

STUDI PEMANFAATAN STEEL SLAG SEBAGAI BAHAN BANGUNAN SABODAM

THE STUDY OF UTILIZATION OF STEEL SLAG TO SABODAM

Jati Iswardoyo

Balai Sabo, Pusat Litbang Sumber Daya Air
Sopalan, Maguwoharjo, Yogyakarta – 55282
Tel.0274-886350, Fax.0274-885431
E-mail: masdjaty@yahoo.co.id

Diterima: 30 Juni 2016; Direvisi: Juli 2016; Disetujui: 24 November 2016

ABSTRAK

Steel slag adalah salah satu dari hasil sisa peleburan biji besi/baja. Untuk mengurangi berlimpahnya steel slag, studi ini ditujukan untuk mengkaji pemanfaatannya sebagai pengganti kerikil dalam beton yang digunakan untuk konstruksi sabodam. Keawetan beton pada lapisan luar dianalisis dengan menggunakan hasil beberapa penelitian terkait. Faktor yang paling berpengaruh adalah kuat tekan bentur (impact) sebagai representasi dari benturan akibat batuan lahar. Untuk menganalisis stabilitas pada sabodam, digunakan SNI 2851:2015 tentang Desain Bangunan Penahan Sedimen. Parameter yang digunakan yaitu stabilitas terhadap guling, geser, tegangan kontak dan daya dukung. Untuk alternatif penggunaan material inti sabodam, digunakan batu belah dan beton steel slag. Skenario pembebanan banjir dibedakan menjadi dua, yaitu banjir biasa dan banjir lahar. Berdasarkan hasil analisis, potensi ketidakstabilan ditemukan pada parameter Daya Dukung. Untuk sabodam menggunakan batu belah, tegangan kontak mempunyai tegangan minimum bernilai $-0,98 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir biasa) dan $-0,43 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir lahar) sedangkan sabodam dengan steel slag mempunyai tegangan minimum $1,74 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir biasa) dan $1,57 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir lahar) yang berarti tidak terjadi tegangan tarik. Kesimpulan yang didapatkan bahwa beton steel slag dapat dimanfaatkan sebagai material untuk sabodam.

Kata Kunci: Steel slag, Beton, Sabodam

ABSTRACT

Steel slag is one of the results of the rest of smelting iron ore/ steel. To reduce the abundance of steel slag, this study seeks to examine utilization as a substitute for gravel in the concrete used for construction sabodam. The durability of concrete on the outer layer was analyzed by using the results of several studies related. The most influential factor is the compressive strength of bump (impact) as a representation of the clash due to lava rock. It will be discussed about the potential use and durability. To analyze the stability of the sabodam, researcher use SNI 2851: 2015 about Sediment Retention Building Design. The parameter used is the stability of the tilting, sliding and bearing capacity. For alternative use sabodam's core material, researcher used split stones and steel slag concrete. The flood scenarios can be divided into two, namely flood plain and flood lava. Based on the results obtained, the potential for instability is found in the parameters of carrying capacity. The sabodam which using split stones, the bearing capacity of the land has a minimum strength is worth -0.98 kN/m^2 (for flood) and -0.43 kN/m^2 (for lava flood), while sabodam with steel slag has a minimum strength of 1.74 kN/m^2 (for flood) and 1.57 kN/m^2 (for lava flood) which means not tensile stresses occurred. The conclusion is the concrete with steel slag can be used as material for sabodam.

Keywords: Steel slag, Concrete, Sabodam

PENDAHULUAN

Steel slag adalah limbah dari pembuatan baja dari besi dengan komposisi berbagai bahan kimia dan mineral yang berupa material limbah padat hasil bahan buangan dari pabrik baja sewaktu proses peleburan besi dan baja. Berat jenis yang

berbeda menyebabkan terkumpulnya semua material *impurities* yang sudah teroksidasi pada lapisan atas cairan logam. Lapisan inilah yang dinamakan *slag*. *Slag* selanjutnya dikeluarkan dari tungku dan diletakkan di tanah luas, seperti terlihat pada Gambar 1. Pabrik baja besar di India

menghasilkan sekitar 29 juta ton bahan limbah setiap tahun (Khan, 2013). Kawasan industri skala kecil dan besar membuang hampir ribuan metrik ton *steel slag* setiap hari. Indonesia memproduksi *steel slag* hingga ribuan ton per bulan. Untuk satu perusahaan, PT. Ispat Indo saja mencapai ± 9.000 ton per bulan atau $\pm 3000 \text{ m}^3$ per bulan (PT. Ispat Indo, 2008). Jumlah tersebut sangat banyak dan tidak dimanfaatkan sehingga menggunung dapat dilihat pada Gambar 2. Hal ini menjadi sebuah dilema yang harus dicarikan solusinya.



Sumber: Foto Lapangan

Gambar 1 Bongkahan *Steel Slag*



Sumber: Foto Lapangan

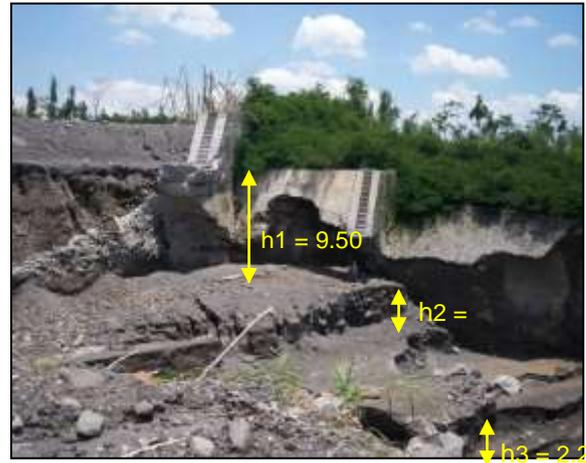
Gambar 2 Tumpukan *Steel Slag* yang melimpah

Masalah pemanfaatan *steel slag* ini sangat serius. Permasalahan ini dapat dikurangi dengan memanfaatkan *steel slag* untuk bahan campuran konstruksi beton. Sebenarnya diluar negeri penggunaan *steel slag* sudah sangat banyak. Selain sebagai bahan perkerasan jalan seperti di Thailand, *steel slag* juga digunakan untuk bangunan gedung, pengganti ballas, pupuk dsb (Iswardoyo, 2014b).

Penelitian sebelumnya telah menjelaskan bahwa beton *steel slag* mempunyai kekuatan dan keawetan yang lebih baik dibandingkan beton biasa. Dalam Leksmningsih (2007) disebutkan bahwa *steel slag* tahan terhadap perubahan

temperatur, terhadap sifat basah dan kering dan terhadap pelapukan yang disebabkan oleh bahan organik. PT. Ispat Indo (2008), Mulyono (2004), Ananto (2014), Arifah (2014), Iswardoyo (2014a), Khan (2013) menyebutkan bahwa adanya peningkatan kekuatan beton menggunakan *steel slag* dibandingkan menggunakan kerikil. Hal ini menimbulkan gagasan untuk melakukan penelitian pemanfaatan *steel slag* sebagai material dalam pembuatan *sabodam*.

Sabodam adalah bangunan melintang sungai yang berfungsi menahan, mengendalikan dan mengontrol sedimen, baik pasir, kerikil maupun batuan besar. Karena menerima beban sedimen yang berat, maka mutlak dibutuhkan material yang kuat dan awet dalam pembangunan *sabodam*. *Sabodam* di Gunung Merapi biasanya terbuat dari batu belah pada inti bendung utamanya, dan kemudian dilapisi dengan beton pada bagian permukaannya.



Sumber : Basis Data Balai Sabo, 31 Januari 2011.

Gambar 3 Dam PU-D1 Mranggen yang rusak

Observasi di lapangan menunjukkan bangunan *sabodam* sangat rentan terhadap kerusakan dari retak hingga hilangnya sebagian volume pada beton akibat aliran lahar, seperti terlihat pada Gambar 3, Dam PU-D1 Mranggen di Magelang, Jawa Tengah mengalami kerusakan yang sangat parah. Oleh karena itu perlu dikaji alternatif material yang lebih kuat dan awet untuk menggantikan beton dalam *sabodam*.

Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui kelayakan penggunaan *steel slag* sebagai material campuran yang digunakan dalam pembangunan *sabodam* yang memenuhi persyaratan perancangan *sabodam*. Manfaat penelitian ini adalah untuk mengatasi keberlimpahan jumlahnya, dengan cara digunakan sebagai bahan konstruksi pada bangunan *sabodam*.

KAJIAN PUSTAKA

Definisi *steel slag*

Glosarium Departemen Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) menyebutkan definisi *Steel Slag* (limbah) adalah kumpulan lelehan yang terpisah pada peleburan atau pemurnian logam yang terapung di atas permukaan logam cair, terbentuk dari campuran bahan imbuhan, pengotot biji/logam, abu hasil pembakaran, dan bahan pelapis tanur (PT. Ispat Indo, 2008).

Dampak *steel slag* pada lingkungan.

Moenir dan Handayani (2012) dan Leksmingsih (2007), menyatakan amannya kandungan kimia pada *steel slag* apabila digunakan dalam campuran beton. Leksmingsih (2007), menyebutkan bahwa penggunaan bahan lokal buangan telah banyak dilakukan tetapi masih dalam taraf penelitian apakah bahan lokal/buangan tersebut layak digunakan dalam pembuatan campuran beton semen, dan masih harus dikaji lebih dalam lagi. Di Indonesia banyak terdapat bahan lokal buangan baik yang dapat langsung digunakan dalam campuran beton semen, sebagai contoh: *steel slag*, abu terbang (*fly-ash*), atau melalui proses agar dapat digunakan di dalam campuran beton semen sebagai contoh limbah katalis bekas.

Beberapa tulisan menyatakan bahwa dampak lingkungan yang dihasilkan *steel slag* harus dipertimbangkan, salah satunya adalah Chaurand (2006). Chaurand (2006) menjelaskan bahwa BOF *steel slag*, selain terdiri dari kalsium, silikon dan besi juga mengandung sedikit unsur beracun, khususnya kromium dan vanadium. Namun ada beberapa penelitian yang menunjukkan kebolehan *steel slag* untuk dimanfaatkan di bidang konstruksi. Hasil penelitian Moenir dan Handayani (2012) menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah bahan berbahaya dan beracun *steel slag* untuk campuran beton sebagai pengganti agregat sampai 100% dapat memenuhi standar produk beton mutu sedang sesuai SNI 2851 dengan kuat tekan terkecil 250 kg/cm².

Terkait pemanfaatan *steel slag* pada konstruksi bangunan, Wang dan Thompson (2011), menjelaskan bahwa, pertama, akan ada pengurangan substansial dalam pencemaran lingkungan akibat perubahan praktek saat ini, dimana bahan yang ada dibuang dan ditimbun saja. Kedua, penggunaan bahan tersebut sebagai pengganti bahan-bahan alami, sehingga hal ini dapat dikatakan sebagai perlindungan sumber daya alam yang tidak terbarukan dan penurunan kebutuhan energi. Ketiga, terdapat kemungkinan mengubah, atau memodifikasi, sifat fisik dan kimia

dari bahan dasar untuk memproduksi bahan rekayasa khusus yang dapat dimanfaatkan untuk aplikasi khusus.

Pengaruh *steel slag* pada kekuatan beton

Hasil uji yang dilakukan oleh Laboratorium Perkerasan dan Bahan Jalan Universitas Kristen Petra terhadap *steel slag* PT. Ispat Indo menunjukkan hasil keausan rata-rata 27% (*Los Angelos Abrasion Test* ASTM C131). Selain itu *steel slag* mempunyai berat jenis yang tinggi, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Sifat Fisik *Steel Slag*

Sifat	Nilai
Berat Jenis	3.2 - 3.6
Berat Volume, kg/m ³	1600 - 1920
Absorpsi	up to 3%

Sumber: PT. Ispat Indo, 2008

Mulyono (2004) menyebutkan ada beberapa keuntungan penggunaan *steel slag* dalam campuran beton sebagai berikut : a) mempertinggi kekuatan tekan beton karena kecenderungan melambatnya kenaikan kekuatan tekan, b) menaikkan rasio antara kelenturan dan kuat tekan beton, c) mengurangi serangan alkali-silika, d) mengurangi panas hidrasi dan menurunkan suhu, e) mempertinggi keawetan karena pengaruh perubahan volume.

Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian Khan (2013) yang menjelaskan bahwa *steel slag* dapat digunakan dalam beton konvensional untuk meningkatkan kelayakan secara mekanik, fisik, dan sifat kimia. Dalam penelitian tersebut disertai dengan hasil bahwa kekuatan geser rata-rata *steel slag* beton pada umur 14 hari dan 28 hari dengan 0,5 w/c rasio adalah konstan. Substitusi *steel slag* 0, 20, 40, 60, 80 & 100% digunakan. Hasil terbaik diperoleh untuk rasio penggantian 60%. Oleh karena itu, penggunaan *steel slag* dalam campuran beton akan meningkatkan kekuatan beton. Dari hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa 60% penggantian agregat halus dengan *steel slag* memberikan hasil yang diinginkan dan dapat dipertimbangkan untuk praktek konstruksi.

METODOLOGI

Metodologi dalam tulisan ini adalah sebagai berikut:

- 1) Observasi lapangan dilakukan ke PT. Ispat Indo yang merupakan penghasil *steel slag*. *Steel slag* terlihat mempunyai bentuk yang tidak beraturan dan teksturnya kasar. *Steel slag* mempunyai sifat yang cocok untuk agregat pengganti kerikil dalam campuran beton,

karena mempunyai permukaan yang kasar. Hal ini disebabkan oleh terperangkapnya gas pada *steel slag* yang masih panas, selama proses pendinginan. Lubang-lubang gas tidak saling berhubungan, sehingga tidak bersifat porous. Ketersediaan *steel slag* berlimpah dan kurang begitu termanfaatkan.

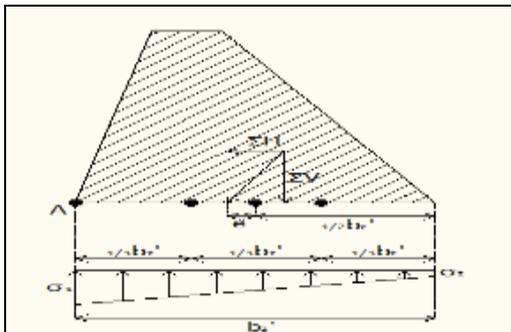
- 2) Observasi lapangan juga dilakukan ke sungai di Gunung Merapi untuk memperkirakan sebab kerusakan *Sabodam* yang terjadi.
- 3) Penelitian ini merupakan pengembangan, dari penelitian sebelumnya yaitu Ananto (2014), Arifah (2014), Iswardoyo (2014a), dan Iswardoyo (2014b). Pengembangan dilakukan dengan cara kajian menyeluruh dalam hal pemanfaatan *steel slag* pada *sabodam* baik kajian lingkungan maupun untuk lapisan luar, dan lapisan intinya. Lokasi penelitian tersebut berada di laboratorium di Balai Litbang Sabo, Pusat Litbang Sumber Daya Air, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat di Yogyakarta.

4) Perencanaan *Sabodam*

Tulisan ini berfokus pada perencanaan *sabodam* dengan berbahan utama *steel slag*. Tubuh *Sabodam* terdiri dari inti dan lapisan luar. Lapisan luar akan dibahas keawetannya menggunakan parameter kuat tekan bentur, abrasi, modulus elastisitas dan daya serap air. Untuk inti *sabodam* menggunakan kuat desak beton dilanjutkan analisis stabilitas eksternal terhadap guling, daya dukung dan geser. Perencanaan menggunakan SNI 2851 Desain Perencanaan Bendung Penahan Sedimen. Adapun persamaan faktor keamanan terhadap guling yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$FK_{guling} = \frac{\sum Mp}{\sum Mg} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:
 FK_{guling} adalah faktor keamanan terhadap guling ($FK_{guling} > 2$);
 $\sum Mp$ adalah jumlah momen penahan (kNm);
 $\sum Mg$ adalah jumlah momen guling (kNm).



Gambar 4 Tekanan pada Tanah Dasar

Keterangan:

- A adalah titik guling;
- b_2 adalah lebar dasar bendung utama;
- e adalah eksentrisitas resultan gaya yang bekerja;
- ΣH adalah jumlah gaya horizontal yang bekerja (kN/m');
 ΣV adalah jumlah gaya vertikal yang bekerja (kN/m');

Tekanan di dasar fondasi

(1) jika ΣV pada $b/2$ maka sentris

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sum V}{b_2} \dots\dots\dots(2)$$

(2) jika $e < b_2/6$ maka

$$\sigma_{12} = \frac{\sum V}{b_2} \left[1 \pm \frac{6e}{b_2} \right] \dots\dots\dots(3)$$

(3) jika $e > b_2/6 \rightarrow$ harus dihitung kembali

(4) jika $e = b_2/6 \rightarrow \sigma_{max} = \sigma_1$ dan $\sigma_2 = 0$

Keterangan:

- b_2 adalah lebar dasar bendung utama (m);
- e adalah eksentrisitas resultan gaya yang bekerja (m), dimana $-b_2/6 < e < b_2/6$
- σ_1 adalah tegangan kontak maksimum pada dasar pondasi (kN/m²) $\leq \sigma$ tanah fondasi;
- σ_2 adalah tegangan kontak minimum pada dasar pondasi (kN/m²);
- σ_{max} adalah tegangan tanah maksimal.

Faktor keamanan terhadap daya dukung

Keterangan:

$$q_{ult} = C.Nc + \gamma b.Nq.Df + 0,5.\gamma b.B.Ny \dots\dots\dots(4)$$

- q_{ult} adalah daya dukung ultimit pondasi
- C adalah kohesi tanah
- γb adalah berat volume tanah
- Df adalah kedalaman dasar pondasi
- B adalah lebar pondasi dianggap 1,00 meter
- Nc, Nq, Ny adalah faktor daya dukung Terzaghi ditentukan oleh besar sudut geser dalam.

Setelah kita mendapatkan nilai daya dukung ultimit tanah (q_{ult}), langkah selanjutnya mencari Faktor Keamanan Daya Dukung.

$$FK_{DayaDukung} = \frac{q_{ult}}{\sigma_{max}} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan :

- $FK_{DayaDukung}$ adalah faktor keamanan terhadap daya dukung dimana $FK \geq 3$;
- q_{ult} adalah daya dukung ultimit tanah;
- σ_{max} adalah tegangan maksimal tanah.

Faktor keamanan terhadap geser

$$FK_{geser} = \frac{\sum V (f) + c b_2}{\sum H} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan :

f biasanya $tg(1/3 - 1/2)\phi$

*f digunakan apabila tidak dilakukan *soil test*

b_2 adalah lebar dasar bendung utama (m);

c adalah kohesi tanah dasar pondasi (kN/m^2);

f adalah koefisien geser

FK_{geser} adalah angka keamanan terhadap geser;

ΣH adalah jumlah gaya horizontal yang bekerja (kN/m');

ΣV adalah jumlah gaya vertikal yang bekerja (kN/m')

ϕ adalah sudut geser dalam (derajat).

Faktor Keamanan Terhadap Geser diambil dari SNI 2851 tentang Desain Perencanaan Bendung Penahan Sedimen (BSN, 2015) seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Faktor Keamanan Terhadap Geser

Faktor keamanan, FK	Tinggi bendung
1,2	< 15 m
1,5	> 15 m

Sumber : BSN, 2015

Tabel 2 Jenis pembebanan yang ditinjau untuk tinggi Sabodam (H) < 15 m

Kondisi banjir tanpa lahar	Kondisi banjir lahar
Tekanan air statis	Tekanan air statis
	Tekanan tanah
	Tekanan dinamis aliran lahar

Sumber : BSN, 2015

Dalam perencanaan inti *sabodam*, analisis stabilitas yang digunakan pada dasarnya sama dengan perhitungan stabilitas dinding penahan tanah. Analisis stabilitas pada perhitungan disini adalah menggunakan analisis stabilitas internal yaitu terhadap gaya guling, geser dan daya dukung. Untuk peninjauan kembali analisis stabilitas *Sabodam* dipilih *Sabodam* Kali Putih PU-D1, Mranggen sebagai studi kasus. Analisis stabilitas *Sabodam* ditinjau terhadap 2 (dua) kondisi yaitu pada kondisi banjir tanpa lahar dan kondisi banjir lahar. Tinggi main dam *Sabodam* PU-D1 adalah 13,9 m, dan jenis beban yang ditinjau berdasarkan Tabel 2.

Dalam penelitian ini beton yang digunakan memiliki mutu beton $F'c = 25$ Mpa dengan umur 28 hari dan perawatan beton menggunakan cara perendaman dalam kolam. Pembuatan benda uji dilakukan pada tanggal 24-27 September 2013 dan pengujian dilakukan pada tanggal 22-25 Oktober 2013.

PEMBAHASAN

Pemanfaatan *steel slag*

Steel slag merupakan limbah yang dihasilkan dari hasil sisa produk peleburan baja atau besi dalam tanur. Dengan bentuk yang tidak beraturan, bertekstur kasar, berat jenis yang lebih besar dari pada batu alam, mempunyai ketahanan terhadap abrasi, karakteristik kekerasan yang bagus (PT. Ispat Indo, 2008), maka *steel slag* layak digunakan sebagai pengganti agregat. Jumlah *steel slag* yang berlimpah menjadi permasalahan tersendiri pada setiap proses produksi. Seperti yang disampaikan Moenir dan Handayani (2012) bahwa *steel slag* hanya ditimbun dalam areal pabrik (*open dumping*) dengan jumlah limbah yang cukup besar. Salah satu penanganan yang direkomendasikan adalah melakukan proses solidifikasi dan dimanfaatkan sebagai bahan yang bermanfaat, yaitu untuk campuran beton.

Dampak pemanfaatan *steel slag* untuk campuran beton terhadap lingkungan terdapat perbedaan. Chauran (2006) menjelaskan bahwa dampak lingkungan dari BOF (*Basic Oxygen Furnace*) *steel slag* harus diperhitungkan dan karena mengandung sedikit bahan beracun. Namun hal ini sebenarnya telah dibantah dalam *The Federal Resister* vol 45 no 98 tahun 1980, disampaikan bahwa telah dilakukan pengujian slag dengan *Environment Protection Act (EPA) Standard Methode*, yang menyatakan bahwa slag tidak berbahaya dengan catatan 1) tidak mudah terbakar 2) mempunyai PH di bawah 12 (slag mempunyai PH 7,9) dan 3) Tidak bersifat reaktif dan racun (sianida atau sulfida), hal ini dibuktikan bahwa cairan pencuci slag (*leachate*) adalah 100 kali di bawah standard air minum dimana persyaratan racun adalah 10x standard air minum (PT. Ispat Indo, 2008). Hasil analisis *TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)* pada semua komposisi masih jauh di bawah ambang batas baku mutu TCLP zat pencemar dalam limbah untuk menentukan sifat racun menurut peraturan pemerintah nomor 85 tahun 1999. Pemanfaatan *steel slag* sebagai agregat beton ini dapat menjadi salah satu cara yang dapat digunakan untuk menurunkan resiko pencemaran dan kerusakan lingkungan akibat *steel slag*. Laboratorium Sucofindo juga melakukan pengujian terhadap produk slag dari PT. ISPAT INDO, yang hasilnya menyatakan bahwa *steel slag* tidak berbahaya (Sucofindo, 2006).

Pembuatan Sabodam

Sabodam adalah bangunan sabo yang dominan yang berinteraksi langsung dengan sedimen. Bangunan *sabodam* terdiri dari beberapa komponen yaitu bendung utama, sayap bendung, dinding tepi, lubang air, celah, apron, subdam, fondasi yang dapat dilihat pada Gambar 5. Bangunan *sabodam* pada umumnya terbuat dari pasangan batu belah pada inti bangunan dan dilapisi dengan pasangan beton pada sisi luar yang berinteraksi langsung dengan sedimen. Pemanfaatan *steel slag* untuk *sabodam* dilakukan pada inti *sabodam* serta lapisan luar *sabodam*. Pada inti *sabodam* dimaksudkan untuk menambah stabilitas internal, sedangkan pada lapisan luar *sabodam* dimaksudkan untuk keawetan *sabodam*.

Kekuatan dan keawetan bahan mutlak dibutuhkan untuk membuat *sabodam*. Hal ini dikarenakan *sabodam* mengalami pembebanan yang bervariasi. Beban tersebut adalah abrasi dan dampak. Abrasi adalah gerusan yang terjadi pada permukaan beton akibat aliran yang mengandung sedimen, sedangkan dampak adalah benturan yang terjadi akibat batuan yang menghantam permukaan, sehingga pada bagian luar *sabodam* digunakanlah beton. Di lapangan, biasanya, batuan menimpa pada semua permukaan beton yang bersinggungan dengan aliran lahar, antara lain di mercu pelimpah, sayap dam, tembok tepi dan kolam olak. Oleh karena itu diperlukan kekuatan dan keawetan bahan untuk mengantisipasi peluang kerusakan.

Lapisan Luar Tubuh Sabodam

Terkait pengaruh *steel slag* terhadap beton, beberapa peneliti merekomendasikan bahwa *steel slag* dapat memberikan dampak positif terhadap kekuatan dan keawetan beton secara keseluruhan dari berbagai parameter, antara lain kuat tekan, menaikkan rasio kelenturan, mengurangi panas hidrasi dan menurunkan suhu, mempertinggi keawetan karena pengaruh perubahan volume (Mulyono, 2013). Hal ini didukung oleh penelitian Maslehuudin (2003) yang menunjukkan bahwa kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik pada beton menjadi semakin meningkat, seiring dengan penambahan jumlah kandungan *steel slag*-nya. Tabel 4 merupakan rekapitulasi hasil uji beton, berupa nilai persamaan dari garis trend dan nilai koefisien korelasi.

Iwardoyo, 2014 b, telah menjelaskan bahwa *sabodam* yang rusak dapat diperbaiki dengan beton yang menggunakan campuran *steel slag*. Dalam tulisan ini dikembangkan apabila beton yang menggunakan campuran slag dipergunakan

untuk lapisan luar *sabodam* sejak dari awal pembuatan, tidak hanya digunakan sebagai bahan isian bangunan (*concrete grouting*) sewaktu mengalami kerusakan saja. Permukaan *sabodam* berpeluang sangat besar mengalami benturan akibat material batuan, terutama sayap, tembok tepi dan mercu pelimpah. Oleh karena itu mutlak diperlukan untuk menggunakan material yang lebih tahan terhadap material benturan. Uji coba perubahan komposisi *steel slag* untuk menggantikan material kerikil, menunjukkan tren bahwa semakin tinggi komposisi *steel slag*, maka semakin tahan terhadap aspek benturan. Korelasi yang kuat ini ditunjukkan dalam persamaan $y = 0,005x^2 - 0,125x + 28,93$ dengan angka $R = 0,9263$ dan $R^2 = 0,86$. Adapun visualisasi korelasi antara kuat bentur beton dengan komposisi *steel slag* sebagai pengganti agregat ditunjukkan pada Gambar 6.

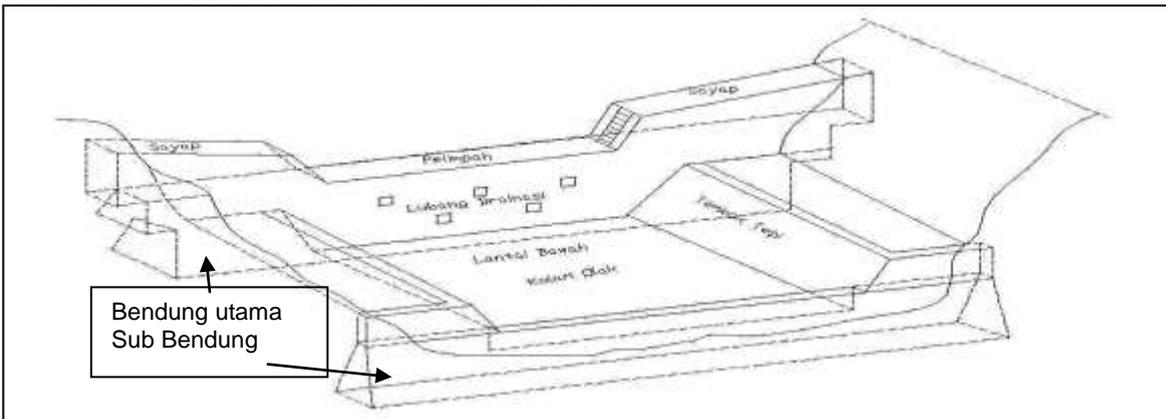
Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa ada trend regresi linier pada korelasi antara kuat desak dan komposisi *steel slag* yang digunakan berupa persamaan $y = 5,558x + 27,72$ dan didapatkan nilai R sebesar 0,647 dengan nilai $R^2 = 0,41$ artinya ada hubungan kurang kuat antara komposisi *steel slag* dengan kekuatan desak pada beton. Perubahan komposisi *steel slag* yang digunakan sebagai substitusi pada campuran beton tidak berdampak signifikan menaikkan nilai kuat desak beton. Adapun visualisasi korelasi antara kuat desak beton *steel slag* dengan komposisi *steel slag* sebagai pengganti agregat ditunjukkan pada Gambar 7.

Untuk daya serap air, menunjukkan pola bahwa semakin besar rasio penggunaan *steel slag*, maka semakin kecil daya serap airnya. Dalam literatur yang sama, Maslehuudin (2003), juga menjelaskan bahwa semakin besar rasio penambahan *steel slag* maka semakin kecil kemungkinan terjadi *crack*. Semakin besar komposisi *steel slag* sebagai substitusi pada campuran beton maka daya serap air di dalam beton akan semakin berkurang. Dengan semakin berkurangnya air yang terserap maka beton akan semakin awet dari pelapukan. Dari hasil analisis secara regresi linier pada daya serap air berdasar hasil pengujian diperoleh persamaan $y = -2,141x + 3,437$ dan didapatkan nilai R sebesar 0,661 dengan $R^2 = 0,436$ artinya ada hubungan yang kurang kuat antara komposisi *steel slag* dengan daya serap air pada beton. Korelasi antara daya serap air beton *steel slag* dengan komposisi *steel slag* sebagai pengganti agregat ditunjukkan pada Gambar 8. Meskipun korelasi kurang kuat, tetapi dari Gambar 8 dapat terbaca bahwa semakin banyak campuran *steel slag* pada *sabodam*, maka semakin kecil daya serapnya terhadap air. Daya serap yang kecil mutlak diperlukan, karena *sabodam* adalah bangunan penahan sedimen yang diletakkan

melintang di penampang sungai, yang akan berdampak pada pelapukan beton. Sabodam sebaiknya mempunyai beton yang mempunyai daya serap air yang kecil.

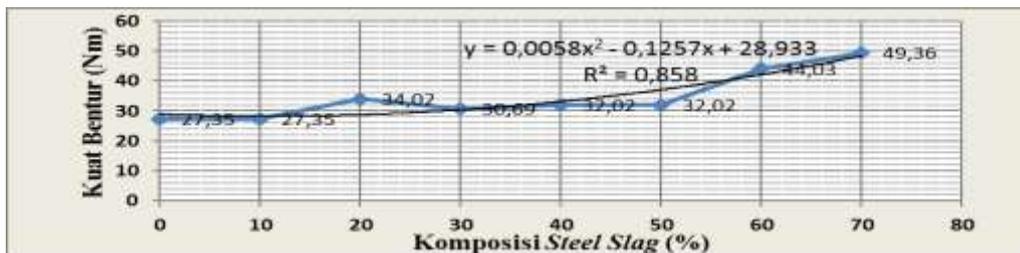
Nilai modulus elastisitas beton meningkat seiring meningkatnya jumlah komposisi *steel slag* sebagai substitusi pada campuran beton. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa beton dengan jumlah substitusi *steel slag* lebih banyak akan menyebabkan beton tersebut menjadi semakin kaku dan semakin kuat menahan beban. Hasil

pengujian menunjukkan bahwa adanya korelasi antara nilai modulus elastisitas dengan komposisi *steel slag*, dengan persamaan regresi yaitu $y = 5674x + 21333$ dan didapatkan nilai R sebesar 0,760 dan nilai $R^2 = 0,58$ artinya ada hubungan yang cukup antara komposisi *steel slag* dengan modulus elastisitas beton tersebut. Sedangkan visualisasi korelasi antara modulus elastisitas beton *steel slag* dengan komposisi *steel slag* sebagai pengganti agregat ditunjukkan pada Gambar 9.



Sumber: SNI 2851., 2015

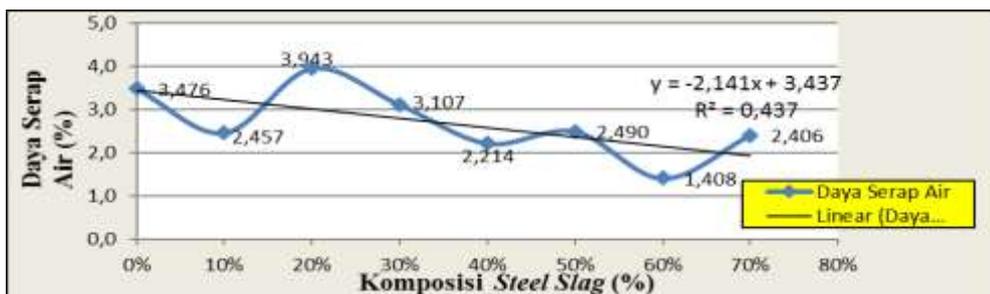
Gambar 5 Komponen Bangunan Sabodam



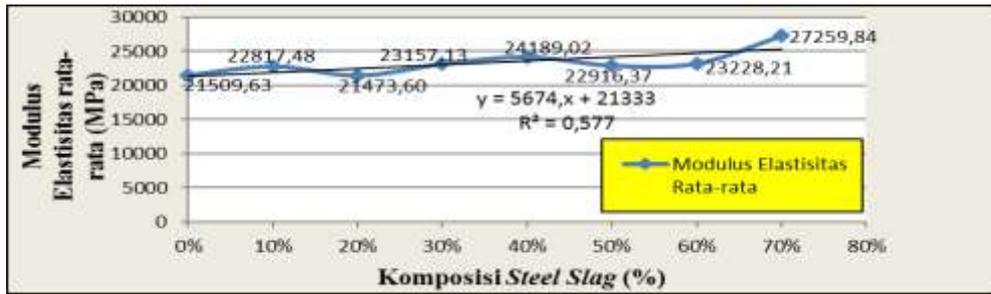
Gambar 6 Grafik Pengaruh Pertambahan *Steel slag* Terhadap Kuat Bentur (Iswardoyo,J, 2014a)



Gambar 7 Grafik Pengaruh Pertambahan *Steel slag* Terhadap Kuat Desak (Arifah, 2014)



Gambar 8 Grafik Pengaruh Pertambahan *Steel slag* Terhadap Daya Serap Air (Arifah, 2014)



Gambar 9 Grafik Pengaruh Pertambahan *Steel slag* Terhadap Modulus Elastisitas (Arifah, 2014)

Modulus elastisitas (E) merupakan perbandingan antara tegangan (σ) dan regangan aksial (ϵ) dalam deformasi yang elastis, sehingga modulus elastisitas menunjukkan kecenderungan suatu material untuk berubah bentuk dan kembali lagi ke bentuk semula bila diberi beban. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka suatu material semakin sedikit mengalami perubahan bentuk apabila menerima gaya atau kaku. Hal ini sangat dibutuhkan untuk *sabodam* yang mengalami pembebanan terus menerus akibat sedimen baik pasir, kerikil, *boulder* maupun batuan yang lebih besar lagi.

Untuk pembebanan abrasi, dalam pemanfaatan *steel slag* pada beton, dalam Ananto (2014), dijelaskan bahwa semakin besar komposisi *steel slag* menggantikan agregat kasar tidak berpengaruh dalam tingkat ketahanan abrasi beton seiring bertambahnya durasi pengujian yaitu 1 jam, 2 jam dan 3 jam. Uji ketahanan abrasi beton menghasilkan persamaan $y = -0,4378x + 420,6$ dengan nilai koefisien korelasi $R = 0,5240$ dan $R^2 = 0,27$, yang ditunjukkan pada Gambar 10. Artinya ada hubungan yang tidak kuat antara komposisi *steel slag* dengan ketahanan abrasi. Namun Wu.et.al (2016) menegaskan bahwa hasil pengujiannya menunjukkan bahwa penambahan *steel slag* dalam beton jelas dapat meningkatkan ketahanan abrasi. Dalam Gambar 11, Wu.et.al (2016) membuktikan bahwa kandungan yang optimal, yang menghasilkan abrasi minimal, adalah pada jumlah 45 % untuk beton usia 28, 56 dan 91 hari. Parameter daya tahan terhadap abrasi ini sangat dibutuhkan, untuk mengatasi gerusan pada permukaan akibat batuan. Proses abrasi ini akan mengikis permukaan beton sedikit demi sedikit, dan akhirnya bisa menyebabkan kerusakan. Hal ini didukung dengan penjelasan dari PAC (*Portland Cement Association*) pada tahun 2002, yang mengatakan bahwa salah satu kerusakan yang hampir pasti dialami oleh bangunan air adalah kerusakan akibat abrasi yang ditimbulkan oleh *silt*, pasir, kerikil, batuan, dan debris yang mengenai permukaan. Kerusakan dapat terjadi meskipun menimpa pada beton berkualitas tinggi. PAC juga menegaskan bahwa kerusakan abrasi pada bangunan air dapat

dikurangi dengan menggunakan beton yang kuat dengan agregat yang keras.

Sabodam direncanakan berdasarkan kriteria fungsi dan stabilitas dengan maksud pengendalian sedimen. Sedimen yang dikendalikan meliputi pasir, kerikil, sampai batuan besar. Dengan kondisi seperti ini, *sabodam* akan mengalami interaksi dengan batuan secara terus menerus pada lapisan luarnya. Interaksi tersebut dapat berupa, abrasi, benturan, dan kombinasi keduanya, yaitu, abrasi dan benturan. Dengan pemanfaatan *steel slag* pada beton luar diharapkan mampu mempunyai keawetan (*durability*) yang lebih dibandingkan dengan penggunaan kerikil sebagai agregat betonnya.

Lapisan Inti Tubuh *Sabodam*

Sabodam memegang peranan paling dominan dalam perencanaan sistem sabo, maka stabilitas *sabodam* adalah hal yang pokok. Analisis stabilitas *sabodam* sebenarnya serupa dengan dinding penahan tanah (*retaining wall*). Dinding penahan tanah merupakan bangunan yang memberi dukungan dalam arah lateral terhadap suatu beban tanah. Kestabilan dinding penahan tanah didapatkan dari berat sendiri, artinya sangat bergantung pada berat jenis dari material penyusunnya. Selain itu karena bagian belakang dinding penahan tanah juga miring, maka berat tanah juga menambah kestabilan (tekanan tanah pasif), sekaligus mengurangi kestabilan (tekanan tanah aktif). Demikian pula dengan *sabodam* dengan data teknis seperti Tabel 5, seperti diuraikan pada Gambar 12, *sabodam* juga menahan gaya lateral, yaitu tanah (P_s), air (P_w) dan lahar (F) seperti ditunjukkan dalam Gambar 12. Dari Gambar 12, dapat terlihat bahwa ketiga gaya ini berperilaku mendorong *sabodam* ke samping (dari hulu ke hilir). Untuk menahan ketiga gaya lateral ini, *sabodam* sangat bergantung pada air dan tanah yang di atasnya (P_{DV}) serta berat sendiri *sabodam* (W). Besarnya gaya yang harus didukung, dan *sabodam* sangat bergantung dari beratnya sendiri. Kondisi ini mengharuskan *sabodam* menjadi sangat besar dan berat. Hal ini dimaksudkan agar memenuhi faktor aman dari guling, geser dan daya dukung. Analisis stabilitas

yang dilakukan, yaitu; saat banjir biasa dan banjir lahar. Pembebanan diterapkan pada *sabodam* menggunakan batu belah dan *steel slag*. Analisis dilakukan dengan pedoman SNI 2851,

menggunakan empat skenario, dan diuraikan dalam Tabel 6 sampai Tabel 17, beserta pembahasannya.

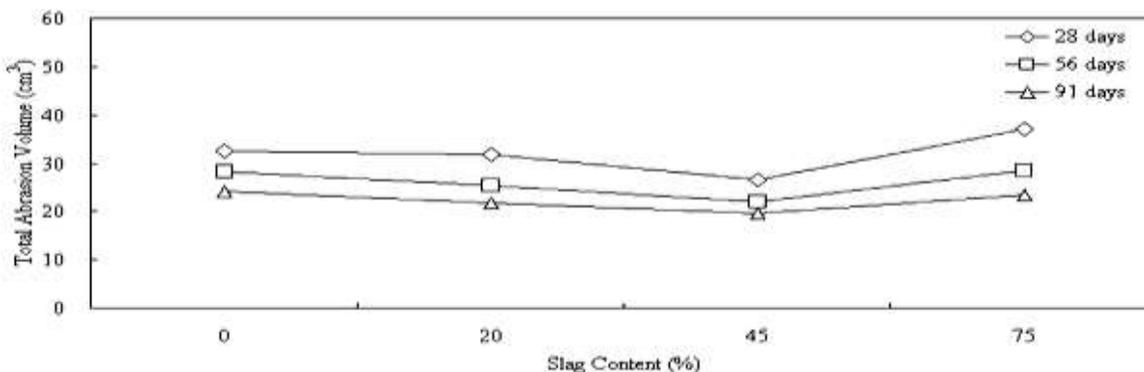
Tabel 4 Rekapitulasi Hasil Uji Beton

No.	Uji	Persamaan	R	R ²	Jumlah Contoh Uji	Interpretasi Korelasi
1	Kuat Tekan Bentur ***	$y = 0,005x^2 - 0,125x + 28,93$	0,926	0,86	8 buah	Kuat
2	Kuat Desak **	$y = 5,553x + 27,699$	0,647	0,42	8 buah	Kurang Kuat
3	Daya Serap Air **	$y = -2,1417x + 3,4372$	0,661	0,436	8 buah	Kurang Kuat
4	Modulus Elastisitas **	$y = 5674,4x + 21333$	0,759	0,58	8 buah	Cukup
5	Abrasi *	$y = -0,4378x + 420,6$	0,524	0,27	48 buah	Tidak Kuat

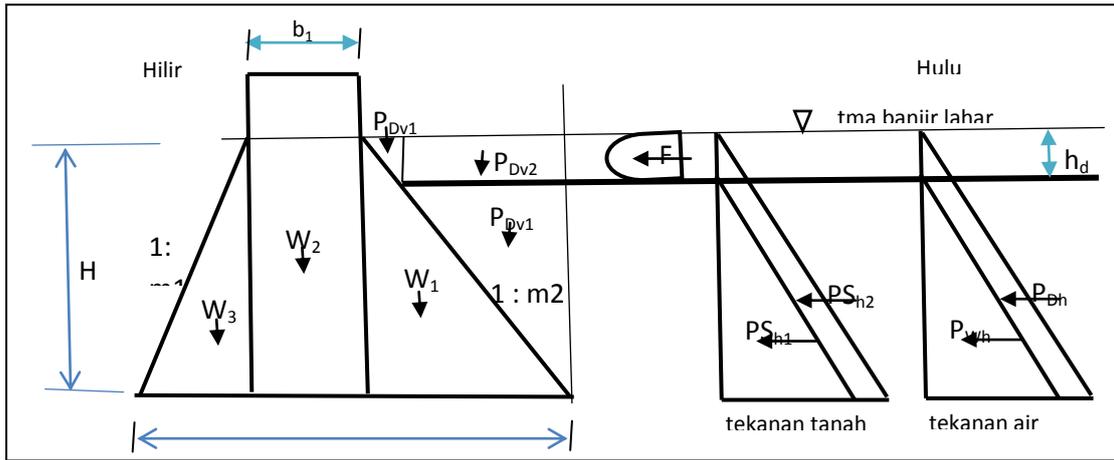
Sumber: diambil dari Ananto, 2014*, Arifah 2014**, Iswardoyo J., 2014a***

Tabel 5 Data Teknis Sabodam

Deskripsi	Notasi	PU-D1 (Mranggen)
Tinggi <i>sabodam</i> (m)	H	13,90
Tebal mercu (m)	b	3,00
Kemiringan hilir (l/m)	m1	0,20
Kemiringan hulu tubuh dam (l/m ₂)	m2	0,60
Kedalaman aliran lahar dari mercu (m)	hd	7,00
Berat volume aliran lahar (kN/m ³)	γ_{ad}	1,90
Berat volume material <i>sabodam</i> (kN/m ³) dengan batu belah	γ_{ma}	1,80
Berat volume material <i>sabodam</i> (kN/m ³) dengan beton <i>steel slag</i>	γ_{mb}	2,40
Lebar dasar <i>sabodam</i> (m)	b2	14,12
Koefisien geser dasar <i>sabodam</i>	f	0,60
Kecepatan aliran debris (m/s)	Vd	5,00
Berat jenis aliran mengandung sedimen	γ_{as}	0,96
Koefisien tekanan lateral tanah aktif ($\phi=32^0$)	Ka	0,30



Gambar 11 Hubungan antara abrasi volume dan prosentase kandungan slag (Wu.et.al, 2016)



Gambar 12 Mekanisme Tekanan pada Sabodam sewaktu Banjir Lahar

Adapun arti dari simbol dari Gambar 12 adalah sebagai berikut :

- W_1 = Berat sendiri *sabodam* sisi hulu kN/m²
- W_2 = Berat sendiri *sabodam* bagian tengah kN/ m²
- W_3 = Berat sendiri *sabodam* bagian hilir kN/ m²
- PDV_1 = Berat lahar yang membebani ke bawah kN/ m²
- PDV_2 = Berat lahar yang membebani ke bawah kN/ m²
- F = Tekanan aktif akibat lahar kN/ m²
- PSh_1 = Tekanan aktif tanah saat banjir biasa kN/ m²
- PSh_2 = Tekanan aktif tanah saat banjir lahar kN/ m²
- Pwh = Tekanan aktif air saat banjir biasa kN/ m²
- PDh = Tekanan aktif air saat banjir lahar kN/ m²
- m_1 = Kemiringan *sabodam* hilir m/m
- m_2 = Kemiringan *sabodam* hulu m/m
- b_1 = Lebar mercu *sabodam* m
- b_2 = Lebar dasar *sabodam* m
- H_d = Tinggi lahar dari mercu m
- H = Tinggi *sabodam* m

Tabel 6 Gaya Geser (V) dan Momen Pasif(Mp) untuk *Sabodam* dengan Batu Belah (Banjir Biasa)

Gaya Vertikal	Lengan Momen	Momen Pasif	V (kN)	L (Meter)	Mp(kNMeter)
W_1 $0,5 \times m_1 \times \gamma_{max} H^2$	L_1 $2/3 \times m_1 \times H$	$W_1 \times L_1$	34,78	1,85	64,45
W_2 $b \times H \times \gamma_{ma}$	L_2 $0,5 \times b + m_1 \times H$	$W_2 \times L_2$	75,06	4,28	321,26
W_3 $0,5 \times m_2 \times \gamma_{max} H^2$	L_3 $1/3 \times m_2 \times H + b + m_1 \times H$	$W_3 \times L_3$	104,33	8,56	893,09
PWv_1 $h_1 \times (b + m_2 \times H) \times \gamma_{as}$	L_4 $1/2 \times (b + m_2 \times H) + m_1 \times H$	$PWv_1 \times L_4$	47,63	8,45	402,46
PWv_2 $0,5 \times m_2 \times H^2 \times \gamma_{as}$	L_5 $m_1 \times H + b + 2/3 \times m_2 \times H$	$PWv_2 \times L_5$	69,56	11,34	788,76
Sub Total			331,35		2470,02

Tabel 7 Gaya Horisontal(H) dan Momen Guling (Mg) untuk *Sabodam* dengan Batu Belah (Banjir Biasa)

Gaya Horisontal	Lengan Momen	Momen Aktif	H (kN)	T (Meter)	Mg(kNMeter)
PWh_1 $\gamma_{as} x H \times h_1$	T_1 $0,5 \times H$	$PWh_1 \times T_1$	58,38	6,95	405,74
PWh_2 $0,5 \times \gamma_{as} x H^2$	T_2 $1/3 \times H$	$PWh_2 \times T_2$	115,9	3	537,12
Sub Total			174,3	1	942,86

Tabel 8 Analisis Stabilitas untuk Sabodam dengan Batu Belah (Banjir Biasa)

No.	Stabilitas	Formula	Notasi	Hasil	Faktor Keamanan	Kesimpulan
1	Guling	Mp/Mg	Fkguling	2,62	2,00	OK
2	Geser	(f x Vtot)/Htot	Fkgeser	1,27	1,20	OK
3	Daya Dukung Tanah	$e = (b_2/2) - (M_{ptot} - M_{gtot})/V_{tot}$	e	2,45	2,35	
		$q_{ult} = (\gamma_{ad}-1) \times H \times N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \times b_2 \times N_{\gamma}$ (Utk $\phi = 32^\circ$ maka $N_q = 23,18$ dan $N_{\gamma} = 30,22$) $= (\gamma_{ad}-1) \times H \times N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \times b_2 \times N_{\gamma}$ $= (1,9-1) \times 13,9 \times 23,18 + \frac{1}{2} \times 1,4 \times 14,12 \times 30,22$ $= 588,673$			588,673	
		$\sigma_1 = (V_{tot}/b_2) \times (1 + 6 \times e/b_2)$	α_1	49,59	588,673	
		$\sigma_2 = (V_{tot}/b_2) \times (1 - 6 \times e/b_2)$	α_2	-0,98	0,00	
		Daya Dukung = $q_{ult}/\sigma_1 = 588,673/49,59 = 11,871$	Fk daya dukung	11,871	3	OK

Tabel 9 Gaya Geser (V) dan Momen Pasif(Mp) untuk Sabodam dengan Batu Belah (Banjir Lahar)

Gaya Vertikal	Lengan Momen	Momen Pasif	V (kN)	L(Meter)	Mp (TonMeter)
W1 $0,5 \times m_1 \times \gamma_{max} H^2$	L1 $2/3 \times m_1 \times H$	W1 x L1	34,78	1,85	64,45
W2 $b \times H \times \gamma_{ma}$	L2 $0,5 \times b + m_1 \times H$	W2 x L2	75,06	4,28	321,26
W3 $0,5 \times m_2 \times \gamma_{ma} \times H^2$	L3 $1/3 \times m_2 \times H + b + m_1 \times H$	W3 x L3	104,33	8,56	893,09
PDv1 $0,5 \times \gamma_{ad} \times \gamma_{ma} \times hd^2$	L4 $m_1 \times H + b + 2/3 \times (m_2 \times hd)$	PDv1 x L4	27,93	8,58	239,64
PDv2 $hd \times m_2 \times (H - hd) \times \gamma_{ad}$	L5 $m_1 \times H + b + m_2 \times hd + 0,5 \times m_2 \times (H - hd)$	PDv2 x L5	55,06	12,05	663,50
PDv2 $0,5 \times m_2 \times (H - hd)^2 \times \gamma_s$	L6 $m_1 \times H + b + m_2 \times hd + 2/3 \times m_2 \times (H - hd)$	PDv1 x L5	17,14	12,74	218,36
Sub Total			314,30		2400,30

Tabel 10 Gaya Horisontal(H) dan Momen Guling (Mg) untuk Sabodam dengan Batu Belah (Banjir Lahar)

Gaya Horisontal	Lengan Momen	Momen Aktif	H (kN)	T(Meter)	Mg (kNMeter)
PDh $0,5 \times \gamma_{ad} \times hd^2$	T1 $H - (2/3 \times hd)$	PDh1 x T1	46,55	9,23	429,81
PWh $0,5 \times \gamma_a \times (H - hd)^2$	T2 $1/3 \times (H - hd)$	PWh x T2	23,81	2,30	54,75
PSh1 $hd \times \gamma_{ad} \times (H - hd) \times K_a$	T3 $0,5 \times (H - hd)$	PSh1 x T3	27,53	3,45	94,98
PSh2 $0,5 \times (\gamma_s - 1) \times (H - hd)^2 \times K_a$	T4 $(1/3) \times (H - hd)$	PSh2 x T4	1,43	2,30	3,29
F $\gamma_a \times (\gamma_{ad}/g) \times hd \times Vd^2$	T5 $H - 0,5 \times hd$	F x T5	33,89	10,40	352,50
Sub Total			133,21		935,33

Tabel 11 Analisis Stabilitas untuk *Sabodam* dengan Batu Belah (Banjir Lahar)

No	Stabilitas	Formula	Notasi	Hasil	Faktor Keamanan	Kesimpulan
1	Guling	Mp/Mg	Fkguling	2,57	2,00	OK
2	Geser	(f x Vtot)/Htot	Fkgeser	1,42	1,20	OK
3	Daya Dukung Tanah	$e = (b_2/2) - (M_{ptot} - M_{gtot})/V_{tot}$	e	2,40	2,35	
		$q_{ult} = (\gamma_{ad}-1) \times H \times N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \times b_2 \times N_{\gamma}$ (Utk $\phi = 32^0$ maka $N_q = 23,18$ dan $N_{\gamma} = 30,22$)			588,673	
		$\sigma_1 = (V_{tot}/b_2) \times (1 + 6 \times e/b_2)$	α_1	44,95	588,673	
		$\sigma_2 = (V_{tot}/b_2) \times (1 - 6 \times e/b_2)$	α_2	-0,43	0,00	
		Daya Dukung = $q_{ult} : \sigma_1 = 588,673/44,95 = 13,096$	Fk daya dukung	13,096	96	3

Tabel 12 Gaya Geser (V) dan Momen Pasif(Mp) untuk *Sabodam* dengan *Steel slag* (Banjir Biasa)

Gaya Vertikal	Lengan Momen	Momen Pasif	V(kN)	L(Meter)	Mp(kNMeter)
W1 $0,5 \times m_1 \times \frac{1}{2} m b \times H^2$	L1 $2/3 \times m_1 \times H$	W1 x L1	46,37	1,85	85,94
W2 $b \times H \times \frac{1}{2} m b$	L2 $0,5 \times b + m_1 \times H$	W2 x L2	100,08	4,28	428,34
W3 $0,5 \times m_2 \times \frac{1}{2} m b \times H^2$	L3 $1/3 \times m_2 \times H + b + m_1 \times H$	W3 x L3	139,11	8,56	1190,79
PWv1 $h_1 \times (b + m_2 \times H) \times \frac{1}{2} a s$	L4 $1/2 \times (b + m_2 \times H) + m_1 \times H$	PWv1 x L4	47,63	8,45	402,46
PWv2 $0,5 \times m_2 \times H^2 \times \frac{1}{2} a s$	L5 $m_1 \times H + b + 2/3 \times m_2 \times H$	PWv2 x L5	69,56	11,34	788,76
Sub Total			402,75		2896,29

Tabel 13 Gaya Horisontal(H) dan Momen Guling (Mg) untuk *Sabodam* dengan *Steel slag* (Banjir Biasa)

Gaya Horisontal	Lengan Momen	Momen Aktif	H(kN)	T(Meter)	Mg(kNMeter)
PWh1 $\frac{1}{2} a s \times H \times h_1$	T1 $0,5 \times H$	PWh1 x T1	58,38	6,95	405,74
PWh2 $0,5 \times \frac{1}{2} a s \times H^2$	T2 $1/3 \times H$	PWh2 x T2	115,93	4,63	537,12
Sub Total			174,31		942,86

Tabel 14 Analisis Stabilitas untuk *Sabodam* dengan *Steel slag* (Banjir Biasa)

No.	Stabilitas	Formula	Notasi	Hasil	Faktor Keamanan	Kesimpulan
1	Guling	Mp/Mg	Fkguling	3,07	2,00	OK
2	Geser	(f x Vtot)/Htot	Fkgeser	1,55	1,20	OK
3	Daya Dukung Tanah	$e = (b_2/2) - (M_{ptot} - M_{gtot})/V_{tot}$	e	2,21	2,35	
		$q_{ult} = (\gamma_{ad}-1) \times H \times N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \times b_2 \times N_{\gamma}$ (Utk $\phi = 32^0$ maka $N_q = 23,18$ dan $N_{\gamma} = 30,22$)			588,673	
		$\sigma_1 = (V_{tot}/b_2) \times (1 + 6 \times e/b_2)$	α_1	65,75	588,673	
		$\sigma_2 = (V_{tot}/b_2) \times (1 - 6 \times e/b_2)$	α_2	1,74	0,00	
		Daya Dukung = $q_{ult} : \sigma_1 = 588,673/65,75 = 8,956$	Fk daya dukung	8,956	8,956	3

Tabel 15 Gaya Geser (V) dan Momen Pasif(Mp) untuk Sabodam dengan Steel slag (Banjir Lahar)

Gaya Vertikal	Lengan Momen	Momen Pasif	V(kN)	L(Meter)	Mp(kNmeter)
W1 $0,5 \times m1 \times \frac{1}{2}mb \times H^2$	L1 $\frac{2}{3} \times m1 \times H$	W1 x L1	46,37	1,85	85,94
W2 $b \times H \times \frac{1}{2}mb$	L2 $0,5 \times b + m1 \times H$	W2 x L2	100,08	4,28	428,34
W3 $0,5 \times m2 \times \frac{1}{2}mb \times H^2$	L3 $\frac{1}{3} \times m2 \times H + b + m1 \times H$	W3 x L3	139,11	8,56	1190,79
PDv1 $0,5 \times \gamma d \times m2 \times hd^2$	L4 $m1 \times H + b + \frac{2}{3} \times (m2 \times hd)$	PDv1 x L4	27,93	8,58	239,64
PDv2 $hd \times m2 \times (H - hd) \times \gamma d$	L5 $m1 \times H + b + m2 \times hd + 0,5 \times m2 \times (H - hd)$	PDv2 x L5	55,06	12,05	663,50
PDv2 $0,5 \times m2 \times (H - hd)^2 \times \gamma s$	L6 $m1 \times H + b + m2 \times hd + \frac{2}{3} \times m2 \times (H - hd)$	PDv1 x L5	13,71	12,74	174,69
Sub Total			382,27		2782,90

Tabel 16 Gaya Horisontal(H) dan Momen Guling (Mg) untuk Sabodam dengan Steel slag (Banjir Lahar)

Gaya Horisontal	Lengan Momen	Momen Aktif	H(kN)	T(Meter)	Mg(kNmeter)
PDh $0,5 \times \gamma d \times hd^2$	T1 $H - \frac{2}{3} \times hd$	PDh1 x T1	46,55	9,23	429,81
PWh $0,5 \times ga \times (H - hd)^2$	T2 $\frac{1}{3} \times (H - hd)$	PWh x T2	23,81	2,30	54,75
PSh1 $hd \times \gamma d \times (H - hd) \times Ka$	T3 $0,5 \times (H - hd)$	PSh1 x T3	27,53	3,45	94,98
PSh2 $0,5 \times (gs - 1) \times (H - hd)^2 \times Ka$	T4 $(\frac{1}{3}) \times (H - hd)$	PSh2 x T4	-0,29	2,30	-0,66
F $\gamma a \times (\gamma d/g) \times hd \times Vd^2$	T5 $H - 0,5 \times hd$	F x T5	33,89	10,40	352,50
Sub Total			131,49		931,39

Tabel 17 Analisis Stabilitas untuk Sabodam dengan Steel slag (Banjir Lahar)

No.	Stabilitas	Formula	Notasi	Hasil	Faktor Keamanan	Kesimpulan
1	Guling	Mp/Mg	Fkguling	2,99	2,00	OK
2	Geser	$(f \times V_{tot})/H_{tot}$	Fkgeser	1,74	1,20	OK
3	Daya Dukung Tanah	$e = (b2/2) - (M_{ptot} - M_{gtot})/V_{tot}$	e	2,22	2,35	
		$q_{ult} = (\gamma_{ad}-1) \times H \times N_q + \frac{1}{2} \gamma_1 \times b_2 \times N_{\gamma}$			588,673	
		(Utk $\phi = 32^0$ maka $N_q = 23,18$ dan $N_{\gamma} = 30,22$)				
		$\sigma_1 = (V_{tot}/b2) \times (1 + 6 \times e/b2)$	α_1	52,57	588,673	
		$\sigma_2 = (V_{tot}/b2) \times (1 - 6 \times e/b2)$	α_2	1,57	0,00	
		Daya Dukung = q_{ult} : $\sigma_1 = 588,673/52,57 = 11,198$	Fk daya dukung	11,198	3	OK

Sebagai pembanding hasil penelitian ini, pada Tabel 18, Maslehuddin et al (2003). telah mencantumkan data percobaannya yang menunjukkan bahwa pemanfaatan *steel slag* untuk campuran beton, dapat memberikan dampak positif. Seiring bertambahnya rasio campuran *steel slag* pada beton maka kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik menjadi meningkat, sedangkan daya serap air menjadi semakin kecil, tegangan dan regangan juga semakin kecil. Hal ini mendukung bahwa pemanfaatan *steel slag* pada beton dapat dilakukan dan berdampak positif bagi kekuatan dan keawetan beton.

Hasil rekapitulasi analisis ditunjukkan pada Tabel 19. Dari Tabel 19 dapat dijelaskan bahwa, untuk *sabodam* dengan $h = 13,9$ m dan $b = 3$ m, didapatkan nilai faktor keamanan (F_k) terhadap guling, geser serta nilai σ_1 dan σ_2 untuk pemakaian batu belah pada kondisi banjir biasa sebesar 2,62; 1,27; 49,59 dan -0,98 sedangkan pada kondisi banjir lahar menjadi 2,57; 1,42; 44,95 kN/m², -0,43 kN/m², dan 13,096. Dengan menggunakan *steel slag* didapatkan nilai terhadap $F_{k_{guling}}$, $F_{k_{geser}}$ serta nilai σ_1 dan σ_2 dan $F_{k_{dayadukung}}$ masing masing sebesar 3,07; 1,55; 65,75 kN/m², 1, kN/m² dan 11,198. Dari nilai tersebut menunjukkan bahwa, untuk momen guling dan geser, kondisi *sabodam* lebih dari angka faktor keamanan minimal yaitu 2 untuk guling dan 1,2 untuk geser, artinya *sabodam* dalam keadaan aman. Pada perhitungan tegangan kontak tanah maksimum (σ_1) nilai yang didapatkan masih memenuhi persyaratan yaitu masuk di zona eksentrisitas yaitu 49,59 kN/m² dan 44,95 kN/m² pada batu belah baik pada kondisi banjir biasa dan banjir lahar. Namun untuk tegangan kontak tanah

minimum (σ_2), terdapat nilai negatif (warna kuning), yaitu -0,98 dan -0,43 kN/m² artinya titik eksentrisitas menjadi diluar kern, berarti terjadi tegangan tarik, sedangkan tanah tidak tahan terhadap tarik. Tegangan kontak merupakan tegangan reaksi pada tanah yang bersentuhan dengan pondasi terhadap beban yang dipikul. Ketika *sabodam* dibebani oleh beban eksentris maka tegangan kontak menjadi tidak merata, dan menurun secara linear dari tumit ke ujung. Dengan pemanfaatan *steel slag* pada *sabodam*, tegangan normal tanah maksimum (σ_1), nilai yang didapatkan menjadi lebih besar, dan masih memenuhi angka keamanan yaitu dibawah 100 kN/m², masuk di zona eksentrisitas yaitu 65,75 kN/m² dan 52,57 kN/m² baik pada kondisi banjir biasa dan banjir lahar. Untuk nilai tegangan normal tanah minimum (σ_2) yang didapatkan sebesar 1,74 kN/m² dan 1,57 kN/m² pada kondisi banjir biasa dan banjir lahar dan lebih besar dari 0 kN/m². Dari daya dukung, didapatkan hasil bahwa faktor keamanan daya dukung dari keempat skenario tersebut sebesar 11,871 ; 13,096 ; 8,956 ; 11,198. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *steel slag* dapat digunakan sebagai bahan bangunan *sabodam*, karena faktor keamanan daya dukung ($F_{k_{dayadukung}}$) yang diperoleh lebih dari 3, sehingga substitusi agregat batu belah dengan *steel slag* untuk *sabodam*, dapat dilakukan.

Permasalahan yang sering ditemukan di lapangan adalah keruntuhan yang terjadi akibat tergerusnya tanah pada hilir pondasi *sabodam*, yang diakibatkan penambangan ataupun kurangnya pasokan sedimen dari hulu.

Tabel 18 Hasil Percobaan Variasi Pengaruh Penggunaan *Steel slag* pada beton

No.	Test	45%	50%	55%	60%	65%
1	Kuat Tekan, Mpa	31,4	37,7	37,6	41,6	42,7
2	Kuat Lentur, Mpa	3,47	3,61	3,69	3,81	4,21
3	Kuat Tarik, Mpa	5,79	6,06	6,11	6,26	6,35
4	Daya Serap Air	4,51	4,33	3,89	3,71	3,64

Sumber: diambil dari M.Maslehuddin et al, 2003

Tabel 19 Rekapitulasi Simulasi untuk *Sabodam* dengan $h=13,9$ m dan $b=3$ m

Faktor Keamanan			Batu Belah		<i>Steel slag</i>	
Beban	Simbol	Nilai Batas	Banjir Biasa	Banjir Lahar	Banjir Biasa	Banjir Lahar
Guling	$F_{k_{guling}}$	2	2,62	2,57	3,07	2,99
Geser	$F_{k_{geser}}$	1,2	1,27	1,42	1,55	1,74
Tegangan Kontak (kN/m ²)	σ_1	357,301		44,95		52,57
		503,335	49,59		65,75	
	σ_2	0	-0,98	-0,43	1,74	1,57
Daya Dukung	$F_{k_{dayadukung}}$	3	11,871	13,096	8,956	11,198

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, dapat disampaikan bahwa secara umum beton berbahan *steel slag*, layak dimanfaatkan untuk pembuatan *sabodam*, baik untuk lapisan luar maupun lapisan inti. Adapun secara khusus dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *steel slag* akan membuat daya dukung tanah terhadap *sabodam* lebih aman. Berdasarkan hasil uji yang diperoleh diketahui bahwa 1) terjadi ketidakamanan untuk *sabodam* yang menggunakan batu belah, dikarenakan tegangan kontak minimum yang bernilai $-0,98 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir biasa) dan $-0,43 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir lahar) yang berarti terjadi tegangan tarik. 2) sedangkan *sabodam* dengan *steel slag* mempunyai tegangan kontak minimum yang bernilai $1,74 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir biasa) dan $1,57 \text{ kN/m}^2$ (untuk banjir lahar) yang berarti tidak terjadi tegangan tarik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananto, Y.Z.A. (2014). *Pengaruh Komposisi Steel slag Sebagai Substitusi Agregat Kasar Terhadap Ketahanan Abrasi Aliran Debris Pada Sabodam*. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Arifah, N. (2014). *Pengaruh Limbah Baja (Steel slag) Sebagai Pengganti Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton Sabodam*. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- BSN. (2015). *SNI 2851 Desain Bangunan Penahan Sedimen*.
- Chaurand, P. (2006). *Environmental impacts of steel slag reused in road construction: Acrytalographic and molecular (XANES) approach*. Journal of Hazardous Materials-5460.
- Iswardoyo, J. (2014a). *Penelitian Pengaruh Komposisi Steel slag Dalam Kekuatan Beton Menggunakan Uji Kuat Tekan Bentur*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil X-2014. Institut Teknik Surabaya, Surabaya.
- Iswardoyo, J. (2014b). *Perbaikan Struktur Sabodam dengan Memanfaatkan Steel slag (Limbah Baja)*. Kolokium Hasil Litbang Sumber Daya Air.
- Khan, R., and Shinde, S.B. (2013). *Effect of Unprocessed Steel slag on Shear Strength of Concrete when used as Fine Aggregate*. International Journal of IT, Engineering and Applied Sciences Research (IJIEASR) Volume 2, No. 4, April 2013.
- Leksminingsih. (2007). Pengaruh Pemberian Bahan Tambah Katalis Bekas (Spent Catalyst) dan Filler *Slag* terhadap Campuran beton Semen untu Perkerasan Jalan. Jurnal Jalan dan Jembatan Vol.24 No 2 Agustus.166-184
- Maslehuiddin, M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M., and Barry, M.S. (2003), *Comparison of properties of steel slag and crushed limestone agregate concretes, Construction and Building Materials 17(2003) 105-112, Elsevier* diunduh dari http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/43897540/Comparison_of_properties_of_steel_slag_a20160319-30440-vkicrg.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1473128331&Signature=Cp5RKKUsl5hZqF9yCpYktzY3tZ7o%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DCo%20mparison%20of%20properties%20of%20steel%20slag%20a.pdf
- Moenir, M. dan Handayani, N.I. (2012). *Recycling Limbah Padat Industri Peleburan Besi (Iron Slag) Sebagai Bahan Campuran Industri Beton Yang Berwawasan Lingkungan*. Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri. Semarang.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Andi. Yogyakarta.
- Portland Cement Association (2002). *Types and Causes of Concrete Deterioration*. Illinois, Unites States of America , diunduh dari http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is536-types-and-causes-of-concrete-deterioration.pdf?sfvrsn=4 ,
- PT Ispat Indo. (2008). *Aplikasi Pemanfaatan Steel Slag pada konstruksi Jalan, PT. Ispat Indo*. Sidoarjo.
- Sucofindo (2006) *Report of Anaysis, Characteristic Test of Hazardous Waste*, Sidoarjo, Jawa Timur
- Wang, G. and Thompson, R. (2011) *Slag Use in Highway Construction – the Philosophy and Technology of its Utilization*, International Journal of Pavement Research and Technology Vol 4. No 2. Mar 2011.
- Wu, C. H., Yen, T., Liu, Y. W., and Hsu, T. H. (---) *The Abrasion Erosion Resistance Of Concrete Containing Blast Furnace Slag*. Taiwan Power Company Report diunduh dari <http://www.nchu.edu.tw/~add/budget/student%20abroad/inter-meeting-94/T94-4-03.pdf>

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis haturkan kepada Allah swt, dan semua pihak yang telah membantu dalam tulisan ini terutama kepada Zardhan Azhari Yusuf Ananto, Normawati Arifah, dan teman – teman di Laboratorium Sabo, Balai Litbang Sabo, Puslitbang SDA, Balitbang PUPR, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.