



## Evaluasi Pengelolaan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Proses Produksi Energi Listrik PLTU Pacitan

Minhajul Abidin<sup>1</sup>, Shinfi Wazna Auvaria<sup>1</sup>, Rhenny Ratnawati<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya, Surabaya, 60294, Indonesia

### Keywords:

*Bottom Ash; Characteristics; Fly Ash; Management; Waste*

### Kata Kunci:

*Bottom Ash; Fly Ash; Karakteristik; Limbah; Pengelolaan*

### Article History:

Submitted: 24 September 2025

Accepted: 10 November 2025

Available Online: 31 December 2025

### Korespondensi Penulis:

Shinfi Wazna Auvaria

### Email:

[shinfiwazna@uinsa.ac.id](mailto:shinfiwazna@uinsa.ac.id)

### Abstract

The increasing consumption of electrical energy has resulted in more power plants. Steam Power Plants (PLTU) are among the largest electricity suppliers that use coal as fuel. The waste produced will potentially cause environmental pollution. Waste generated in the form of Fly Ash and Bottom Ash (FABA). Waste management must be carried out based on applicable regulations. The purpose of this study is to analyze the management of Pacitan PLTU's FABA and compare it with regulations. This research method uses a qualitative descriptive approach. The data needed are literature studies, field observations, interviews, and documentation. The results of these characteristic tests show that the parameters SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, and Na<sub>2</sub>O do not meet the pozzolan quality standards. However, in Bottom Ash, SiO<sub>2</sub> meets the standards. The waste management process that is implemented is considered to meet the applicable standards or regulations to support environmental protection and management policies.

### Abstrak

Konsumsi energi listrik yang meningkat mengakibatkan Pembangkit tenaga listrik yang didirikan semakin banyak. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) termasuk pemasok listrik terbesar yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Limbah yang dihasilkan akan berpotensi mengakibatkan terjadinya pencemaran lingkungan. Limbah yang dihasilkan berupa *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA). Pengelolaan limbah harus dilakukan berdasarkan regulasi yang berlaku. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengelolaan FABA PLTU Pacitan dan membandingkan dengan peraturan. Metode penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif. Data yang dibutuhkan berasal dari studi literatur, observasi lapangan, wawancara, dan dokumentasi. Hasil uji karakteristik ini menunjukkan terdapat parameter SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, dan Na<sub>2</sub>O yang kurang memenuhi standar kualitas pozzolan. Namun pada Bottom Ash, SiO<sub>2</sub> telah memenuhi standar. Proses pengelolaan limbah yang diterapkan dinilai telah memenuhi standar atau regulasi yang berlaku untuk mendukung kebijakan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup.

Sitasi: Abidin, M., Auvaria, S. W., & Ratnawati, R. (2025). *Evaluasi Pengelolaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash dari Proses Produksi Energi Listrik PLTU Pacitan*. *Composite: Journal of Civil Engineering*, 4(2), 55–66. <https://doi.org/10.26905/cjce.v4i2.16210>

© 2025 Composite: Journal of Civil Engineering

This is an open-access article distributed under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

## 1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama manusia pada zaman modern. Manusia umumnya menggunakan energi listrik dalam setiap aktivitas sehari-hari. Energi listrik dapat difungsikan sebagai pencahayaan, pemanas, penggerak dan lainnya (Pattinasarany et al., 2022). Menurut data BPS tahun 2018-2023, konsumsi listrik di Indonesia mengalami peningkatan sebesar 22,6%. Peningkatan konsumsi listrik ini mengakibatkan unit pembangkit listrik semakin banyak didirikan di seluruh wilayah Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. PLTU memanfaatkan hasil uap pembakaran untuk menggerakkan turbin. Energi mekanik yang dihasilkan turbin akan diubah oleh generator untuk menjadi energi listrik (Maulidia et al., 2024). PLTU Pacitan merupakan pembangkit listrik yang terletak di bagian wilayah Jawa Timur bagian selatan, dan menggunakan bahan bakar batu bara dengan kapasitas 2 x 315 MW serta jaringan transmisi SUTT 150 KV sepanjang 35,58 km mulai dari PLTU Pacitan hingga GI Pacitan. Batu bara yang digunakan dalam proses produksi energi listrik  $\pm$  200.000 ton/bulan. Pembakaran batu bara pada PLTU dapat menghasilkan bermacam-macam limbah, salah satunya adalah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) (Gazalie et al., 2023). FABA merupakan sisa pembakaran batu bara berupa partikel halus atau berupa abu (Larasati & Aziz, 2024). *Fly Ash* memiliki bentuk halus dengan ukuran  $>0,074$  mm dan massa jenis 1.600 kg/m<sup>3</sup> (Szerement et al., 2021). Sedangkan *Bottom Ash* berbentuk seperti pasir dengan ukuran besar sekitar 0,5-2 mm, dengan massa jenis sebesar 2.230 kg/m<sup>3</sup> (Ansari & Prianto, 2021). Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 pada Lampiran XIV, FABA termasuk kategori Limbah Non B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) terdaftar.

FABA yang dihasilkan harus dikelola dengan pengurangan limbah, penyimpanan limbah, pemanfaatan limbah, dan penimbunan limbah sesuai dengan peraturan yang berlaku. Pengelolaan FABA yang dilakukan di PLTU Pacitan terdiri dari pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pemanfaatan, dan penimbunan.

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis dan mengevaluasi proses pengelolaan limbah FABA yang diterapkan oleh PLTU Pacitan dengan PP 22 Tahun 2021, dan Permen LHK 19 Tahun 2021, serta kualitas *pozzolan* dalam FABA dengan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C-618 (*Pozzolan*). Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengelolaan FABA, mulai dari pengurangan hingga penimbunan, dan hal-hal yang berkaitan dengan pengelolaan FABA seperti karakteristik yang terkandung dalam FABA dan teknologi yang digunakan dalam pengelolaan FABA, serta membandingkan dengan peraturan yang telah ditetapkan. Hasil dalam penelitian ini dapat berfungsi sebagai salah satu penilaian dalam pengelolaan FABA yang telah diterapkan oleh PLTU Pacitan.

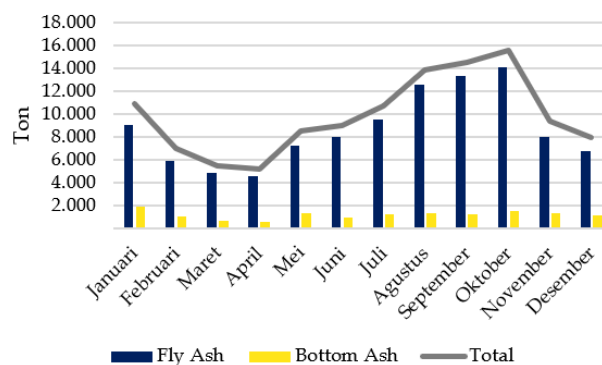
## 2. Metode Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan yang terletak di Jl. Raya Pacitan-Trenggalek KM. 55, Desa Sukorejo, Kec. Sudimoro, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. Adapun waktu penelitian ini dilakukan mulai Januari hingga April 2025. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif kualitatif. Metode ini dilakukan dengan menganalisis data yang diperoleh dan dibandingkan dengan peraturan. Data yang digunakan terbagi menjadi data primer (hasil observasi dan wawancara) dan sekunder (data timbulan dan karakteristik FABA, studi literatur dan dokumentasi). Data yang telah dikumpulkan berfungsi sebagai acuan untuk menganalisis kesesuaian kondisi eksisting pengelolaan di PLTU Pacitan dengan PP 22 Tahun 2021 dan Permen LHK 19 Tahun 2021.

## 3. Hasil dan Pembahasan

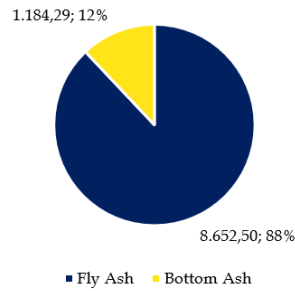
### Kuantitas Timbulan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Limbah yang dihasilkan dari pembakaran batu bara PLTU Pacitan berupa limbah FABA. Limbah FABA yang dihasilkan mengalami fluktuasi. Total timbulan FABA pada tahun 2024 sebesar 118,041.5 ton/tahun dengan rata-rata perbulan sebesar 9,836.8 ton (**Gambar 1**).



Gambar 1. Timbulan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Periode Tahun 2024

Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025



Gambar 2. Persentase Kuantitas Timbulan Fly Ash dan Bottom Ash Periode Tahun 2024

Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025

Persentase rata-rata timbulan FABA (**Gambar 2**) pada tahun 2024 adalah 88% berupa Fly Ash, dan 12% berupa Bottom Ash. Timbulan Fly Ash terendah terdapat pada bulan April sebanyak 4,575 ton. Sedangkan timbulan Fly Ash tertinggi terdapat pada bulan Oktober sebanyak 14.112 ton. Timbulan Bottom Ash terendah terdapat pada bulan April sebanyak 570 ton. Sedangkan timbulan Bottom Ash tertinggi terdapat pada bulan Januari sebanyak 1,870 ton (**Gambar 1**). Jumlah timbulan FABA yang dihasilkan mengalami fluktuatif. Hal ini disebabkan oleh adanya *overhaul* yang dilaksanakan setiap tahun atau *maintenance* alat pada setiap unit, sehingga proses produksi akan dihentikan sementara atau disebabkan oleh perbedaan kuantitas bahan bakar yang digunakan.

#### Karakteristik Limbah Fly Ash dan Bottom Ash

Limbah FABA yang dihasilkan dari proses produksi dilakukan uji karakteristik setiap tiga bulan sekali. Uji karakteristik ini bertujuan untuk mengetahui ukuran partikel (fisik) dan kandungan yang ada dalam FABA (kimia). Pengujian ini dilakukan oleh pihak eksternal yang telah bekerja sama dengan perusahaan. Hasil uji karakteristik FABA yang dihasilkan PLTU Pacitan tahun 2024 dapat dibandingkan dengan standar kebutuhan pemanfaatan FABA (**Tabel 1 dan Tabel 2**).

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Fisik Fly Ash dan Bottom Ash TW 4 Periode Tahun 2024

No	Size Test	Satuan	Mesh No. 325 (45 $\mu$ m)		
			On	Pass	Standar ASTM C-618
1	Fly Ash	% wt	6.50	93.50	max% 34
2	Bottom Ash	% wt	99.80	0.20	max% 34

Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025

Karakteristik fisik FABA (**Tabel 1**) ini menunjukkan tingkat kehalusan partikel yang mampu melewati ayakan dengan nomor 325 (45  $\mu$ m). Hasil uji menunjukkan karakteristik fisik Fly Ash memiliki nilai 93.50% dapat melewati ayakan dan Bottom Ash memiliki nilai 0.2% dapat melewati ayakan. Nilai ini dapat dibandingkan dengan standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C-618 (*Pozzolan*) dan menunjukkan persentase tingkat kehalusan partikel Fly Ash tidak memenuhi standar.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Kimia Fly Ash dan Bottom Ash TW 4 Periode Tahun 2024

No	Parameter	Satuan	Fly Ash	Bottom Ash	Standar ASTM C-618
1	SiO <sub>2</sub> (Silicon Dioxide)	% wt	31.72	52.42	min% 50.0
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Aluminium Trioxide)	% wt	17.18	9.81	min% 50.0
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Iron Trioxide)	% wt	14.27	13.74	min% 50.0
4	CaO (Calcium Oxide)	% wt	15.86	14.31	max% 1.5
5	MgO (Magnesium Oxide)	% wt	10.43	4.82	max% 1.5
6	Na <sub>2</sub> O (Sodium Oxide)	% wt	2.70	2.13	max% 1.5

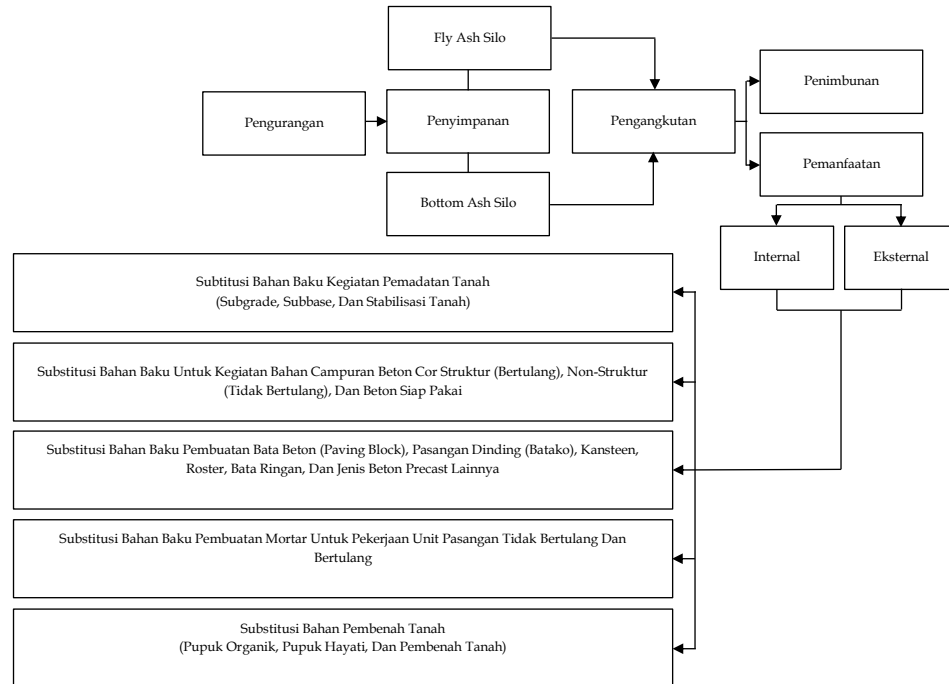
Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025

Hasil uji karakteristik kimia FABA (**Tabel 2**) ini dapat dibandingkan dengan standar ASTM C-618 (*Pozzolan*) dan menunjukkan parameter yang tidak memenuhi standar kurang lebih sama yaitu SiO<sub>2</sub>

(Silicon Dioxide),  $Al_2O_3$  (Aluminium Trioxide),  $Fe_2O_3$  (Iron Trioxide),  $CaO$  (Calcium Oxide),  $MgO$  (Magnesium Oxide), dan  $Na_2O$  (Sodium Oxide). Namun pada *Bottom Ash* parameter  $SiO_2$  (Silicon Dioxide) telah memenuhi standar. FABAs yang memiliki kualitas rendah akan menyebabkan reaktivitas rendah, sehingga kekuatan tekan tidak optimal (Jin et al., 2024).

### Pengelolaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash

PLTU Pacitan telah menerapkan pengelolaan FABAs mulai dari pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pemanfaatan, dan penimbunan (**Gambar 3**). Hal ini sejalan dengan PP 22 Tahun 2021 dan Permen LHK 19 Tahun 2021, bahwa setiap orang yang menghasilkan limbah non B3 wajib melakukan pengelolaan limbah non B3. Pedoman pengelolaan limbah FABAs juga telah dicantumkan dalam dokumen rincian teknis yang telah disetujui oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.



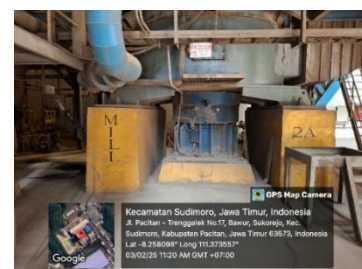
Gambar 3. Diagram Alir Pengelolaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash  
 Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025

#### a. Pengurangan

Proses pengurangan limbah FABAs yang diterapkan oleh PLTU Pacitan adalah modifikasi proses. Modifikasi proses ini dilakukan dengan *co-firing* (**Gambar 4a**) dan penambahan unit *Crusher House* dan *Coal Mill* (**Gambar 4b**). *Co-firing* merupakan pencampuran batu bara dengan biomassa sebagai bahan bakar. Penggantian bahan bakar berupa biomassa ini bertujuan untuk menurunkan tingkat penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar, serta mendukung kebijakan pengendalian dan penurunan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) (Rizqi et al., 2023). Sedangkan *Crusher House* dan *Coal Mill* berfungsi untuk menghancurkan dan mengubah ukuran bahan bakar menjadi lebih kecil dan meningkatkan efektivitas proses pembakaran pada *Boiler*. Ukuran partikel yang semakin kecil akan meningkatkan luas permukaan partikel, sehingga kandungan yang ada dalam batu bara juga akan berkurang karena proses pembakaran (Maharani et al., 2023).



(a)

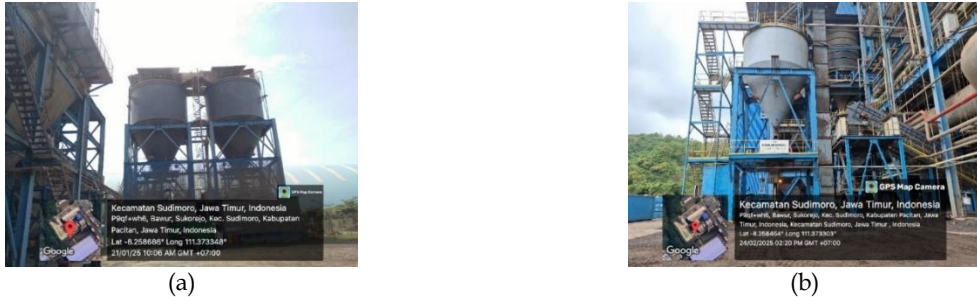


(b)

Gambar 4. (a.) *Co-Firing*, (b.) Unit *Coal Mill*

### b. Penyimpanan

Penyimpanan limbah FABA yang digunakan berupa *Silo* (**Gambar 5**). *Silo* merupakan suatu bangunan berbentuk tangki silinder yang berfungsi untuk menyimpan bahan baku sebelum digunakan atau hasil dari proses produksi (Wafa & Irawan, 2023). *Silo* ini dibangun sebanyak 2 buah untuk *Fly Ash Silo* (**Gambar 5a**) dan 2 buah untuk *Bottom Ash* (**Gambar 5b**). *Silo* ini berfungsi untuk menyimpan sementara limbah FABA sebelum dimanfaatkan.



Gambar 5. (a.) *Fly Ash Silo*, (b.) *Bottom Ash Silo*

### c. Pengangkutan

Pengangkutan limbah FABA ini dilakukan menggunakan transportasi berupa *dump truck* (**Gambar 6**). Pengangkutan ini mencakup pengangkutan limbah dari *Silo* menuju tempat pemanfaatan langsung limbah FABA, pengangkutan menuju tempat pemanfaatan eksternal, dan pengangkutan menuju *landfill* atau *Ash Yard*.



Gambar 6. Transportasi Pengangkut Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

### d. Pemanfaatan

Pemanfaatan limbah FABA yang diterapkan oleh PLTU Pacitan adalah sebagai substitusi bahan baku. Pemanfaatan ini dilakukan oleh pihak internal dan eksternal (**Tabel 3**). Limbah FABA dapat dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku untuk kegiatan bahan campuran beton cor struktur (bertulang), non-struktur (tidak bertulang), dan beton siap pakai; substitusi bahan baku pembuatan bata beton (*paving block*), pasangan dinding (batako), *kansteen*, *roster*, bata ringan, dan jenis beton *precast* lainnya; substitusi bahan baku pembuatan mortar untuk pekerjaan unit pasangan tidak bertulang dan bertulang karena memiliki karakteristik *pozzolan*. Karakteristik ini didapatkan karena FABA mengandung silika dan aluminium yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang bersifat mengikat (Ayuningtyas et al., 2023).

Limbah FABA juga dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku kegiatan pemadatan tanah (*subgrade*, *subbase*, dan stabilisasi tanah). Stabilisasi tanah merupakan upaya menambahkan zat *additive* pada tanah untuk memperbaiki sifat-sifat pada tanah, mempertahankan kuat geser dalam tanah, dan meningkatkan kekuatan tanah (Dwina et al., 2021). Selain itu, limbah FABA juga dimanfaatkan sebagai substitusi bahan pembenah tanah (pupuk organik, pupuk hayati, dan pembenah tanah). Kandungan unsur hara limbah FABA baik makro (K, Na, Ca, Mg) maupun mikro (Fe, Cu, Zn, Mn) dapat berfungsi sebagai kompos untuk membantu pertumbuhan tanaman.

Penambahan ini juga bermanfaat untuk meningkatkan nilai pH dalam tanah (Faoziah et al., 2022).

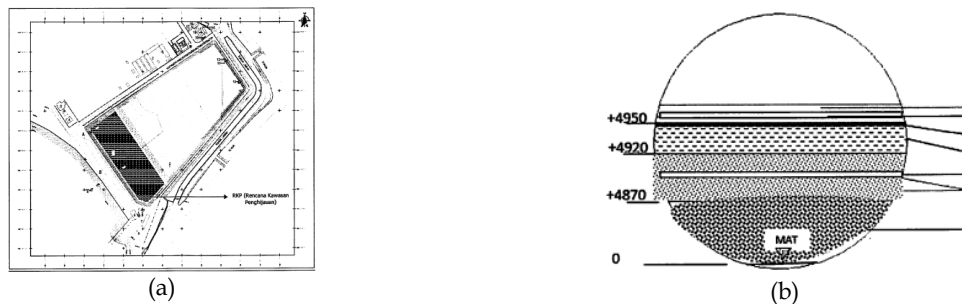
Tabel 3. Kegiatan Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Pacitan

No	Jenis Pemanfaatan	Bentuk Kegiatan
1	Internal	Pemanfaatan <i>paving block</i> untuk pembangunan lapangan sekitar GOR PLTU Pacitan Pemanfaatan kompos FABA di Desa Pager Kidul, dan kawasan pertanian di Desa Sumberejo (Kegiatan CSR PLTU Pacitan) Pengecoran jalan berlubang dan area sekitar PLTU Pacitan
2	Eksternal	Pembangunan akses jalan di kawasan wisata Agroforestri Pacitan Perbaikan jalan di Desa Sumberejo, Kecamatan Sudimoro, Kabupaten Pacitan, seperti di lokasi pemukiman dan akses jalan menuju Pantai Ndaki Stabilisasi tanah di sekitar SMK Pusat Keunggulan dan di Desa Sumberejo, Kecamatan Sudimoro, Kabupaten Pacitan. Stabilisasi tanah di sekitar pangkalan TNI AL Pacitan, area pantai Kili-Kili Trenggalek Stabilisasi tanah di area pantai Kili-Kili Trenggalek

Sumber: Data PLTU Pacitan, 2025

**e. Penimbunan**

Limbah FABA yang tidak dimanfaatkan akan ditimbun pada fasilitas penimbunan atau *landfill*. Fasilitas penimbunan ini tergolong kelas II dan telah mendapatkan izin dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Fasilitas penimbunan ini terdiri dari *ash yard*, sumur pantau, kolam pengumpul air lindi, bak pendeteksi kebocoran, dan *runoff pond*. *Ash yard* yang difungsikan sebagai tempat penimbunan limbah FABA ini memiliki kapasitas penampungan sebesar 450,000 m<sup>3</sup> dengan luas permukaan atas sebesar 55,000 m<sup>2</sup>, luas permukaan bawah sebesar 45,000 m<sup>2</sup>, ketinggian paling tinggi tumpukan dari dasar tanggul sebesar 9 m, ketebalan dinding tanggul (*embankment*) sekeliling penimbunan bagian atas sebesar 4 m, dan bagian bawah sebesar 18 m (**Gambar 7a**). Lapisan pada *ash yard* memiliki beberapa lapisan (**Gambar 7b**). lapisan ini memiliki fungsi masing-masing. Lapisan ini terdiri dari lapisan dasar, lapisan pendeteksi kebocoran, lapisan tanah penghalang, lapisan geomembran, lapisan sistem pengumpul lindi, lapisan pelindung. Limbah FABA ini juga akan dilakukan pengujian TCLP dan LD<sub>50</sub> setiap satu tahun sekali. Uji TCLP merupakan pengujian suatu bahan yang dilakukan untuk mengetahui konsentrasi kandungan bahan organik dan anorganik zat pencemar (Wigusti et al., 2022). Sedangkan uji LD<sub>50</sub> merupakan pengujian toksisitas akut sebagai tolak ukur setelah pemberian dosis zat kimia yang menyebabkan kematian hewan uji 50% (Andriani et al., 2023). Hasil uji yang telah dilakukan pada tahun 2024 menunjukkan nilai uji memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan.



Gambar 7. (a) Desain Ash Yard, (b) Desain Lapisan

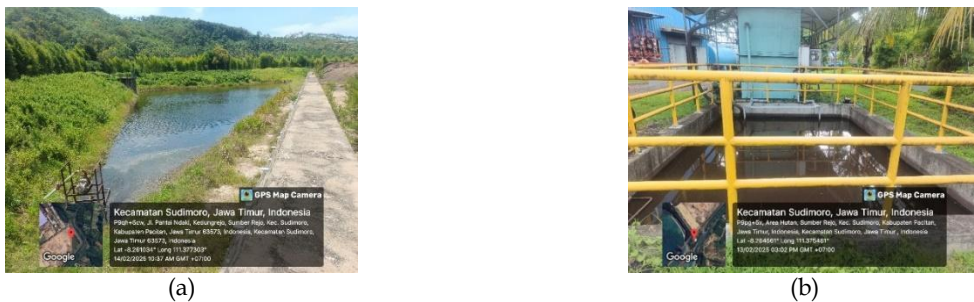
Sumur pantau yang dimiliki fasilitas penimbunan ini terdiri dari 4 buah. Sumur pantau ini terletak di bagian hulu dan hilir *ash yard*. Ukuran diameter sumur pantau sebesar 0,8 m dengan kedalaman 7 m dari permukaan tanah atas (**Gambar 8a**). Sumur ini berfungsi untuk mengetahui kondisi air tanah di sekitar fasilitas penimbunan. Air tanah yang terdapat pada sumur pantau akan dilakukan uji setiap tiga bulan sekali. Hasil uji kualitas air tanah pada sumur pantau tahun 2024 memiliki nilai yang telah memenuhi baku mutu, sehingga dianggap aman dan tidak mencemari lingkungan. Selain itu fasilitas penimbunan juga

dilengkapi dengan bak pendeteksi kebocoran yang berfungsi untuk mengetahui jika terdapat kebocoran pada lapisan *ash yard* (**Gambar 8b**).



Gambar 8. (a) Desain Sumur Pantau, (b) Bak Pendeteksi Kebocoran

Kolam pengumpul air lindi berfungsi untuk mengumpulkan air lindi yang dihasilkan dari *ash yard* (**Gambar 9a**). Air lindi merupakan cairan yang dihasilkan dari rembesan timbunan limbah yang mengandung zat berbahaya. Air lindi dapat lebih berbahaya jika timbunan limbah mengandung limbah B3 (Permono et al., 2024). Kolam pengumpul air lindi ini memiliki luas bagian atas sebesar 5,885 m<sup>2</sup> dan luas bagian bawah sebesar 3,052 m<sup>2</sup> dengan ketinggian kolam adalah 4 m. Air lindi yang terdapat di kolam akan dilakukan pengujian setiap tiga bulan sekali. Hasil uji kualitas air lindi pada tahun 2024 menunjukkan bahwa nilai uji termasuk memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan. Fasilitas penimbunan ini juga dilengkapi dengan *runoff pond* yang berfungsi sebagai pengumpul air limpasan hujan dari *ash yard* (**Gambar 9b**). Sehingga air limpasan tersebut tidak mencemari lingkungan sekitar *ash yard*. Air yang terkumpul akan diolah pada fasilitas pengolahan air limbah dan dimanfaatkan kembali untuk air Boiler.



Gambar 9. (a) Kolam Pengumpulan Air Lindi, (b) Run Off Pond Ash Yard

### Evaluasi Pengelolaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash

Pengelolaan limbah FABA yang dilakukan PLTU Pacitan harus sesuai dengan peraturan yang berlaku. Peraturan yang digunakan sebagai pedoman pengelolaan limbah FABA ini adalah PP 22 Tahun 2021 dan Permen LHK 19 Tahun 2021. Proses pengelolaan ini akan dibandingkan dengan peraturan tersebut untuk mengetahui kesesuaian terhadap regulasi, sehingga dapat dinilai dan diberikan rekomendasi jika terdapat kekurangan dalam proses pengelolaan.

Tabel 4. Evaluasi Pengelolaan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash

No	Peraturan Menteri LHK Nomor 19 Tahun 2021	Kondisi Lapangan	Kesesuaian
1.	<p><b>Pengurangan Limbah non-B3</b></p> <p><b>Pasal 4 ayat 2, 3 dan 4</b></p> <p>2) Pengurangan dapat dilakukan sebelum dan/atau setelah limbah terbentuk</p> <p>3) Cara pengurangan sebelum limbah terbentuk:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Rekayasa proses</li> <li>Teknologi ramah lingkungan</li> </ol> <p>4) Cara pengurangan setelah limbah terbentuk:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Penggilingan</li> <li>Pencacahan</li> </ol>	<p>PLTU Pacitan telah melakukan pengurangan limbah non-B3. Cara pengurangan sebelum limbah terbentuk adalah <i>Co-Firing</i> dan penambahan unit <i>Crusher House</i> dan <i>Coal Mill</i>, sedangkan pengurangan setelah limbah terbentuk adalah</p>	Sesuai

No	Peraturan Menteri LHK Nomor 19 Tahun 2021	Kondisi Lapangan	Kesesuaian
	<ul style="list-style-type: none"> <li>c. Pemadatan</li> <li>d. Termal</li> <li>e. Sejalan dengan perkembangan iptek</li> </ul>	<p>pemanfaatan perkembangan iptek</p> <p>sesuai</p>	
2.	<p><b>Penyimpanan Limbah non-B3</b></p> <p><b>Pasal 5 ayat 1 dan 2</b></p> <p>1) Pihak penghasil wajib menyimpan limbah sebelum diolah</p> <p>2) Fasilitas penyimpanan dapat berupa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Bangunan</li> <li>b. Silo</li> <li>c. <i>Waste pile</i></li> <li>d. <i>Waste impoundment</i></li> <li>e. Sejalan dengan perkembangan iptek</li> </ul> <p><b>Pasal 8 ayat 1</b></p> <p>Lokasi penyimpanan harus:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Bebas banjir</li> <li>b. Memiliki jarak yang aman terhadap perairan</li> <li>c. Terletak dalam area penguasaan penghasil</li> </ul> <p><b>Pasal 9 b</b></p> <p>Persyaratan <i>Silo</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Dibangun di atas tanah dengan fondasi yang mampu menahan tekanan</li> <li>2. Mampu mencegah kerusakan akibat pengisian, tekanan, dan gaya angkat</li> <li>3. Terbuat dari material yang mampu menahan tekanan tinggi</li> </ul> <p><b>Pasal 10 ayat 1</b></p> <p>Limbah disimpan paling lama adalah 3 tahun setelah limbah terbentuk</p>	<p>PLTU Pacitan telah melakukan penyimpanan limbah non-B3 pada <i>Silo</i> sebelum limbah tersebut diolah.</p> <p><i>Silo</i> terletak di area produksi PLTU Pacitan yang telah dicantumkan dalam Persetujuan Teknis.</p> <p><i>Silo</i> pada PLTU Pacitan dibangun melayang di atas tanah dengan penopang baja yang dapat menahan tekanan vertikal dari proses produksi, serta tahan terhadap limbah.</p> <p>Limbah disimpan sementara dalam <i>silo</i> dan akan dipindahkan setiap hari</p>	<p>Sesuai</p> <p>Sesuai</p> <p>Sesuai</p>
3.	<p><b>Pengangkutan Limbah non-B3</b></p> <p><b>Pasal 39 ayat 2</b></p> <p>Persyaratan pengangkutan limbah:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Menjamin tidak terjadi ceceran, tumpahan dan pencemaran lingkungan</li> <li>b. Menggunakan alat transportasi sesuai peraturan</li> </ul>	<p>Pengangkutan internal maupun eksternal dilakukan menggunakan <i>dump truck</i> dengan bak yang telah ditutup dengan terpal dan diisi sesuai kapasitas volume bak</p>	<p>Sesuai</p>
4.	<p><b>Pemanfaatan Limbah non-B3</b></p> <p><b>Pasal 13</b></p> <p>Pemanfaatan limbah sebagai substitusi bahan baku dapat dilakukan pada kegiatan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Produksi beton, batako, beton ringan, paving block, dan bahan konstruksi lainnya</li> <li>b. Industri semen</li> <li>c. Pemadatan tanah</li> <li>d. Sejalan dengan perkembangan iptek</li> </ul>	<p>Limbah yang dihasilkan di PLTU Pacitan dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku pemadatan tanah; produksi <i>paving block</i>, batako, <i>kansteen</i>, <i>roster</i>, bata ringan, dan bahan konstruksi lainnya; kegiatan pengecoran, pembuatan mortar; dan bahan pembenah tanah</p>	<p>Sesuai</p>
5.	<p><b>Penimbunan Limbah non-B3</b></p> <p><b>Pasal 21 ayat 2</b></p> <p>Penimbunan limbah dilakukan pada fasilitas penimbunan berupa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Penimbunan akhir</li> <li>b. Backfilling limbah di lokasi bekas tambang</li> <li>c. Bendungan penampung limbah tambang</li> </ul>	<p>PLTU Pacitan telah melakukan penimbunan limbah di <i>Ash Yard/Landfill</i> sesuai izin penimbunan dalam Kepmen LHK. Fasilitas ini masuk pada</p>	<p>Sesuai</p>

No	Peraturan Menteri LHK Nomor 19 Tahun 2021	Kondisi Lapangan	Kesesuaian
	d. Sejalan dengan perkembangan iptek	fasilitas penimbunan akhir kelas II.	
	<b>Pasal 24</b> Fasilitas penimbunan akhir harus memiliki:	<i>Ash Yard</i> di PLTU Pacitan memiliki kapasitas daya tampung sebesar 450.000 m <sup>3</sup> , luas permukaan atas sebesar 55.000 m <sup>2</sup> , luas permukaan bawah sebesar 45.000 m <sup>2</sup> , ketinggian maksimum timbunan dari dasar tanggul sebesar 9 m, ketebalan dinding tanggul ( <i>embankment</i> ) bagian atas sebesar 4 m, dan bagian bawah sebesar 18 m. <i>Ash Yard</i> juga dilengkapi dengan sistem pelapisan yang lengkap dan peralatan pendukung, serta rencana penimbunan sesuai izin hingga 2027	Sesuai
	a. Desain fasilitas		
	b. Sistem pelapis dilengkapi dengan saluran air permukaan, pengumpul dan pengolahan air lindi, dan sumur pantau		
	c. Peralatan pendukung seperti peralatan keadaan darurat, alat pengangkut, dan alat pelindung diri		
	d. Rencana penimbunan, penutupan, dan pasca penutupan limbah		
	<b>Pasal 25 ayat 1</b> Sistem pelapisan berupa:	<i>Ash Yard</i> di PLTU Pacitan memiliki sistem pelapisan yang terdiri dari lapisan dasar, lapisan sistem pendeteksi kebocoran, lapisan tanah penghalang, lapisan geomembran, lapisan sistem pengumpulan lindi, dan lapisan pelindung.	Sesuai
	a. Lapisan dasar		
	b. Lapisan kedua untuk sistem saluran air lindi		
	c. Lapisan tanah penghalang		
	d. Lapisan pertama untuk sistem saluran air lindi		
	e. Lapisan pelindung		
	<b>Pasal 28 ayat 1</b> Lokasi penimbunan limbah harus:	Lokasi <i>Ash Yard</i> di PLTU Pacitan telah sesuai izin yang ditetapkan yaitu berlokasi di area operasional PLTU Pacitan, di luar kawasan lindung dan jauh dari pemukiman.	Sesuai
	a. Berdasarkan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW)		
	b. Bebas banjir 100 tahunan		
	c. Memiliki konduktivitas hidraulik pada tanah maksimal 10 <sup>-5</sup> cm/detik		
	d. Secara geologis aman dan stabil, dan di luar zona lindung		
	e. Tidak termasuk area resapan air tanah		
	f. Tidak termasuk area hidrologi permukaan		
	<b>Pasal 31 ayat 3 dan 5</b> 3) Penampungan air lindi dapat berupa:	Penampungan air lindi <i>Ash Yard</i> di PLTU Pacitan berupa kolam dengan luas bagian atas sebesar 5.885 m <sup>2</sup> , luas bagian bawah sebesar 3.052 m <sup>2</sup> , dan ketinggian kolam adalah 4 m	Sesuai
	a. Tangki		
	b. Kolam atau bak		
	5) Kolam atau bak air lindi harus:		
	a. Berupa kolam atau bak yang tertutup		
	b. Terbuat dari konstruksi beton atau konstruksi kedap air		
	c. Mampu menampung air lindi selama 1 minggu pada curah hujan maksimum		
	<b>Pasal 31 ayat 6 dan 7</b> 6) Air lindi harus diuji dan wajib memenuhi baku mutu	Air lindi yang terkumpul di PLTU Pacitan telah dilakukan uji laboratorium setiap tiga bulan sekali dan telah memenuhi baku mutu	Sesuai
	7) Pengujian dilakukan di laboratorium terakreditasi minimal 3 bulan sekali		

No	Peraturan Menteri LHK Nomor 19 Tahun 2021	Kondisi Lapangan	Kesesuaian
	<b>Pasal 33 ayat 2 a, b, c, dan d</b>	Ash Yard di PLTU Pacitan	Sesuai
2)	Ketentuan pemantauan lingkungan pada air tanah:	memiliki 2 sumur pantau di	
a.	Air tanah dari sumur pantau	hulu dan 2 sumur pantau di	
b.	Melakukan uji dari sampel air tanah	hilir. Air tanah pada sumur	
c.	Melakukan pengujian setiap bulan untuk 2 tahun pertama operasi, dan setiap 3 bulan sekali untuk tahun selanjutnya	pantau dilakukan uji laboratorium, dan menunjukkan hasil yang	
d.	Memiliki minimal 1 buah sumur pantau di hulu, dan 2 buah sumur pantau di hilir, air tanah tidak mengering sepanjang tahun, sumur pantau disesuaikan dengan kondisi hidrologi setempat	memenuhi baku mutu lingkungan	

Hasil analisis dan evaluasi proses pengelolaan limbah FABA yang diterapkan PLTU Pacitan telah memenuhi regulasi yang berlaku (**Tabel 4**). Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan dan pengendalian pencemaran limbah FABA di PLTU Pacitan sudah sangat baik, sehingga harus tetap dijaga dan dipelihara.

#### 4. Simpulan

Limbah FABA yang dihasilkan dari proses produksi energi listrik PLTU Pacitan memiliki nilai karakteristik fisik berupa tingkat kehalusan partikel dan kimia yang terdiri dari SiO<sub>2</sub> (Silicon Dioxide), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aluminium Trioxide), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Iron Trioxide), SO<sub>3</sub> (Sulphur Trioxide), Loss On Ignition (LOI), Moisture Content, dan Kandungan Alkali. Hasil uji karakteristik limbah Fly Ash menunjukkan terdapat parameter SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, dan Na<sub>2</sub>O yang kurang memenuhi standar kualitas pozzolan. Namun pada limbah Bottom Ash, SiO<sub>2</sub> telah memenuhi standar. Pengelolaan limbah FABA yang telah diterapkan di PLTU Pacitan terdiri dari pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pemanfaatan, dan penimbunan. Berdasarkan peraturan yang berlaku, proses pengelolaan ini memiliki nilai yang sangat baik dan telah memenuhi standar acuan yang telah ditetapkan oleh pemerintah.

#### 5. Daftar Pustaka

- Andriani, L., Yulion, R., Manora, O. S., & Nanda, R. B. (2023). Uji Toksisitas Akut LD50 Ekstrak Batang Bajakah Tampala (*Spatholobus littoralis* Hassk.) dan Batang Bajakah Kuning (*Arcangelisia flava* (L.) Merr.) pada Mencit Putih (*Mus musculus*). *Medical Sains: Jurnal Ilmiah Kefarmasian*, 8(1), 337-344. <https://ojs.ummada.ac.id/index.php/iojs/article/view/537/420>
- Ansari, V., & Prianto, E. (2021). Ciptakan Rumah Ramah Lingkungan dengan Material Dinding Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA). *Prosiding SNST Ke-11*. [https://www.academia.edu/87290491/Ciptakan\\_Rumah\\_Ramah\\_Lingkungan\\_Dengan\\_Material\\_Dinding\\_Limbah\\_Fly\\_Ash\\_Dan\\_Bottom\\_Ash\\_Faba\\_](https://www.academia.edu/87290491/Ciptakan_Rumah_Ramah_Lingkungan_Dengan_Material_Dinding_Limbah_Fly_Ash_Dan_Bottom_Ash_Faba_)
- Ayuningtyas, U., Rosmeika, & Firdaus, A. (2023). Fly Ash dan Bottom Ash sebagai Material Infrastruktur untuk Mendukung Pembangunan yang Berkelanjutan. *Vol. 7 (2023): Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, 47-52. <https://www.journal.ubb.ac.id/index.php/snppm/article/view/4828>
- Dwina, D. O., Nazarudin, N., Kumalasari, D., & Fitriani, E. (2021). Stabilisasi Tanah Gambut dengan Penambahan Kapur dan Fly Ash Sisa Pembakaran Cangkang Sawit sebagai Subgrade Jalan. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 24. <https://doi.org/10.36055/fondasi.v10i1.10275>
- Faoziah, N., Iskandar, & Djajakirana, G. (2022). Pengaruh Penambahan Kompos dan FABA terhadap Karakteristik Kimia pada Tanah Berpasir dan Pertumbuhan Tanaman Tomat. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 23(2), 78-82. <https://doi.org/10.29244/jitl.23.2.78-82>
- Gazalie, R., Fauzi, M., Hawinuti, R., & Helmi, M. (2023). Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara sebagai Filler pada Lataston Lapis AUS (HRS-WC). *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 7(1), 71-85.

- Jin, Q., Liao, W., Ni, X., & Ma, H. (2024). Low-grade Fly Ash in Portland Cement Blends: A Decoupling Approach to Evaluate Reactivity and Hydration Effects. *Cement*, 18(September), 100119. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2024.100119>
- Larasati, N., & Aziz, R. M. (2024). Praktik Pemanfaatan Limbah Industri FABA (Fly Ash Bottom Ash) Sebagai Inovasi Pertanian Kopi Bagi Mitra Binaan PT PLN UBP Labuan 2 di Kabupaten Serang Provinsi Banten. *ARMADA: Jurnal Penelitian Multidisiplin*, 2(10), 891–903.
- Maharani, A. N., Junaidi, R., & Yerizam, M. (2023). Penurunan Kadar Sulfur Batubara dengan Fluidized Bed Desulfurizer Menggunakan Saturated Steam. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 3(11), 473–478. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.211>
- Maulidia, F., Mahardika, M. A., Nurbanasari, M., & Adurrachim. (2024). *Simulasi Remaining Life Low Pressure Rotating Blade PLTU Batubara 600 MW*. 04(01), 70–78.
- Pattinasarany, J., Ticoh, J., Ridwan, R., & Kilis, B. (2022). Perancangan Instalasi Tenaga Listrik di Bengkel Universitas Negeri Manado. *JURNAL EDUNITRO: Jurnal Pendidikan Teknik Elektro*, 2(1), 19–28. <https://doi.org/10.53682/edunitro.v2i1.3343>
- Permono, H., Mustain, A., & Pratiwi, M. K. (2024). Pemanfaatan Air Lindi untuk Pupuk Organik Cair (POC) dengan Bioaktivator EM4 dan Pesudomonas Fluorescens pada TPA Supit Urang. *Jurnal Teknologi Separasi (DISTILAT)*, 10(2), 498–504.
- Rizqi, H. D., Guntur, H. L., Putra, A. B. K., Kusumadewi, T. V., Nasution, A. H., Sinansari, P., & Kurniawan, F. (2023). Kajian Potensi Bambu untuk mendukung Penerapan Co-firing pada Pembangkit Listrik Jawa Bali. *Sewagati*, 7(1), 85–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i1.277>
- Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Jarosz, R., Bajda, T., & Mierzwa-Hersztek, M. (2021). Contemporary Applications of Natural and Synthetic Zeolites from Fly Ash in Agriculture and Environmental Protection. *Journal of Cleaner Production*, 311(May), 127461. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127461>
- Wafa, D., & Irawan, D. (2023). Rancang Bangun Sistem Monitoring Area Packaging di PT Garam (Persero) berbasis Outseal-Haiwell. *Jurnal Cahaya Mandalika*, 3(2), 697–710.
- Wigusti, A. E., Widyaningrum, A., Puspita, K. E., Trianingrum, S., & Rosyidah, U. (2022). Implementasi Konsep Creating Shared Value (CSV) dalam Pemanfaatan Fly Ash Bottom Ash (FABA) oleh PLTU Jateng 2 Adipala Omu. *JIMIEA: Jurnal Ilmiah MEA (Manajemen, Ekonomi, Dan Akutansi)*, 6(2), 1930–1945.