

STUDI PEMANFAATAN PRODUK SOLIDIFIKASI LIMBAH CERAMIC BALL, MOLESIEVE, SAND BLAST & SPENT CLAY SEBAGAI PAVING BLOCK

UTILIZATION STUDY OF SOLIDIFICATION PRODUCT FROM THE WASTE OF : CERAMIC BALL, MOLESIEVE, SAND BLAST & SPENT CLAY AS PAVING BLOCK

*¹Adhitya Wicaksono dan ²Sukandar

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha No. 10 Bandung 40132

e-mail : ¹orano.gaia@gmail.com dan ²kandar@ftsl.itb.ac.id

Abstrak: Proses solidifikasi adalah metode pengolahan limbah B3 yang bertujuan untuk mengurangi kadar toksisitas suatu limbah dengan memperkecil permeabilitas dan meningkatkan kekuatan fisik limbah tersebut. Teknik solidifikasi yang umumnya dilakukan adalah kapsulasi, yaitu teknik penyelimutan limbah dengan bahan pengikat seperti semen untuk mengeraskan limbah secara fisik. Dengan teknik kapsulasi, hasil solidifikasi limbah B3 akan menyerupai beton pada umumnya. Penelitian ini dilakukan untuk melihat potensi pemanfaatan hasil solidifikasi limbah B3 sebagai paving block. Limbah B3 akan dijadikan pengganti agregat halus dan kasar seperti layaknya sebuah campuran beton. Sebagai pengganti agregat halus, limbah molesieve, sand blast dan clay mempunyai karakteristik seperti pasir. Ceramic ball akan menjadi pengganti agregat kasar atau kerikil. Agregat mengisi 40%-70% volume dan memberikan karakteristik serta kekuatan pada beton. Variasi akan dilakukan pada kadar limbah dan semen untuk setiap campuran. Produk solidifikasi dibuat dengan perbandingan antara semen : agregat sebesar 1:3, 1:4 dan 1:5. Campuran beton dicetak dalam cetakan balok berukuran 8x8x6 cm. Benda uji diamati selama 1 bulan dengan objek pengamatan adalah kuat tekan, kadar toksisitas lindi dan durabilitas benda uji. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa kekuatan benda uji akan meningkat seiring meningkatnya kadar semen dan menurun seiring meningkatnya kadar beberapa jenis limbah. Benda uji dengan versi 13V5 mempunyai kuat tekan mencapai 117,2 kg/cm². Benda uji dengan versi 14V6 mempunyai kuat tekan mencapai 129,7 kg/cm². Kedua versi tersebut menjadi campuran terpilih pemanfaatan hasil solidifikasi limbah B3 sebagai paving block dengan mutu D dan C.

Kata kunci: agregat, kapsulasi, paving block, pemanfaatan, solidifikasi

Abstract: Solidification is a method of hazardous waste treatment in decreasing the toxicity by reducing the waste's permeability and strengthens its physical properties. The common solidification technique is encapsulation, which the waste will be covered by somekind of binder material, such as cement. This experiment is used to observe the potential state of reusing solidification product as paving block. The wastes is used to replace fine and coarse aggregates as in a concrete mixture. As the substitute of fine aggregates; molesieve, sand blast and clay have similar physical characteristics as sand. The waste of ceramic ball will be used as the substitute for coarse aggregates. Both aggregates fill 40% - 70% of concrete's volume and take an essential rule for its characteristic and strength. The combination and amount of wastes and cement in every concrete are taken as the experiment variations. The proportions of waste and cement are 1:3, 1:4 and 1:5. The solidification product is block-shaped concrete sized 8 x 8x 6 cm. Every solidification product was observed for a month and the subjects for observation are compressive strength, leachate toxicity and durability. The experiment result showed that product's compressive strength increased by the increase of cement and lowered by the increase of specific kind of waste. The product version of 13V5 has the compressive strength of 117.2 kg/cm². The product version of 14V6 has the compressive strength of 129.7 kg/cm². Both versions have become the chosen proportion for hazardous waste solidification reuse as grade D and C paving block.

Keywords: aggregates, encapsulation, paving block, reuse, solidification

PENDAHULUAN

Limbah B3, sebagaimana disebut dalam PP 18/1999 jo PP 85/1999, adalah sisa suatu usaha dan atau kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan atau beracun yang karena sifat dan atau konsentrasinya dan atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung dapat mencemarkan dan atau merusakkan lingkungan hidup, dan atau dapat membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, kelangsungan hidup manusia serta makhluk lain.

Limbah *ceramic ball*, *molesieve*, *sand blast* dan *spent clay* merupakan contoh limbah B3 yang ditimbulkan oleh industri migas. Menurut Tabel 2 PP 18/1999 jo PP 85/1999, limbah yang berasal dari perusahaan migas, terutama industri *refinery* (pemurnian) termasuk di dalam kategori limbah B3 dengan kode D220 dan D221.

Pengolahan limbah B3 harus dilakukan dengan hati-hati, mengingat sifatnya yang berbahaya dan beracun. Proses pengolahannya pun harus sesuai dengan baku mutu yang sudah ditetapkan oleh pemerintah melalui peraturan yang berlaku. Meski demikian, hal tersebut tidak menutup kemungkinan adanya potensi pemanfaatan kembali limbah B3 yang sudah dibuktikan keamanannya baik dari sisi teknis maupun kesehatan.

Proses solidifikasi adalah salah satu metode pengolahan limbah B3 yang banyak dilakukan dengan tujuan untuk mengubah limbah yang berbahaya menjadi tidak berbahaya karena permaebilitasnya berkurang dan kekuatan fisiknya meningkat sehingga mudah diangkut dan ditimbun (Silitonga, 2008). Metode ini dilatar belakangi oleh kenyataan bahwa kebanyakan bahan berbahaya dan beracun tingkat bahaya yang paling tinggi bila berbentuk gas dan paling rendah bila berbentuk padat (Connor, 1990). Teknik solidifikasi yang banyak dilakukan adalah kapsulasi. Kapsulasi adalah teknik penyelimutan limbah dengan bahan pengikat yang mengeras di bagian luar seperti semen, kapur dan senyawa silikat yang dapat mengikat dan mengeras secara fisik limbah tersebut. Setelah melalui tahap solidifikasi, biasanya limbah B3 yang sudah memenuhi baku mutu akan ditimbun dalam lahan urug (*landfill*) yang khusus menerima limbah B3.

Hal ini cukup disayangkan sebab pada dasarnya limbah seperti *ceramic ball*, *molesieve*, *sand blast* dan *spent clay* berpotensi untuk digunakan kembali oleh karena karakteristik fisik dan kimianya. Limbah *ceramic ball* mempunyai kekuatan fisik yang tinggi. Limbah *sand blast* dan *clay* memiliki kandungan senyawa silika dan oksida logam yang cukup tinggi. Produk hasil solidifikasi dari jenis limbah tersebut dapat digunakan sebagai batu bata, *paving block* dan banyak kegunaan lainnya.

METODOLOGI

Kegiatan pendahuluan yang dilakukan sebelum memulai penelitian ini adalah studi literatur. Dalam penelitian ini digunakan 2 jenis data yaitu data sekunder dan data primer. Data sekunder didapat dari data-data hasil penelitian dan analisis dari organisasi terkait dan penelitian sebelumnya. Data primer yang didapat pada penelitian ini merupakan hasil analisis laboratorium dan pelaksanaan solidifikasi.

Perencanaan solidifikasi

Campuran direncanakan terdiri dari 15 variasi dalam 3 macam perbandingan semen : agregat. Menurut Widiasih (2010), perbandingan antara *binder* dan agregat yang baik adalah 1:1 – 1:7. Perencanaan campuran dilakukan untuk menemukan komposisi yang tepat antara semen sebagai *binder* dan limbah sebagai agregat. Selain kualitas, hal yang diperhatikan dalam perencanaan adalah faktor ekonomi dan potensi habisnya limbah tersebut dengan menggunakan perbandingan campuran tersebut. Variasi komposisi dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Variasi komposisi solidifikasi

Variasi	Semen (%)	Agregat halus (%)			Agregat kasar (%)	Jumlah benda uji			Jumlah total
		Clay	Sand blast	Mole-sieve	Ceramic ball	Kuat tekan	Durabilitas	Absorpsi	
13V1	25	15	30	25	5	8	2	2	12
13V2	25	20	25	20	10	8	2	2	12
13V3	25	22,5	22,5	15	15	8	2	2	12
13V4	25	25	20	10	20	8	2	2	12
13V5	25	30	15	5	25	8	2	2	12
14V1	20	30	30	15	5	8	2	2	12
14V2	20	25	35	10	10	8	2	2	12
14V3	20	20	40	5	15	8	2	2	12
14V4	20	15	45	15	5	8	2	2	12
14V5	20	10	50	10	10	8	2	2	12
14V6	20	5	55	5	15	8	2	2	12
15V1	16,7	25	25	16,7	16,7	8	2	2	12
15V2	16,7	30	20	16,7	16,7	8	2	2	12
15V3	16,7	35	15	16,7	16,7	8	2	2	12
15V4	16,7	40	10	16,7	16,7	8	2	2	12

Kesejuruhan berat semen dan limbah ditentukan berdasarkan berat beton segar bernilai 2400 kg/m³ (Sugiri, 2005). Sehingga didapatkan berat masing-masing komposisi yang dibutuhkan dalam tiap variasi untuk tiap benda uji. Benda uji kemudian dicetak dalam cetakan berbentuk balok berbentuk 8 x 8 x 6 cm. Masing-masing variasi dicetak sebanyak 12 buah. 8 dari 12 buah akan digunakan untuk pengujian kuat tekan mortar pada hari ke-2, hari ke-7, hari ke-14 dan hari ke-28, 2 buah untuk uji durabilitas dan 2 buah untuk uji absorpsi. Untuk uji TCLP dilakukan dengan menggunakan pecahan dari benda uji kuat tekan pada hari ke-28.

Analisis laboratorium

Analisis laboratorium dilakukan baik pada limbah maupun pada benda uji hasil solidifikasi. Analisis karakteristik limbah meliputi parameter fisik dan kimia. Hal ini dilakukan untuk menentukan karakteristik limbah serta melihat potensi pemakaian limbah pada campuran beton. Analisis laboratorium pada produk hasil solidifikasi meliputi parameter fisik dan kimia. Hal ini bertujuan untuk menguji keamanan serta ketahanan benda uji sesuai dengan baku mutu yang ada.

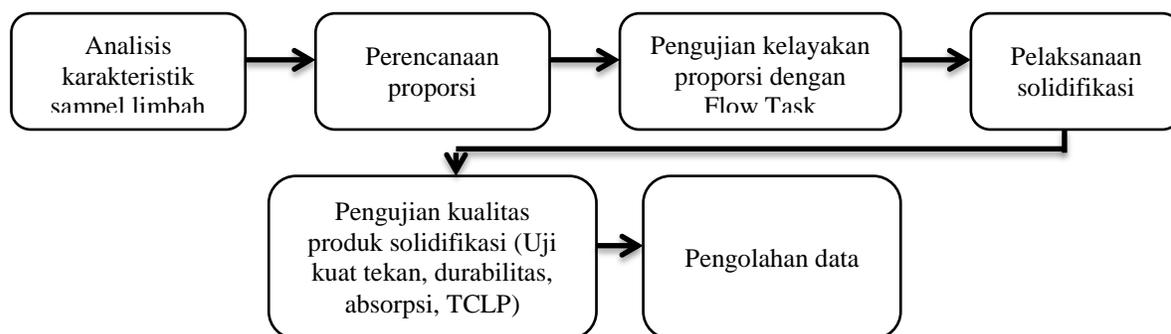
Pengukuran karakteristik limbah secara keseluruhan meliputi 9 parameter. Parameter kimia yang diukur meliputi kandungan logam berat dan oksida logam serta kualitas lindi. Kandungan logam berat pada limbah diuji berdasarkan Kep-04/Bapedal/09/1995 terhadap 14 jenis logam. Kandungan oksida logam diukur dengan tujuan untuk menilai potensi limbah sebagai material solidifikasi. Kualitas lindi diukur dengan metode TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), uji didasarkan atas Keputusan Kepala Bapedal Kep-03/Bapedal/09/1995. Pengujian kualitas lindi dapat menunjukkan seberapa besar potensi senyawa logam yang terlindikan.

Semua pengukuran parameter fisik pada limbah mengacu pada standar yang ditetapkan oleh ASTM. Pengukuran ini dimaksudkan untuk menguji kualitas limbah sebagai material solidifikasi. Parameter fisik yang diuji meliputi kadar air, kadar kering, analisis ayakan, berat gembur, berat padat dan *specific gravity*. Kadar air dan kadar kering diukur berdasarkan ASTM D2216-98, bertujuan untuk melihat kebutuhan atas pengolahan awal. Analisis ayakan dilakukan untuk melihat persebaran ukuran partikel yang didasarkan atas ASTM C136-95a. Pengujian berat gembur dan berat padat serta *specific gravity* dilakukan untuk mendapatkan berat jenis limbah. Pengukuran berat gembur dan berat padat dilakukan berdasarkan ASTM C29-91a. Pengukuran *specific gravity* dilakukan berdasarkan ASTM C128-93.

Setelah benda uji selesai dicetak, pengujian kualitas harus dilakukan untuk menentukan mutu benda uji tersebut. Pengujian terhadap produk solidifikasi meliputi uji kuat tekan, uji durabilitas, uji absorpsi dan uji TCLP. Uji kuat tekan bertujuan untuk mengetahui secara umum gambaran kualitas beton yang telah jadi berdasarkan ASTM C39-94. Uji durabilitas digunakan untuk mengetahui kekuatan produk terhadap perubahan cuaca berdasarkan ASTM D4843-99. Uji absorpsi adalah pengujian terhadap kemampuan penyerapan air produk solidifikasi berdasarkan SNI 03-0691-1996. Pengujian TCLP terhadap produk solidifikasi bertujuan untuk mengetahui potensi senyawa berbahaya, seperti logam berat, yang dapat terlindikan.

Pengolahan data

Secara umum bagan alir penelitian ini adalah seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**. Analisa karakteristik sampel merupakan bagian awal dan terpenting untuk menentukan langkah selanjutnya terutama perencanaan proporsi limbah untuk campuran beton.



Gambar 1 Bagan alir penelitian

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan setelah pengujian kualitas terhadap produk solidifikasi telah dilaksanakan. Diharapkan hasil dari pengolahan data akan menjadi membuktikan bahwa hasil produk solidifikasi dari limbah B3 yaitu *ceramic ball*, *molesieve*, *spent clay* dan pasir ex. *sand blast* dapat dimanfaatkan sebagai bahan bangunan utamanya *paving block*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis karakteristik kimia limbah

Analisis karakteristik limbah meliputi aspek fisik dan kimia. Analisis parameter kimia pada limbah meliputi logam berat, oksida logam dan pH. Analisis logam berat dilakukan pada 13 parameter logam menurut Keputusan Bapedal Kep-04/Bapedal/09/1995. Hasil pemeriksaan kandungan logam berat pada limbah dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Analisis kandungan logam berat limbah

No	Parameter	Metode	Konsentrasi (mg/kg berat kering)				Kadar maksimum*)	
			Clay	Ceramic ball	Sand blast	Mole sieve	Kolom A	Kolom B
1	Arsen (As)	AAS	1,36	1,09	0,79	0,79	300	30
2	Barium (Ba)	AAS	267,46	184,48	195,29	236,78	N/A	N/A
3	Cadmium (Cd)	AAS	3,53	4,35	9,96	10,51	50	5
4	Chromium (Cr)	AAS	4,62	6,53	3,93	16,29	2500	250
5	Copper (Cu)	AAS	8,42	51,97	17,83	12,88	1000	100
6	Cobalt (Co)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	500	50
7	Lead (Pb)	AAS	11,68	2,45	3,15	2,37	3000	300
8	Mercury (Hg)	AAS	0,005	0,005	0,005	0,005	20	2
9	Molybdenum (Mo)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	400	40
10	Nickel (Ni)	AAS	5,43	52,51	25,95	<0,001	1000	100
11	Tin (Sn)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	500	50
12	Selenium (Se)	AAS	1,09	1,9	1,83	2,1	100	10
13	Silver (Ag)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	N/A	N/A
14	Zinc (Zn)	AAS	78,47	112,1	7572,61	84,62	5000	500
15	Cianida (CN)	AAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Fluorida (F)	AAS	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

*)Kep 04/Bapedal/09/1995

Limbah pasir ex. *sand blast* dan *molesieve* memiliki kadar kadmium (Cd) yang lebih tinggi dari kolom B yaitu sebesar 9,96 mg/kg dan 10,51 mg/kg. Limbah pasir ex. *sand blast* juga memiliki kadar Zn yang melebihi kadar maksimum kolom A yaitu 7572,61 mg/kg. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa apabila keempat limbah tersebut akan ditimbun di dalam sebuah lahan urug, maka limbah pasir ex. *sand blast* harus ditimbun pada lahan urug kategori 1, *molesieve* pada lahan urug kategori 2 sedangkan *clay* dan *ceramic ball* dapat ditimbun pada lahan urug kategori 3.

Analisis oksida logam pada limbah bertujuan untuk penentuan bahan pencampur pembuatan beton, baik pengganti semen maupun agregat. Menurut ASTM C-618, kekuatan beton dipengaruhi oleh keberadaan oksida logam SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ karena mengandung unsur silikat dan aluminat yang mempunyai kecenderungan sifat pozzolan yang dapat mengikat agregat, sehingga dapat memperbesar ikatan terhadap mortar (Widiasih, 2010). Pemeriksaan LOI dilakukan untuk melihat kehadiran karbon di dalam limbah tersebut. LOI digunakan sebagai metode untuk mengukur kandungan organik dan karbonat inorganik di dalam tanah atau sedimen ada suhu 350-440^oC (Schumacher, 2002). Hasil pengukuran terhadap kandungan oksida logam dan kadar LOI dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Analisa oksida logam pada limbah

No	Parameter	Satuan	Hasil Analisis				Kriteria ASTM C-618	
			Clay	Ceramic ball	Sand blast	Molesieve	Kelas C (%)	Kelas F (%)
1	SiO ₂	% BK	50	58,41	69,67	57,49	N/A	N/A
2	Al ₂ O ₃	% BK	22,45	17,89	11,46	18,76	N/A	N/A
3	Fe ₂ O ₃	% BK	6,06	6,17	4,05	3,23	N/A	N/A
Total SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃			78,51	82,47	85,18	79,48	>50	>70
4	K ₂ O	% BK	0,23	0,34	0,19	0,09	1,5	1,5
5	Na ₂ O	% BK	0,33	0,41	0,25	0,13		
6	CaO	% BK	1,01	1,49	2,12	1,56	N/A	N/A
7	MgO	% BK	0,58	0,78	1,55	0,87	5	5
8	TiO ₂	% BK	0,17	0,18	0,05	0,09	N/A	N/A
9	P ₂ O ₅	% BK	0,06	0,06	0,06	0,06	N/A	N/A
10	LOI	% BK	18,11	14,23	10,56	17,1	6	6

Berdasarkan **Tabel 3** diketahui bahwa kandungan SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ pada keempat limbah lebih besar dari 70%. Mengacu pada ASTM C-618 nilai kandungan ketiga senyawa oksida logam dari semua limbah memenuhi syarat sebagai pozzolan kelas F dan berpotensi sebagai pengganti semen. Kandungan oksida alkali seperti MgO, K₂O dan Na₂O dapat bereaksi dengan silika pada agregat sehingga dapat mengakibatkan diintergrasi beton dan mempengaruhi kekuatan beton (Widiasih, 2010). Kandungan oksida alkali pada limbah tidak melebihi standar yang ditetapkan oleh ASTM.

Kandungan LOI pada keempat limbah berada jauh diatas persyaratan yang ditetapkan oleh ASTM yaitu 6% Berat Kering. Kandungan karbon yang tinggi tidak diinginkan dalam sebuah campuran beton. Kehadiran karbon di dalam beton dianggap akan mengganggu reaksi hidrasi serta mengurangi kelecakan serta meningkatkan kebutuhan air yang digunakan dalam campuran beton (Atici dan Ersoy, 2008).

Analisis TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Process*) adalah sebuah metode untuk mengukur kandungan senyawa yang dapat terlindikan dari suatu limbah. Hasil pengukuran konsentrasi senyawa dalam larutan lindi dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Analisis TCLP

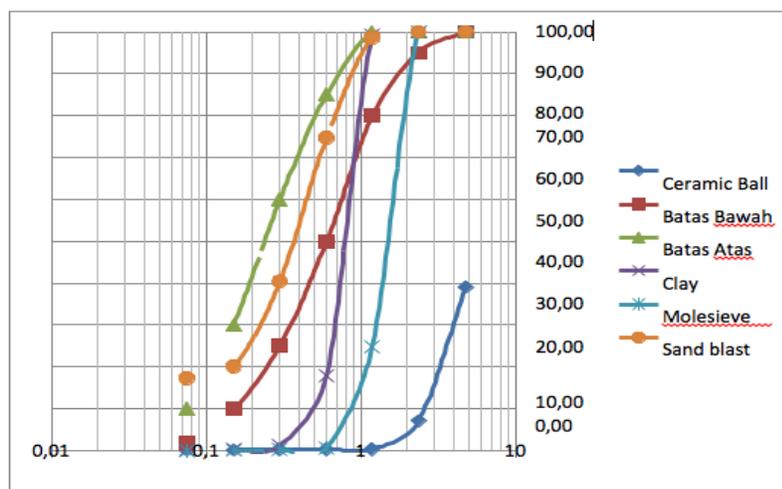
No	Parameter	Metode	Konsentrasi (mg/kg berat kering)				Baku Mutu	
			Clay	Ceramic ball	Sand blast	Mole-sieve	PP 18/99 jo PP 85/99	USEPA
1	Arsen (As)	AAS	0,004	0,017	0,002	0,017	5	5
2	Barium (Ba)	AAS	0,899	0,664	4,144	0,587	100	100
3	Boron (B)	AAS	0,575	0,491	0,631	0,263	500	N/A
4	Cadmium (Cd)	AAS	<0,001	<0,001	0,041	<0,001	1	1
5	Chromium (Cr)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	5	5
6	Copper (Cu)	AAS	0,031	0,042	0,041	0,041	10	N/A
7	Lead (Pb)	AAS	<0,001	<0,001	6,312	0,113	5	5
8	Mercury (Hg)	AAS	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,2	0,2

No	Parameter	Metode	Konsentrasi (mg/kg berat kering)				Baku Mutu	
			Clay	Ceramic ball	Sand blast	Mole-sieve	PP 18/99 jo PP 85/99	USEPA
9	Selenium (Se)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1	1
10	Silver (Ag)	AAS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	5	5
11	Zinc (Zn)	AAS	0,079	0,866	1,133	0,094	50	N/A

Pada umumnya kandungan logam berat dalam larutan ekstraksi TCLP keempat limbah berada pada nilai baku mutu. Kandungan logam berat Pb dalam senyawa ekstraksi TCLP pasir ex. *sand blast* berada diatas baku mutu, yaitu pada angka 6,312 mg/L. Dari pengukuran ini dapat dikatakan bahwa lindi yang terbentuk dari keempat limbah masih di dalam batas aman.

Analisis karakteristik fisik limbah

Pengujian karakteristik fisik pada limbah meliputi analisis saringan, modulus kehalusan, dan *specific gravity*. Analisis saringan merupakan sebuah proses analisis untuk membagi sampel agregat ke dalam fraksi dengan ukuran partikel yang sama dengan tujuan untuuk menentukan gradasi dan distribusi ukuran agregat tersebut. Modulus kehalusan adalah jumlah persen kumulatif yang tertahan pada saringan seri standar dibagi 100. Secara umum hasil analisis saringan pada keempat limbah dapat digambarkan dalam grafik seperti pada **Gambar 2** berikut ini.



Gambar 2 Analisis saringan

Batas atas dan bawah pada **Gambar 2** adalah batas persen lolos kumulatif yang ditetapkan oleh ASTM C33-90 untuk agregat halus pada rentang ukuran saringan No.4-No.200. Modulus kehalusan *ceramic ball*, *molesieve*, *clay* dan *sand blast* berturut-turut adalah 9,55, 6,74, 5,81 dan 4,44.

Dari **Gambar 2** dapat diketahui bahwa dari keempat limbah, *ceramic ball* tidak masuk ke dalam rentang batas yang ditentukan sebagai agregat halus. Meski demikian dengan menggunakan peraturan yang ada pada ASTM *ceramic ball* memenuhi syarat sebagai agregat kasar. Dengan hasil analisis tersebut *ceramic ball* dijadikan sebagai pengganti agregat kasar pada campuran solidifikasi.

Analisis *specific gravity* untuk menentukan potensi besarnya komposisi volume agregat di dalam adukan beton. Dengan menghitung berat jenis maka akan didapat perkiraan berat produk solidifikasi yang dihasilkan. Hasil analisis *specific gravity* dapat dilihat pada **Tabel 5** dibawah ini.

Tabel 5. Analisis *specific gravity*

No	Parameter	Satuan	Nilai			
			Clay	Sand blast	Molesieve	Ceramic ball
1	Apparent specific gravity	-	2,21	2,68	2,14	2,44
2	Bulk specific gravity (kering)	-	1,41	2,44	1,34	2,33
3	Bulk specific gravity (SSD)	-	1,775	2,532	1,716	2,377
4	Persentase absorpsi air	%	25,52	3,63	27,85	2,01

Pelaksanaan solidifikasi

Pelaksanaan solidifikasi didasarkan pada perbandingan *binder* : agregat yaitu 1:3, 1:4 dan 1:5. Pada setiap variasi akan dilihat limbah apa saja yang memberikan kontribusi terhadap kekuatan beton. Selain faktor ekonomis dan teknis, hal lain yang turut menjadi pertimbangan dalam perencanaan campuran adalah potensi habisnya suatu jenis limbah apabila digunakan di dalam campuran beton. Faktor Air Semen pada **Tabel 6** menunjukkan kebutuhan air pada campuran beton. FAS didapatkan dari pengukuran *Flow Test* yang digunakan untuk memperhitungkan kelayakan dari suatu campuran beton. Angka FAS yang didapat dengan menggunakan *Flow Test* pada setiap perbandingan *binder* : agregat umumnya sama, oleh karena itu kebutuhan air yang digunakan dipakai diambil rata-ratanya. Komposisi campuran beton dapat dilihat pada **Tabel 6** berikut ini.

Tabel 6. Komposisi campuran

Kode Variasi	Rasio Binder	Agregat Halus (%)			Agregat Kasar (%)	FAS
	Semen	Clay	Sand blast	Molesieve	Ceramic ball	
14V1	20	30	30	15	5	0,9
14V2	20	25	35	10	10	
14V3	20	20	40	5	15	
14V4	20	15	45	15	5	
14V5	20	10	50	10	10	
14V6	20	5	55	5	15	
13V1	25	15	30	25	5	0,88
13V2	25	20	25	20	10	
13V3	25	22,5	22,5	15	15	
13V4	25	25	20	10	20	
13V5	25	30	15	5	25	
15V1	16,67	25	25	16,665	16,665	1,28
15V2	16,67	30	20	16,665	16,665	
15V3	16,67	35	15	16,665	16,665	
15V4	16,67	40	10	16,665	16,665	

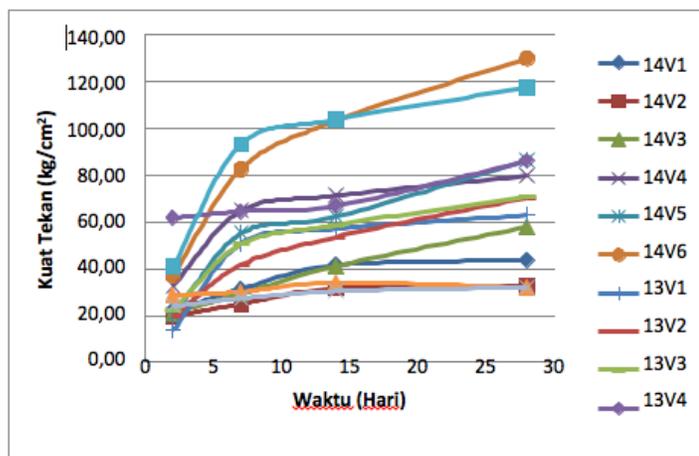
Rasio FAS yang ideal bagi beton adalah 0,25 - 0,65 (Mulyono, 2003 dalam Widiasih, 2010). Pada **Tabel 6**, terlihat bahwa rasio FAS berkisar antara 0,9 - 1,28, hal ini dapat dikarenakan tingginya kadar karbon di dalam limbah seperti yang ditunjukkan pada nilai LOI dan tingginya nilai absorpsi pada *clay* dan *molesieve*.

Pengujian produk solidifikasi

Pengujian produk solidifikasi awal yaitu uji kuat tekan. Uji kuat tekan menjadi sangat penting sebab uji kuat tekan menjadi awal penentuan kelayakan teknis sebuah beton untuk digunakan. Pemanfaatan hasil solidifikasi sebagai *paving block* mempunyai baku mutu kuat tekan yang mengikuti SNI 03-0691-1996. Dalam **Tabel 7** di bawah ditampilkan hasil pengukuran uji kuat tekan pada benda uji selama 28 hari. Pengamatan selama 28 hari didasarkan pada proses hidrasi semen yang terjadi pada campuran beton. Proses hidrasi pada semen dapat dikatakan berlangsung sempurna pada umur 28 hari atau 1 bulan. Notasi N/A (*Not Available*) menyatakan variasi yang hancur pada saat cetakan dibuka. Produk solidifikasi dengan kode 15V3 dan 15V4 tidak mempunyai ikatan yang cukup kuat sehingga benda uji hancur ketika dikeluarkan dari cetakan. Dari hasil pengukuran uji kuat tekan yang tertera pada **Tabel 7**, maka grafik pertumbuhan kekuatan pada beton dapat digambarkan pada **Gambar 3** berikut dibawah ini.

Tabel 7 Analisis kuat tekan benda uji

Versi	Kuat tekan (kg/cm ²)			
	2	7	14	28
14V1	22,03	31,33	41,41	43,75
14V2	19,61	25,00	31,64	32,81
14V3	21,02	29,22	41,02	57,81
14V4	32,58	64,84	71,09	79,69
14V5	20,16	55,08	62,11	85,97
14V6	36,88	82,42	103,13	129,69
13V1	13,59	50,78	57,03	62,81
13V2	19,45	41,61	53,52	70,31
13V3	22,19	50,39	58,59	70,94
13V4	61,53	64,45	66,80	85,94
13V5	41,09	92,97	103,52	117,19
15V1	28,67	30,08	33,98	32,03
15V2	23,91	27,34	30,47	32,03
15V3	N/A	N/A	N/A	N/A
15V4	N/A	N/A	N/A	N/A



Gambar 3 Grafik kuat tekan

Dengan menggunakan Tabel 2 diatas maka kenaikan kekuatan pada beton dapat dimasukkan ke dalam grafik. Gambar 3 menunjukkan bahwa kekuatan beton bertambah setiap harinya selama masa pengamatan berlangsung.

Baik dari tabel maupun grafik dapat diketahui bahwa kekuatan beton bertambah setiap harinya. Semakin tinggi kadar semen di dalam campuran, dilambangkan dengan 2 angka pertama pada versi campuran seperti 14-VX, 13-VY dan 15-VZ, maka semakin tinggi pula kuat tekan beton. Apabila diperhatikan dengan seksama maka terlihat kecenderungan yang berbeda untuk setiap perbandingan campuran binder : semen. Pada versi 14-VX menunjukkan seiring dengan meningkatnya kandungan limbah pasir ex. *sand blast* dan berkurangnya kandungan limbah *clay* di dalam campuran beton nilai kuat tekan produk solidifikasi meningkat cukup signifikan. Variasi yang mempunyai kandungan *ceramic ball* dalam jumlah yang lebih besar mempunyai kuat tekan yang lebih besar. Hal ini dimungkinkan karena sifat *ceramic ball* yang sangat keras dan kuat dapat memberikan kekuatan tambahan pada struktur internal produk solidifikasi seperti layaknya kerikil di dalam beton. Pada versi 13-VY terlihat bahwa secara umum dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya kandungan *ceramic ball* dan menurunnya kandungan *molesieve* di dalam campuran memberikan nilai kuat tekan yang lebih baik. Hal ini memperlihatkan bahwa tidak hanya limbah pasir ex. *sand blast* yang memberikan kontribusi yang besar terhadap kuat tekan. Pada versi 15-VZ, terlihat bahwa semakin kecil kandungan binder dan semakin besar kandungan *clay* di dalam campuran akan berakibat pada tingginya kebutuhan air dan rendahnya kekuatan beton. Bahkan untuk versi 15V3 dan 15V4, air harus ditambahkan lebih untuk menjaga agar campuran tetap berbentuk pasta. Hal ini dikarenakan limbah *clay* memiliki nilai persentase absorpsi air yang cukup tinggi sehingga dapat mengganggu proses hidrasi yang terjadi. Air yang mengisi ruang antara di dalam pasta akan diserap oleh *clay* sehingga kekuatan beton akan menjadi lemah, selain itu panas hidrasi semen akan menguapkan sebagian besar air yang tersisa sehingga proses hidrasi semen tidak berlangsung sempurna. Dari 15 variasi campuran, apabila hasil uji kuat tekan dibandingkan dengan baku mutu pada SNI 03-0691-1996 didapatkan 2 buah versi yang memenuhi standar yaitu 13V5 dan 14V6. Rincian untuk kedua variasi dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Rincian variasi terpilih

Variasi	Kuat tekan akhir (kg/cm ²)	Semen (gram)	Limbah (gram)				Kebutuhan air (ml)
			Clay	Sand blast	Molesieve	Ceramic ball	
13V5	117,19	249,60	99,84	349,44	99,84	199,68	224,64
14V6	129	199,68	49,92	549,12	49,92	149,76	175,72

KESIMPULAN

Melalui analisa fisik dan kimia pada limbah dapat dikatakan bahwa limbah *ceramic ball*, *molesieve*, *spent clay* dan *sand blast* memungkinkan untuk digunakan kembali setelah melalui proses solidifikasi. Hal ini dibuktikan dengan kandungan oksida logam keempat limbah yang berada di atas 50%. Hasil analisis saringan telah membuktikan bahwa *ceramic ball* dapat dijadikan pengganti agregat kasar dan ketiga limbah lainnya menjadi pengganti agregat halus. Dari 15 variasi campuran, terdapat 2 versi produk hasil solidifikasi yang telah diuji kuat tekan dan memenuhi standar SNI 03-0691-1996 untuk dijadikan *paving block* dengan nilai kuat tekan 13V5 sebesar $117,19 \text{ kg/cm}^2$ (mutu D) dan 14V6 sebesar $129,69 \text{ kg/cm}^2$ (mutu C). Untuk membuktikan kelayakan campuran tersebut untuk dimanfaatkan kembali dibutuhkan beberapa uji yang lain seperti TCLP, absorpsi dan durabilitas. Dengan memenuhi persyaratan pada keempat uji tersebut maka dapat dikatakan campuran tersebut layak dan aman untuk digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Annual Book of ASTM Standard volume 04.02. Concrete and Aggregates.1997
- Damanhuri, Enri. 2004. *Pengelolaan Limbah Berbahaya dan Beracun*. Diktat Kuliah Jurusan Teknik Lingkungan, ITB. Bandung.
- Keputusan Kepala BAPEDAL No. : KEP-03/BAPEDAL/09/1995 tentang Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Berbahaya dan Beracun.
- Keputusan Kepala BAPEDAL No. : KEP-04/BAPEDAL/09/1995 tentang Tata Cara Persyaratan Penimbunan Hasil Pengolahan, Persyaratan Lokasi Bekas Pengolahan dan Lokasi Bekas Penimbunan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
- Marzuki, Putri Farida. *Potensi Semen Alternatif Dengan Bahan Dasar Kapur Padalarang dan Fly Ash Suralaya Untuk Kontruksi Rumah Sederhana*. Seminar Nasional “Sustainability dalam Bidang Material, Rekayasa dan Konstruksi Beton”, ITB. Bandung.
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.02 Tahun 2008 tentang Pemanfaatan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 18 Tahun 1999 juncto Peraturan Pemerintah No.85 Tahun 1999 tentang Pengolahan Limbah Berbahaya dan Beracun
- Primanda, Adisti. 2008. *Kajian Solidifikasi/Stabilisasi Limbah Pabrik Bearing*. Laporan Tugas Akhir, ITB. Bandung.