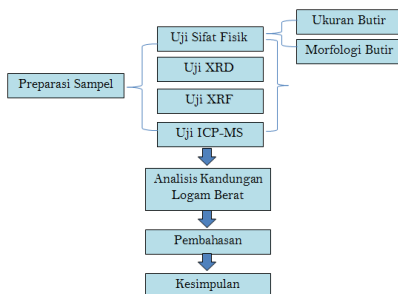
^aUniversitas Khairun, Ternate, Indonesia

^bPoliteknik Negeri Banjarmasin, Indonesia

*Corresponding author

firman@unkhair.ac.id

Graphical abstract



Abstract

Coal combustion product (CCP) from Bangko Barat Power Plant is used as landfill material in acidic overburden layers. CCP is categorized as hazardous and toxic waste (PP No.101/2014) from specific sources and is known to contain heavy metals. This study aims to analyze the heavy metal content of coal combustion product from Bangko Barat Power Plant, Muara Enim Regency, South Sumatra Province. Heavy metal content of CCP includes Hg, Cd, Cu, Ag, Ni, Pb, As, Cr, Sn, Zn dan Mn. Heavy metal content analysis to ensure overburden piling by utilizing CCP, either with a long-term safe coating or mixing scheme. The analysis was carried out by using ICP-MS test, XRF test, XRD test, analysis of grain size and grain morphology. Samples of fly ash and bottom ash were categorized as non-hazardous and toxic waste based on the results of the ICP-MS test compared to the values of TK-A, TK-B and TK-C. Heavy metal content that needs attention from coal ash is As (4.4-20 ppm), Cr (26-43 ppm), Cu (30.7-42.6 ppm), Pb (22.2-29.3 ppm), Zn (77.5-128 ppm), Ni (10.6-24.8 ppm) and Mn (144-396 ppm). The content of other heavy metals is relatively low (Hg, Cd, Ag and Sn) and the threshold is not exceeded. Monitoring the quality of runoff water from landfill area using CCP to be controlled so that the heavy metal content does not endanger the health of living things.

Keywords: CCP, West Bangko, ICP-MS, heavy metals

Abstrak

Abu batubara PLTU Bangko Barat digunakan sebagai material *landfill* dalam pelapisan batuan penutup yang bersifat asam. Abu batubara dikategorikan sebagai limbah B3 (PP No.101 Tahun 2014) dari sumber spesifik khusus dan diketahui memiliki kandungan logam berat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan logam berat dari abu batubara PLTU Bangko Barat Kabupaten Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan. Analisis kandungan logam berat untuk memastikan timbunan batuan penutup dengan memanfaatkan abu batubara, baik dengan skema pelapisan maupun pencampuran aman untuk jangka panjang. Analisis dilakukan dengan uji ICP-MS, uji XRF uji XRD, analisis ukuran butir dan morfologi butirmnya. Sampel *fly ash* dan *bottom ash* terkategori limbah non-B3 berdasarkan hasil pengujian ICP-MS dibandingkan dengan nilai TK-A, TK-B dan TK-C. Kandungan logam berat abu batubara meliputi, Hg, Cd, Cu, Ag, Ni, Pb, As, Cr, Sn, Zn dan Mn. Kandungan logam berat yang perlu mendapatkan perhatian dari abu batubara yaitu As (4,4-20 ppm), Cr (26-43 ppm), Cu (30,7-42,6 ppm), Pb (22,2-29,3 ppm), Zn (77,5-128 ppm), Ni (10,6-24,8 ppm) dan Mn (144-396 ppm). Kandungan logam berat yang lainnya relatif rendah (Hg, Cd, Ag dan Sn) dan ambang batasnya tidak terlampaui. Pemantauan terhadap kualitas air limpasan dari daerah timbunan yang menggunakan abu batubara perlu dikontrol sehingga kandungan logam berat yang ada tidak membahayakan kesehatan makhluk hidup.

Kata kunci: Abu batubara, Bangko Barat, ICP-MS, logam berat

© 2020 Penerbit Fakultas Teknik Unkhair. All rights reserved

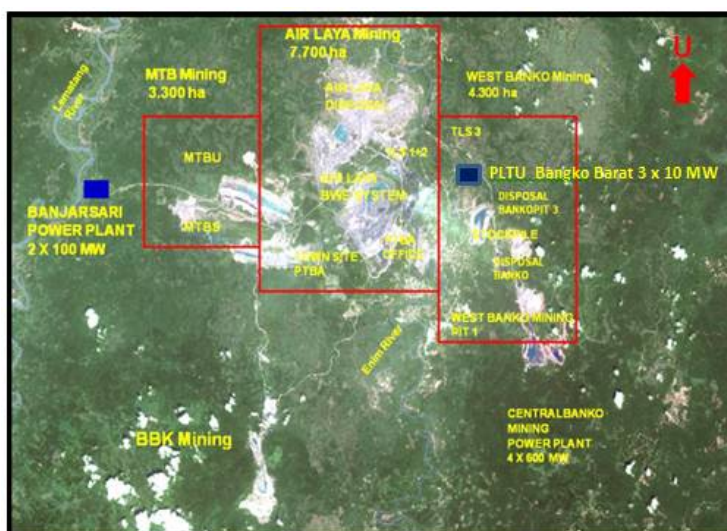
1.0 PENDAHULUAN

Abu batubara merupakan material sisa pembakaran pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), dimana sangat dipengaruhi tipe pembakaran pada PLTU dan input batubaranya [1]. Residu pembakaran batubara berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Sekitar 80-90% adalah *fly ash* dan hanya 10-20% terkategori *bottom ash* [2]. Abu batubara digunakan sebagai material *landfill* lubang bukaan tambang yang telah memasuki masa *mine out*. Pemanfaatannya digunakan dalam pelapisan (*layering*) [3][4] atau pencampuran (*blending*) [5] dengan batuan penutup (*overburden*) yang bersifat asam atau *potentially acid forming* (PAF) karena memiliki kandungan alkalinitas dan ukuran butir yang kecil sehingga mengurangi laju infiltrasi air [6]. Abu batubara 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 kandungan logam beratnya untuk memastikan penggunaannya dalam aplikasi timbunan batuan penutup aman secara lingkungan.

Salah satu jenis polutan yang banyak mendapat perhatian dalam pengelolaan lingkungan adalah logam berat. Abu batubara memiliki kandungan logam berat sehingga perlu mendapat perhatian serius karena dimanfaatkan dalam material timbunan khususnya di kegiatan pertambangan batubara pada PT. Bukit Asam, Tbk. Tanjung Enim Kabupaten Muara Enim Sumatera Selatan. Jenis logam berat yang tergolong memiliki tingkat toksisitas tinggi, antara lain yaitu air raksa (Hg), kadmium (Cd), tembaga (Cu), perak (Ag), nikel (Ni), timbal (Pb), arsen (As), kromium (Cr), timah (Sn), seng (Zn), dan mangan (Mn) [7].

2.0 METODOLOGI

Preparasi sampel abu batubara (*fly ash* dan *bottom ash*) dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian sedangkan pengujian dilakukan di Laboratorium Hidrogeologi dan Geokimia (uji XRF) serta Laboratorium Batubara (uji XRD) Program Studi Teknik Pertambangan FTTM Institut Teknologi Bandung. Pengujian ICP-MS sampel abu batubara dilakukan di *Activation Laboratories LTD*, Ontario Kanada. Lokasi pengambilan sampel abu batubara pada PLTU Bangko Barat (3 x 10 MW) yang berada dalam Wilayah Izin Usaha Pertambangan (WIUP) PT. Bukit Asam, Tbk (Gambar 1) yang secara administratif terletak di Kabupaten Muara Enim, Propinsi Sumatera Selatan.



Gambar 1. Lokasi PLTU Bangko Barat pada IUP PT. Bukit Asam, Tbk.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi; ayakan standar (No. 30, 40, 60, 80, 100, 140, 200 dan 270), oven, alat *X-Ray Diffraction* (XRD), alat *X-Ray Fluorescence* (XRF), alat *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS), mikroskop bijih, kantong sampel, *splitter box* dan GPS (*Global Positioning System*). Prosedur Penelitian meliputi:

2.1. Preparasi Sampel

Sampel dilakukan preparasi untuk menyiapkan sampel sehingga siap dilakukan pengujian selanjutnya. 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). Selanjutnya dilakukan pengayakan dengan ayak kering maupun ayak basah untuk mengetahui distribusi ukuran butir abu batubara. Ayakan yang digunakan yaitu ayakan No. 30, 40, 60, 80, 100, 140, 200 dan 270. Hasil ayak kering ditimbang setiap fraksinya sedangkan hasil ayak basah diovenkan selama 24 jam dan dilakukan penimbangan untuk mengetahui massa setiap fraksi lalu dibuatkan kurva distribusi ukuran butir.

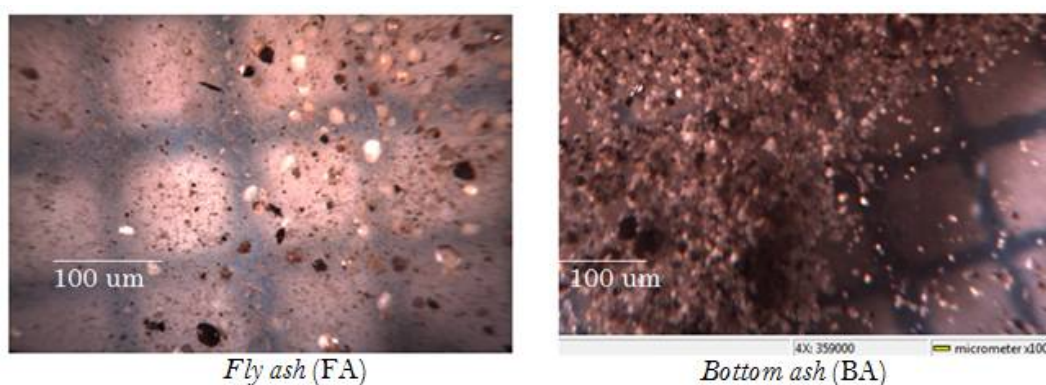
2.2. Pengujian Sampel

Pengujian sampel dilakukan untuk mengetahui morfologi butir abu batubara (mikroskop bijih), kandungan senyawa atau mineral (uji XRD) [8][9], oksida dominan (uji XRF) dan kandungan logam berat (uji ICP-MS) dari abu batubara. Sampel abu batubara yang diuji dengan 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

Morfologi butir abu batubara dari PLTU Bangko Barat berdasarkan hasil pengamatan dengan mikroskop bijih terlihat seperti Gambar 2. Material *fly ash* (FA) ukurannya relatif lebih kecil dibandingkan dengan *bottom ash* (BA) dan memiliki bentuk *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 Bangko Barat menggunakan input batubara dengan ukuran butir yang lebih halus dan sistem pembakarannya adalah *Pulverized Coal Boiler* (PCB). Abu batubaranya relatif lebih halus, baik *fly ash* maupun *bottom ash*. Input batubara PLTU Bangko Barat menggunakan brand batubara Bukit Asam-50 dengan kualitas, yaitu *calorific value* (CV) 5142,81 kcal/kg; total sulfur (TS) 0,74%; ash 3,68%; *total moisture* (TM) 23,14% dan *volatile matter* (VM) 34,86%. Batubaranya berasal dari *site* yang dekat dengan PLTU tersebut, khususnya *site* Bangko Barat.

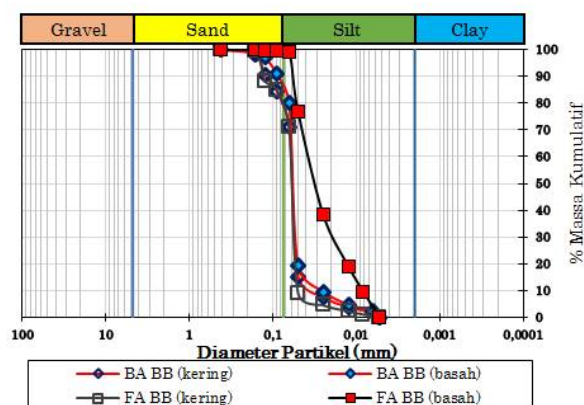


Gambar 2. Bentuk Morfologi Abu Batubara

b) Distribusi Ukuran Butir

Distribusi ukuran butir sampel abu batubara, baik *fly ash* maupun *bottom ash* seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Distribusi ukuran butir ditentukan dengan ayak kering dan ayak basah untuk mengetahui ukuran butir yang sesungguhnya dari abu batubara. Ayak kering cenderung tidak mampu memperlihatkan distribusi ukuran butir yang sesungguhnya dari abu batubara, karena sampel bersifat higroskopis. Sifat higroskopis merupakan kemampuan suatu zat untuk menyerap molekul air dari lingkungannya, baik melalui absorpsi atau adsorpsi. Ukuran butir yang halus menjadikan abu batubara digunakan sebagai material *capping* batuan penutup yang bersifat asam karena mengurangi laju infiltrasi air dalam timbunan serta memiliki kandungan alkalinitas sebagai penetral material *potentially acid forming* (PAF).

Sampel *fly ash* (FA) dengan ayak kering hanya 70,96% yang lolos ayakan No. 200 atau 0,074 mm sedangkan dengan ayak basah yang lolos mencapai 98,16%. Sampel *bottom ash* (BA) dengan ayak kering hanya 70,94% yang lolos ayakan No. 200 sedangkan dengan ayak basah mencapai 79,72% yang lolos. Perbandingan jumlah yang lolos ayakan No.200 sampel *fly ash* dan *bottom ash* adalah 1,23 : 1.



Gambar 3. Distribusi ukuran abu batubara

Berdasarkan kurva distribusi ukuran butir ini memperlihatkan bahwa ukuran butir *fly ash* lebih halus dibandingkan dengan *bottom ash*. Hal ini menguatkan hasil pengamatan dengan mikroskop bijih yang memperlihatkan *fly ash* lebih kecil ukuran butirnya dibandingkan dengan *bottom ash*. Sampel *fly ash* dan *bottom ash* termasuk material berbutir halus (kategori *clay and silt*) karena lebih dari 50% lolos ayakan No. 200 atau 0,074 mm [10].

c) Kandungan Oksida dan Mineral Sampel Abu Batubara

Kandungan oksida dominan dari sampel abu batubara, baik *fly ash* maupun *bottom ash* seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Ada beberapa oksida dominan pembawa logam berat, seperti Cr_2O_3 pada sampel *fly ash* kandungannya sebanyak 0,02%; ZnO pada kedua sampel dengan kadar yang sama 0,02% serta oksida MnO dengan kadar 0,02% pada *bottom ash* dan 0,22% pada *fly ash*. Oksida pembawa logam berat yang lain belum terdeteksi dengan uji XRF, diantaranya oksida yang membawa logam air raksa (Hg), kadmium (Cd), tembaga (Cu), perak (Ag), nikel (Ni), timbal (Pb), arsen (As), timah (Sn). Logam berat tersebut boleh jadi ada dalam sampel tetapi kandungannya kecil sehingga belum terdeteksi dengan uji XRF.

Tabel 1. Kandungan Oksida Dominan sampel Abu Batubara

No.	Komponen	% Massa	
		BA BB	FA BB
1	Na_2O	0,17	1,75
2	MgO	1,02	2,43
3	Al_2O_3	23,80	21,90
4	SiO_2	66,30	50,60
5	P_2O_5	0,11	0,06
6	SO_3	2,05	12,20
7	Cl	0,01	0,01
8	K_2O	0,64	2,02
9	CaO	1,10	2,55
10	TiO_2	0,69	0,90
11	Cr_2O_3	-	0,02
12	MnO	0,02	0,22
13	Fe_2O_3	4,04	7,76
14	ZnO	0,02	0,02
15	Rb_2O	-	0,01
16	SrO	0,02	0,02
17	ZrO_2	0,08	0,03
Total		100	100

Uji XRF ini selain bertujuan untuk mengetahui kandungan oksida dominan (pembawa logam berat) juga bertujuan untuk mengetahui kelas abu batubara berdasarkan ASTM-C-618, dimana *fly ash* dan *bottom ash* dari

PLTU Bangko Barat termasuk abu batubara kelas F. Kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimalnya 70% sedangkan sampel FA dan BA jauh di atasnya, yaitu 80,26% dan 94,14%. Kandungan SO_3 maksimal 5% (kelas F) sedangkan *bottom ash* hanya 2,05%. Kadar air sampel FA 2,92% dan BA hanya 0,08% (berdasarkan hasil pengujian kadar air) sedangkan untuk kelas F maksimal 3% sehingga masih memenuhi.

Kandungan senyawa atau mineral dari sampel abu batubara sesuai hasil uji XRD, yaitu *bottom ash* mengandung mineral kuarsa, muskovit, periclase, hematit, magnetit dan pirit. Sampel *fly ash* mengandung mineral kuarsa, muskovit, lime, pirit, magnetit dan hematit. Kandungan dominannya untuk kedua sampel adalah mineral kuarsa (SiO_2). Selain itu, mengandung mineral muskovit sebagai mineral minor. Mineral minor lainnya pembawa logam besi seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) dan pirit (FeS_2) serta mineral lime (CaO) dan periclase (MgO) sebagai pembawa logam Ca dan Mg. Hasil uji dengan XRD belum memperlihatkan kandungan mineral pembawa logam berat.

d) Kandungan Logam Berat Abu Batubara

Abu batubara, baik *fly ash* (FA) maupun *bottom ash* (BA) berdasarkan hasil uji dengan ICP-MS memiliki kandungan logam berat (*heavy metal*) yang tinggi khususnya logam mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), kromium (Cr), timbal (Pb), nikel (Ni) dan arsen (As) sesuai Tabel 2 dan Tabel 3. Logam arsen merupakan logam yang mudah patah dan sangat toksik [11]. Standar WHO dan US-EPA untuk konsentrasi arsen maksimum yang diperbolehkan dalam air minum adalah 10 $\mu\text{g/L}$ (ppb). Kandungan arsen dalam *fly ash* 20 ppm (2000 kali lebih banyak dari yang diperbolehkan dalam air minum) sedangkan pada *bottom ash* 4,4 ppm (440 kali lebih banyak). Metode penghilangan senyawa arsen dalam air lindian adalah proses pengendapan ferri arsenat atau pengendapan arsen dalam bentuk senyawa sulfida. Berdasarkan PP No 101 Tahun 2014 (Tabel 2) ada 15 parameter unsur logam untuk mengelompokan suatu limbah, mulai dari limbah B3 kategori 1, limbah B3 kategori 2, limbah non-B3 ataupun tanah pelapis dasar. Pada Tabel 2 hanya 14 parameter yang dicantumkan yaitu antimon (Sb), arsen (As), barium (Ba), berilium (Be), kadmium (Cd), krom (Cr) valensi 6, tembaga (Cu), timbal (Pb), air raksa (Hg), molibdenum (Mo), nikel (Ni), selenium (Se), perak (Ag) dan seng (Zn) sedangkan kandungan unsur boron (B) tidak dilakukan pengujian.

Tabel 2. Klasifikasi limbah abu batubara (PP No.101 Tahun 2014)

Item	Sb	As	Ba	Be	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Mo	Ni	Se	Ag	Zn
	Konsentrasi (ppm)													
TK-A	300	2000	25000	4000	400	2000	3000	6000	300	4000	12000	200	720	15000
TK-B	75	500	6250	100	100	500	750	1500	75	1000	3000	50	180	3750
TK-C	3	20	160	1.1	3	1	30	300	0.3	40	60	10	10	120
FA	2,2	20	376	4,4	0,2	43	42,6	29,3	0,53	11	24,8	5,4	0,29	128
BA	0,7	4,4	261	1,6	0,1	26	30,7	22,2	0,06	2,63	10,6	0,3	0,19	77,5

Keterangan: Limbah B3 Kategori 1 (>TK-A); Limbah B3 Kategori 2 (TK-A_TK-B); Limbah Non-B3 (TK-B_TK-C); dan Tanah Pelapis Dasar (< TK-C)

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa abu batubara dari PLTU Bangko Barat tidak terkategori limbah B3, baik kategori 1 ataupun kategori 2 sesuai dengan PP No. 101 Tahun 2014. Dari 14 parameter yang dilakukan pengukuran dengan menggunakan ICP-MS tidak satupun yang melampaui total konsentrasi (TK) kadarnya, baik TK-A dan TK-B. Sampel *fly ash* (FA) untuk parameter unsur As, Ba, Be, Cr, Cu, Hg dan Zn terkategori limbah non-B3 sedangkan 7 indikator lainnya termasuk tanah pelapis dasar (< TK-C). Sampel *bottom ash* (BA) untuk parameter Ba, Be, Cr dan Cu terkategori limbah non-B3 sedangkan untuk 10 parameter lainnya hanya sebagai tanah pelapis dasar.

Kandungan logam berat abu batubara hasil pembakaran PLTU Bangko Barat diperlihatkan dalam Tabel 3. Terdapat 11 jenis logam berat dalam *fly ash* maupun *bottom ash*, mulai dari Hg, Cd, Cu, Ag, Ni, Pb, As, Cr, Sn, Zn dan Mn. Logam kromium (Cr) tidak toksik, tetapi senyawanya sangat iritan dan korosif serta dalam paru-paru dapat menimbulkan kanker. Kandungan logam Mn dalam *fly ash* sebanyak 396 ppm sedangkan pada *bottom*

ash 144 ppm, nilai tersebut jauh diatas baku mutu air limbah kegiatan pertambangan batubara yang hanya 4 ppm (mg/L). Jika abu batubara tersebut digunakan dalam perlapisan ataupun pencampuran dengan material PAF sebagai material timbunan maka peluang adanya air lindian hasil infiltrasi dari areal timbunan tersebut sangat besar sehingga perlu dilakukan kompaksi pada areal tersebut sehingga air lindiannya tetap memenuhi baku mutu lingkungan.

Tabel 3. Kandungan logam berat abu batubara

Sampel	Kadar (ppm)											Total
	Hg	Cd	Cu	Ag	Ni	Pb	As	Cr	Sn	Zn	Mn	
FA	0,53	0,2	42,6	0,29	24,8	29,3	20	43	3	128	396	687,72
BA	0,06	< 0,1	30,7	0,19	10,6	22,2	4,4	26	2	77,5	144	317,65

Kandungan logam berat *fly ash* untuk semua parameter selalu lebih besar dari sampel *bottom ash* (Tabel 3). Kandungan total logam berat (11 jenis logam) *fly ash* sebanyak 687,72 ppm sedangkan *bottom ash* sebanyak 317,65 ppm. Logam berat yang perlu mendapat perhatian serius dari abu batubara adalah kromium (kandungannya 26-43 ppm), timbal (22,2-29,3 ppm), arsen (4,4-20 ppm), tembaga (30,7-42,6 ppm), nikel (10,6-24,8), seng (77,5-128 ppm) dan mangan (144-396 ppm). Sedangkan logam yang lain relatif lebih rendah, seperti air raksa (0,06-0,53 ppm), perak (0,19-0,29 ppm), kadmium (<0,1 – 0,2 ppm) dan timah (2-3 ppm).

4.0 KESIMPULAN

Abu batubara (*fly ash* maupun *bottom ash*) PLTU Bangko Barat memiliki kandungan logam berat sebanyak 11 unsur, yaitu Hg, Cd, Cu, Ag, Ni, Pb, As, Cr, Sn, Zn dan Mn. Abu batubara tidak terkategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) berdasarkan nilai TK-A dan TK-B. Ada 8 unsur logam berat yang kandungannya dominan sehingga tetap perlu mendapat perhatian serius ketika digunakan dalam aplikasi timbunan batuan penutup, yaitu kromium (26-43 ppm), timbal (22,2-29,3 ppm), arsen (4,4-20 ppm), tembaga (30,7-42,6 ppm), nikel (10,6-24,8), seng (77,5-128 ppm) dan mangan (144-396 ppm).

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada PT. Bukit Asam, Tbk yang telah mengirimkan sampel abu batubara PLTU Bangko Barat dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kepada Prof. Dr. Ir. Rudy Sayoga Gautama dan Dr. Eng. Ginting Jalu Kusuma, ST., MT yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] F. Firman, "Kajian Pencampuran Abu Batubara Limbah PLTU Dengan Material Pembentuk Asam untuk Pencegahan Air Asam Tambang," Intitut Teknologi Bandung, 2017.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] M. F. Madi, Almun; Syafri, Ildream; and Rosana, "Bulletin of Scientific Contribution," vol. 16, no. April,

pp. 65–70, 2018.

- [10] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering, Seventh Edition*, Sevent. CENGAGE Learning, 2010.
- [11] M. Ahmaruzzaman, "A review on the utilization of fly ash," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 327–363, 2010.