

**KETERLINDIAN LOGAM BERAT DARI PEMANFAATAN  
LIMBAH SLAG BESI DAN BAJA SEBAGAI AGREGAT  
CAMPURAN LAPIS PERMUKAAN JALAN**

***HEAVY METALS LEACHABILITY FROM IRON AND STEEL SLAG  
UTILIZATION AS ASPHALT CONCRETE – WEARING COURSE  
AGGREGATE***

**<sup>1</sup>Airine Luhnira Perdana, dan <sup>2</sup>Sukandar**

<sup>1,2</sup> Program Magister Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jl Ganesha 10 Bandung 40132

<sup>1</sup>perdana.airine@gmail.com dan <sup>2</sup>sukandar11@gmail.com

**Abstrak:** Pencemaran lindi slag menjadi fokus utama lingkungan akibat tingginya produksi limbah slag dari industri pengolahan besi dan baja. Slag terpapar hujan asam berpotensi meningkatkan keterlindian logam berat ke badan air permukaan dan air tanah. Pemanfaatan slag sebagai agregat campuran lapis permukaan jalan merupakan upaya meminimasi pencemaran dengan membatasi pergerakan logam berat. Permen LH No.2 Tahun 2008 menuntut pemanfaatan limbah slag dengan kriteria aman bagi lingkungan dan layak secara teknis. Penelitian bertujuan untuk mengkaji keterlindian logam berat dari limbah slag besi dan baja sebelum dan setelah dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku campuran lapis permukaan jalan (AC-WC) melalui solidifikasi. Jenis slag yang diteliti adalah BF dan BOF. Keterlindian logam berat limbah slag serta produk solidifikasi dianalisis melalui pengujian ANC, TCLP standar dan modifikasi, uji pelindian statis dan dinamis. Uji karakteristik fisik dan kimia menunjukkan slag BF dan BOF berpotensi untuk dimanfaatkan melalui metode solidifikasi. Secara teknis, slag BF dan BOF layak digunakan sebagai bahan baku lapis permukaan jalan karena memenuhi spesifikasi Dep. PU melalui uji mutu agregat dan kinerja. Jenis logam berat yang berkontribusi sebagai pencemar utama untuk slag BF dan BOF yaitu Fe (641,5; 692,25 mg/kg), Ba (17,25; 17,75 mg/kg), Zn (17,25; 17,75 mg/kg), Cr (7,75; 9,75 mg/kg) dan Cd (5,25; 5,75 mg/kg). Uji TCLP standar dan modifikasi mengindikasikan slag besi dan baja tidak memiliki karakteristik toksik karena konsentrasi logam berat dalam lindi tidak melampaui baku mutu TCLP mengacu PP No.101 Tahun 2014. Urutan laju pelindian logam berat statis Ba>Fe>Zn>Cd>Cr, dinamis Zn>Ba>Cr>Fe>Cd. Kandungan Cd dalam lindi statis AC-WC berpotensi menimbulkan efek karsinogen, sedangkan efek non-karsinogen ditimbulkan oleh lindi statis AC-WC berbahan baku slag BOF.

**Kata kunci:** slag, agregat, keterlindian logam berat, solidifikasi, lapis permukaan jalan.

**Abstract:** Slag leachate pollution can be a great environmental concern due to generation of slag in numerous amounts of iron and steel-making industries. During periods of acid rain, these exposed slags release heavy metals into surface and groundwater. Slag utilization as asphalt concrete-wearing course (AC-WC) is a minimization effort to limit heavy metals migration. Ministry Regulation No.2/2008 requires two criteria of slag utilization that are safety for environmental and technical feasibility. The aim of research is investigating heavy metals leachability from iron and steel slag, before and after utilizing as AC-WC aggregate through solidification. Leachability of heavy metals produced from slag and solidification products were analyzed by ANC test, standard and modified TCLP test, static and dynamic leaching test. Materials that used in this research are BF and BOF slag. Physical and chemical characterization test show BF and BOF slags potentially utilize through solidification method. Technically, BF and BOF slags feasible used as raw materials of AC-WC, aggregate quality and performance test result show both of slag meet the Dep. of Public Works specifications. Fe (641.5; 692.25 mg/kg), Ba (17.25; 17.75 mg/kg), Zn (17.25; 17.75 mg/kg), Cr (7.75; 9.75 mg/kg), and Cd (5.25; 5.75 mg/kg) are the major pollutants that contain in both type of slags. Standard and modified TCLP test show BF, BOF slag, and solidification products are have no toxic character, heavy metals concentration in leachate not exceed the quality standards refer to GR No.101/2014. Static leaching rate of metals show Ba>Fe>Zn>Cd>Cr and

*Zn>Ba>Cr>Fe>Cd for dynamic. Cd in static AC-WC leachate has carcinogenic effect potential, while non-carcinogenic effects caused by static BOF AC-WC leachate.*

**Keywords:** *slag, aggregate, heavy metals leachability, solidification, asphalt concrete – wearing course.*

## PENDAHULUAN

Pada tahun 2012–2013 perekonomian Indonesia mengalami pertumbuhan sebesar 5,68%. Pertumbuhan ekonomi Indonesia tak luput dari perkembangan sektor industri pengolahan yaitu sebesar 5,56% di tahun 2013, hal tersebut memberikan dampak positif terhadap percepatan pembangunan dan peningkatan kesejahteraan masyarakat. Namun, perkembangan sektor industri pengolahan memberikan implikasi negatif terhadap timbulan jumlah limbah B3. Maka dari itu, tantangan pengelolaan limbah B3 akan semakin besar di tahun mendatang.

Industri pengolahan besi dan baja menghasilkan 20% limbah slag dari setiap ton produksi baja (Gunawan et al., 2011). Mengacu pada PP RI No.101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, limbah slag dikategorikan sebagai limbah B3 dari sumber spesifik khusus dengan kode limbah B402. Slag merupakan produk samping proses pirometalurgi dari beragam bijih logam dan diklasifikasikan sesuai dengan jenis tungku slag tersebut dihasilkan (Piatak et al., 2014). Upaya pengelolaan limbah slag di Indonesia terbatas pada penimbunan di lahan urug. Namun, luas lahan landfill yang memenuhi syarat KLH semakin berkurang. Untuk menghindari timbulnya limbah, maka pengelolaan limbah B3 perlu menerapkan prinsip minimisasi dengan menerapkan konsep 4R (reduce, reuse, recycle dan recovery). Salah satu aplikasi recycle yaitu pemanfaatan limbah B3 sebagai substitusi bahan baku.

Pemanfaatan limbah slag besi dan baja melalui solidifikasi dalam bidang konstruksi jalan adalah sebagai substitusi agregat campuran lapis permukaan jalan (Asphalt Concrete-Wearing Course, AC-WC). Lapis permukaan jalan merupakan lapisan paling atas dari struktur perkerasan yang berhubungan langsung dengan roda kendaraan. Lapisan ini berupa campuran beton aspal antara agregat dan aspal dimana sifat-sifat campuran harus sesuai dengan spesifikasi Dep. Pekerjaan Umum (2010). Agregat yang digunakan terdiri dari berbagai fraksi yaitu agregat kasar, sedang, dan halus. Limbah slag baja memiliki struktur padat, keras, tahan abrasi, dan daya gesek tinggi, sehingga layak dimanfaatkan sebagai agregat lapis permukaan jalan dimana memerlukan ketahanan aus yang tinggi, kuat dan tahan lama (Sofilic et al., 2012).

Slag mengandung logam berat (Sb, As, Ba, Be, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Th, dan V) dengan konsentrasi lebih tinggi dari tanah pada umumnya. Konsumsi kromium dari air terkontaminasi dapat menyebabkan anemia dan kanker lambung. Konsumsi zat besi dalam jumlah besar mengakibatkan kondisi heamochromatosis atau kerusakan jaringan akibat akumulasi zat besi (Tiwari et al., 2015). Penimbunan slag besi dan baja di lahan terbuka menimbulkan kekhawatiran akan lindi yang terbentuk akibat paparan air hujan terhadap limbah slag akan menyebabkan pencemaran lingkungan terutama masalah perubahan kualitas air permukaan dan air tanah. Pemanfaatan limbah slag besi dan baja melalui solidifikasi bukan hanya upaya untuk meminimasi timbulan jumlah limbah B3, tetapi juga sebagai upaya untuk membatasi kelarutan pencemar terutama logam berat. Di Indonesia, terdapat dua kriteria pemanfaatan limbah B3 yang harus dipenuhi mengacu pada Permen LH No.2 Tahun 2008 yaitu pemanfaatan limbah bersifat aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia serta layak secara teknis. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan penelitian komprehensif untuk mengkaji keterlindian logam berat dari limbah slag besi dan baja sebelum dan setelah dimanfaatkan sebagai substitusi bahan baku campuran lapis permukaan jalan melalui proses solidifikasi. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi awal berupa penjelasan ilmiah bagi pemerintah Indonesia mengenai pemanfaatan limbah slag besi dan baja sebagai agregat campuran meliputi kinerja lapis permukaan jalan serta dampak terhadap lingkungan.

## METODOLOGI

Penelitian difokuskan pada keterlindian logam berat setiap fraksi limbah *slag* besi dan baja, campuran fraksi *slag* besi dan baja sebelum solidifikasi, dan produk solidifikasi melalui beberapa metode pelindian. Bahan yang digunakan adalah limbah *slag* bersumber dari tungku *blast furnace* (BF) pengolahan besi dan *basic oxygen furnace* (BOF) pengolahan baja yang berasal dari industri pengolahan besi dan baja di Pulau Jawa, Indonesia. Kedua jenis *slag* digunakan sebagai substitusi bahan penyusun campuran perkerasan yaitu agregat standar.

Dalam penelitian ini dilakukan solidifikasi dengan memanfaatkan limbah *slag* besi dan baja sebagai agregat campuran lapis permukaan jalan (AC-WC). Limbah *slag* dipreparasi melalui proses mesin pemecah batu (*crusher*) untuk mendapatkan agregat yang memenuhi persyaratan ukuran yang diperlukan sesuai spesifikasi Dep. Pekerjaan Umum 2010 yaitu terdiri dari agregat kasar (1 – 2 cm), sedang (0,5 – 1 cm), dan halus (0 – 0,5 cm). Jumlah benda uji yang digunakan dalam penelitian adalah 10 buah yaitu tiga fraksi *slag* BF dan BOF, campuran fraksi *slag* sebelum solidifikasi serta produk solidifikasi berbahan baku *slag* BF dan BOF. Tahap pekerjaan laboratorium dibagi menjadi dua bagian utama mengacu pada Permen LH No.2 Tahun 2008 mengenai kriteria pemanfaatan limbah B3. Namun, terlebih dahulu dilakukan identifikasi karakteristik limbah *slag* dengan parameter fisik dan kimia.

Kriteria pertama, kelayakan teknis produk akhir berupa lapis permukaan jalan dinilai melalui pengujian mutu agregat dan aspal, solidifikasi (perencanaan dan pelaksanaan campuran lapis permukaan jalan), dan pengujian kinerja campuran lapis permukaan jalan sehingga dihasilkan produk solidifikasi pada kondisi optimum. Kriteria kedua, pemanfaatan limbah B3 bersifat aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia ditentukan melalui uji keterlindian logam berat dengan empat jenis metode yakni uji ANC, uji TCLP standar dan modifikasi, uji pelindian statis dan dinamis terhadap tiga fraksi limbah *slag* besi dan baja, campuran fraksi, serta produk solidifikasi. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan uji statistik *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan signifikan keterlindian logam berat antara sebelum dan setelah pemanfaatan limbah *slag* besi dan baja.

### Uji ANC (*Acid Neutralizing Capacity*)

Pengujian ANC bertujuan untuk mengetahui kestabilan/ketahanan sampel uji terhadap asidifikasi mengacu pada modifikasi uji ANC Sobek yang didasari prosedur EPA-600/2-78-054. Untuk mengetahui kemampuan satu gram limbah *slag* dalam menetralkan asam, maka dilakukan asidifikasi dengan mereaksikan sampel uji dengan kelebihan HCl yang telah diketahui konsentrasinya. Modifikasi uji ANC Sobek terletak pada tahap filtrasi residu setelah asidifikasi sampel limbah *slag*. Kemudian filtrat dititrasi balik menggunakan NaOH hingga mencapai pH 7. Perhitungan ANC (meq/g limbah *slag*) mengikuti **Persamaan 1** berikut.

$$ANC = \frac{[V_{HCl} - (V_{NaOH} \times \frac{V_{HCl}^{blanko}}{V_{NaOH}^{blanko}})] \times C_{HCl} \times BE}{W_s} \quad \text{(Persamaan 1)}$$

Dimana  $V_{HCl}$  adalah volume larutan HCl pada asidifikasi (mL),  $V_{NaOH}$  adalah volume larutan NaOH pada titrasi balik (mL).  $C_{HCl}$  adalah konsentrasi larutan HCl yang digunakan (N), BE adalah Berat ekuivalen H (Ar H/muatan ion  $H^+=1$ ), dan  $W_s$  adalah berat sampel limbah *slag* (gr).

### Uji TCLP Standar dan Modifikasi

Uji TCLP termasuk kedalam uji pelindian dengan ekstraksi secara *batch* yang bertujuan untuk mengidentifikasi limbah yang berpotensi untuk melindikan pencemar berbahaya terutama logam berat ke air tanah yang mengacu pada TCLP USEPA *Test Method* 1311. Perbedaan uji

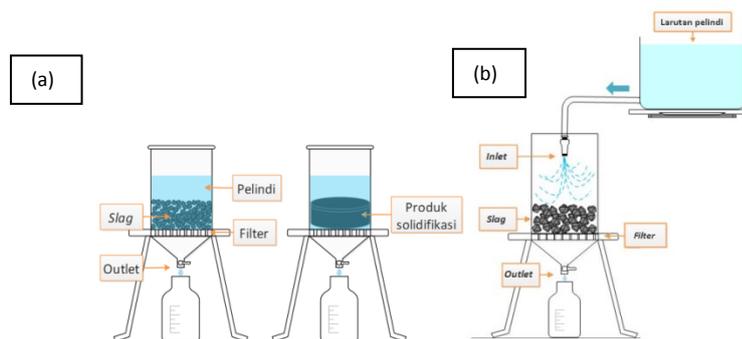
TCLP standar dan modifikasi terletak pada penggunaan larutan ekstrak/pelindi, dimana asam asetat glasial pada uji TCLP standar digantikan dengan air hujan asam artifisial berupa asam karbonat yang diperoleh dengan mengalirkan gas CO<sub>2</sub> ke dalam *aquadest*.

### Uji Pelindian Statis

Uji pelindian statis merupakan simulasi penimbunan limbah *slag* dan lapis permukaan jalan ketika terendam air hujan. Air asam yang digunakan sebagai larutan pelindi memiliki pH sebesar 4,5 sesuai dengan pH terendah hujan asam dan larutan pelindi tidak diganti baru untuk mempertahankan kondisi ekuilibrium. Limbah *slag* dan produk solidifikasi disiapkan dalam tabung berbahan akrilik seperti ditunjukkan pada **Gambar 1a**, dengan rasio L/S yaitu 20:1. Uji ini dilakukan selama 12 hari dengan pemeriksaan logam berat yang terkandung dalam lindi pada hari ke-1, 3, 6, 9 dan 12.

### Uji Pelindian Dinamis dengan Simulasi Cuaca

Uji pelindian dinamis merupakan simulasi penimbunan limbah *slag* dan lapis permukaan jalan terhadap perubahan cuaca dalam satu siklus. Satu siklus terdiri dari dua tahap perlakuan. Tahap pertama, simulasi hujan asam dilakukan menggunakan reaktor yang memapar benda uji dengan air asam seperti ditunjukkan pada **Gambar 1b** dengan rasio L/S yaitu 20:1, debit 90 – 130 mL/detik, selama 3 jam dengan pemeriksaan logam berat setiap satu jam. Tahap kedua, benda uji dikeringkan selama 24 jam dalam oven bersuhu 60°C (ASTM D4843-88). Pengujian ini diulangi selama 3 siklus berturut-turut.



**Gambar 1.** Skema a) uji pelindian statis dan b) dinamis.

### Estimasi Analisis Risiko Kesehatan Manusia

Karakterisasi risiko merupakan tahapan ke-4 dari keseluruhan tahapan analisis risiko kesehatan. **Persamaan 2** dan **Persamaan 4** menyatakan perhitungan *Chronic Daily Intake* (CDI) untuk mengestimasi efek karsinogen dan HI (*Hazard Index*) untuk efek non-karsinogen dari pemanfaatan limbah *slag* besi dan baja. Kedua perhitungan menggunakan data konsentrasi logam berat dalam lindi yang diperoleh dari hasil uji pelindian statis dan dinamis, masing-masing untuk logam berat yang berperan sebagai sumber pencemar utama.

$$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(Persamaan 2)}$$

$$HQ = \frac{CDI}{RfD} \quad \text{(Persamaan 3)}$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \quad \text{(Persamaan 4)}$$

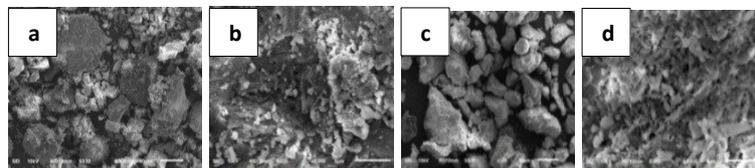
Dimana C adalah konsentrasi logam berat (mg/L), IR adalah *Ingestion Rate* (laju konsumsi air minum harian orang dewasa, 2 L/hari), EF adalah *Exposure Frequency* (frekuensi pajanan, 365 hari/tahun), ED adalah *Exposure Duration* (durasi pajanan, 70 tahun), BW adalah *Body Weight*

(berat badan, 70 kg), AT adalah *Averaging Time* (waktu rata-rata pajanan, 70 tahun masa hidup x 365 hari/tahun). *Hazard Quotient* (HQ) dihitung menggunakan **Persamaan 3**. RfD adalah *Reference Dose* (mg/kg-hari) spesifik untuk setiap logam mengacu pada USEPA.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Fisik dan Kimia *Slag* Besi dan Baja

Penelitian dilakukan terpusat di Laboratorium Buangan Padat dan B3, ITB. Analisis kandungan logam berat dilakukan di Puslitbang tekMIRA, Bandung. Kandungan mineral dianalisis di Laboratorium Pengujian Metalurgi dan Karakteristik, ITB. Pengujian SEM dilakukan di Laboratorium SEM, BSC-A ITB. Pengujian mutu agregat diadakan di Laboratorium Jalan Raya, Pusjatan Bandung. Pola difraksi X-ray slag BF dan BOF menunjukkan kemiripan puncak mineral utama penyusun struktur yaitu Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (larnite), CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (oksida besi kalsium), SiO<sub>2</sub> (cristobalite/ kuarsa), CaCO<sub>3</sub> (calcite), FeO (wustite), dan Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandite) serta tambahan FeFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (magnetite) untuk slag BF..



**Gambar 2.** Mikrograf SEM a) *slag* BF pembesaran 300x b) *slag* BF pembesaran 5000x c) *slag* BOF pembesaran 300x d) *slag* BOF pembesaran 5000x.

Hasil uji SEM untuk mengetahui topologi *slag* BF dan BOF ditampilkan pada **Gambar 2**. Mikrograf SEM *slag* BF dan BOF memiliki topologi permukaan berpori. Namun, jika dilihat lebih seksama (**Gambar 2b** dan **2d**) permukaan kedua jenis *slag* cenderung bertekstur kasar. Keuntungan dari agregat berpori yaitu peningkatan kelekatan aspal terhadap agregat, menyebabkan naiknya ketahanan terhadap cuaca serta kestabilan terhadap panas (Hainin *et al.*, 2012).

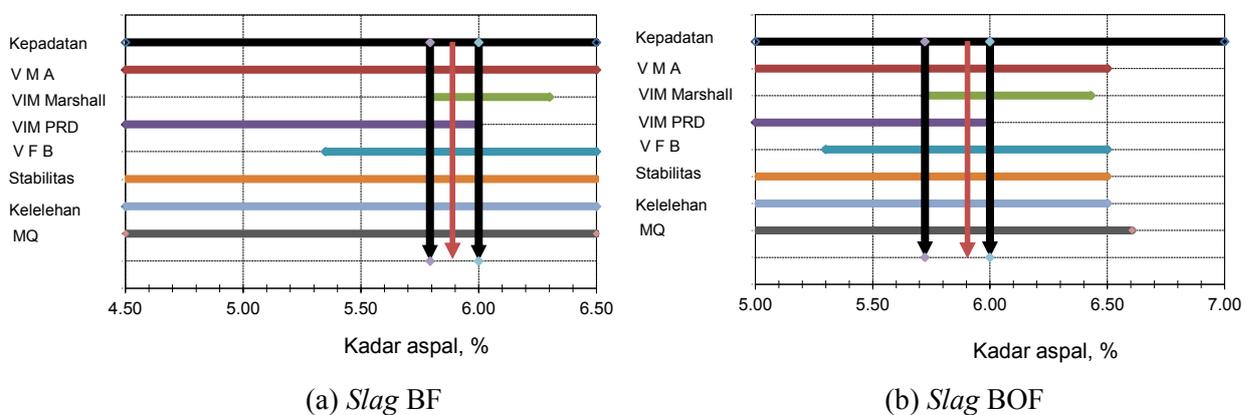
**Tabel 1.** Kadar logam berat *slag* BF dan BOF.

No.	Parameter	Konsentrasi (mg/kg BK)			Kadar maksimum Kep No.4/BAPEDAL/9/1995 (mg/kg BK)	
		BF	BOF	Aspal	Kolom A	Kolom B
1	Arsen (As)	2,75	3	2,25	300	30
2	Barium (Ba)	17,25	17,75	18,75	-	-
3	Kadmium (Cd)	5,25	5,75	7	50	5
4	Kromium (Cr)	7,75	9,75	9	2500	250
5	Cobalt (Co)	2	1,75	2,25	500	50
6	Tembaga (Cu)	2,25	2,75	1,75	1000	100
7	Timbal (Pb)	1,5	0,75	0,75	3000	300
8	Merkuri (Hg)	0,02	0,0225	0,02	20	2
9	Molibdenum (Mo)	0,25	0,25	0,25	400	40
10	Nikel (Nikel)	1,75	2	2,25	1000	100
11	Timah (Sn)	0,5	0,5	0,25	500	50
12	Selenium (Se)	1	1,25	0,75	100	10
13	Perak (Ag)	0,25	0,25	0,25	-	-
14	Zinc (Zn)	17,25	17,75	16,5	5000	500
15	Besi (Fe)	641,5	692,25	0,5	-	-

Mengacu pada **Tabel 1**, kadar logam berat tertinggi *slag* BF dan BOF berturut-turut yaitu Ba, Fe, Zn, Cr dan Cd. Kelima logam tersebut menjadi fokus utama dalam pengujian tahap selanjutnya yaitu uji keterlindian logam berat tiga fraksi limbah *slag* BF dan BOF, campuran fraksi *slag*, serta produk solidifikasi.

### Kelayakan Teknis Produk Akhir Lapis Permukaan Jalan (AC-WC)

Hasil pengujian mutu agregat kasar, sedang, dan halus menunjukkan sifat dan kualitas *slag* BF dan BOF sebagian besar memenuhi spesifikasi yang ditentukan Dep. Pekerjaan Umum (2010). Berdasarkan analisis saringan penggunaan *slag* BF sebagai agregat campuran laston, diperoleh gradasi gabungan dengan komposisi agregat kasar, sedang, halus sebesar 15%, 28%, dan 57%, sedangkan untuk *slag* BOF 10%, 32% dan 58%. Kadar Aspal Optimum (KAO) ditentukan dengan menggunakan metode Marshall dan Kepadatan Mutlak (PRD).



**Gambar 3.** Hasil Pengujian Marshall dan Keadatan Mutlak.

Hubungan antara kadar aspal dengan parameter Marshall yang memenuhi seluruh persyaratan kriteria campuran beraspal ditunjukkan pada **Gambar 3**. KAO ditentukan dengan metode skala balok (*bar-chart*). Berdasarkan hubungan VIM-Marshall terhadap kadar aspal yang telah digabungkan dengan VIM-PRD, KAO kedua jenis agregat *slag* diperoleh 5,9%. Kinerja lapis permukaan jalan ditentukan melalui uji perendaman Marshall untuk mengukur ketahanan campuran terhadap perusakan oleh air (durabilitas campuran). Durabilitas campuran agregat *slag* BF dan BOF berturut-turut 857 kg dan 817,3 kg. Nilai tersebut memenuhi spesifikasi yang ditetapkan yaitu 800 kg. Hasil pengujian ketahanan alur menunjukkan nilai stabilitas dinamis untuk agregat *slag* BF dan BOF adalah 2863,6 dan 3315,8 lintasan/mm, lebih besar dari persyaratan stabilitas dinamis beton aspal untuk lalu lintas berat minimum 2500 lintasan/mm (Dep. Pekerjaan Umum, 2010).

### Kriteria Produk Solidifikasi Aman bagi Lingkungan

Kriteria aman bagi lingkungan hidup dikaji menggunakan parameter keterlindian pencemar terutama logam berat sebagai upaya kontrol terhadap disposal limbah B3. Tujuan utama kriteria ini yaitu memastikan konsentrasi logam berat produk solidifikasi berada di bawah batas aman bagi kesehatan maupun lingkungan hidup, terutama informasi mengenai konsentrasi logam berat yang masih diperbolehkan dalam air tanah sebagai sumber air minum.

### ANC (*Acid Neutralizing Capacity*)

Kapasitas limbah *slag* untuk menetralkan sejumlah asam ditentukan melalui perhitungan asam-basa. *Slag* BF memiliki nilai ANC (14,54 meq/g sampel) lebih tinggi dari nilai ANC *slag* BOF (13,75 meq/g sampel). Kemampuan *slag* BF untuk menetralkan asam lebih besar karena tingginya kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (35,21%). Nilai ANC dipengaruhi oleh kehadiran Al, Si, Na, K, Mg, dan Ca, terutama Fe karena mampu menetralkan mol H<sup>+</sup> 1,5 kali lebih besar dari Ca dan Mg.

### Keterlindian Logam Berat melalui Uji TCLP Standar dan Modifikasi

Prosedur pengujian TCLP modifikasi hampir sama dengan TCLP standar, namun penggunaan larutan ekstrak 1 dan 2 digantikan oleh asam karbonat dengan pH 4,5. Penggantian asam karbonat bertujuan untuk merepresentasikan kondisi faktual dimana timbunan limbah *slag* di area terbuka terpapar langsung oleh air hujan. Air hujan secara alami mengandung asam karbonat bersifat asam lemah akibat terlarutnya CO<sub>2</sub> di udara dalam air hujan. Penggunaan pH 4,5 didasari oleh batas pH minimum hujan asam yang ditetapkan KLH.

**Tabel 2** menunjukkan konsentrasi keterlindian logam As, Ba, B, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Se, Ag dan Zn untuk limbah *slag* BF, BOF serta aspal pada pengujian TCLP standar tidak jauh berbeda dengan TCLP modifikasi. Penggunaan larutan pelindi asam asetat glasial (pH 2,88 dan 4,9) dan asam karbonat (pH 4,5) tidak mampu melarutkan konsentrasi logam berat yang terkandung dalam limbah *slag* secara keseluruhan. Asam lemah kurang efektif dalam melarutkan mineral yang terkandung dalam *slag* (Moustakas *et al.*, 2012). Konsentrasi logam-logam berat untuk ketiga bahan baku dan produk solidifikasi tidak memiliki karakteristik beracun karena tidak memiliki konsentrasi logam berat lebih kecil dari atau sama dengan konsentrasi logam berat pada kolom TCLP-A dan tidak memiliki konsentrasi logam berat lebih besar dari konsentrasi logam berat pada kolom TCLP-B.

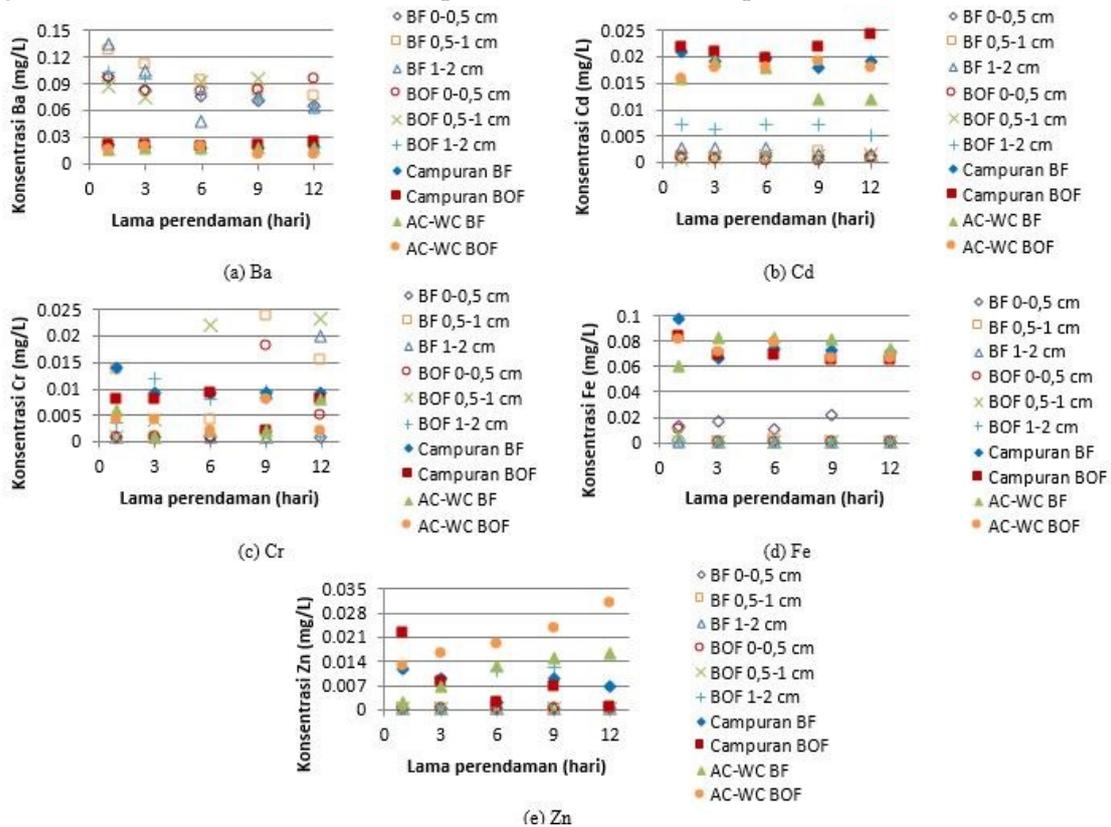
**Tabel 2.** Hasil pengujian TCLP Standar dan Modifikasi.

Parameter	Satuan	Pelindi Asam Asetat					Pelindi Asam Karbonat					Baku Mutu	
		Slag BF	Slag BOF	Aspal	AC-WC BF	AC-WC BOF	Slag BF	Slag BOF	Aspal	AC-WC BF	AC-WC BOF	TCLP-A	TCLP-B
As	mg/L	0,003	0,003	0,004	0,001	0,001	0,002	0,004	0,003	0,001	0,001	3	0,5
Ba	mg/L	0,047	0,028	0,019	0,026	0,029	0,033	0,031	0,037	0,016	0,013	210	35
B	mg/L	0,009	0,007	0,009	0,004	0,002	0,008	0,008	0,008	0,004	0,002	150	25
Cd	mg/L	0,006	0,005	0,005	0,002	0,003	0,006	0,008	0,006	0,001	0,001	0,9	0,15
Cr	mg/L	0,002	0,002	0,011	0,001	0,001	0,002	0,003	0,008	0,001	0,001	15	2,5
Cu	mg/L	0,002	0,002	0,011	0,001	0,001	0,002	0,002	0,009	0,001	0,001	60	10
Pb	mg/L	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,001	0,001	3	0,5
Hg	mg/L	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,001	0,001	0,3	0,05
Se	mg/L	0,005	0,003	0,004	0,003	0,002	0,004	0,004	0,004	0,001	0,003	3	0,5
Ag	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	40	5
Zn	mg/L	0,022	0,023	0,023	0,011	0,014	0,024	0,021	0,037	0,009	0,01	300	50

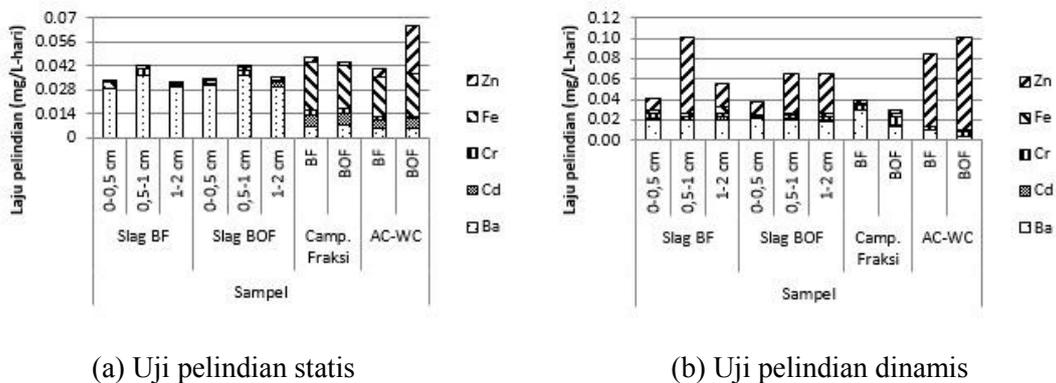
### Keterlindian Logam Berat melalui Uji Pelindian Statis

Kondisi perendaman statis memfasilitasi limbah *slag* dan produk solidifikasi kontak dengan pelindi pada volume dan jangka waktu tertentu tanpa adanya pergantian larutan pelindi (Tiwari, 2015). Selama 12 hari pengamatan konsentrasi logam cenderung menurun terhadap waktu, disebabkan oleh kenaikan pH pelindi akibat terlarutnya logam alkali dari *slag*. Peningkatan pH pelindi menyebabkan keterlindian logam menurun. Konsentrasi Ba pada **Gambar 4** menunjukkan keterluruhan tertinggi dalam limbah *slag*. Kelarutan mineral Ba (BaSO<sub>4</sub>,

barite) menurun seiring kenaikan pH. *Slag* BF dan BOF cenderung mudah melepaskan logam Ba dalam struktur padat menjadi bentuk ion yang terlarut oleh larutan pelindi bersifat asam (Yildirim, 2011). Kontak produk solidifikasi dan campuran fraksi dengan asam karbonat pH 4,5 selama 12 hari menyebabkan korosi pada permukaan sehingga berkontribusi atas tingginya konsentrasi Fe terlaruh. Terdapat perbedaan laju pelindian antara produk solidifikasi dengan campuran fraksi sebelum dilakukan solidifikasi pada **Gambar 5a**. Laju pelindian produk solidifikasi *slag* BF dan BOF untuk logam Ba, Cd, dan Cr lebih rendah dibandingkan dengan campuran fraksi karena logam terimobilisasi dan terikat oleh aspal dalam kondisi matrik padat.



**Gambar 4.** Konsentrasi logam yang terlindikan pada uji pelindian statis.



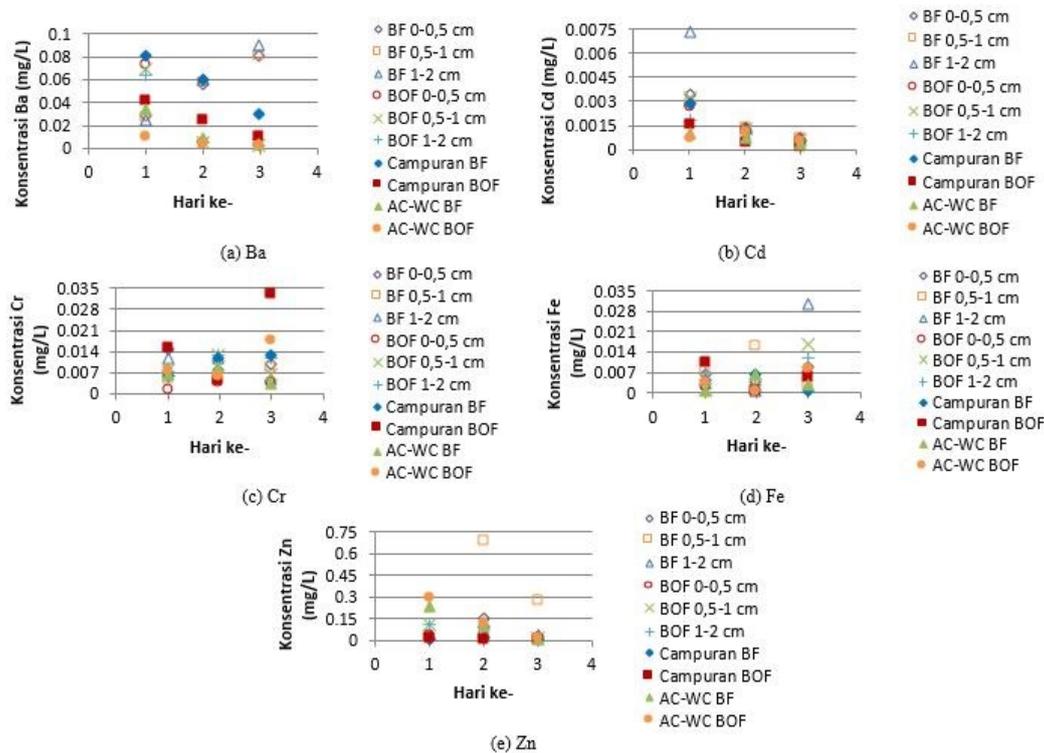
(a) Uji pelindian statis

(b) Uji pelindian dinamis

**Gambar 5.** Laju pelindian rata-rata logam Ba, Cd, Cr, Fe, dan Zn.

## Uji Pelindian Dinamis dengan Simulasi Cuaca

Sistem pelindian simulasi cuaca berjeda 24 jam antara tahap basah-kering. Menyerupai pelindian statis, pola keterlindian logam menurun terhadap waktu (**Gambar 6**). Ketika air hujan memapar benda uji terjadi pertukaran kation antara ion  $H^+$  dengan kation bebas sehingga konsentrasi logam berat terukur lebih besar diawal pelindian. Dari **Gambar 5b** produk solidifikasi mampu membatasi laju pelindian logam Ba, Cd, Cr, dan Fe pada simulasi cuaca namun tidak termasuk Zn. Zn terdistribusi pada permukaan *slag*, sedangkan Ba, Cr, dan Fe berada pada lapisan antara permukaan dan matriks *slag*. Cd pun terdistribusi di permukaan, namun kandungan Cd dalam *slag* sebatas *trace metal*. Pemanasan mampu merubah struktur mineral yang mempengaruhi proses pelepasan logam berat dalam lindi. Hal ini menyebabkan kosentrasi Zn terluruh pada pelindian dinamis lebih besa dari pelindian statis.



**Gambar 6.** Konsentrasi logam yang terlindian pada uji pelindian dinamis.

## Analisis Risiko Kesehatan Manusia

CDI digunakan untuk mengukur logam berat yang masuk secara oral pada usia dewasa dalam satuan waktu yang memberikan efek karsinogen, dengan asumsi lindi produk solidifikasi berupa lapis permukaan jalan mencemari air tanah yang digunakan sebagai persediaan air minum penduduk. Tabel 3 menunjukkan nilai CDI untuk logam Cd pada sampel uji pelindian statis dan dinamis melampaui baku mutu mengacu Permenkes No.492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum. Artinya, asupan air minum mengandung logam Cd per hari meningkatkan risiko terkena kanker. Lapis permukaan jalan berbahan baku slag BOF dengan kondisi terendam air hujan memiliki nilai HI >1, mengindikasikan sumber air minum yang tercemar lindi tersebut berpotensi menimbulkan efek non-karsinogen. Namun, hasil tersebut mengandung ketidakpastian akibat asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan.

**Tabel 3.** Estimasi CDI dan HI.

Uji pelindian	Produk solidifikasi	Parameter logam	Baku mutu CDI (mg/kg-hari)	CDI (mg/kg-hari)	HI
Statis	AW-WC BF	Ba	0,0200	0,0005	0,928
		Cd	0,0001	0,0004	
		Cr	0,0014	0,0001	
		Fe	0,0086	0,0022	
		Zn	0,0857	0,0005	
	AW-WC BOF	Ba	0,0200	0,0005	1,073
		Cd	0,0001	0,0005	
		Cr	0,0014	0,0001	
		Fe	0,0086	0,0021	
		Zn	0,0857	0,0023	
Dinamis	AW-WC BF	Ba	0,0200	0,0002	0,158
		Cd	0,0001	0,00002	
		Cr	0,0014	0,0003	
		Fe	0,0086	0,0001	
		Zn	0,0857	0,0042	
	AW-WC BOF	Ba	0,0200	0,0002	0,116
		Cd	0,0001	0,00002	
		Cr	0,0014	0,0003	
		Fe	0,0086	0,0001	
		Zn	0,0857	0,0042	

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakteristik fisik dan kimia, limbah slag besi dan baja berpotensi untuk dimanfaatkan melalui metode solidifikasi. Kinerja campuran meliputi pengujian durabilitas dan stabilitas dinamis menunjukkan limbah slag besi maupun baja dapat digunakan sepenuhnya sebagai substitusi agregat campuran lapis permukaan jalan. Urutan laju pelindian logam berat statis Ba>Fe>Zn>Cd>Cr, dinamis Zn>Ba>Cr>Fe>Cd. Tidak ada satupun logam berat dalam lindi yang melampaui baku mutu konsentrasi logam berat tercantum dalam PP 101/ 2014. Namun, terdapat potensi bahaya kesehatan berupa efek karsinogen (Cd) dan efek non-karsinogen dalam lindi statis AC-WC berbahan baku BOF.

## DAFTAR PUSTAKA

- Gunawan, G., Oetoyo, P.D., Kusminingrum, N., Rahmawati, T., dan Leksminingsih. (2011) : Pemanfaatan Slag Baja untuk Teknologi Jalan yang Ramah Lingkungan. Pusjatan. Bandung, 5 – 6.
- Hainin, M. R., Yusoff, N. I., Sabri, M. F. M., Aziz, M. A. A., Hameed, M. A. S., dan Reshi, W. F. (2012) : Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt. *ISRN Civil Engineering*. 2012, 459016, 1 – 5.
- Moustakas, K., Mavropoulos, Al., Katsou, E., Haralambous, K. J., dan Loizidou, M. (2012) : Leaching Properties of Slag Generated by a Gasification/Vitrification Unit: The Role of pH, Particle Size, Contact Time and Cooling Method Used, *ScienceDirect: Journal of Hazardous Material*, 207–208, 44 – 50.
- Piatak, N.M., Michael B.P., dan Robert, R.S. (2014) : Characteristics and environmental aspects of slag: A review, *Applied Geochemistry*, 1 – 31.
- Sofilic, T., Sofilic, U., dan Brnardic, I. (2012) : The Significance of Iron And Steel Slag as By-Product for Utilization in Road Construction. 12th International Foundrymen Conference Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies, 419 – 436.
- Tiwari, M. K., Bajpai, S., Dewangan, U. K. (2015) : Suitability of Leaching Test Methods for Fly Ash and Slag: A Review, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 1 – 15.