

SOLIDIFIKASI LUMPUR LAPINDO DALAM UPAYA PENCEGAHAN PENCEMARAN LINGKUNGAN SEBAGAI BAHAN CAMPURAN PAVING BLOCK

Fakhrian Aji, Mochtar Hadiwidodo, Ganjar Samudro.

Program Studi Teknik Lingkungan FT UNDIP, Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang Semarang

Email: fakhrianaji@gmail.com

ABSTRACT

Sidoarjo mud, or commonly known as the lapindo mud, which occurred in May 2006, make activities of the community in 3 districts around the mudflow became paralyzed. Lapindo mud actually contains the silicates (SiO₂) and lime (CaO) that quite high and classified of pozzolanic. Beside that, lapindo mud classified to hazard waste too because it contains heavy metals such as timbale (Pb) 35,41 ppm and copper (Cu) 21,9 ppm. Solidification technique is a technique to changes physical and chemical character of hazard wastes within addition fastener compounds, so can inhibited the movement of hazard wastes and form a bond with a monolithic mass of muscular structure. In this research, using 10 variations of addition lapindo mud to be used as a mixture of paving blocks, which is 5 variations (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) is the substitution of cement, and 5 variations (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) is the substitution of sand. After the solidification process, variation of 30% lapindo mud substitution cement, obtained quality of compressive strength 408 kg/cm², water absorbtion of paving block 10,17% and the leachate of Pb and Cu parameters below 0,03 ppm and cost for making paving block decreased from Rp 1.302,86 per each become Rp 1.059,40 per each.

Keywords: Solidifications, Hazard Wastes, Lapindo Mud, Paving Blocks.

Pendahuluan

Lumpur panas Sidoarjo atau biasa dikenal dengan lumpur lapindo, yang terjadi pada bulan Mei 2006 membuat lumpuhnya seluruh aktivitas masyarakat di 3 kecamatan di sekitar semburan lumpur.

Lumpur lapindo sebenarnya memiliki kandungan silikat (SiO₂) dan kandungan kapur (CaO) yang cukup tinggi dan bersifat pozzolan. Selain kandungan kimia yang menguntungkan tadi, ternyata lumpur lapindo bersifat B3 (bahan berbahaya dan beracun) karena mengandung logam berat seperti Pb (35,41 ppm), dan Cu (21,9 ppm).

Teknik solidifikasi merupakan teknik dengan mengubah watak fisik dan kimiawi limbah B3 dengan cara penambahan senyawa pengikat sehingga pergerakan senyawa B3 dapat dihambat atau terbatas dan membentuk ikatan massa monolit dengan struktur yang kekar.

Menilik dari latar belakang ini, maka akan dilaksanakan penelitian tentang solidifikasi lumpur Lapindo sebagai bahan campuran pembuatan *paving block*. Hasil yang diharapkan adalah mengetahui kandungan kimia dan fisika dari lumpur lapindo, dapat menentukan komposisi paling optimal lumpur lapindo sebagai campuran bahan pembuatan *paving block*, kualitas paving block (kuat tekan, daya serap air) dan menganalisis kandungan logam berat yang tereduksi setelah dilakukan proses solidifikasi.

Tinjauan Pustaka

Stabilisasi merupakan proses dimana suatu aditif atau reagen dicampurkan dengan limbah untuk meminimalkan laju perpindahan kontaminan yang ada pada limbah ke lingkungan dan untuk menurunkan tingkat toksisitas limbah tersebut. Sedangkan Solidifikasi adalah suatu cara lain untuk

mereduksi tingkat racun pada limbah B3. Solidifikasi digambarkan sebagai proses dimana suatu material ditambahkan ke dalam limbah B3 untuk menghasilkan massa yang padat. (La Grega, et al. 1994)

Menurut La Grega, et al., (1994), beberapa teknologi pengikat dalam proses stabilisasi/solidifikasi adalah sebagai berikut:

a. Semen

Semen sebagai bahan dasar stabilisasi, material limbah dicampurkan dengan semen diikuti dengan penambahan air untuk hidrasi. Stabilisasi menggunakan semen adalah yang paling cocok untuk limbah anorganik, khususnya yang mengandung logam berat. Biaya material menjadi relative lebih rendah dan peralatannya tersedia. Proses relative lebih mudah dan cocok untuk digunakan sebagai pencampur bahan logam.

b. Pozzolan

Pozolan adalah material yang dapat bereaksi dengan kapur dengan kehadiran air untuk memproduksi sebuah material semen. Reaksi material dari silica alumina, kapur (*lime*) dan air menghasilkan formasi beton. Kebanyakan aplikasi stabilisasi termasuk penggunaan dari pozzolan, yaitu untuk material anorganik. pH yang tinggi baik untuk limbah yang mengandung logam berat.

c. Kapur

Stabilisasi lumpur sering diselesaikan dengan penambahan *calcium hydroxide* (Ca(OH)₂) atau kapur. Kapur juga dapat ditambahkan untuk meningkatkan pH dari keasaman lumpur dengan reagen lainnya, seperti *fly ash* dan *bottom ash*. Stabilisasi berbahan dasar kapur biasanya cocok untuk zat anorganik dan telah luas diterapkan untuk lumpur yang mengandung logam.

Metodologi Penelitian

Metode penelitian ini dibagi menjadi 2 variabel, variabel bebas yaitu variasi campuran lumpur lapindo dalam semen maupun pasir, sedangkan variabel terikat adalah kuat tekan paving block, daya serap air, dan uji perlintian paving block.

Untuk variabel bebas, variasi penambahan lumpur lapindo dalam semen adalah 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dari berat semen dan variasi tanpa penambahan lumpur lapindo (0%) sebagai paving block kontrol. Selain variasi tadi, variasi

penambahan lumpur lapindo dalam pasir adalah 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat pasir, serta pembuatan variasi 0% sebagai paving block control.

Tabel 1

Variasi Penambahan Lumpur Lapindo Dalam Semen

Variasi Lumpur Lapindo	Berat Semen (kg)	Berat Lumpur Lapindo (kg)	Berat Pasir (kg)	Total Lumpur dan Semen (kg)
0%	1	0	3	1
10%	0,9	0,10	3	1
20%	0,8	0,20	3	1
30%	0,7	0,30	3	1
40%	0,6	0,40	3	1
50%	0,5	0,50	3	1

Tabel 2

Variasi Penambahan Lumpur Lapindo Dalam Pasir

Variasi Lumpur Lapindo	Berat Semen (kg)	Berat Lumpur Lapindo (kg)	Berat Pasir (kg)	Total Lumpur dan Semen (kg)
0%	1	0	3	3
10%	1	0,3	2,7	3
20%	1	0,6	2,3	3
30%	1	0,9	2,1	3
40%	1	1,2	1,8	3
50%	1	1,5	1,5	3

Variabel terikat pada penelitian ini adalah kualitas kuat tekan paving block, kualitas daya serap air, dan kualitas air lindi yang dihasilkan setelah dilakukan proses solidifikasi.

Hasil dan Pembahasan

Sebelum dilakukan penelitian, perlu dianalisis kandungan fisik maupun kimia dari lumpur lapindo.

Tabel 3

Karakteristik Kimia Lumpur Lapindo

Parameter	Satuan	Hasil Analisis
Uji Mineral (Kandungan Kimia)		
SiO ₂	%	21,32
Al ₂ O ₃	%	6,18
Fe ₂ O ₃	%	5,60
CaO	%	2,19
Uji Kandungan Logam Berat		
Timbal (Pb)	Ppm	35,41
Krom (Cr)	Ppm	-
Cadmium (Cd)	Ppm	0,005
Tembaga (Cu)	Ppm	21,9

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Tabel 4
Karakteristik Fisik Lumpur Lapindo

Nama Sampel	Berat Jenis gr/cm ³	Berat Isi gr/cm ³	Kadar Air %	Porositas %
Lumpur Lapindo	2,58	7,7	18,91	49,10

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Dari hasil analisis fisik dan kimia pada lumpur lapindo, lumpur lapindo bersifat pozzolan, yaitu material yang dapat bereaksi dengan kapur dengan kehadiran air untuk memproduksi material semen dan menghasilkan formasi beton.

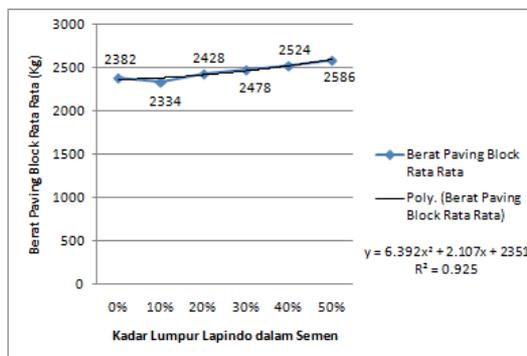
Kemudian setelah diketahui kandungan fisik maupun kimia, lumpur lapindo kemudian disolidifikasi dengan berbagai variasi (10% - 50%). Setelah dilakukan solidifikasi dan berbentuk paving block, pada hari ke 28 dilakukan analisis berat paving block, uji kuat tekan dan uji daya serap air.

A. Analisis Berat

Tabel 5
Rata Rata Berat Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Variasi	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Berat (gram)	2382	2334	2428	2478	2524	2586

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013



Gambar 1. Grafik Hubungan Kadar Lumpur Lapindo dalam Semen dengan Berat Paving Block

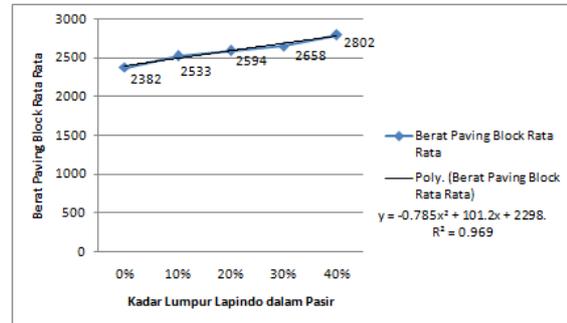
Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Berat tertinggi dimiliki oleh paving block pada variasi 50% lumpur lapindo substitusi sebagian semen, yaitu 2586 gram. Sedangkan berat terendah adalah pada variasi 10%, yaitu 2334 gram. Semakin banyak jumlah penggunaan lumpur lapindo dalam semen, semakin berat pula paving block yang dihasilkan. Hal ini terjadi dikarenakan berat jenis lumpur yang lebih besar daripada berat jenis semen.

Tabel 6
Rata Rata Berat Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Variasi	0%	10%	20%	30%	40%	50%
Berat (gram)	2382	2533	594	658	802	812

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013



Gambar 2. Grafik Hubungan Kadar Lumpur Lapindo dalam Pasir dengan Berat Paving Block

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Berat tertinggi dimiliki oleh paving block dengan variasi persentase 50% lumpur lapindo sebagai substitusi pasir, yaitu 2812 gram. Sedangkan berat terendah pada variasi 0%, yaitu 2382 gram. Dari tabel dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan berat mulai dari 0% hingga 50% campuran lumpur dalam pasir. Hal ini terjadi dikarenakan berat jenis lumpur lebih besar daripada berat jenis pasir. Sehingga, semakin banyak jumlah campuran lumpur dalam pasir, semakin berat pula paving block.

B. Uji Kuat Tekan

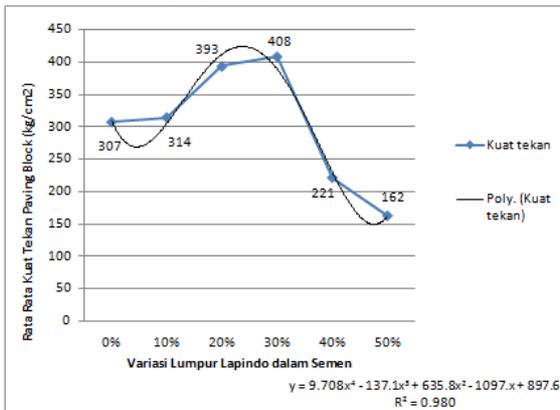
Tabel 7
Nilai Kuat Tekan Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Kode Sampel	Variasi (%)	Kuat Tekan Paving Block	SNI 03 - 0691 - 1996		
			Mutu	Fungsi	Kuat Tekan kg/cm ²
LS0	0	307	B	Parkir	Min. 170
LS1	10	314	B	Parkir	Min. 170
LS2	20	393	A	Jalan	Min. 350
LS3	30	408	A	Jalan	Min. 350
LS4	40	221	B	Parkir	Min. 170
LS5	50	162	C	Pejalan kaki	Min. 125

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Dapat dilihat pada tabel, bahwa kualitas kuat tekan tertinggi pada variasi 30% campuran lumpur lapindo, yaitu 408 kg/cm², dimana termasuk mutu A (rata rata kuat tekan 400kg/cm² dan minimal kuat tekan 350 kg/cm²) dan dapat digunakan sebagai jalan. Kualitas kuat tekan terendah pada variasi 50%

campuran lumpur lapindo, yaitu 162 kg/cm^2 , dimana termasuk mutu C (rata rata kuat tekan 150 kg/cm^2 dan minimal kuat tekan 125 kg/cm^2) dan dapat digunakan untuk pemasangan pada trotoar untuk pejalan kaki.



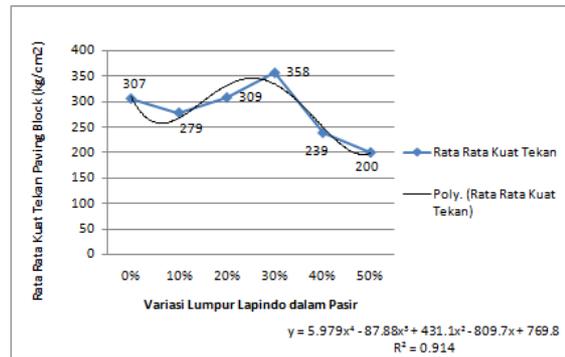
Gambar 3. Grafik Hubungan Kadar Lumpur Lapindo dalam Semen dengan Kuat Tekan Paving Block
 Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 8
 Nilai Kuat Tekan Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Pasir)

Kode Sampel	Variasi (%)	Kuat Tekan Paving Block	SNI 03 - 0691 - 1996		
			Mutu	Fungsi	Kuat Tekan kg/cm ²
LS0	0	307	B	Parkir	Min. 170
LS1	10	279	B	Parkir	Min. 170
LS2	20	309	B	Parkir	Min. 170
LS3	30	358	A	Jalan	Min. 350
LS4	40	239	B	Parkir	Min. 170
LS5	50	200	B	Pejalan kaki	Min. 125

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Dapat dilihat pada tabel, bahwa kualitas kuat tekan tertinggi pada variasi 30% campuran lumpur lapindo, yaitu 358 kg/cm^2 , dimana termasuk mutu A (minimal kuat tekan 350 kg/cm^2) dan dapat digunakan sebagai peralatan parkir. Kualitas kuat tekan terendah pada variasi 50% campuran lumpur lapindo, yaitu 200 kg/cm^2 , dimana termasuk mutu B (rata rata kuat tekan 200 kg/cm^2 dan minimal kuat tekan 170 kg/cm^2) dan dapat digunakan untuk pemasangan pada parkir.



Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Lumpur Lapindo dalam Pasir dengan Kuat Tekan Paving Block

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Adanya sifat pozzolan pada lumpur Lapindo yang mengandung silica reaktif dapat berfungsi untuk mereduksi kapur bebas (Ca(OH)_2) hasil hidrasi trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) dan menghasilkan produk hidrasi tambahan yang bersifat sebagai perekat. Adanya bahan perekat ini akan mengisi rongga rongga kapiler besar yang terbentuk pada proses hidrasi semen. Hal ini mengakibatkan porositas dari pasta semen hidrat maupun pasta semen hidrat dan agregat akan berkurang signifikan sehingga produk beton akan meningkat. (Alit, I Made. 2007)

Melihat beberapa teori yang dinyatakan oleh beberapa peneliti terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan material yang bersifat pozzolan (kandungan silica tinggi) seperti lumpur Lapindo ini mampu meningkatkan kualitas kuat tekan paving block. Penggunaan lumpur lapindo ini ternyata mampu mengurangi penggunaan semen. pasta semen yang dihasilkan dari campuran semen dan lumpur lapindo ini akan mengisi setiap rongga pada agregat sehingga membuat kualitas paving block lebih kuat.

Melihat dari gambar 3 dan 4, penggunaan lumpur Lapindo berlebih diatas 30% membuat kualitas kuat tekan menurun secara drastic. Hal ini disebabkan karena jumlah pasir yang semakin sedikit daripada jumlah lumpur Lapindo membuat daya ikatan (*setting*) atau proses pengikatan antara pasir dan semen tidak berjalan dengan sempurna. Pengikatan ini dipengaruhi oleh senyawa trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) yang sedikit dan proses pengikatan tidak berjalan dengan baik. (Munir. 2008)

Seiring bertambahnya penggunaan lumpur lapindo menggantikan sebagian pasir, terjadi penurunan kualitas kuat tekan secara drastis. Hal ini terjadi dikarenakan pasir yang berguna sebagai agregat yang bermanfaat untuk kekuatan tekan, ketahanan terhadap benturan dan dapat mempengaruhi ikatannya

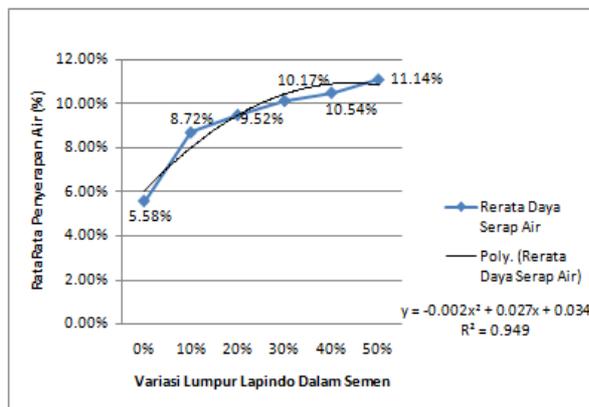
dengan pasta semen, jumlahnya semakin berkurang sehingga terjadi penurunan kualitas kuat tekan yang cukup signifikan, bila dibandingkan dengan paving block tanpa campuran lumpur lapindo.

C. Uji Daya Serap Air

Tabel 9
Rata Rata Daya Serap Air Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Kode Sampel	Variasi	Rata Rata Daya Serap Air Paving Block	Penyerapan Air Rata Rata Maksimal (%) (SNI 03-0691-1996)
LS0	0%	5,58	6
LS1	10%	8,72	6
LS2	20%	9,52	3
LS3	30%	10,17	3
LS4	40%	10,54	6
LS5	50%	11,14	8

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

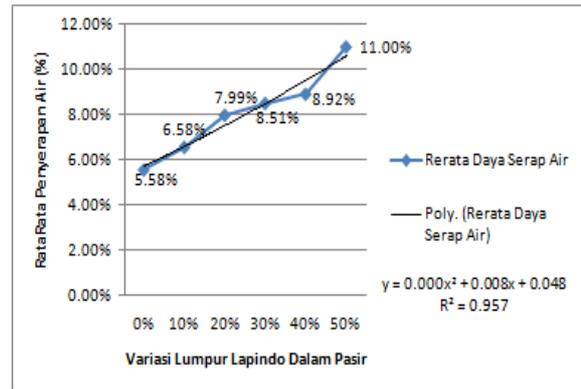


Gambar 5. Grafik Hubungan Rata Rata Penyerapan Air Paving Block dengan Kadar Lumpur Lapindo dalam Campuran Semen
Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 10
Rata Rata Daya Serap Air Paving Block (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Pasir)

Kode Sampel	Variasi	Rata Rata Daya Serap Air Paving Block	Penyerapan Air Rata Rata Maksimal (%) (SNI 03-0691-1996)
LP0	0%	5,58	6
LP1	10%	6,58	6
LP2	20%	7,99	6
LP3	30%	8,51	6
LP4	40%	8,92	6
LP5	50%	11,00	6

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013



Gambar 6. Grafik Hubungan Rata Rata Penyerapan Air Paving Block dengan Kadar Lumpur Lapindo dalam Campuran Pasir
Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Peranan lumpur lapindo sebagai substitusi sebagian semen, mempengaruhi daya serap air pada paving block. Kandungan CaO yang cukup besar pada semen berkurang seiringnya dengan bertambahnya jumlah lumpur lapindo dalam campuran paving block. Kandungan CaO yang diketahui dapat bermanfaat sebagai bahan pengikat berkurang, sedangkan kandungan SiO₂ sebagai bahan pengisi semakin banyak sehingga daya pengikatan menjadi berkurang, dan membuat pasir tidak terikat dengan sempurna.

Peranan lumpur lapindo sebagai substitusi sebagian pasir, mempengaruhi daya serap air pada paving block. Fungsi lumpur lapindo sebagai bahan pengisi (*filler*) kurang baik karena kadar lumpur terlalu banyak. Berdasarkan analisis pendahuluan, kadar air lumpur Lapindo cukup tinggi, yaitu 43,34%. Oleh sebab itu, ketika proses hidrasi semen terjadi, rongga udara yang terbentuk semakin banyak karena air yang menguap akan lebih besar. Rongga rongga udara inilah yang akan meningkatkan daya serap air pada paving block.

Menurut Murdock(1991), beton dan paving block mempunyai kecenderungan berisi rongga akibat adanya gelembung gelembung udara yang terbentuk selama atau sesudah pencetakan. Air ini menggunakan ruangan, dan bila kemudian kering, akan meninggalkan rongga rongga udara. Hal lainnya adalah terdapat pengurangan volume absolute dari semen dan air setelah reaksi kimia dan terjadi pengeringan sedemikian rupa sehingga pasta semen yang sudah kering akan menempati volume yang lebih kecil dibanding dengan pasta yang masih basah, berapapun perbandingan air semen yang digunakan.

Besar kecilnya daya serap air lebih dipengaruhi oleh besarnya kandungan SiO₂, tetapi juga didukung oleh peranan kandungan

CaO dalam menjaga keterikatan antara material dalam bata beton (paving block). (Wiryasa, 2009)

Menurut Juniawan (2012), lumpur Lapindo memiliki nilai porositas yang hampir sama dengan nilai porositas tanah yang biasanya berkisar antara 30- 60%. Dalam lumpur Lapindo dapat disimpulkan bahwa kemampuan lumpur Lapindo dalam mengikat air cukup besar yang dikarenakan persentase ruang pori dalam Lapindo sangat tinggi, sehingga memudahkan molekul-molekul air untuk terikat di dalamnya.

D. Uji Perlindungan

Perendaman paving block dilakukan setelah 28 hari pembuatan paving block, selama 28 hari perendaman, dan dilakukan pengambilan sampel pada hari ke-1, 7, 14, 21, dan 28.

Tabel 11
Hasil Pengujian Konsentrasi Pb (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Kode	Variasi	Rata – Rata Konsentrasi Pb (ppm)				
		Hari Perendaman				
		1	7	14	21	28
LS0	0%	Tidak dilakukan pengujian				
LS1	10%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS2	20%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS3	30%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS4	40%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS5	50%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Tabel 12
Hasil Pengujian Konsentrasi Cu (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Semen)

Kode	Variasi	Rata – Rata Konsentrasi Pb (ppm)				
		Hari Perendaman				
		1	7	14	21	28
LS0	0%	Tidak dilakukan pengujian				
LS1	10%	0,004	0,003	0,003	0	0
LS2	20%	0,007	0	0	0	0
LS3	30%	0,009	0	0	0	0
LS4	40%	0,020	0,002	0,002	0,004	0
LS5	50%	0,027	0,002	0,002	0,009	0

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Tabel 13
Hasil Pengujian Konsentrasi Pb (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Pasir)

Kode	Variasi	Rata – Rata Konsentrasi Pb (ppm)				
		Hari Perendaman				
		1	7	14	21	28
LS0	0%	Tidak dilakukan pengujian				
LS1	10%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS2	20%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS3	30%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS4	40%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03
LS5	50%	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Tabel 14
Hasil Pengujian Konsentrasi Cu (Variasi Lumpur Lapindo Dalam Pasir)

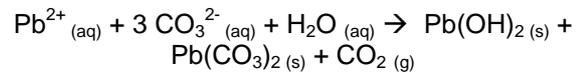
Kode	Variasi	Rata – Rata Konsentrasi Pb (ppm)				
		Hari Perendaman				
		1	7	14	21	28
LS0	0%	Tidak dilakukan pengujian				
LS1	10%	0	0	0	0	0
LS2	20%	0	0	0	0	0
LS3	30%	0	0	0	0	0
LS4	40%	0	0	0	0	0
LS5	50%	0,007	0,005	0	0	0

Sumber: Analisis Laboratorium, 2013

Konsentrasi Pb dan Cu dalam lumpur lapindo sebesar 35,41ppm dan 21,9 ppm. Setelah dilakukan proses solidifikasi dengan menjadikannya sebagai paving block, dapat diketahui bahwa konsentrasi Pb dan Cu mengalami penurunan yang sangat signifikan. Kecilnya konsentrasi Pb dan Cu setelah dilakukan proses solidifikasi disebabkan karena kontaminan dikunci atau dijebak dalam padatan yang terbentuk oleh proses solidifikasi. Kontaminan tidak dapat berinteraksi langsung dengan kontaminan lain, dan hanya dapat berinteraksi dengan reagen solidifikasi. (Pranjoto, 2007)

Menurut LaGrega, et al. (1994), stabilisasi dengan semen merupakan yang paling cocok untuk limbah anorganik, terutama logam berat. Logam berat seperti Pb, Cu, Zn, dan Cd akan ditahan dan terikat oleh bentuk terlarut dari hidroksida dan garam karbonat yang terbentuk dari hasil hidrasi semen, sehingga dapat membatasi/ menghambat pergerakan senyawa B3 dan membentuk struktur yang kuat dan keras.

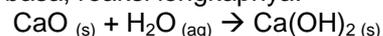
Logam Pb ketika bereaksi dengan karbonat dalam semen akan membentuk endapan putih campuran timbale karbonat dan timbale hidroksida. Dengan reaksi sebagai berikut:



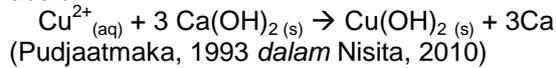
(Moerdwiyono, 1998 dalam Anastasia, 2010)

Bahan pengikat dalam proses stabilisasi/solidifikasi berupa semen, logam akan dihentikan atau dibatasi kelarutannya dalam bentuk garam karbonat atau hidroksida. Dari reaksi di atas, diketahui logam Pb membentuk garam karbonat $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2$ dan hidroksida $\text{Pb}(\text{OH})_2$. Senyawa tersebut dibatasi dalam struktur keras yang dibentuk semen dan pasir sehingga tidak larut dalam air rendaman.

Semen Portland Tipe I mengandung kapur (CaO) sebesar 64%. Apabila bercampur dengan air, maka akan terjadi reaksi dan menghasilkan gugus hidroksil CaOH_2 yang bersifat basa, reaksi lengkapnya:



Dalam air dan tanah, bentuk logam Cu umumnya adalah Cu^{2+} . Reaksi kimia yang terjadi terhadap logam Cu dalam limbah jika bereaksi dengan hidroksida Ca dalam pasta semen adalah tembaga (cuprum) akan membentuk hidroksida $Cu(OH)_2$. Reaksinya adalah:



E. Analisis Biaya

Tabel 15
Harga Satuan Bahan Paving Block

Material	Satuan	Harga Satuan
Pasir	Kg	Rp 142,86
Semen	Kg	Rp 1.200,00
Lumpur Lapindo	Kg	Rp 185,56

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 16
Variasi Penambahan Lumpur Lapindo Dalam Semen

Variasi Lumpur Lapindo	Berat Semen kg	Berat Lumpur Lapindo kg	Berat Pasir kg	Total Lumpur dan Semen kg
0%	0,8	0	2,4	0,8
10%	0,72	0,08	2,4	0,8
20%	0,64	0,16	2,4	0,8
30%	0,56	0,24	2,4	0,8
40%	0,48	0,32	2,4	0,8
50%	0,40	0,40	2,4	0,8

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 17
Perbandingan Variasi Lumpur Lapindo dan Biaya Pembuatan Paving Block

No.	Variasi Lumpur Lapindo (%)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block
1.	0 %	Rp 1.302,86
2.	10 %	Rp 1.221,71
3.	20 %	Rp 1.140,55
4.	30 %	Rp 1.059,40
5.	40 %	Rp 978,24
6.	50 %	Rp 897,09

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 18
Variasi Penambahan Lumpur Lapindo Dalam Pasir

Variasi Lumpur Lapindo dalam Pasir	Berat Semen (kg)	Berat Lumpur Lapindo (kg)	Berat Pasir (kg)	Total Lumpur dan Semen (kg)
0%	0,8	0	2,4	2,4
10%	0,8	0,24	2,16	2,4
20%	0,8	0,48	1,92	2,4
30%	0,8	0,72	1,68	2,4
40%	0,8	0,96	1,44	2,4
50%	0,8	1,2	1,2	2,4

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013
Tabel 19

Perbandingan Variasi Lumpur Lapindo dan Biaya Pembuatan Paving Block

No.	Variasi Lumpur Lapindo (%)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block
1.	0 %	Rp 1.320,86
2.	10 %	Rp 1.313,11
3.	20 %	Rp 1.323,36
4.	30 %	Rp 1.333,61
5.	40 %	Rp 1.343,86
6.	50 %	Rp 1.354,10

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Berdasarkan Tabel 17 dapat dilihat pengaruh dari penggantian semen dengan lumpur Lapindo dalam pembuatan paving block. Biaya produksi mengalami penurunan seiring dengan penambahan kadar lumpur Lapindo. Hal ini disebabkan biaya pembelian semen yang cukup tinggi tergantikan sebagian oleh biaya pembelian lumpur Lapindo yang lebih murah. Dapat disimpulkan penggunaan lumpur Lapindo dalam campuran paving block relative lebih ekonomis dibandingkan tanpa penambahan lumpur.

Berdasarkan tabel 19 dapat dilihat pengaruh penambahan lumpur Lapindo dalam substitusi sebagian pasir. Dalam tabel terlihat kecenderungan biaya pembuatan paving block yang meningkat seiring dengan makin bertambahnya jumlah lumpur Lapindo dalam substitusi sebagian berat pasir. Hal ini terjadi karena harga pembelian lumpur Lapindo lebih mahal daripada harga pembelian pasir. Melihat keadaan ini, tidak direkomendasikan untuk menggunakan lumpur Lapindo sebagai substitusi pasir, bila dilihat dari sisi biaya produksi, dikarenakan akan membuat harga paving block menjadi lebih mahal daripada paving block tanpa penambahan lumpur.

F. Perbandingan Biaya Pembuatan Paving Block di Semarang dan Sidoarjo

Tabel 20
Harga Satuan Bahan Paving Block di Kabupaten Sidoarjo

Material	Satuan	Harga Satuan
Pasir	Kg	Rp 63,03
Semen	Kg	Rp 1.290,00
Lumpur Lapindo	Kg	Rp 34,24

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 21
Perbandingan Biaya Pembuatan Paving Block di Kota Semarang dengan Kabupaten Sidoarjo (Variasi Lumpur Substitusi Semen)

No.	Variasi Lumpur Lapindo (%)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kota Semarang)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kab. Sidoarjo)
1.	0 %	Rp 1.302,86	Rp 1.183,27

No.	Variasi Lumpur Lapindo (%)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kota Semarang)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kab. Sidoarjo)
2.	10 %	Rp 1.221,71	Rp 1.083,29
3.	20 %	Rp 1.140,55	Rp 983,31
4.	30 %	Rp 1.059,40	Rp 883,32
5.	40 %	Rp 978,24	Rp 783,34
6.	50 %	Rp 897,09	Rp 683,36

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 22

Perbandingan Biaya Pembuatan Paving Block di Kota Semarang dengan Kabupaten Sidoarjo (Variasi Lumpur Substitusi Pasir)

No.	Variasi Lumpur Lapindo (%)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kota Semarang)	Biaya Pembuatan 1 Buah Paving Block (Kab. Sidoarjo)
1.	0 %	Rp 1.320,86	Rp 1.183,27
2.	10 %	Rp 1.313,11	Rp 1.177,80
3.	20 %	Rp 1.323,36	Rp 1.172,32
4.	30 %	Rp 1.333,61	Rp 1.166,84
5.	40 %	Rp 1.343,86	Rp 1.161,36
6.	50 %	Rp 1.354,10	Rp 1.155,89

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Dapat dilihat pada tabel 21 dan 22, ternyata harga pembuatan paving block di Semarang lebih mahal bila dibandingkan dengan pembuatan paving block di Kabupaten Sidoarjo. Hal ini terjadi karena harga pasir di Semarang lebih mahal daripada harga pasir di Sidoarjo. Walaupun harga pasir di Semarang lebih mahal, namun harga semen di Sidoarjo lebih mahal daripada harga semen di Semarang. Harga lumpur lapindo di Kota Semarang jauh lebih tinggi daripada harga lumpur lapindo di Kabupaten Sidoarjo. Selain biaya transportasi tidak terlalu tinggi, waktu pengangkutan lumpur lapindo ke tempat pembuatan paving block pun memakan waktu yang sedikit.

G. Matriks Perbandingan Mutu Paving Block

Setelah dilakukan pengujian kualitas, dan analisis biaya, maka perlu dilakukan perbandingan mutu antara *paving block* tanpa campuran lumpur lapindo dengan lumpur lapindo dengan campuran lumpur lapindo.

Tabel 23

Perbandingan Mutu Paving Block

Variasi Lumpur Lapindo %	Kuat Tekan kg/cm ²	Daya Serap Air %	Perlindungan (ppm)		Biaya Paving Block
			Pb	Cu	
0	307	5,58	-	-	1.302,86

Variasi Lumpur Lapindo %	Kuat Tekan kg/cm ²	Daya Serap Air %	Perlindungan (ppm)		Biaya Paving Block
			Pb	Cu	
10	314	8,72	<0,03	<0,03	1.221,71
20	393	9,52	<0,03	<0,03	1.140,55
30	408	10,17	<0,03	<0,03	1.059,40
40	221	10,54	<0,03	<0,03	978,24
50	162	11,14	<0,03	<0,03	897,09

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Tabel 24

Perbandingan Mutu Paving Block

Variasi Lumpur Lapindo %	Kuat Tekan kg/cm ²	Daya Serap Air %	Perlindungan (ppm)		Biaya Paving Block
			Pb	Cu	
0	307	5,58	-	-	1.320,86
10	279	6,58	<0,03	<0,03	1.313,11
20	309	7,99	<0,03	<0,03	1.323,36
30	358	8,51	<0,03	<0,03	1.333,61
40	239	8,92	<0,03	<0,03	1.343,86
50	200	11,00	<0,03	<0,03	1.354,10

Sumber: Hasil Perhitungan, 2013

Berdasarkan matriks perbandingan mutu, komposisi paling optimal solidifikasi lumpur lapindo sebagai bahan campuran paving block, adalah pada variasi penambahan lumpur lapindo dalam semen sebesar 30%, kuat tekan mengalami peningkatan yang cukup signifikan menjadi 408 kg/cm², dan mengalami peningkatan sebesar 101 kg/cm² (24,75%). Daya serap air juga mengalami peningkatan menjadi 10,17%, dan naik sekitar 4,58 (45,13%). Kandungan logam Pb dan Cu dibawah baku mutu sesuai Kep 03/ Bapedal/ 09/1995 tentang persyaratan teknis pengolahan limbah bahan berbahaya dan beracun. Biaya pembuatan *paving block* mengalami penurunan menjadi Rp 1059,40 atau turun sekitar Rp 243,47 (18,67%) terhadap biaya pembuatan *paving block* tanpa penambahan lumpur lapindo (*paving block* normal).

Kesimpulan

Berdasarkan matriks perbandingan mutu, komposisi paling optimal solidifikasi lumpur lapindo sebagai bahan campuran paving block, adalah pada variasi penambahan lumpur lapindo dalam semen sebesar 30%, kuat tekan mengalami peningkatan yang cukup signifikan menjadi 408 kg/cm², dan mengalami peningkatan sebesar 101 kg/cm² (24,75%). Daya serap air juga mengalami peningkatan menjadi 10,17%, dan naik sekitar 4,58 (45,13%). Kandungan logam Pb dan Cu dibawah baku mutu sesuai Kep 03/ Bapedal/ 09/1995 tentang persyaratan teknis pengolahan limbah bahan berbahaya dan beracun. Biaya pembuatan *paving block* mengalami penurunan

menjadi Rp 1059,40 atau turun sekitar Rp 243,47 (18,67%) terhadap biaya pembuatan *paving block* tanpa penambahan lumpur lapindo (*paving block* normal).

Daftar Pustaka

- Alit, I Made, 2007 : Perbandingan Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton yang Menggunakan Semen Portland Pozzolan dengan yang Menggunakan Semen Portland Tipe I, Bahan Seminar Konstruksi Tahan Gempa di Indonesia, Yogyakarta.
- LaGrega, et. Al. 1994. *Hazardous Waste Management*. USA.: Mc Graw Hill Companies Inc.
- Liu & Liptak. 1997. *Environmental Engineers Handbook*. Second Edition. CRC Press LLC Corporate.
- Juniawan, Alvin, dkk. 2012. *Karakteristik Lumpur Lapindo Dan Fluktuasi Logam Berat Pb dan Cu Pada Sungai Porong dan Aloo*. Universitas Brawijaya: Malang.
- Munir, Misbachul. 2008. *Pemanfaatan Abu Batubara (Fly Ash) Untuk Hollow Block Yang Bermutu dan Aman Bagi Lingkungan*. Tesis Program Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro: Semarang.
- Murdock, L.J dan Brook, J.J. 1991. *Bahan dan Praktek Beton*. Jakarta: Erlangga.
- Nisita, Diah. 2010. *Pemanfaatan Limbah Fly Ash Sisa Pembakaran Batu Bara Dengan Metode Solidifikasi-Stabilisasi Sebagai Bahan Campuran Paving Block Geopolimer (Studi Kasus: PLTU Tanjung Jati B Jepara)*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro: Semarang.
- Pranjoto & Endang. 2007. *Kajian Tentang Proses Solidifikasi/Stabilisasi Logam Berat Dalam Limbah Dengan Semen Portland*. Universitas Negeri Yogyakarta: Yogyakarta.
- Wiryasa, Anom Made, et al. 2009. *Pemanfaatan Lumpur Lapindo Sebagai Bahan Substitusi Semen Dalam Pembuatan Bata Beton Pejal*. Universitas Udayana: Denpasar.
- Widjtmoko, dkk. 1999. *Struktur Beton Semarang*: Badan Penerbit Universitas Semarang: Semarang.
- Widya, Anastasia. 2010. *Stabilisasi – Solidifikasi Bottom Ash Hasil Pembakaran Batu Bara Dari Unit Boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Studi Kasus: PLTU Tanjung Jati B Jepara)*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro: Semarang.