



Pemanfaatan *Fly Ash* Dari PLTU-3 SULUT Untuk Substitusi Sebagian Semen Pada Produksi Paving Block Sebagai Upaya Pengurangan Limbah *Fly Ash* Dan Emisi CO₂

Miguel R. Chandra^{#a}, Isri R. Mangangka^{#b}, Reky S. Windah^{#c}

[#]Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^amiguelchandra2k@gmail.com, ^bisri.mangangka@unsrat.ac.id, ^crekywindah@unsrat.ac.id

Abstrak

PLTU-3 SULUT menghasilkan limbah *fly ash* sekitar 10 ton/hari yang masih terbatas pemanfaatannya, menyebabkan penumpukan limbah di landfill. Produksi semen untuk pembuatan paving block juga berdampak pada emisi CO₂ yang tinggi. Pemanfaatan *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen pada produksi paving block dapat mengurangi limbah *fly ash* dan emisi CO₂ sekaligus, karena *fly ash* berpotensi sebagai bahan substitusi semen yang mengurangi jejak karbon (PP No. 22 Tahun 2021). Penelitian ini bertujuan mendapatkan komposisi optimal *fly ash* untuk substitusi semen pada paving block dan menganalisis dampaknya. *Fly ash* tipe C digunakan dengan variasi 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat semen. Paving block dibuat dengan mesin press dan getar hidrolik, lalu diuji kuat tekan dan diklasifikasi berdasarkan IS 15658:2021. Hasil menunjukkan komposisi optimal 10% *fly ash*, dimana kuat tekan turun 4,05% (7 hari) dan 2,65% (28 hari) dibanding tanpa *fly ash*, namun masih memenuhi standar M-30 (30-35 MPa). Pada 20-50% *fly ash*, kuat tekan menurun signifikan 48-80% dan tidak memenuhi standar. Komposisi 10% *fly ash* mengurangi emisi CO₂ 0,235 ton/hari dan limbah *fly ash* 0,279 ton/hari per pabrik (produksi 5000 buah/hari). Menurut Müllauer dkk. (2015), penambahan *fly ash* meningkatkan kadar logam, namun pelepasannya berkurang karena *fly ash* mengurangi porositas beton. Namun, proses produksi berisiko pencemaran tanah dan air tanah oleh logam berat *fly ash* mentah karena tidak ada penyimpanan material *fly ash* dan tidak ada pengendalian air limpasan pada pabrik, sehingga diperlukan pengendalian risiko sesuai KEPDIRJEN MINERBA No.185 K/37.04/DJB/2019, dengan metode eliminasi risiko (pembuatan penyimpanan *fly ash* dan saluran air limpasan) dan administratif (pelatihan pekerja dan penggunaan rambu peringatan).

Kata kunci: fly ash, paving block, kuat tekan, dampak lingkungan

1. Pendahuluan

PLTU-3 SULUT menghasilkan limbah *fly ash* dalam jumlah yang cukup besar, yaitu sekitar 10 ton per harinya. Sayangnya, pemanfaatan *fly ash* ini masih sangat terbatas sehingga menimbulkan permasalahan penumpukan limbah yang berdampak buruk bagi lingkungan. Di sisi lain, produksi paving block banyak menggunakan semen Portland sebagai bahan pengikat. Namun proses produksi semen dinilai berdampak negatif karena menghasilkan emisi CO₂ sebesar 8,43 g per 1 kg semen yang diproduksi sehingga dinilai tidak ramah lingkungan. (N. De Belie P. Van den Heede, 2012).

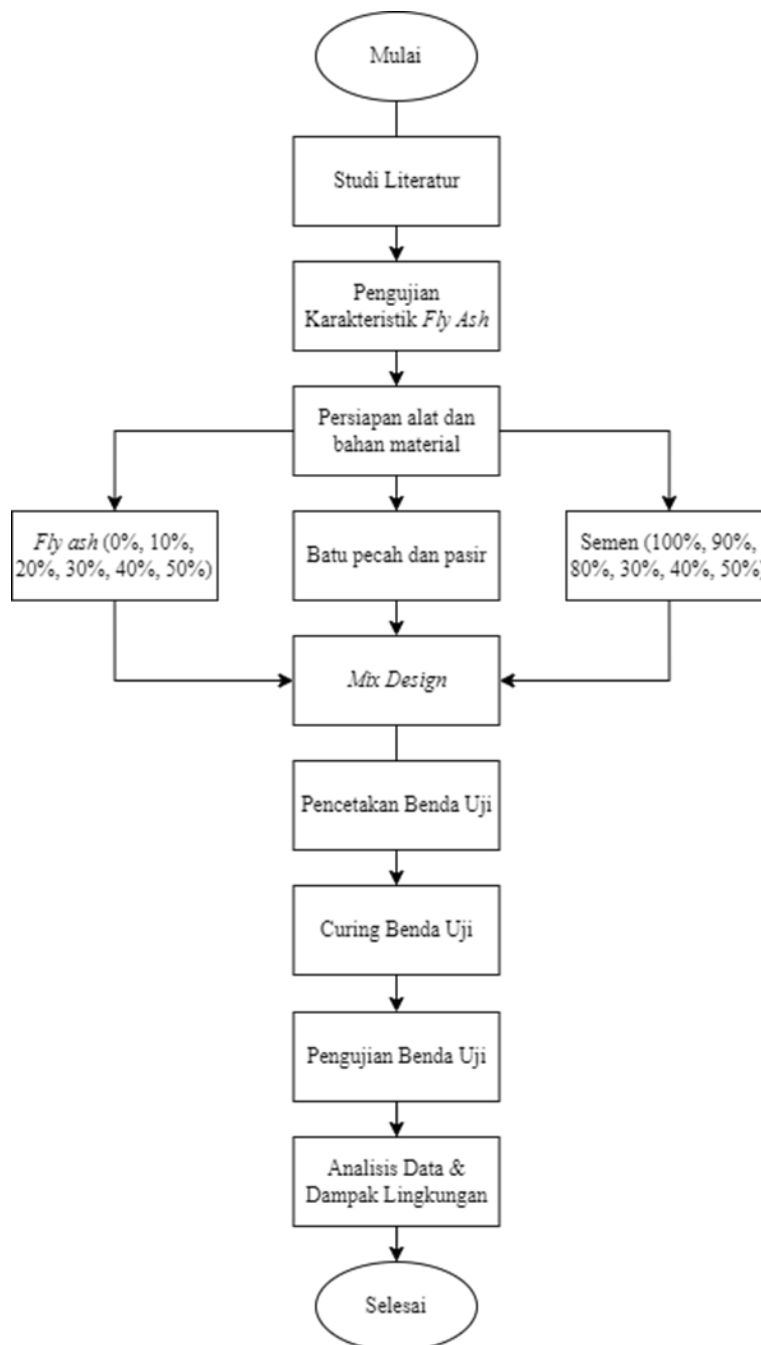
Menurut R. Garavaglia & P. Caramuscio (1994), *fly ash* kaya akan unsur-unsur besar dan unsur jejak yang memiliki potensi untuk mempengaruhi kualitas air tanah secara negatif jika dilepaskan ke subsoil dalam jumlah yang cukup. Volume timbunan *fly ash* yang banyak juga menimbulkan masalah baru, karena membutuhkan banyak ruang untuk menampungnya. *Fly ash* tersebut perlu dimanfaatkan kembali menjadi bahan yang berguna sehingga volume *fly ash* dapat berkurang dari tempat penampungan.

Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 telah

mengatur bahwa *fly ash* sebagai limbah nonB3 berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi semen asalkan memenuhi standar yang berlaku (Standar nasional atau standar negara lain atau standar internasional). Dengan memanfaatkan *fly ash* dari PLTU-3 SULUT sebagai substitusi sebagian semen pada produksi paving block, diharapkan dapat mengurangi limbah *fly ash* dan emisi CO₂ akibat produksi semen sekaligus. Namun, perlu dilakukan kajian mengenai dampak lingkungan akibat penggunaan paving block dengan *fly ash* ini, terutama potensi leaching atau pelepasan logam berat ke lingkungan. Hal ini penting guna memastikan paving block ramah lingkungan.

2. Metode

Penelitian dilakukan di beberapa tempat, yaitu Laboratorium Material dan Struktur untuk uji kuat tekan, Pabrik Paving Block CV. Kawian Jaya untuk pembuatan sampel. Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Gambaran Umum

Penelitian ini dilakukan dengan membuat benda uji paving block (ukuran 21 x 10 x 8 cm dengan *chamfer* tebal 5 mm dan sudut 45°) di pabrik paving block dengan menggunakan mesin press dan getar hidrolik. Dimensi benda uji dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Proyeksi 45°; (b) Tampak depan

Setiap variasi perlakuan terdiri dari empat contoh uji untuk mendapatkan nilai rata-rata dari setiap variasi. Tahapan penelitian dimulai dari persiapan bahan, perencanaan campuran, pembuatan benda uji, dilanjutkan dengan pengujian benda uji di Laboratorium Struktur dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi untuk mendapatkan hasil yang sesuai dan mencapai tujuan penelitian. Kemudian dilanjutkan dengan menganalisa dampak lingkungan dari proses substitusi sebagian *fly ash* terhadap semen. Semua pekerjaan dilakukan sesuai dengan pedoman/standar yang berlaku dengan penyesuaian terhadap kondisi dan fasilitas pabrik dan laboratorium.

3.2. Komposisi Kimia Fly Ash

Untuk mengetahui komposisi unsur-unsur dalam *fly ash* yang akan dimanfaatkan, dilakukan uji kimia dengan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Malang. Tabel 1 merupakan hasil analisis XRF yang menunjukkan komposisi unsur-unsur dalam sampel *fly ash* yang diuji.

Tabel 1. Hasil uji XRF Fly Ash (Hasil Laboratorium, 2022)

Parameter	Persentase (%)
Al ₂ O ₃	8,5
SiO ₂	19,4
P ₂ O ₅	0,2
SO ₃	9,0
K ₂ O	1,1
CaO	17,2
TiO ₂	1,1
V ₂ O ₅	0,04
Cr ₂ O ₃	0,079
MnO	0,43
Fe ₂ O ₃	37,32
NiO	0,02
CuO	0,043
SrO	0,55
MoO ₃	4,2

Parameter	Persentase (%)
BaO	0,27
Eu ₂ O ₃	0,41
Yb ₂ O ₃	0,02
Re ₂ O ₇	0,27

3.3. Komposisi Campuran

Komposisi campuran pada penelitian ini mengacu pada komposisi campuran pada Pabrik Paving Block CV. Kawian Jaya menggunakan komposisi 1:2:3 (Semen : Pasir : Abu Batu) untuk 1 buah paving block (3.35 kg), yang kemudian semen yang digunakan akan disubstitusi dengan *fly ash* sebagian. Faktor air/binder yang digunakan adalah 0.38. Komposisi campuran dari Pabrik Paving Block CV Kawian Jaya dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Campuran Pabrik untuk 1 Paving Block

Material	Berat (kg)
Abu Batu	1.67
Pasir	1.11
Semen	0.55
Air	0.21

3.4. Kebutuhan Material

Pencetakan dilakukan sebanyak 6 batch produksi, 1 kali cetak mesin press hidrolik menghasilkan 12 buah sampel. Total kebutuhan bahan dihitung berdasarkan komposisi 15 buah paving block per batch, lalu dikalikan 6 sesuai jumlah batch. Perhitungan sudah termasuk surplus bahan 20% untuk mengantisipasi kehilangan material dan kekurangan bahan selama proses produksi (tertinggal di mixer atau tumpah). Total kebutuhan material dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Total Kebutuhan Material

Material (15 sampel)	Variasi <i>Fly ash</i>						Total
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Abu batu (kg)	25.13	25.13	25.13	25.13	25.13	25.13	150.75
Pasir (kg)	16.75	16.75	16.75	16.75	16.75	16.75	100.50
Semen (kg)	8.37	7.54	6.70	5.86	5.02	4.19	37.69
<i>Fly ash</i> (kg)	0.00	0.84	1.67	2.51	3.35	4.19	12.56
Air (kg)	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	18.90

3.5. Pengujian Kuat Tekan Keseluruhan Paving Block

Pada pengujian kuat tekan paving block, sampel ditempatkan pada mesin pengujian dan diberikan beban tekan secara bertahap hingga terjadi kerusakan atau pecah pada paving block. Kuat tekan paving block dihitung berdasarkan besar beban maksimum yang diperlukan untuk memecahkan paving block, dibagi dengan luas penampang paving block yang diuji dan dikalikan dengan faktor koreksi menurut BS 6717:2001 & IS 15658: 2021. Perhitungan kuat tekan paving block dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$\sigma = \frac{P}{A} \times cf \quad (1)$$

Keterangan:

σ = Kuat tekan (MPa atau kg/cm²)

P = Beban maksimal yang dapat ditahan sebelum mengalami kehancuran (N atau kg)

A = Luas bidang tekan (mm² atau cm²)

cf = Faktor koreksi

Untuk faktor koreksi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Koreksi Ketebalan dan Timbulan/Chamfer BS 6717:2001; IS 15658:2021

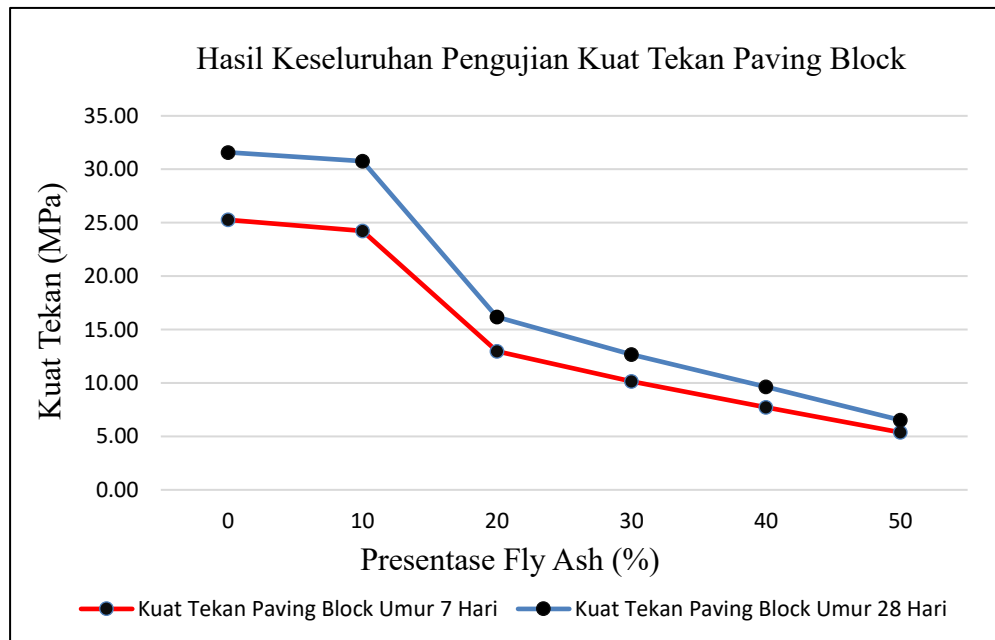
Ketebalan (mm)	Faktor Koreksi	
	Paving Block Polos	Paving Block <i>Arrises/Chamfer</i>
50	0,96	1,03
60	1,00	1,06
80	1,12	1,18
100	1,18	1,24
120	1,28	1,34

Pada Tabel 5 ini adalah ringkasan hasil keseluruhan berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan dan dikalikan dengan faktor koreksi.

Tabel 5. Pemeriksaan Keseluruhan Kuat Tekan Paving Block

Variasi <i>Fly ash</i> (%)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	
	7 Hari	28 Hari
0	25,27	31,58
10	24,24	30,75
20	12,98	16,16
30	10,16	12,67
40	7,73	9,63
50	5,38	6,53

Berdasarkan hasil pada Tabel 5, maka dibuat grafik untuk representasi hasil pemeriksaan keseluruhan kuat tekan paving block pada Gambar 3.

**Gambar 3.** Grafik Hasil Keseluruhan Pengujian Kuat Tekan

3.6. Klasifikasi Paving Block berdasarkan Kuat Tekan menurut IS 15658: 2021

Menurut PP no 22 Tahun 2021, produk hasil pemanfaatan limbah nonB3 wajib memenuhi persyaratan standar produk, yaitu standar nasional yang ditetapkan oleh Pemerintah atau standar dari negara lain atau internasional. Hasil pengujian kuat tekan paving block pada umur 28 hari akan diklasifikasikan sesuai standar internasional IS 15658: 2021 tentang *Precast concrete blocks*

for paving — *Specification* (Balok beton pracetak untuk perkerasan — Spesifikasi). Klasifikasi Paving Block dapat menurut IS 15658: 2021 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Klasifikasi Paving Block IS 15658: 2021

No.	Klasifikasi Paving Block	Kuat Tekan 28 hari (MPa)	Kategori Lalu Lintas	Ketebalan Minimum yang direkomendasikan (mm)	Contoh Aplikasi Lalu Lintas
1	M-30	30	Non-lalu lintas	50	Area bangunan, area monumen, jalan akses residential, jalur pejalan kaki, taman/kebun publik, dll.
2	M-35	35	Lalu lintas ringan	60	Alun-alun pejalan kaki, kompleks perbelanjaan, parkir mobil, jalan kantor, dll.
3	M-40	40	Lalu lintas sedang	80	Jalan perkotaan, pasar kecil dan menengah, dll.
4	M-50	50	Lalu lintas berat	100	Terminal bus, kompleks industrial, lantai pabrik, dll.
5	M-55	55	Lalu lintas sangat berat	100	Terminal kontainer, pelabuhan, jalan akses tambang, paving bandara, dll.

Klasifikasi paving block berdasarkan rata-rata hasil kuat tekan keseluruhan pengujian menurut IS 15658: 2021 dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Klasifikasi Paving Block Berdasarkan Kuat Tekan Menurut IS:15658: 2021

Variasi <i>Fly ash</i> (%)	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)	Kelas	Kategori Lalu Lintas
0	31,58	M-30	Non-lalu lintas
10	30,75	M-30	Non-lalu lintas
20	16,16	Tidak dispesifikkan	-
30	12,67	Tidak dispesifikkan	-
40	9,63	Tidak dispesifikkan	-
50	6,53	Tidak dispesifikkan	-

Berdasarkan klasifikasi pengujian paving block pada Tabel 5, paving block dengan variasi 0 dan 10% dapat digunakan dalam kategori non-lalu lintas yang penggunaannya mencakup area bangunan, area monumen, jalan akses residential (domestic drives), jalur pejalan kaki, taman/kebun publik, dan lainnya. Sedangkan paving block dengan variasi 20% - 50% penggunaannya tidak dispesifikkan.

3.7. Analisis Dampak Lingkungan Hasil Substitusi *Fly Ash* dalam Produksi Paving Block

Analisis dampak lingkungan dari hasil substitusi *fly ash* dalam produksi paving block perlu dilakukan untuk memahami sejauh mana perubahan dalam komposisi bahan pembuatan paving block dapat mengurangi jejak lingkungan dan mempertimbangkan dampaknya terhadap siklus hidup produk dan lingkungan secara keseluruhan.

3.7.1. Analisis Pengurangan Emisi CO₂ dan Limbah *Fly Ash*

Berikut adalah hasil perhitungan untuk pengurangan Emisi CO₂ dan pengurangan limbah *fly ash* dalam pembuatan 1 buah paving block, dengan beberapa variasi persentase *fly ash* (Tabel 8).

Tabel 8. Emisi CO₂ dan pengurangan limbah *fly ash* dalam 1 buah paving block

Persentase <i>Fly ash</i> (%)	Material		Emisi CO ₂ (kg)	Pengurangan Limbah <i>Fly ash</i> (kg)
	Semen (kg)	<i>Fly ash</i> (kg)		
0%	0,558	0	0,470	0
10%	0,502	0,056	0,423	0,056
20%	0,447	0,112	0,376	0,112
30%	0,391	0,167	0,329	0,167
40%	0,335	0,223	0,282	0,223
50%	0,279	0,279	0,235	0,279

Dengan kapasitas produksi Pabrik Paving Block CV. Kawian Jaya yang mencapai rata-rata 5000 buah per hari, dan kapasitas produksi limbah *fly ash* dari PLTU-3 SULUT yang mencapai 10 ton per hari, maka pengurangan CO₂ dan limbah *fly ash* dalam produksi paving block per hari dapat dihitung pada Tabel 9.

Tabel 9. Perhitungan emisi CO₂ dan Pengurangan Limbah *Fly Ash* dalam Produksi Paving Block (ton/hari)

Persentase <i>Fly ash</i> (%)	Material		Emisi CO ₂ (ton)	Pengurangan Limbah <i>Fly ash</i> (ton)
	Semen (ton)	<i>Fly ash</i> (ton)		
0	2,792	0,000	2,350	0,000
10	2,512	0,279	2,115	0,279
20	2,233	0,558	1,880	0,558
30	1,954	0,837	1,645	0,837
40	1,675	1,117	1,410	1,117
50	1,396	1,396	1,175	1,396

Dikarenakan hanya paving block variasi 10% yang memenuhi standar produk, maka berdasarkan perhitungan Tabel 7, kebutuhan pabrik paving block untuk mengimbangi produksi *fly ash* PLTU-3 SULUT diperlukan sebanyak jumlah produksi *fly ash* dibagi dengan penggunaan *fly ash* dalam campuran paving block. Maka jumlah pabrik yang dibutuhkan sebanyak 36 unit untuk mengimbangi laju produksi *fly ash* agar tidak membebani *landfill* PLTU-3 SULUT.

3.7.2. Analisis Resiko Pelindian Paving Block Substitusi *Fly Ash*

Untuk menilai potensi dampak lingkungan dari unsur yang terlepas dari paving block melalui proses tank leaching tersebut, satuan kumulatif pelepasan dikonversi dari mmol/m² menjadi mg/L dengan cara mengalikan nilai mmol/m² dengan massa molar (MM) dalam g/mol lalu dibagi volume spesifik larutan eluat yaitu 90 L/m². Kemudian hasil konversi dalam mg/L dibandingkan dengan baku mutu unsur dalam air tanah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 19 Tahun 2010 dan *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality* (2019), untuk menentukan apakah konsentrasinya berpotensi mencemari lingkungan. Tabel 10 berikut adalah perbandingan antara sampel beton konvensional dengan beton substitusi *fly ash* 10% terhadap semen.

Tabel 10. Perbandingan Pelepasan Unsur antara Sampel Beton Konvensional dengan Sampel Beton Substitusi *Fly Ash* 10% (Müllauer et al., 2015)

Unsur	MM (g/mol)	0% FA (mmol/m ²)	10% FA (mmol/m ²)	0% FA (mg/L)	10% FA (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Ket B1	Ket B3
Al	26,98	17,82	14,95	5,34	4,48	-	-	-
Ba	137,33	0,37	0,3	0,57	0,46	1**	OK	OK
Ca	40,08	1811,80	1153,1	806,85	513,51	-	OK	OK
Cr	52	0,03	0,021	0,02	0,01	0,05*	OK	OK

Unsur	MM (g/mol)	0% FA (mmol/m ²)	10% FA (mmol/m ²)	0% FA (mg/L)	10% FA (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	Ket B1	Ket B3
K	39,1	316,00	215,6	137,28	93,67	-	OK	OK
Na	22,99	125,90	88,9	32,16	22,71	200**	OK	OK
S	32,07	9,08	7	3,24	2,57	400*	OK	OK
Si	28,09	37,70	45,4	11,77	14,17	-	-	-
V	50,94	0,004	0,012	0,0023	0,0068	0,1**	OK	OK
Zn	65,38	0,12	0,217	0,09	0,16	5**	OK	OK
Sr	87,62	1,19	0,95	1,16	0,92	7**	OK	OK

*) Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021

***) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality, 2019

Penelitian Müllauer et al. (2015) menunjukkan bahwa meskipun penggantian semen dengan *fly ash* dapat meningkatkan kadar logam dalam beton, namun pelepasan logam-logam tersebut ke lingkungan sangat terbatas karena sebagian besar masih terikat kuat dalam matriks padat beton. Penambahan *fly ash* sebagai substitusi semen sebagian justru dapat memperbaiki mikrostruktur beton dengan mengurangi porositas, sehingga mengurangi laju pelepasan unsur melalui mekanisme difusi. Secara spesifik, *fly ash* 10% dapat menurunkan pelepasan alkali, kalsium, barium dan stronsium karena penurunan porositas. Sementara pelepasan aluminium, sulfur, vanadium, kromium, seng, tembaga, nikel, kobalt dan timbal tidak meningkat secara signifikan.

3.7.3. Analisis Risiko Produksi Paving Block Substitusi Fly Ash sebagian Semen

Analisis ini membahas tentang risiko produksi paving block dengan substitusi sebagian semen menggunakan *fly ash* dari PLTU-3 SULUT. Sumber risiko utama adalah paparan logam berat dari *fly ash* terhadap pekerja dan lingkungan sekitar. Penyebabnya adalah tidak adanya sistem penyimpanan dan pengelolaan air limpasan yang memadai, serta kurangnya perlindungan dan pelatihan bagi pekerja. Penilaian risiko dilakukan dengan metode semi-kuantitatif AS/NZS 4360:1999, dengan penilaian pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Tabel 11. Bobot Nilai Kemungkinan (*Probability*) dan Frekuensi (*Frequency*) AS/NZS 4360:1999

Nilai	Deskripsi - <i>PROBABILITY</i>
1	Hampir selalu terjadi (<i>certainly</i>); Diperkirakan dapat terjadi kapan saja
0,6	Sangat mungkin (<i>significant chance</i>); Dapat terjadi pada sebagian besar keadaan
0,3	Mungkin terjadi (<i>possible</i>); Dapat terjadi pada beberapa keadaan tertentu
0,1	Kemungkinan kecil (<i>unlikely</i>); Hanya terjadi pada waktu-waktu tertentu
0,05	Jarang terjadi (<i>rare</i>); Terjadi hanya pada keadaan luar biasa
Nilai	Deskripsi - <i>FREQUENCY</i>
10	Sangat sering terjadi; Selalu terjadi di area pekerjaan
6	>3 kali per tahun; Sering terjadi di area pekerjaan
3	1-3 kali per tahun; Pernah terjadi di area pekerjaan
2	Satu kali per tahun; Pernah terjadi di industri ini
1	Jarang sekali; Tidak pernah terdengar di industri ini

Tabel 12. Bobot Nilai Keparahan (*Severity*) AS/NZS 4360:1999

Nilai	Deskripsi - <i>SEVERITY</i>			
	Keselamatan	Finansial (IDR)	Lingkungan Hidup	Faktor Eksternal
20	Terjadi banyak kematian	>500 jt	Bahaya lingkungan jangka panjang di luar lokasi proyek.	Menyebabkan seluruh operasional perusahaan terhenti; Contoh: Protes masyarakat sekitar, Kerusakan, Kebut asap, Krisis ekonomi, dll

Nilai	Deskripsi - SEVERITY			
	Keselamatan	Finansial (IDR)	Lingkungan Hidup	Faktor Eksternal
10	Satu kasus kematian/ banyak cedera dengan akibat cacat seumur hidup	50 - 500 jt	Dampak signifikan pada biodiversitas Membahayakan lingkungan di luar lokasi proyek. Bisa pulih dengan tindakan perbaikan yang intensif	Memengaruhi seluruh pendapat karyawan & seluruh operasional perusahaan terganggu; Contoh: Aktivitas tambang benturan dengan tanah masyarakat
5	Terjadi cedera berat yang mengharuskan pekerja istirahat >1 hari	10 – 50 jt	Dampak lingkungan di luar lokasi proyek terbatas. Kerusakan jangka pendek yang dapat pulih sendiri	Memengaruhi seluruh pendapat karyawan & sebagian operasional perusahaan terganggu; Contoh: Kecelakaan kerja, Kebakaran, Kebocoran bahan kimia, dll
2	Terjadi cedera ringan yang memerlukan pertolongan pertama (P3K)	1 - 10 jt	Dampak lingkungan di lokasi proyek. Kerusakan minimal yang dapat diperbaiki	Memengaruhi sebagian pendapat karyawan & sebagian operasional perusahaan terganggu; Contoh: Kecelakaan ringan, Gangguan listrik, dll
1	Tidak ada cedera	<1 jt	Tidak ada dampak lingkungan. Tidak ada kerusakan	Mempengaruhi sebagian pendapat karyawan namun tidak mempengaruhi operasional perusahaan. Contoh: Perubahan peraturan pemerintah tentang standar APD bagi operator HD

Setelah menilai risiko dari kemungkinan, frekuensi dan keparahan, maka dapat ditentukan nilai risiko. Nilai risiko dapat dilihat pada Tabel 13 berikut.

Tabel 13. Bobot Nilai dan Kode Nilai Risiko

Nilai (Kode)	Status	Deskripsi – NILAI RISIKO	
		Evaluasi Risiko dan Langkah Pengendalian	
20 (AA)	Very High	Ekstrim; Langkah pengendalian harus dilakukan tanpa penundaan (seluruh kegiatan berhenti sampai dengan perbaikan selesai dilakukan)	
10-20 (A)	Priorit y	Tinggi; Perlu langkah pengendalian secepatnya, pemberian peringatan, sosialisasi JSA, dll; Penggunaan APD sebagai upaya pengendalian sementara	
3-10 (B)	Moder ate	Sedang; Perlu sedikit upaya pengendalian; Manajemen harus melakukan pengawasan tindakan perbaikan dan/atau pengendalian	
<3 (C)	Accept able	Rendah; Tingkat risiko yang sudah bisa diterima/ditoleransi; monitoring rutin dan cek kelengkapan APD	

Penilaian Risiko dihasilkan dari hasil kali nilai Kemungkinan, Frekuensi dan Keparahannya. menghasilkan nilai risiko 18 yang termasuk prioritas sehingga diperlukan tindakan pengendalian secepatnya. Pengendalian risiko dilakukan dengan metode paling handal menurut KEPDIRJEN MINERBA No.185 K/37.04/DJB/2019, yaitu rekayasa eliminasi sumber risiko melalui penyimpanan *fly ash* yang terlindung dari cuaca dan kedap air, pengelolaan air limpasan dengan kolam pengendapan dan pengolahan air sebelum dibuang, serta pengelolaan administrasi perbaikan melalui pelatihan pekerja dan rambu peringatan bahaya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- 1) Komposisi *fly ash* yang optimal secara teknis dalam pembuatan paving block adalah 10%. Hal ini ditunjukkan dari hasil kuat tekan paving block dengan variasi 10% *fly ash* yang hanya sedikit di bawah variasi tanpa *fly ash* (penurunan 4,05% pada umur 7 hari dan 2,65% pada umur 28 hari). Rata-rata nilai kuat tekan variasi 10% *fly ash* (30,75 MPa) memenuhi standar M-30 untuk penggunaan non-lalu lintas. Sedangkan variasi lebih dari 20%

menyebabkan penurunan kuat tekan yang sangat signifikan (48% – 80%) hingga tidak memenuhi standar.

- 2) Pemanfaatan 10% *fly ash* dalam produksi paving block memberikan manfaat lingkungan berupa pengurangan emisi CO₂ 0,235 ton/hari dan mendaur ulang 0,279 ton/hari limbah *fly ash* per pabrik (produksi 5000 buah/hari), sehingga dibutuhkan 36 pabrik untuk mengimbangi produksi 10 ton/hari *fly ash* dari PLTU. Meskipun meningkatkan kadar logam, studi Müllauer et al. (2015) menunjukkan pelepasan logam ke lingkungan sangat terbatas karena terikat dalam matriks padat, bahkan *fly ash* mengurangi porositas beton sehingga mengurangi pelepasan unsur. Namun, produksi berisiko mencemari tanah dan air tanah oleh *fly ash* mentah dengan penilaian risiko menurut AS/NZS 4360:1999 mendapat nilai 18 yang memerlukan pengendalian segera. Pengendalian risiko dilakukan sesuai KEPDIRJEN MINERBA No.185K/37.04/DJB/2019, melalui rekayasa eliminasi risiko, dengan kehandalan tertinggi dengan cara penyimpanan *fly ash* yang terlindungi cuaca dan kedap air, pengelolaan air limpasan. Pengendalian risiko tambahan dilakukan dengan cara metode administrasi (pelatihan pekerja, dan rambu bahaya).

Referensi

- ASTM. (2019). *ASTM C618-19 Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bureau of Indian Standards. (2021). *IS 15658:2021 Precast concrete blocks for paving*. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- De Belie, N. & Van den Heede, P., (2012). *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations*. Cement & Concrete Composites, 34(4), 431-442. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Garavaglia, R., & Caramuscio, P. (1994). *Coal fly-ash leaching behaviour and solubility controlling solids*. In H. A. van der Sloot, J. J. J. M. Goumans, & Th. G. Aalbers (Eds.), *Studies in Environmental Science* (Vol. 60, pp. 87-102). Elsevier.
- Health Canada. (2019). *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table*. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada: Ottawa, Ontario.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2019). *KEPDIRJEN MINERBA No.185 K/37.04/DJB/2019*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- Müllauer, Wolfram, Robin E. Beddoe, dan Detlef Heinz. 2015. *Leaching Behaviour of Major and Trace Elements from Concrete: Effect of Fly ash and GGBS*. Cement and Concrete Composites 58:129–39. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.002.
- Van den Heede, P., and N. De Belie. 2012. *Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'Green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations*. Cement and Concrete Composites 34(4):431–42. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Sekretariat Negara. Jakarta.
- Standards Australia/Standards New Zealand. (1999). *AS/NZS 4360:1999 Risk management*. Sydney: Standards Australia International Ltd.