

ANALISA KANDUNGAN UNSUR DAN OKSIDA LIMBAH *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* SERTA POTENSI PEMANFAATANNYA

ESTHI KUSDARINI¹, DANIEL FEBRIYANDI¹, YUDHO DWI GALIH CAHYONO¹

1. Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 60117

Email: esti@itats.ac.id

ABSTRAK

Proses produksi energi listrik pada industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kalimantan Barat-1 menghasilkan limbah fly ash dan bottom ash yang dihasilkan dari pembakaran batubara. Limbah ini berpotensi mencemari lingkungan sehingga sangat penting untuk dicari solusi penanganannya. Penelitian ini bertujuan untuk : 1) mendapatkan prosentase jumlah limbah fly ash and bottom ash yang dihasilkan dibandingkan jumlah batubara yang dibakar; 2) mendapatkan kandungan unsur dan senyawa oksida fly ash dan bottom ash; 3) menentukan potensi pemanfaatan fly ash dan bottom ash. Metode penelitian yang digunakan adalah analisa unsur dan senyawa oksida menggunakan uji X-Ray Fluorescence (XRF), pengamatan di lapangan, wawancara, dan pengumpulan data sekunder. Hasil penelitian menunjukkan bahwa : 1) fly ash yang dihasilkan sebesar 2,9% dan bottom ash sebesar 1,5% dari berat batubara yang dibakar; 2) fly ash mengandung unsur utama rata-rata Fe 41%, Si 12%, Al 4,9% dan senyawa oksida utama rata-rata CaO 33%, SiO₂ 19%, Al₂O₃ 7,0 %; bottom ash mengandung unsur utama rata-rata Fe 45%, Si 13%, Al 3,7% dan senyawa oksida utama rata-rata CaO 28%, SiO₂ 20%, Al₂O₃ 5,3%; 3) Fly ash maupun bottom ash berpotensi untuk dimanfaatkan pada bidang konstruksi, pengolahan limbah, dan diekstraksi unsur berharga dan logam tanah jarang.

Kata kunci: batubara, bottom ash, fly ash, pembangkit listrik.

ABSTRACT

The electrical energy production process in the West Kalimantan Steam Power Plant-1 industry produces fly ash and bottom ash waste produced from coal combustion. This waste can pollute the environment, so it is very important to find solutions to handle it. This study aims to 1) obtain the percentage of the amount of fly ash and bottom ash waste produced compared to the amount of coal burned; 2) obtain the content of elements and oxide compounds of fly ash and bottom ash; 3) Determine the potential utilization of fly ash and bottom ash. The research methods used are analysis of elements and oxide compounds using X-ray fluorescence (XRF) tests, field observations, interviews, and secondary data collection. The results of the study showed that: 1) the fly ash produced was 2.9% and the bottom ash was 1.5% of the weight of the coal burned; 2) fly ash contains an average of 41% Fe, 12% Si, 4.9% Al and average 33% CaO, 19% SiO₂, 7.0% Al₂O₃; bottom ash contains an average of 45% Fe, 13% Si, 3.7% Al and average 28% CaO, 20% SiO₂, 5.3% Al₂O₃; 3) The results showed that fly ash and bottom ash contained metal oxides so they needed further processing—advanced processing into construction materials, rare metals and waste treatment material.

Keywords: bottom ash, coal, fly ash, power plant.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kalimantan Barat-1 menggunakan bahan bakar utama batubara untuk menghasilkan energi panas. Energi panas digunakan untuk memanaskan air dan menghasilkan uap air. Uap air digunakan untuk menggerakkan turbin yang mengubah energi panas menjadi energi listrik (Abbas dkk., 2020). Di samping manfaatnya sebagai penghasil energi listrik, PLTU juga menghasilkan limbah hasil pembakaran batubara, yaitu *fly ash* dan *bottom ash* yang berpotensi mencemari lingkungan.

Fly ash dan *bottom ash* menyebabkan polusi udara karena mengandung polutan beracun (Chen dkk., 2024). Oleh karena itu PLTU wajib menyediakan fasilitas penyimpanan dan pengelolaan *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan setelah proses pembakaran batubara. Penggunaan batubara di Indonesia lebih dari 75% untuk keperluan PLTU menyebabkan permasalahan limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan perlu penanganan yang serius (Haryadi & Suciyanti, 2020). Sedangkan kontribusi batubara sebagai sumber energi di Indonesia sampai tahun 2050 diperkirakan kurang dari 31% (Damayanti, 2018). Selain itu penggunaan batubara untuk PLTU yang cenderung meningkat setiap tahun akan menyebabkan kecenderungan peningkatan limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan (Setiawan dkk., 2020).

Untuk penanganan limbah *fly ash* dan *bottom ash* maka perlu dipelajari karakteristik masing-masing. Limbah *fly ash* dan *bottom ash* mempunyai kandungan unsur yang hampir sama namun komposisi yang berbeda. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkaji potensi pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash*. Damayanti menghasilkan temuan kandungan unsur *fly ash* dan *bottom ash* dari limbah pembakaran batubara PLTU Jawa Barat dan potensi pemanfaatannya (Damayanti, 2018). Namun demikian karakteristik *fly ash* dan *bottom ash* dari jenis batubara dan proses pembakaran batubara yang berbeda bisa menghasilkan kandungan unsur dalam *fly ash* dan *bottom ash* yang berbeda pula. Fauzi menghasilkan temuan karakteristik *fly ash* dari limbah pembakaran batubara PT Power Indonesia II Cilacap dan potensi pemanfaatannya (Fauzi, 2023). Namun demikian penelitian ini hanya menganalisa karakteristik limbah *fly ash*, dan juga jenis batubara maupun proses pembakaran batubara yang berbeda bisa menghasilkan kandungan unsur dalam *fly ash* yang berbeda pula. Penelitian sebelumnya menghasilkan temuan pedoman perbaikan peraturan kebijakan pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* (Hartono dkk., 2023). Penelitian yang lain menganalisa 5 unsur (Ca, Si, Al, Fe, dan Mn) dan 5 oksida (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO) yang terkandung dalam *fly ash* (Fauzi, 2023). Penelitian ini menyempurnakan penelitian sebelumnya dengan menganalisa 19 unsur dan 19 oksida yang terkandung dalam *fly ash* dan *bottom* sehingga dapat ditentukan potensi pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* secara lebih luas melalui review penelitian terdahulu terkait pemanfaatan limbah *fly ash* dan *bottom ash*.

2. METODE

Penelitian dilakukan di PLTU Kalimantan Barat-1 yang berlokasi di Dusun Tanjung Gundul, Desa Karimunting, Kecamatan Sungai Raya Kepulauan, Kabupaten Bengkayang, Provinsi Kalimantan Barat. Penelitian dilakukan dalam 3 tahap, yaitu : 1) mencari data sekunder kebutuhan batubara, limbah *fly ash* dan *bottom ash*; 2) mengambil dan menganalisa kandungan unsur dan senyawa oksida dalam sampel *fly ash* dan *bottom ash* menggunakan metode XRF; 3) mengkaji potensi pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* berdasarkan hasil analisa XRF dan literatur.

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah 2 sampel *fly ash* dan 2 sampel *bottom ash*, yang diambil selama 2 hari berturut-turut. Sampel yang diambil di hari pertama adalah *fly ash* (F1) dan *bottom ash* (B1). Sedangkan sampel yang diambil di hari kedua adalah *fly ash* (F2) dan *bottom ash* (B2). Sampel diambil dari silo (penampungan). Alat yang digunakan untuk mengambil sampel adalah kotak sampel, kertas sampel, sekop, sikat, label, dan spidol.

2.2. Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Alat yang digunakan untuk uji XRF adalah timbangan analitik, sendok, kertas alas (*baging paper*), campuran perekat sampel (*blinder flux*), *cup/ring* XRF, cawan *cup press pellet*. Langkah-langkah pengujian: 1) menyiapkan kertas alas sampel (*baging paper*), 2) memasukkan kertas alas sampel ke dalam neraca analitik, 3) mengambil sampel *ash* dan meletakkan di kertas alas sebanyak 4 g, 4) mencampurkan *binder* ke dalam sampel dengan komposisi *binder* : sampel adalah 1 : 4, 5) mengkalibrasi alat XRF, 6) memasukkan sampel ke dalam *cup/ring* XRF, 7) memberi tekanan pada sampel agar tidak pecah; 8) meletakkan sampel di atas cawan pellet; 9) penyinaran sampel dengan sinar X; 10) sinar X yang dipancarkan sampel ditangkap oleh detektor, 11) perangkat lunak dalam alat XRF memproses hasil deteksi berupa puncak-puncak energi yang merupakan unsur-unsur spesifik dan komposisinya.

2.3. Menganalisa Hasil Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Hasil uji XRF berupa kandungan unsur dan senyawa oksida dalam *fly ash* dan *bottom ash* diidentifikasi unsur dan senyawa oksida yang paling dominan. Langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil uji XRF dengan penelitian terdahulu sehingga diketahui potensi pemanfaatan limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari pembakaran batubara di PLTU Kalimantan Barat-1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah Fly Ash dan Bottom Ash

Limbah *fly ash* dan *bottom ash* dihasilkan dari proses pembakaran batubara di unit boiler. PLTU Kalimantan Barat-1 mempunyai kapasitas pembangkit listrik (2 x 100 MW). Batubara digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik melalui energi uap yang dihasilkan unit boiler. Unit boiler berguna untuk memanaskan air sampai menjadi uap yang difungsikan untuk menggerakkan turbin. Pada proses ini air merupakan bahan baku untuk menghasilkan uap. Air yang digunakan adalah air tawar yang merupakan hasil olahan dari air laut. Pemanasan air menggunakan bahan bakar batu bara 4200 kalori yang telah dihancurkan lebih dahulu sebelum disemprotkan ke dalam boiler bersamaan dengan udara untuk proses pembakaran. Selanjutnya kebutuhan batubara dan limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara selama bulan Januari 2022 sampai Juni 2024 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Batubara 4200 Kal dan Limbah Ash

Batubara (ton)	Waktu	Fly Ash (ton)	Bottom Ash (ton)
943.635	Jan – Des 2022	27.396	14.154
929.940	Jan – Des 2023	26.986	13.949
500.000	Jan – Juni 2024	14.500	7.500

Kebutuhan batubara dan limbah *ash* yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa prosentase dari limbah *ash* yang dihasilkan dibandingkan jumlah batubara yang dibakar mendekati bilangan yang tetap seperti disajikan pada Tabel 2.

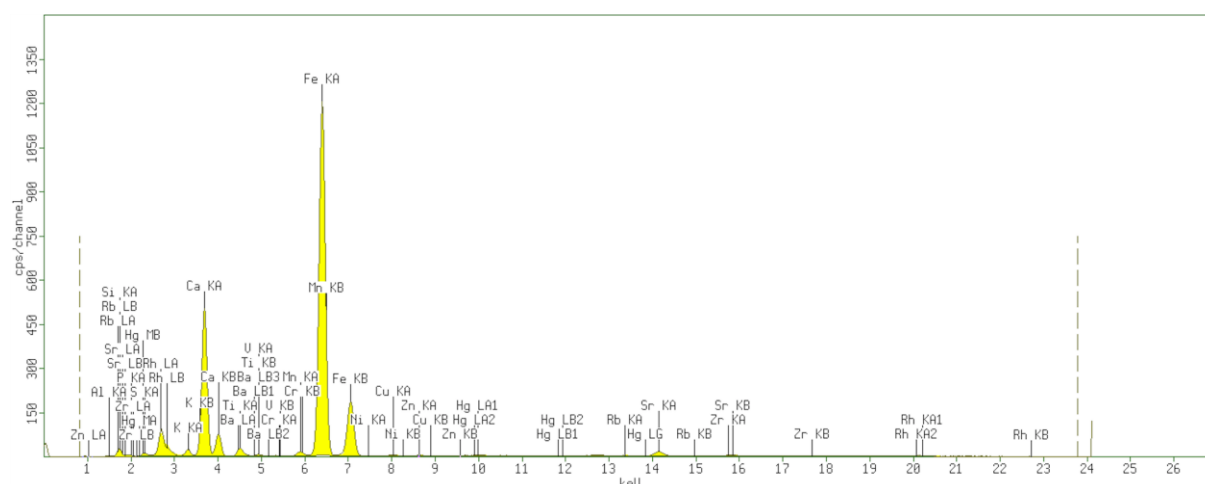
Tabel 2. Prosentase Limbah *Ash* Dibandingkan Batubara 4200 Kal yang Dibakar

Batubara (ton)	Waktu	<i>Fly Ash</i> (%)	<i>Bottom Ash</i> (%)
943.635	Jan – Des 2022	2,903	15,00
929.940	Jan – Des 2023	2,902	15,00
500.000	Jan – Juni 2024	2,900	15,00

Kandungan Unsur dan Senyawa Oksida Limbah *Ash*

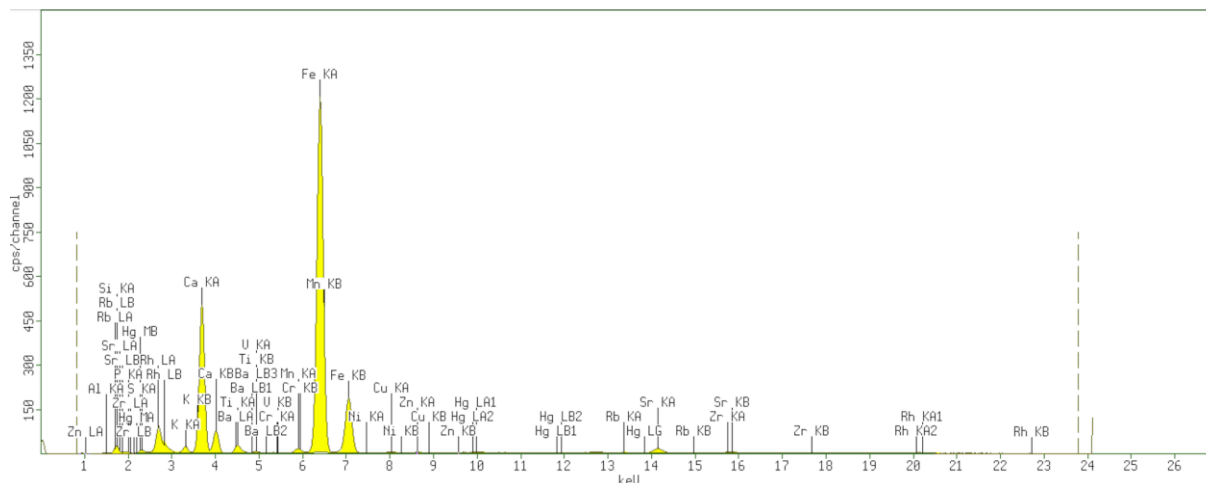
Fly Ash

Sampel F1 dan F2 diuji kandungan unsurnya menggunakan uji XRF. Hasil uji disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Hasil Uji XRF Kandungan Unsur Sampel F1

Gambar 1 menunjukkan 19 unsur yang terkandung dalam sampel *fly ash* F1. Unsur terbanyak yang terkandung dalam sampel *fly ash* (F1) adalah Fe sebesar 40,9% menyusul Ca 35,3%, Si 12%, Al 4,9% dan sisanya unsur lain. Sedangkan Gambar 2 menunjukkan 19 unsur yang terkandung dalam sampel *fly ash* F2. Unsur terbanyak yang terkandung dalam sampel *fly ash* (F2) adalah Fe sebesar 41,1% menyusul Ca 35,4%, Si 12%, Al 4,8% dan sisanya unsur lain. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan dari kandungan jenis unsur dan kadar masing-masing unsur pada sampel *fly ash* F1 dan F2. Unsur dominan dalam *fly ash* yang ditemukan pada penelitian ini sama dengan yang ditemukan pada penelitian sebelumnya, namun komposisinya berbeda, yaitu Ca 8,33%; Si 5,429%; Al 1,801%; dan Fe 3,571% (Fauzi, 2023). Perbedaan komposisi unsur yang cukup besar antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya kemungkinan disebabkan perbedaan jenis batubara, teknologi pembakaran, kondisi operasional pembakaran, metode penangkapan abu, dan adanya kemungkinan pengolahan tambahan yang dilakukan oleh masing-masing PLTU yang melibatkan penambahan zat kimia atau pemurnian.



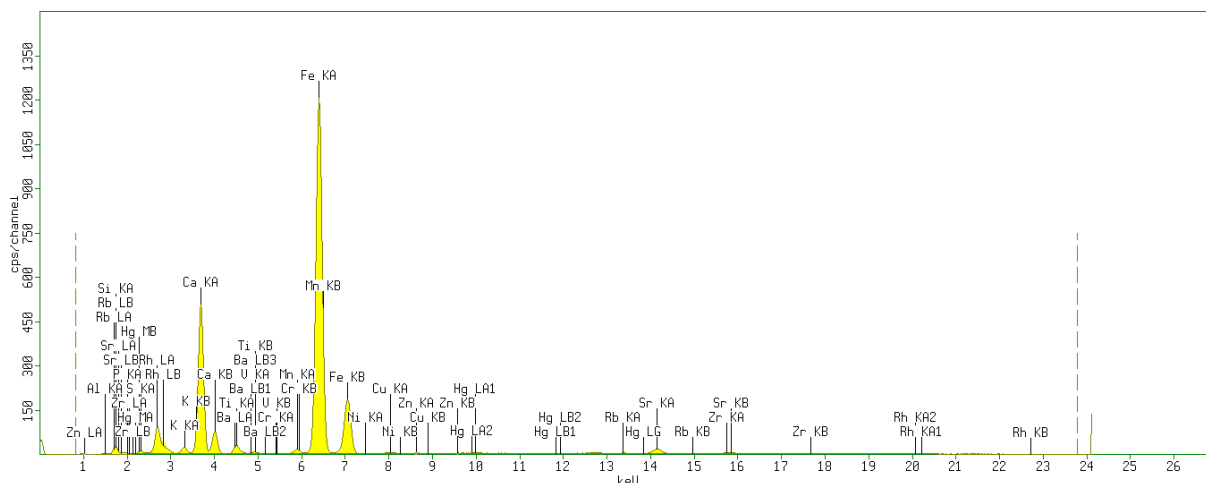
Gambar 2. Hasil Uji XRF Kandungan Unsur Sampel F2

Hasil analisa XRF untuk kandungan unsur dari sampel *fly ash* F1 (Gambar 1) dan F2 (Gambar 2) dapat disajikan secara sistematis pada Tabel 3.

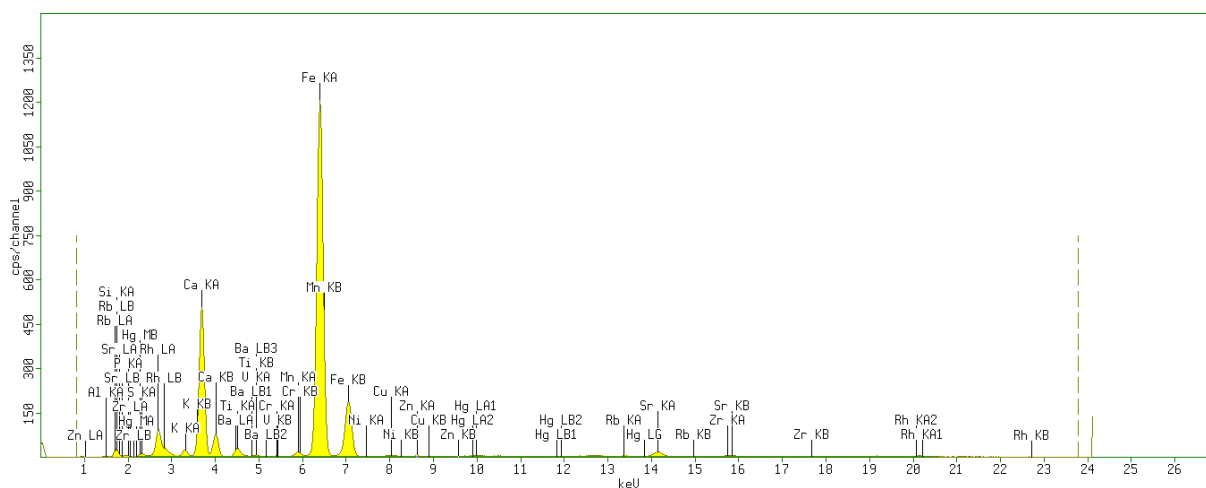
Tabel 3. Kandungan Unsur *Fly Ash*

No	Unsur	Sampel F1 (%)	Sampel F2 (%)
1	Al	4,9	4,8
2	Si	12	12
3	P	0,3	0,3
4	S	1	1
5	K	1,8	1,7
6	Ca	35,3	35,4
7	Ti	1,6	1,6
8	V	0,05	0,04
9	Cr	0,03	0,04
10	Mn	0,5	0,5
11	Fe	40,9	41,1
12	Ni	0,04	0,03
13	Cu	0,15	0,14
14	Zn	0,055	0,051
15	Rb	0,06	0,05
16	Sr	0,833	0,841
17	Zr	0,1	0,098
18	Ba	0,3	0,4
19	Hg	0,1	0,1

Selain kandungan unsurnya, sampel F1 dan F2 juga diuji kandungan senyawa oksidanya menggunakan uji XRF seperti disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Hasil Uji Senyawa Oksida Sampel F1



Gambar 4. Hasil Uji Senyawa Oksida Sampel F2

Hasil analisa XRF untuk kandungan senyawa oksida dari sampel *fly ash* F1 (Gambar 3) dan F2 (Gambar 4) dapat disajikan secara sistematis pada Tabel 4. Unsur terbanyak yang terkandung dalam sampel *fly ash* (F1 dan F2) adalah rata-rata untuk Fe_2O_3 sebesar 34,45% menyusul CaO 32,45%, SiO_2 19%, Al_2O_3 6,95% dan sisanya unsur lain. Unsur dominan dalam *fly ash* yang ditemukan pada penelitian ini sama dengan yang ditemukan pada penelitian sebelumnya, namun komposisinya berbeda, yaitu CaO 13,70%; SiO_2 13,99%; Al_2O_3 4,07%; dan Fe_2O_3 6,018% (Fauzi, 2023). Sama halnya dengan kandungan unsur dalam *fly ash*, perbedaan komposisi oksida *fly ash* penelitian ini dengan penelitian sebelumnya kemungkinan disebabkan jenis batubara, teknologi pembakaran, kondisi operasional pembakaran, metode penangkapan abu yang tidak sama, dan adanya kemungkinan pengolahan tambahan yang dilakukan oleh masing-masing PLTU yang melibatkan penambahan senyawa kimia.

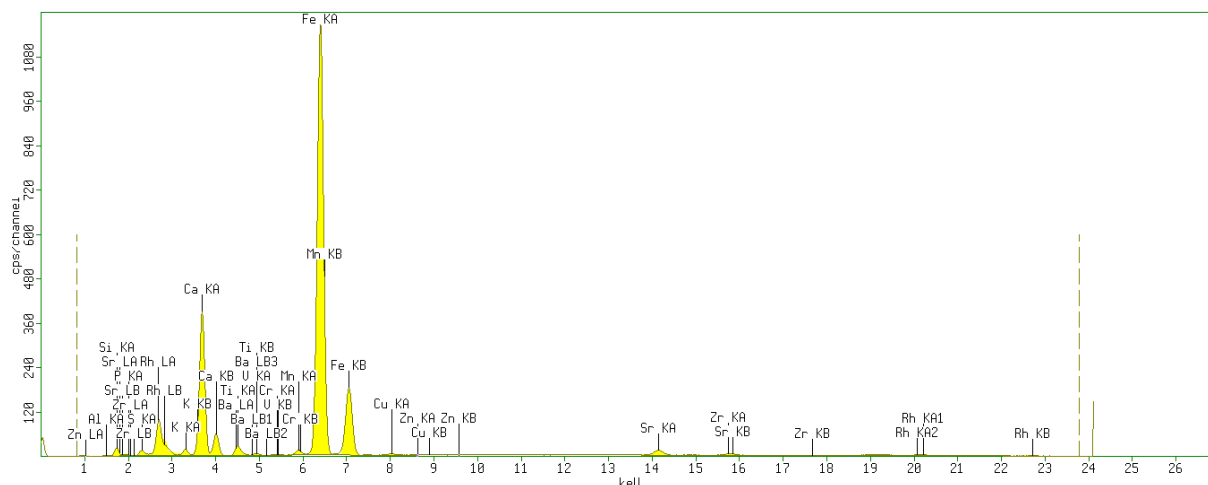
Tabel 4. Kandungan Senyawa Oksida *Fly Ash*

No	Senyawa Oksida	Sampel F1 (%)	Sampel F2 (%)
1	Al_2O_3	6,9	7
2	SiO_2	19	19
3	P_2O_5	0,5	0,4
4	SO_3	1,9	1,8
5	K_2O	1,4	1,4

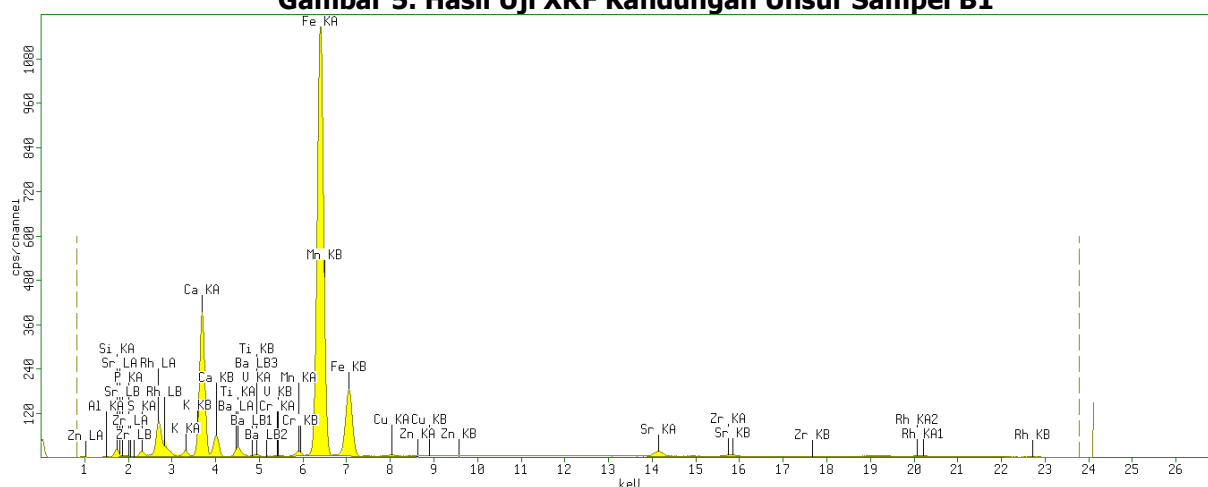
6	CaO	32,4	32,5
7	TiO ₂	1,7	1,69
8	V ₂ O ₅	0,05	0,06
9	Cr ₂ O ₃	0,03	0,03
10	MnO	0,38	0,38
11	Fe ₂ O ₃	34,4	34,5
12	NiO	0,02	0,03
13	CuO	0,11	0,1
14	ZnO	0,034	0,034
15	Rb ₂ O	0,031	0,031
16	SrO	0,548	0,553
17	ZrO ₂	0,082	0,076
18	BaO	0,3	0,2
19	HgO	0,05	0,06

Bottom Ash

Sampel B1 dan B2 diuji kandungan unsurnya menggunakan uji XRF seperti disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Uji XRF Kandungan Unsur Sampel B1



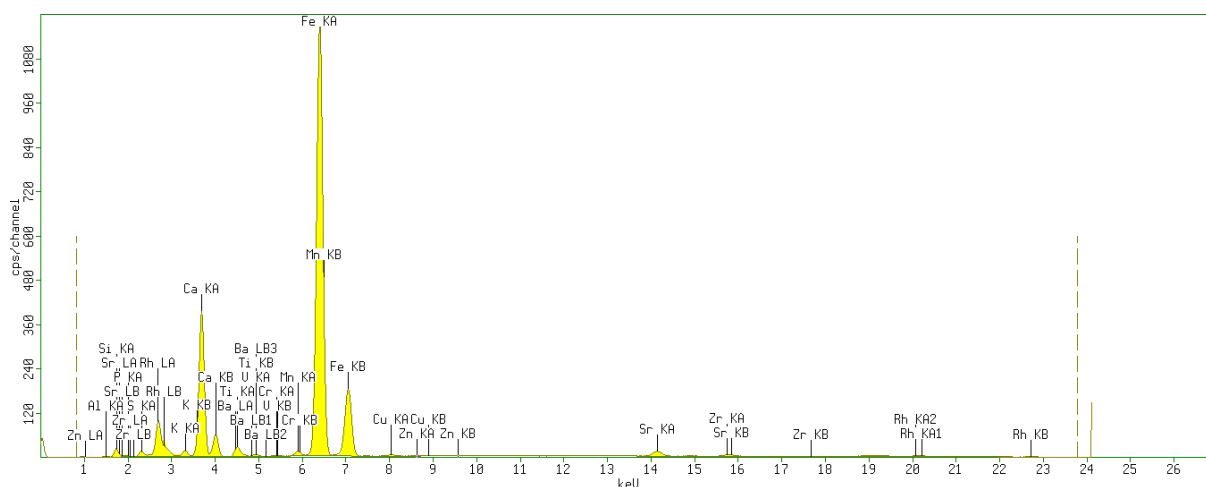
Gambar 6. Hasil Uji XRF Kandungan Unsur Sampel B2

Hasil analisa XRF untuk kandungan unsur dari sampel *bottom ash* B1 (Gambar 5) dan B2 (Gambar 6) dapat disajikan secara sistematis pada Tabel 5.

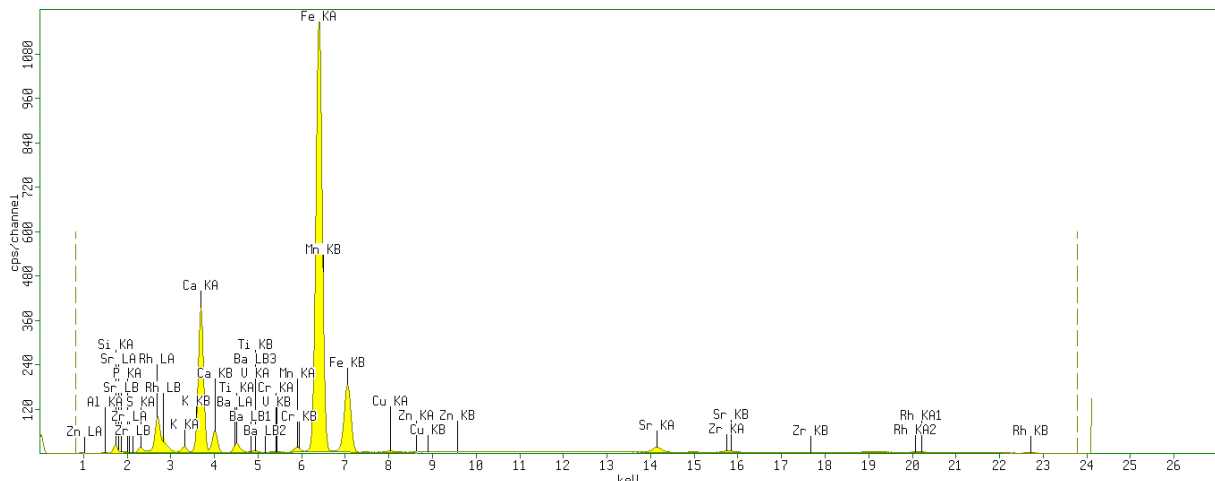
Tabel 5. Kandungan Unsur *Bottom Ash*

No	Unsur	Sampel B1 (%)	Sampel B2 (%)
1	Al	3,6	3,7
2	Si	13	13
3	P	0,3	0,3
4	S	1,7	1,8
5	K	1,4	1,4
6	Ca	31	30,9
7	Ti	1,7	1,6
8	V	0,06	0,06
9	Cr	0,062	0,067
10	Mn	0,54	0,54
11	Fe	45,1	45,1
12	Cu	0,17	0,16
13	Zn	0,04	0,04
14	Sr	0,92	0,91
15	Zr	0,21	0,22
16	Ba	0,3	0,3

Selain kandungan unsurnya, sampel B1 dan B2 juga diuji kandungan senyawa oksidanya menggunakan uji XRF seperti disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Hasil Uji Senyawa Oksida Sampel B1



Gambar 8. Hasil Uji Senyawa Oksida Sampel B2

Hasil analisa XRF untuk kandungan senyawa oksida dari sampel *bottom ash* B1 (Gambar 7) dan B2 (Gambar 8) dapat disajikan secara sistematis pada Tabel 6.

Tabel 6. Kandungan Senyawa Oksida *Bottom Ash*

No	Senyawa Oksida	Sampel B1 (%)	Sampel B2 (%)
1	Al ₂ O ₃	5,1	5,5
2	SiO ₂	20	20
3	P ₂ O ₅	0,5	0,6
4	SO ₃	3,1	3,1
5	K ₂ O	1,1	1,1
6	CaO	28,4	28,4
7	TiO ₂	1,7	1,8
8	V ₂ O ₅	0,07	0,07
9	Cr ₂ O ₃	0,063	0,056
10	MnO	0,42	0,41
11	Fe ₂ O ₃	37,9	37,9
12	CuO	0,12	0,12
13	ZnO	0,02	0,03
14	SrO	0,6	0,59
15	ZrO ₂	0,16	0,16
16	BaO	0,2	0,2

Potensi Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) Pengolahan Limbah

Keberadaan limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari aktivitas di PLTU Kalimantan Barat-1 menjadi masalah yang serius karena jumlahnya yang cukup besar (Tabel 1). Oleh karena itu perlu dikaji potensi pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash*. Tabel 4 menunjukkan bahwa *fly ash* mengandung Al₂O₃ 6,9 – 7% dan CaO 32,4 – 32,5%. Sedangkan *bottom ash* mengandung Al₂O₃ 5,1 – 5,5% dan CaO 28,4%. Senyawa Al₂O₃ dan CaO bersifat basa sehingga berpotensi untuk digunakan untuk menetralkan air asam tambang dan memperbaiki kualitas tanah kaolin (Abdelbaseta dkk., 2024). Hal ini sesuai dengan temuan sebelumnya bahwa 1 gram *fly ash* dan *bottom ash* mampu menaikkan pH air asam tambang sebanyak 200 mL dari pH 3 menjadi 7 (Samosir & Har, 2021). *Fly ash* dan *bottom ash*

berpotensi menjadi bahan penetral limbah bersifat asam selain kapur tohor (Kusdarini dkk., 2024) dan manganese greensand (Kusdarini dkk., 2023). Selain potensinya untuk menetralkan keasaman air limbah, *fly ash* juga berpotensi sebagai adsorber. Penelitian sebelumnya menghasilkan temuan bahwa *fly ash* mampu mengadsorpsi zat fenolik dalam air limbah sampai 30,42 mg/L (Jia dkk., 2024). *Fly ash* juga berpotensi digunakan sebagai adsorber zat warna dalam air limbah. *Fly ash* alami mampu mengadsorpsi zat warna sampai 81,52%, sedangkan *fly ash* yang sudah ditingkatkan luas permukaannya melalui aktivasi kimia mampu mengadsorpsi zat warna sampai 97,52% (Nadeem dkk., 2024).

Konstruksi

Selanjutnya kandungan pozzolan dalam *fly ash* dan *bottom ash* yang meliputi SiO_2 19-20%, Al_2O_3 5,1-6,9% dalam *fly ash* dan *bottom ash* menyebabkan material ini berpotensi untuk digunakan sebagai campuran semen pada pembuatan paving blok (Kusdarini dkk., 2022). Limbah *fly ash* dan *bottom ash* juga berpotensi untuk campuran bahan perkerasan jalan (Indriyati dkk., 2019), dan campuran semen (Ma dkk., 2024). Penambahan *fly ash* sebesar 8-12% ke dalam mortar mampu meningkatkan fenomena segregasi dan presipitasi mortar, serta menurunkan tegangan luluh mortar sebesar 35,1-64,9% (J. Zhang dkk., 2024). *Fly ash* juga mampu menggantikan semen pada pembangunan tanggul. Penelitian sebelumnya menghasilkan temuan bahwa dengan menggantikan semen dengan *fly ash* 10% dan pasir 20% mampu meningkatkan penyerapan energi 57% dan fluiditas semen ringan 7%, serta menurunkan indeks keuletan 34%, emisi karbon 46%, dan biaya konstruksi 35% (C. Zhang dkk., 2024). *Bottom ash* berpotensi menjadi bahan substitusi sebagian pasir dalam campuran beton siap pakai, *paving block*, batako, *conblock*, bata ringan, dan produk pemecah ombak karena mengandung SiO_2 20%, Al_2O_3 5,1-5,5%, Fe_2O_3 37,9%, dan CaO 28,4% sehingga totalnya lebih dari 50% (Asof dkk., 2022). Selain itu limbah *fly ash* dan *bottom ash* juga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan geopolimer, cenosphere, stabilitas tanah jalan raya; bahan yang dapat diekstraksi kandungan unburned carbon, unsur berharga, dan unsur tanah jarang (Anggara dkk., 2021).

Ekstraksi Unsur Berharga

Temuan yang lain menunjukkan bahwa ekstraksi logam tanah jarang dari *fly ash* dapat dilakukan melalui metode hidrometalurgi seperti pelindian asam langsung, jalur solvo-metalurgi yang memanfaatkan pelarut eutektik dalam dan cairan ionik, dan proses pemulihan logam berikutnya melalui proses pemisahan pelarut, pemisahan elektrokimia, dan teknik pemisahan membrane (Thomas dkk., 2024).

4. KESIMPULAN

PLTU Kalimantan Barat-1 membutuhkan batubara lebih dari 900.000 ton/tahun sejak tahun 2022 untuk operasionalnya. Aktivitas pembakaran batubara pada unit boiler menimbulkan limbah *fly ash* sebanyak 2,9% dan *bottom ash* 1,5% dari berat batubara yang dibakar. Limbah *fly ash* mengandung oksida dominan Fe_2O_3 34,4-34,5%; CaO 32,4-32,5%; SiO_2 19%; Al_2O_3 6,9-7%; sedangkan limbah *bottom ash* mengandung oksida dominan Fe_2O_3 37,9%; CaO 28,4%; SiO_2 20%, Al_2O_3 5,1-5,5%. Limbah *fly ash* dan *bottom ash* masih bernilai ekonomis mengingat potensinya untuk dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi seperti campuran beton, *paving block*, batako, *conblock*, bata ringan, stabilitas tanah; pengolahan limbah; dan bahan yang dapat diekstraksi apabila mengandung unsur berharga seperti *unburned carbon* dan unsur tanah jarang. Untuk penyempurnaan penelitian ini dapat dilakukan penelitian lanjutan mengenai penentuan komposisi optimal antara *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bahan substitusi semen atau pasir pada bidang konstruksi agar produk memenuhi standar SNI atau peraturan perundangan yang berlaku. Penelitian juga bisa

dikembangkan untuk menentukan dosisnya dan meningkatkan kinerjanya sebagai media pengolah limbah. Selanjutnya penelitian juga bisa dilanjutkan terkait eksperimen ekstraksi unsur berharga dalam *fly ash* dan *bottom ash*.

PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dewan direksi dan karyawan PLTU Kalimantan Barat-1 yang telah menyediakan tempat penelitian dan fasilitas lain, memberi kesempatan penulis untuk mengambil data primer maupun sekunder sehingga penelitian dapat selesai pada waktunya dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, H., Amaluddin, Arif, M., & Amiruddin. (2020). Analisa Pembangkit Tenaga Listrik dengan Tenaga Uap di PLTU. *ILTEK: Jurnal Teknologi*, 15(2), 103–106. <https://doi.org/https://doi.org/10.47398/iltek.v15i02.33>
- Abdelbaseta, A. M., Katunský, D., Zelenáková, M., & Mohamed H. El-Feky. (2024). Mechanical Properties Stabilization of Low Plasticity Kaolin Soil Using Fly Ash and Hydrated Lime. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03662>
- Anggara, F., Petrus, H. T. B. M., Besari, D. A. A., Manurung, H., & Saputra, F. Y. A. (2021). Review on Characterization and Utilization Potential of Fly Ash and Bottom Ash (FABA). *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(1), 53–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.47599/bsdg.v16i1.320>
- Asof, M., S. Arita, Mukiat, Luthfia, Andalia, W., & Naswir, M. (2022). Analisis Karakteristik, Potensi dan Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Industri Pupuk. *Jurnal Teknik Kimia*, 28(1), 44–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.36706/jtk.v28i1.977>
- Chen, Y., Fan, Y., Huang, Y., Liao, X., Xu, W., & Zhang, T. (2024). A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115905>
- DAMAYANTI, R. (2018). Abu Batubara dan Pemanfaatannya: Tinjauan Teknis Karakteristik Secara Kimia dan Toksikologinya. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 14(3), 213–231.
- Fauzi, M. A. R. (2023). Karakterisasi Kimia dan Kategorisasi Abu Terbang dari PT Indonesia Power II Cilacap: Analisis XRF. *Indonesian Journal of Innovation Studies*, 23, 1–8. <https://doi.org/10.21070/ijins.v24i.954>
- Hartono, D., Widjayanti, A., & Rifai, F. H. (2023). Pedoman Perbaikan Peraturan Kebijakan Pemanfaatan FABA (Fly Ash Bottom Ash) di Perusahaan Listrik Negara (PT PLN). *Management Studies and Entrepreneurship Journal*, 4(6), : 8315-8322. <https://doi.org/http://journal.yrpiiku.com/index.php/msej>
- Haryadi, H., & Suciyaniti, M. (2020). "Analisis perkiraan kebutuhan batubara untuk industri domestik tahun 2020-2035 dalam mendukung kebijakan domestik market obligation dan kebijakan energi nasional. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 14(1), 59. <https://doi.org/doi: 10.30556/jtmb.Vol14.No1.2018.192>
- Indriyati, T. S., Malik, A., & Alwinda, Y. (2019). Kajian Pengaruh Pemanfaatan Limbah Faba (Fly Ash dan Bottom Ash) pada Konstruksi Lapisan Base Perkerasan Jalan. *Jurnal Teknik*, 13(2), 112–119.

- Jia, X., Liu, Y., Yang, Z., Zhang, A., Liu, P., & Liu, Z. (2024). Construction of coal fly ash-based spherical grain adsorbents and their adsorption characteristics on phenolic compounds Author links. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsuc.2024.100042>
- Kusdarini, E., Sania, P. R., & Budianto, A. (2023). Adsorption of Iron and Manganese Ions from Mine Acid Water Using Manganese Green Sand in Batch Process. *Journal of Ecological Engineering*, 24(12), 158–166.
- Kusdarini, E., Sania, P. R., & Budianto, A. (2024). Netralisasi Air Asam Tambang Menggunakan Pengolahan Aktif dan Pasif. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 808–815. <https://doi.org/10.14710/jil.22.3.808-815>
- Kusdarini, E., Ulviandri, F. I., & Sari, A. S. (2022). Penentuan Komposisi Bahan Baku pada Pemanfaatan Fly Ash pada Proses Produksi Paving Block. *Jurnal Reka Lingkungan*, 10(2), 103–112. <https://doi.org/DOI:http://dx.doi.org/10.26760/rekalingkungan.v10i2.103-112>
- Ma, X., Da, Y., He, T., Su, F., & Yang, R. (2024). Long term environmental safety evaluation of incineration fly ash and its use as admixture after freeze-thaw. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110506>
- Nadeem, H., Jamil, F., Iqbal, M. A., Nee, T. W., Kashif, M., Ibrahim, A. H., ... Rehman, M. T. (2024). Comparative study on efficiency of surface enhanced coal fly ash and raw coal fly ash for the removal of hazardous dyes in wastewater: optimization through response surface methodology. *Royal Society of Chemistry*, 14(31), 22312–22325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d4ra04075a>
- Samosir, G. B. G., & Har, R. (2021). Pemanfaatan Fly Ash Bottom Ash dan Tawas untuk Menetralkan Air Asam Tambang. *Jurnal Bina Tambang*, 6(4), 102–111.
- Setiawan, A., Wibowo, A. P., & Rosyid, F. (2020). Analisis pengaruh ekspor dan konsumsi batubara terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 16(2), 109–124. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol16.No2.2020.1081>
- Thomas, B. S., Dimitriadis, P., Kundu, C., Vuppaladadiyam, S. S. V., Raman, R. K. S., & Bhattacharya, S. (2024). Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 1–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769>
- Zhang, C., Zhang, Y., Zhu, Z., Liu, F., Yang, Y., Shi, L., & Kang, X. (2024). Applicability and chemical mechanism of lightweight cement composite containing fly ash and sand for sustainable embankment. *Construction and Building Materials*, 443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137735>
- Zhang, J., Jin, C., Wang, B., Han, J., Guo, L., & Tang, N. (2024). Study on the micro-rheological properties of fly ash-based cement mortar. *Construction and Building Materials*, 442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137664>