

Pemanfaatan Limbah *Fly Ash & Bottom Ash* Sebagai Solusi Pengurangan Limbah dan Efisiensi Biaya untuk *Breakwater* pada PLTU Pacitan

Suari Dwi Pangudi^{1,3*}, Widayat^{1,2}, Didi Dwi Anggoro^{1,2}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro,

²Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

³PT PLN Nusantara Power UP Pacitan,

Jl. Raya Pacitan - Trenggalek KM. 55, Desa Sukorejo, Kecamatan Sudimoro, Kabupaten Pacitan

^{*}Corresponding author: environmentsgpb@gmail.com

(Received: January 17, 2026; Accepted: February 20, 2026)

Abstract

Utilization of Fly Ash & Bottom Ash Waste as a Solution for Waste Reduction and Cost Efficiency for Breakwaters at Pacitan PLTU. PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan is a coal-fired steam power plant. The remaining coal combustion produces waste in the form of fly ash and bottom ash (FABA). FABA material has been tested in the laboratory and has more beneficial value. FABA PT. PJB UBJOM Pacitan has a loss on ignition and total metal oxide that meets the standards for use as raw material for ready-mix concrete. The use of FABA as a primary armor BPPT-lock will have a significant impact and be beneficial for the operations of PT. PJB UBJOM Pacitan. This step is based on the condition of the breakwater dock of PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan which is always damaged by extreme waves and currents of the southern Java sea, thus disrupting the process of unloading coal from coal carrier ships. The innovation of making primary armor type BPPT-lock from FABA has many functions, including reducing sea wave disturbances during the coal unloading process, as well as reducing the amount of FABA generated by 6,160 per year, thus potentially reducing waste costs by Rp4,188,800,000 per year. FABA, which is useful as a BPPT-lock type breakwater with a FABA mixture, is expected to provide added value to other business solutions and generate revenue for PT. PJB in the future.

Keywords: FABA, BPPT-lock, revenue

Abstrak

PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan merupakan pembangkit listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar batu bara. Sisa pembakaran batu bara menghasilkan limbah berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA). Material FABA secara pengujian laboratorium memiliki nilai manfaat lebih. FABA PT. PJB UBJOM Pacitan memiliki *loss on ignition* dan total oksida logam yang memenuhi standar untuk digunakan sebagai bahan baku beton *ready mix*. Pemanfaatan FABA sebagai *primary armour* BPPT-lock ini akan sangat berdampak dan bermanfaat untuk operasional PT. PJB UBJOM Pacitan. Langkah ini didasari oleh kondisi *breakwater* dermaga PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan yang selalu mengalami kerusakan akibat gelombang dan arus laut selatan Jawa yang ekstrem sehingga mengganggu proses *unloading* batu bara dari kapal pengangkut batu bara. Inovasi pembuatan *primary armour* tipe BPPT-lock dari FABA ini memiliki banyak fungsi antara lain mengurangi gangguan gelombang laut saat proses *unloading* batu bara, serta mengurangi jumlah timbulan FABA sebanyak 6.160 per tahun sehingga berpotensi mengurangi biaya pelimbahan sebesar Rp4.188.800.000 per tahun. FABA yang bermanfaat sebagai *breakwater* tipe BPPT-lock dengan

campuran FABA diharapkan dapat menjadi nilai tambah solusi bisnis lainnya dan menjadi *revenue* yang dihasilkan PT. PJB pada masa yang akan datang.

Kata kunci: FABA, BPPT-lock, *revenue*

How to Cite This Article: Pangudi, S. D., Widayat, W., & Anggoro, D. D. (2026). Pemanfaatan Limbah Fly Ash & Bottom Ash Sebagai Solusi Pengurangan Limbah dan Efisiensi Biaya untuk Breakwater pada PLTU Pacitan. *JPII*, 4(1), 19-24. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2026.32307>

PENDAHULUAN

PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan dengan kapasitas 2×315 MW merupakan pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara. Dalam proses pembakaran, batu bara meninggalkan sisa pembakaran berupa abu batu bara yang disebut *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) yang kemudian material FABA akan diangkut dan ditimbun di *landfill*. FABA yang ditimbun di *landfill* berdasarkan hasil uji memiliki manfaat yang potensial yang dapat digunakan sebagai produk dan dari produk tersebut dapat diimplementasikan sesuai kebutuhan di dalam PLTU Pacitan.

Dengan memanfaatkan FABA sebagai produk, maka akan menambah sisa kapasitas *landfill*, sehingga tetap *beyond compliance* seperti yang sudah tercantum di dalam izin *landfill* PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan yang diterbitkan oleh Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. Salah satu tantangan di PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan dalam pemanfaatan FABA dikarenakan letak geografis PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan yang relatif jauh dan kondisi jalan yang berupa pegunungan. Sejak tahun 2019, tidak ada lagi transportir yang mengambil material FABA dari PLTU Pacitan.

Upaya memperpanjang umur *landfill* antara lain adalah melakukan pelimbahan material FABA. Dikarenakan kegiatan pelimbahan material FABA memerlukan proses yang panjang dan biaya yang sangat tinggi, UBJ O&M Pacitan melakukan *trial formula job mix* beton menggunakan material FABA, yang selanjutnya akan digunakan sebagai dasar pengajuan izin pemanfaatan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI.

Pemanfaatan FABA salah satunya adalah untuk pembuatan *primary armour breakwater* tipe BPPT-lock. Hal ini didasari dari *breakwater* di dermaga PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan semakin hari mengalami kerusakan yang disebabkan arus dan gelombang laut pantai selatan yang ekstrem. *Breakwater* yang mengalami kerusakan membuat gelombang/ombak masuk ke dalam kolam labuh, sehingga alun dari kapal pengangkut batu bara akan semakin besar. Hal ini berakibat terganggunya proses *unloading* (pengambilan) batu bara dan berisiko besar kapal dan dermaga mengalami kerusakan. *Breakwater* merupakan sarana pemecah gelombang/ombak laut yang bertujuan sebagai pengaman dermaga dan kapal saat dilakukan sandar atau berlabuh.

Breakwater terdiri dari banyak *primary armour* yang disusun sedemikian hingga saling mengikat satu sama lainnya.

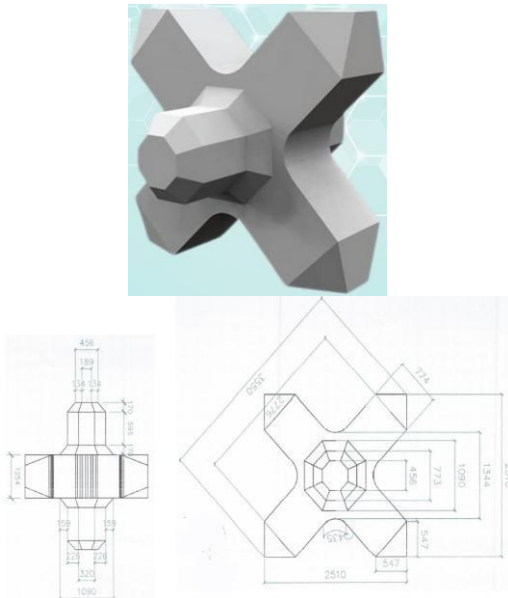
Beton *ready mix* adalah istilah beton yang sudah siap untuk digunakan tanpa perlu lagi pengolahan di lapangan. Lalu metode konvensional biasa disebut dengan *site mix*, proses pencampurannya dilakukan di lapangan. Penggunaan *ready mix* dapat mempercepat pekerjaan menghemat waktu dengan kualitas beton yang tetap terjaga. Sedangkan beton *precast* atau beton pracetak merupakan material yang telah dicetak dan dibuat terlebih dahulu di pabrik. Tekstur dari beton *precast* umumnya ada yang kering dan basah. Material tersebut dibuat berdasarkan cetakan dan ukuran tertentu yang sudah disesuaikan dengan kondisi di lokasi pembangunan.

PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan telah mengantongi izin pemanfaatan FABA dengan nomor SK: S891/Menlhk/setjen/PLB 3/12/2020 dengan komposisi yang sudah standar dengan SNI untuk pembuatan beton dari FABA yang dimiliki.

Tabel 1. Hasil uji *job mix*

No	Nama Bahan	Persentase (%)
1	<i>Fly Ash</i>	56
2	<i>Bottom ash</i>	14
3	Pasir	10
4	Semen	20
5	<i>Admixture</i>	0,5

Breakwater merupakan pemecah gelombang atau dikenal sebagai juga sebagai pemecah ombak atau prasarana yang dibangun untuk memecahkan ombak/gelombang dengan menyerap sebagian energi gelombang. Struktur *breakwater* terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *core*, *secondary armour layer* dan *primary armour layer*. *Primary armour layer* merupakan bagian kritis pada struktur *breakwater* dikarenakan *primary armour* merupakan bagian yang langsung menerima *impact* dari gelombang/ombak laut, sehingga lebih dahulu mengalami kerusakan. BPPT-lock merupakan satu tipe *primary armour layer breakwater* yang merupakan invensi BPDP-BPPT pada tahun 2010. Pemilihan BPPT-lock sebagai *primary armour breakwater* dermaga PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan berdasarkan Kajian Kelayakan oleh Akademisi dari Institut Sepuluh November (ITS).



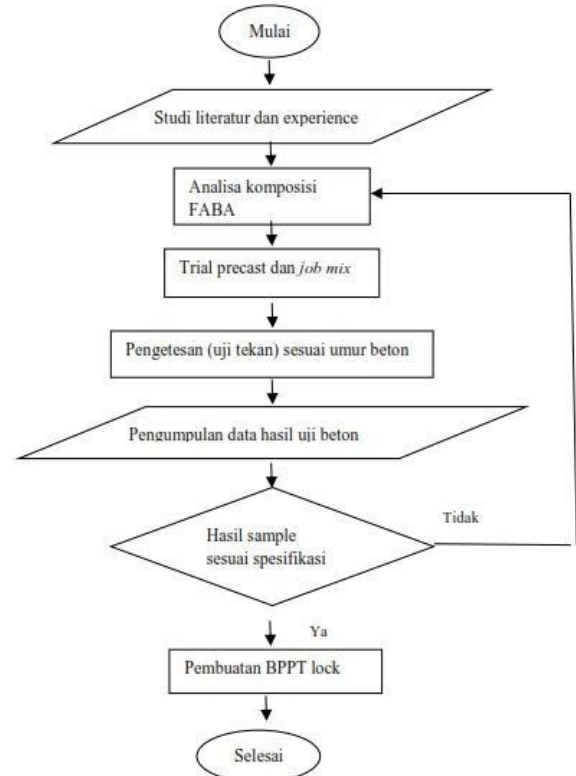
Gambar 1. Desain BPPT-lock

Spesifikasi BBPT-lock

- Berat :11 ton/unit
- Massa jenis beton :2.200 kg/m³
- Mutu beton :K-350
- Kuat tekan minimum :27,5 MPa
- Daya serap air maksimum :192 kg/m³

Penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan BPPT-lock berbahan dasar *Fly Ash and Bottom Ash* (FABA) sebagai *primary armour* pada struktur *breakwater* dermaga PLTU Pacitan. Pemanfaatan FABA dalam pembuatan BPPT-lock bertujuan untuk meningkatkan nilai guna limbah hasil pembakaran batu bara menjadi material konstruksi yang bermanfaat. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan *breakwater* berbahan FABA yang mampu mengurangi biaya pembuatan *primary armour* tipe BPPT-lock, mendukung keberlanjutan (*sustainable*) proses *unloading* batu bara sehingga menjaga keandalan operasional pembangkit listrik, serta mengurangi jumlah timbunan material FABA yang dibuang ke *landfill*.

METODE PENELITIAN



Gambar 2. Flowchart tahapan pembuatan BPPT-lock dari FABA

Studi Literatur dan Pengalaman

Tahap pertama dimulai dengan melakukan studi literatur terkait pemanfaatan FABA sebagai bahan campuran beton. Beberapa referensi teknis dan hasil penelitian sebelumnya digunakan untuk menentukan karakteristik fisik dan kimia FABA, meliputi kandungan silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃) dan kalsium oksida (CaO). Selain itu, dilakukan juga studi pengalaman dari proyek serupa di lingkungan PLTU lain dan lembaga penelitian seperti BPPT dan Balai Pengembangan dan Jas Konstruksi PUPR Yogyakarta. Hasil studi ini menjadi dasar untuk menentukan batas aman penggunaan FABA sebanyak 70% dari total agregat halus dan sebagian semen.

Analisis Komposisi FABA

Pada tahap ini dilakukan analisis laboratorium terhadap *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari unit pembangkit PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan. Analisis meliputi ukuran butiran, kandungan kimia, densitas dan daya serap air. Hasil analisis menunjukkan bahwa FABA memiliki karakteristik yang sesuai untuk dimanfaatkan sebagai bahan campuran beton, terutama karena kandungan silika dan alumina yang tinggi memberikan efek *pozzolanic*.

Trial Precast dan Job Mix

Berdasarkan hasil analisis komposisi, dilakukan *trial mix design* untuk menentukan komposisi campuran beton optimal. Proporsi utama yang digunakan adalah 70% FABA (kombinasi *fly ash* dan *bottom ash*), 30% agregat halus alami, semen Portland dan air sesuai rasio 0,4-0,5. Selanjutnya dilakukan *trial precast* pembuatan sampel BPPT-lock.

Pengujian (Uji Tekan) Sesuai Umur Beton

Setelah pencetakan, dilakukan pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari, 14 hari dan 28 hari menggunakan *Compression Testing Machine (CTM)*. Tujuannya adalah memastikan campuran beton FABA mampu mencapai kekuatan minimum yang dipersyaratkan untuk produk *paving block*.

Pengumpulan Data Hasil Uji Beton

Seluruh hasil pengujian dicatat dan dianalisis, meliputi kuat tekan rata-rata, densitas beton dan penyerapan air. Data ini menjadi dasar untuk menentukan kesesuaian dengan standar.

- SNI 4433:2016 Spesifikasi beton segar siap pakai.
- SNI 2847:2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung.
- SNI 7833:2012 Tata cara perancangan struktur beton.
- SNI 1974:2011 Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder.
- SNI 03-6468-2000 Tata cara perencanaan campuran beton berkekuatan tinggi dengan semen portland dan abu terbang.

- SNI 03-6867-2002 Spesifikasi abu terbang dan pozzolan lainnya untuk di gunakan dengan kapur.
- SNI 2640:2014 Spesifikasi abu terbang batu bara dan pozzolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton.

Evaluasi Hasil dan Penyesuaian

Apabila hasil uji menunjukkan kuat tekan belum sesuai spesifikasi, dilakukan evaluasi terhadap komposisi campuran FABA dan perbaikan *job mix*. Proses ini diulang hingga hasil memenuhi standar yang diinginkan.

Pembuatan BPPT Lock

Setelah formula optimal ditetapkan, dilakukan produksi BPPT-lock dalam skala lebih besar menggunakan komposisi 70% FABA. Produk akhir diuji kembali untuk memastikan konsistensi mutu. Hasil menunjukkan BPPT-lock dari 70% FABA memiliki kekuatan setara beton konvensional dan memberikan nilai tambah lingkungan yang signifikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi minimum yang dipersyaratkan untuk pembuatan BPPT-lock yaitu minimal dengan mutu beton K-350. Untuk mendapatkan kualitas tersebut dengan menggunakan material FABA, dilakukan percobaan campuran penyusun *job mix*. Adapun persentase campuran FABA yang dipergunakan untuk pembuatan campuran *job mix* adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Persentase campuran FABA untuk pembuatan campuran *job mix*

No	Komposisi FABA	Semen %	Pasir %	BA %	FA %	Total Komposisi %	Air %	Aktivator %	Nilai Bacaan Alat (KN)	Luas bidang tekan (cm ²)	Kuat Tekan
Jobmix per silinder dengan volume silinder = 0,0053 m ³										Sampel 1	Sampel 1 Sampel 2
1	95%	5	0	25	65	100	15	0,1	100	176,71	0,57
2	90%	10	0	30	60	100	15	0,1	150	176,71	0,85
3	85%	10	5	25	60	100	15	0,2	200	176,71	1,13
4	80%	15	5	20	60	100	15	0,3	250	176,71	1,41
5	75%	15	10	20	55	100	15	0,4	300	176,71	1,70
6	70%	20	10	14	56	100	5	0,5	520	176,71	2,94

Sesuai dengan standar SNI 1974:2011 campuran *job mix* dibuat dalam bentuk silinder beton. Untuk mengetahui kualitas mutu beton campuran *job mix*, dilakukan pengetesan hasil campuran *job mix* dengan metode uji tekan beton mengacu pada umur beton yaitu 7 hari, 14 hari dan 28 hari.

Tabel 3. Hasil uji tekan beton

No	Tipe Beton	Tinggi (mm)	Diameter (mm)	Luas (mm ²)	Nilai Kuat Tekan (MPa)	Nilai Kuat Tekan (kg/cm ²)
1	M50 - 10 / FABA = 0,41 / BA = 0,7	300	100	7854	10,8	108
2	M50 - 10 / FABA = 0,41 / BA = 0,7	300	100	7854	11,7	117
3	M50 - 10 / FABA = 0,41 / BA = 0,7	300	100	7854	11,7	117

Dari tabel di atas diketahui campuran *job mix* yang masuk spesifikasi untuk pembuatan BPPT-lock dengan pemanfaatan FABA 70%.

Hasil implementasi yaitu *primary armour* (BPPT-lock) yang terbuat dari FABA, memiliki hasil kekuatan yang sama dengan *ready mix* dengan mutu K 350 sehingga dalam implementasinya dapat menggantikan BPPT-lock eksisting. Pemanfaatan FABA untuk BPPT-lock ini memiliki beberapa nilai lebih baik dari finansial, nonfinansial, serta berpotensi menjadi *revenue* untuk PJB pada umumnya.

Manfaat Inovasi Terhadap Korporat

Dengan dibuatnya *breakwater* dari material bahan baku *fly ash* dan *bottom ash*, maka akan diperoleh keuntungan:

- Memanfaatkan FABA menjadi *breakwater* sebanyak 600 unit (6.160 Ton FABA) per tahun.
- Mengurangi potensi biaya pelimbahan.
- Mendukung keandalan dan kelancaran proses pembongkaran (*unloading*) batu bara serta meningkatkan *flow rate* pembongkaran batu bara.
- Mendorong dan mengenalkan manfaat FABA kepada para pihak *stakeholder*.

Manfaat Finansial

Tabel 4. Manfaat finansial dari pembuatan *breakwater*

No	Item	Breakwater Non FABA (Rp)	Breakwater FABA (Rp)
1	Harga Bahan Baku		5.820.000
2	Man Power		5.760.000
3	Sewa Peralatan Pendukung		1.500.000
Total/Unit		19.621.427*)	11.580.000
Total 800 unit		5.697.141.600	9.264.000.000

*) Berdasarkan kontrak

Data kontrak penguatan *breakwater* PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan tahun 2017 dan 2019 diketahui membutuhkan 800 BPPT-lock per tahunnya guna kelancaran operasional *unloading* dan operasional pembangkit. Dengan pembuatan BPPT dari FABA maka didapat *reduce cost* sebesar Rp8.041.427 per unit. Dengan diaplikasikan ke dalam 800 buah BPPT-lock maka total *reduce cost* yang didapat sejumlah Rp6.433.141.600.

Berdasarkan komposisi 70% FABA, apabila membuat 800 BPPT berbahan FABA membutuhkan 6.160 ton FABA. Penawaran harga pelimbahan dari transporter per ton adalah Rp680.000 sehingga membutuhkan dana Rp4.188.800.000 untuk

mengeluarkan 6.160 ton FABA. Maka dengan melakukan pemanfaatan FABA untuk *primary armour breakwater* dapat mengurangi *cost total* senilai Rp4.188.800.000.

Manfaat Nonfinansial

Manfaat nonfinansial yang diperoleh dari penerapan adalah:

- Meningkatkan citra perusahaan PT PJB dikarenakan mampu mengelola aset pembangkitan dalam proses pembongkaran batu bara.
- Menjaga keselamatan dan keamanan tongkang, *vessel* serta pelabuhan milik PT. PLN Nusantara Power UP Pacitan, dari benturan yang diakibatkan dari *alun* atau ombak yang besar.
- Menjaga keandalan operasional pembangkit untuk memenuhi kebutuhan *supply* listrik Jawa Bali.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *Fly Ash and Bottom Ash* (FABA) sebagai bahan baku pembuatan beton siap pakai (*ready mix*) untuk produk BPPT-lock merupakan alternatif yang layak dan memberikan berbagai manfaat. Dari aspek ekonomi, pemanfaatan FABA mampu menghasilkan efisiensi biaya (*cost efficiency*) sebesar Rp6.433.141.600. Selain itu, penerapan BPPT-lock berbahan FABA mendukung keberlanjutan (*sustainable*) proses *unloading* batu bara sehingga berkontribusi terhadap peningkatan keandalan operasional pembangkit listrik. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan FABA mampu mengurangi timbunan limbah yang dibuang ke *landfill* hingga sekitar 6.160 ton per tahun, sekaligus mendukung perusahaan dalam mempertahankan capaian Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan (PROPER).

DAFTAR PUSTAKA

- Armono, H. D. (2017). *Kajian ITS penguatan breakwater permanent jetty dan temporary jetty*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-6468-2000: Tata cara perencanaan campuran beton berkekuatan tinggi dengan semen portland dan abu terbang*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6867-2002: Spesifikasi abu terbang dan pozzolan lainnya untuk digunakan dengan kapur*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011: Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7833:2012: Tata cara perancangan struktur beton*.

- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 2847:2013: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 2640:2014: Spesifikasi abu terbang batu bara dan pozzolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 4433:2016: Spesifikasi beton segar siap pakai*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Pedoman Pd-14-2018-B: Penggunaan abu terbang dalam campuran beton sedikit semen portland*.