

PEMANFAATAN SEMEN PORTLAND SLAG UNTUK MENINGKATKAN SIFAT MEKANIK DAN DURABILITAS BETON

The Effect of Portland Slag Cement on Mechanical Properties and Durability of Concrete

N. Retno Setiati¹, Hanna Abdul Halim²

^{1,2} Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Litbang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jalan A.H. Nasution No. 264 Ujungberung Bandung
Surel :¹retno.setiati@pusjatan.pu.go.id; ²hanna.abdul@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 23 Maret 2018

Disetujui: 24 Agustus 2018

Abstrak

Berbagai penelitian terkait pembuatan rancangan campuran beton dengan menggunakan limbah slag mengalami perkembangan yang pesat. Dalam perkembangannya, slag yang merupakan produk limbah dapat digunakan sebagai material pembentuk beton (baik sebagai agregat halus, agregat kasar, maupun semen). Semen slag merupakan jenis semen portland yang memanfaatkan slag dari industri baja sebagai salah satu bahan bakunya. Dalam proses produksinya, semen slag menghasilkan emisi CO₂ yang rendah sehingga sangat ramah lingkungan dan layak disebut sebagai jawaban untuk konstruksi yang berkelanjutan (sustainable). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan semen slag terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton dengan komposisi yang digunakan sebesar 100% semen slag. Material semen slag yang digunakan terdiri dari tipe LH (low heat) dan general. Pembuatan rancangan campuran beton mengacu pada SNI 03-2834-2000 (Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal), pengujian sifat mekanik beton mengacu pada SNI 1974-2011 (Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder) dan SNI 4431-2011 (Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan). Uji resistivity dan permeabilitas dilakukan untuk mengetahui durabilitas beton. Dari hasil uji laboratorium diperoleh bahwa terdapat peningkatan kuat tekan, kuat lentur dan durabilitas beton pada umur di atas 56 hari. Beton dengan penggunaan 100% semen slag tipe LH kuat tekannya lebih besar 15% dari beton konvensional. Untuk beton dengan menggunakan 100% semen slag tipe general kuat lenturnya lebih besar 15,60% dari beton konvensional. Nilai resistivity beton dengan semen slag tipe LH adalah 59 KΩcm dan beton konvensional sebesar 14 KΩcm, artinya bahwa beton dengan semen slag tipe LH lebih tahan empat kali terhadap laju korosi dari beton konvensional. Berdasarkan hasil uji permeabilitas, beton dengan semen slag tipe LH dan general mempunyai nilai permeabilitas dengan kualitas baik dan nilai indeks 2, karena berada dalam rentang KT (0,01 – 0,1) x 10⁻¹⁶ m². Sedangkan beton konvensional nilai permeabilitasnya berada dalam kelas normal dengan indeks 3 karena berada dalam rentang KT (0,1 – 1,0) x 10¹⁶ m².

Kata Kunci: Semen portland slag, kuat tekan, kuat lentur, durabilitas, permeabilitas

Abstract

The studies related to the concrete mixtures using slag have developed rapidly. In its development, the slag which is a waste product can be used as a concrete-forming material (either as fine aggregate, coarse aggregate, or cements). Slag cement is a type of portland cement that utilizes slag from the steel industry as one of its raw materials. In its production process, slag cement produces low CO₂ emissions so it is environmentally friendly and deserves to be called the answer for sustainable construction. This study aims to determine the effect of the use of slag cement on mechanical properties and the durability of concrete with the composition used for 100% slag cement. The slag cement materials used consist of LH (low heat) type and general. Preparation of concrete mixture design refers to SNI 03-2834-2000 (Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal), testing of the mechanical properties of concrete refers to SNI 1974-2011 (Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder) and SNI 4431-2011 (Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan). Resistivity and permeability tests were performed to determine the durability of concrete. Base on the laboratory results obtained that there is an increase in compressive strength, flexural strength and durability of concrete at age above 56 days. Concrete with the use of 100% slag type LH, the compressive strength greater than 15% of conventional concrete. For concrete with 100% slag cement type general, the flexural strength is greater than 15.60% of conventional concrete. The concrete resistivity value with LH type slag is 59 KΩcm and conventional concrete is 14 KΩcm,

meaning that concrete with LH type slag cement is more resistant four times to the corrosion rate of conventional concrete. Based on the results of permeability test, concrete with LH and general slag type cement has a good quality permeability value and index value 2, because it is in the range of $KT (0.01 - 0.1) \times 10^{-16} m^2$. While the conventional concrete permeability value is in normal class with index 3 because it is in the range of $KT (0.1 - 1.0) \times 10^{-16} m^2$.

Keywords : Portland slag cement, compressive strength, flexural strength, durability, permeability

PENDAHULUAN

Penggunaan limbah sebagai material pembentuk beton adalah salah satu upaya untuk membuat sarana infrastruktur jalan dan jembatan yang berwawasan lingkungan. Perkembangan ilmu pengetahuan di bidang teknologi beton memungkinkan penggunaan limbah menjadi bahan dasar pembentuk beton, sehingga di satu sisi penggunaan bahan alam yang merusak lingkungan dapat diatasi dan di sisi lain bahan limbah dimanfaatkan seoptimal mungkin untuk bahan dasar pembentuk beton. Slag yang merupakan hasil residu pembakaran tanur tinggi dari proses peleburan baja adalah salah satu limbah yang secara fisik menyerupai agregat kasar. Seiring dengan perkembangan teknologi sampai saat ini sudah dihasilkan semen *Portland slag* (Badan Standardisasi Nasional 2016). Semen ini mengandung Silika (Si) dan Ferro (Fe) yang merupakan unsur dominan. Unsur Silika sangat berperan dalam memperbaiki interface antara agregat dengan campuran pasta.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan semen *Portland slag* terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton. Beton yang dibuat dari komposisi semen *Portland slag* dibandingkan karakteristiknya terhadap beton konvensional, yaitu beton dengan semen tipe PCC (*Portland Composite Cement*). Lingkup penelitian dibatasi untuk penggunaan semen slag tipe LH (*Low Heat*) dan *general*. Sifat mekanik dan durabilitas beton dengan semen *Portland slag* akan dibandingkan terhadap beton konvensional yang menggunakan tipe semen PCC (*Portland Composite Cement*).

Pemanfaatan bahan limbah untuk hal yang berguna adalah salah satu cara terbaik untuk mengatasi masalah lingkungan. Bukan hanya mengurangi kerusakan dampak lingkungan tapi juga menjadi alternatif penggunaan bahan yang masih lazim digunakan. Berbagai penelitian dan percobaan di bidang beton dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan kualitas beton. Teknologi bahan dan teknik pelaksanaan yang diperoleh dari hasil penelitian dan percobaan tersebut dimaksudkan untuk menjawab tuntutan yang semakin tinggi terhadap pemakaian beton serta mengatasi masalah-masalah yang sering terjadi pada saat pengerjaan di lapangan.

Slag adalah limbah padat yang berasal dari proses peleburan baja. *Slag* dihasilkan dari proses pemisahan cairan baja dari bahan pengotornya pada tungku-tungku baja (Rosiana, Kurniawandy, dan Djauhari 2016). Bila dilihat dari bentuk fisiknya, slag menyerupai agregat alam yang digunakan sebagai campuran dalam pembuatan beton. Terak baja (*steel slag*) dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus maupun agregat kasar dalam beton. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Subathra Devi dan Gnanavel 2014), beton dengan substitusi 40% terak baja pada agregat halus mempunyai kehilangan berat yang sangat rendah dibandingkan beton konvensional setelah direndam dalam larutan H_2SO_4 . Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan penambahan terak baja sebagai agregat halus lebih tahan terhadap serangan sulfat. Selain digunakan sebagai pengganti agregat kasar maupun agregat halus, slag dapat diproduksi sebagai semen *Portland slag*. Menurut Karolina dan Putra (2018) faktor-faktor untuk menentukan sifat *cementitious* dalam *slag* adalah komposisi kimia, konsentrasi alkali dan reaksi terhadap sistem, kandungan kaca dalam *slag*, kehalusan, dan temperatur yang ditimbulkan selama proses hidrasi berlangsung. Hasil pengujian komposisi kimia dan fisika semen *Portland slag* tipe LH dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

Berdasarkan Tabel 1. hasil pengujian semen slag tipe LH, kandungan senyawa kalsium oksida (CaO) memberikan bobot persentase yang paling dominan (51,68%). Kalsium oksida atau batu kapur merupakan bahan kunci untuk proses pembuatan semen ("Slag Cement (Low Heat) Certificate (2)-PT. Indocement.pdf," n.d.).

Dari Tabel 2 menunjukkan bahwa hasil uji fisik semen *Portland slag* tipe LH memenuhi standar spesifikasi sebagaimana disyaratkan dalam SNI 8363:2017 (semen *portland slag*) (Badan Standardisasi Nasional 2017, 2014). Tipe semen slag lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe *general*. Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan komposisi kimia dan sifat fisik dari semen *Portland slag* tipe *general*.

Komposisi kalsium oksida (CaO) dalam semen *Portland slag* tipe *general* adalah 52,95% (Tabel 3) dan merupakan unsur senyawa yang paling dominan. Menurut (ASTM C618 1993), material dengan

komposisi kimia Silika (SiO₂), Ferri oksida (Fe₂O₃) dan Alumina (Al₂O₃) lebih kecil dari 70%, dapat digunakan sebagai bahan semen pada campuran beton. Komposisi kimia semen *Portland* slag tipe LH terdiri dari silika 29,59%,

Ferri Oksida 2,59% dan Alumina 10,05%. Untuk tipe *general* komposisi kimia terdiri dari Silika 28,59%, Ferri Oksida 2,28% dan Alumina 9,77%. Hasil pengujian kimiawi semen *Portland* slag tipe LH dan tipe *general* menunjukkan komposisi yang lebih kecil dari 70%.

Beberapa komposisi kimia dan sifat fisik semen *Portland* slag sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1 sampai dengan Tabel 4 antara tipe LH dan tipe *general* tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, kecuali pada saat terjadinya proses pengikatan awal dan akhir. Laju hidrasi beton dengan menggunakan semen slag sangat tergantung pada komposisi perbandingan air dan semen tersebut (fas) dari campuran beton (Castellano et al. 2016).

Waktu pengikatan awal dan pengikatan akhir untuk tipe *general* lebih cepat dibandingkan tipe LH. Selisih antara waktu ikat awal dan waktu ikat akhir pada tipe

Tabel 1 Komposisi Kimia Semen Portland Slag Tipe LH

No.	Komposisi kimia	Nama Senyawa Kimia	Metode Uji	Spesifikasi SNI 8363:2017	Hasil Uji
1.	SiO ₂	<i>Silicon dioxide</i>	XRF		29,59%
2.	Al ₂ O ₃	<i>Aluminium oxide</i>	XRF		10,05%
3.	Fe ₂ O ₃	<i>Ferric oxide</i>	XRF		2,59%
4.	CaO	<i>Calcium oxide</i>	XRF		51,68%
5.	MgO	<i>Magnesium oxide</i>	XRF		2,11%
6.	SO ₃	<i>Sulfur trioxide</i>	XRF	Maks. 3%	2,31%
7.	S ²⁻	<i>Sulfide</i>	SNI 2049 : 2015	Maks. 2%	0,22%
8.	LOI	<i>Loss on Ignition</i>	SNI 2049 : 2015	Maks. 3%	0,21%
9.	IR	<i>Insoluble Residue</i>	SNI 2049 : 2015	Maks. 1%	0,95%
10.	f-CaO	<i>Free Lime</i>	ASTM STP 985		0,18%
11.	As Na ₂ O	<i>Total Alkalies</i>			0,44%
12.	Cr ⁶⁺	<i>Chromium Hexavalent</i>	Spectro UV-Vis		0,52%

Sumber: PT. Indocement, 2017

Tabel 2 Sifat Fisik Semen *Portland Slag* Tipe LH

No.	Sifat Fisik	Satuan	Metode Uji	Spesifikasi SNI 8363:2017	Hasil Uji
1.	Kadar udara dalam mortar	%		Maks. 12	5,4
2.	Kehalusan dengan alat <i>Blaine</i>	m ² /kg			388
3.	Residu 45 µm	%			5,9
4.	Kekekalan, pemuaiian dengan <i>Autoclave</i>	%		Maks. 0,80	0,00
5.	Susut, 28 hari	%		Maks. 0,15	0,08
6.	Kuat tekan:				
	- 3 hari	Kg/cm ²		-	107
	- 7 hari	Kg/cm ²		Min. 110	161
	- 28 hari	Kg/cm ²	SNI 2049:2015	Min. 210	358
7.	Konsistensi normal	%			26,13
8.	Waktu pengikatan dengan alat <i>vicat</i> :				
	- Pengikatan awal	Menit		Min. 45	260
	- Pengikatan akhir	Menit		Maks. 420	384
9.	Pengikatan semu	%			87
10.	Panas hidrasi:				
	- 7 hari	Cal/gr		Maks. 60	50
	- 28 hari	Cal/gr		Maks. 70	57

Sumber: PT. Indocement, 2017

general juga lebih cepat dari tipe LH. Menurut Takehisa (2017), lambatnya pencapaian kuat tekan awal beton yang dibuat dengan menggunakan semen slag dapat diantisipasi melalui proses *curing* dengan suhu di atas 20°C.

Semen Portland slag yang digunakan untuk menggantikan semen berfungsi menghambat proses hidrasi dan mencegah terjadinya muai susut beton sehingga dapat memperbaiki kinerja beton. Beton yang dibuat dari semen dengan kandungan slag (35-40)% dapat meningkatkan resistensi terhadap silika alkali, mengurangi masuknya ion klorida, dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi (Saranya, Nagarajan, dan Shashikala 2018).

Keuntungan lain adalah harga beton menjadi lebih murah dikarenakan penggunaan semen *Portland* slag

dapat mengurangi penjumlahan konsumsi semen (Awoyera et al. 2016). Pengurangan jumlah konsumsi semen akan berdampak pada pengurangan energi dalam proses pembuatan semen sehingga polusi gas CO₂ dapat direduksi. Berdasarkan hal tersebut, penggunaan semen *Portland* slag sebagai bahan pembuat beton sejalan dengan penerapan teknologi material yang berkelanjutan (*sustainable material technology*).

Kushartomo dan Supiono (2014) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa *copper slag* bisa dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen (*cementitious*) tetapi materialnya harus dihaluskan hampir seperti semen agar didapatkan hasil yang optimum. *Copper slag* yang digunakan sebagai semen dapat meningkatkan sifat mekanik (kuat tekan dan lentur) beton, meningkatkan ketahanan terhadap

Tabel 3 Komposisi Kimia Semen *Portland Slag* Tipe General

No.	Komposisi Kimia	Nama Senyawa Kimia	Metode Uji	Spesifikasi SNI 8363:2017	Hasil Uji
1.	SiO ₂	<i>Silicon dioxide</i>	XRF		28,59%
2.	Al ₂ O ₃	<i>Aluminium oxide</i>	XRF		9,77%
3.	Fe ₂ O ₃	<i>Ferric oxide</i>	XRF		2,28%
4.	CaO	<i>Calcium oxide</i>	XRF		52,95%
5.	MgO	<i>Magnesium oxide</i>	XRF		2,19%
6.	SO ₃	<i>Sulfur trioxide</i>	XRF	Maks. 3%	2,38%
7.	LOI	<i>Loss on Ignition</i>	ASTM C 114	Maks. 3%	0,59%
8.	IR	<i>Insoluble Residue</i>	ASTM C 114	Maks. 1%	0,38%
9.	F-CaO	<i>Free Lime</i>	ASTM STP 985		0,31%
10.	As Na ₂ O	<i>Total Alkalies</i>			0,45%

Sumber: PT. Indocement, 2018 (Pusajatan dan Indocement 2018)

Tabel 4 Sifat Fisik Semen *Portland Slag* Tipe General

No.	Sifat fisik	Satuan	Metode Uji	Spesifikasi SNI 8363:2017	Hasil Uji
1.	Kehalusan dengan alat <i>Blaine</i>	m ² /kg	ASTM C 204		391
2.	Kekekalan, pemuaiian dengan <i>Autoclave</i>	%	ASTM C 151	Maks. 0,80	0,06
3.	Kuat tekan:				
	- 1 hari	Kg/cm ²	ASTM C 109		56
	- 3 hari	Kg/cm ²	ASTM C 109	Min. 130	141
	- 7 hari	Kg/cm ²	ASTM C 109	Min. 200	210
	- 28 hari	Kg/cm ²	ASTM C 109	Min. 250	364
4.	Waktu pengikatan dengan alat <i>vicat</i> :				
	- Pengikatan awal	Menit	ASTM C 191	Min. 45	173
	- Pengikatan akhir	Menit	ASTM C 191	Maks. 420	247
5.	Pengikatan semu	%	ASTM C 451		76
6.	Konsistensi normal	%	ASTM C 187		25,09

Sumber: PT. Indocement, 2018

sulfat dalam air laut, mengurangi panas hidrasi, dan memperkecil porositas. Sifat dan karakteristik semen *Portland* slag berbeda dengan semen tipe PCC (*Portland Composite Cement*). Kadhafi (2015) dalam penelitiannya membuat beton normal dengan menggunakan *copper slag* sebagai bahan substitusi semen. Persentasi *copper slag* yang ditambahkan ke dalam campuran beton sebesar 10%, 15%, 20%, dan 30%. Peningkatan kuat tekan secara signifikan terjadi pada beton dengan penambahan 25% *copper slag*.

Bonavetti et al. (2014) dalam penelitian yang dilakukannya menyebutkan bahwa semen biner yang mengandung silika fume dan slag dapat meningkatkan tingkat hidrasi pada usia dini dan pada usia lanjut, sebagian besar semen yang diteliti memiliki kekuatan yang setara atau lebih besar daripada yang diperoleh di semen *Portland* polos.

Semen PCC (*Portland Composite Cement*) atau semen *Portland composite*, adalah semen *Portland* yang masuk kedalam kategori *blended cement* atau semen campur. Menurut SNI 15-7064-2004, semen *Portland* campur adalah bahan pengikat hidrolisis hasil penggilingan dengan terak (*clinker*) semen *Portland* dan *gibs* dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen *Portland* dengan bubuk bahan anorganik lain (Badan Standardisasi Nasional 2004b, 2004a). Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blastfurnace slag*), pozzoland, senyawa silika, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik antara (6 - 35%) dari massa semen *Portland composite*. Menurut Standard Eropa DIN EN 197-1 *Portland Composite Cement* atau Semen *Portland* Campur dibagi menjadi 2 tipe (berdasarkan jumlah aditif material aktif), yaitu tipe I/A-M mengandung (6 - 20%) aditif dan tipe II/B-M mengandung (21 - 35%) aditif (EN 197-1 2011). Bahan-bahan anorganik pada semen PCC merupakan bahan-bahan mineral yang memiliki sifat pozzolonik atau memiliki sifat pozzolan yaitu bahan-bahan mineral yang unsur-unsurnya tidak memiliki sifat semen secara mandiri, namun bila bereaksi dengan kalsium oksida dan air pada temperatur biasa, bisa membentuk senyawa yang mempunyai ciri-ciri semen PCC. Semen PCC merupakan salah satu jenis produk semen yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan khusus, baik pada aspek teknis maupun pada aspek biaya yang tidak bisa dipenuhi oleh semen *Portland* biasa (OPC). Kadar silika yang tinggi dari bahan pozzolan tersebut akan menyebabkan jenis semen ini agak lambat mengeras dan panas hidrasinya rendah, namun kekuatan beton masih dapat meningkat lagi secara signifikan pada umur 28 hari. Walaupun kekuatan awalnya relatif rendah, namun dengan perawatan yang baik dan teratur bisa

menghasilkan kekuatan akhir yang tidak jauh berbeda dengan penggunaan semen *Portland* normal. Disamping itu, karena sifat pozzolan yang mampu mengikat kalsium-hidroksida, maka kekuatan beton yang dihasilkan terhadap korosi sulfat juga akan menjadi lebih baik. Demikian pula terhadap pengaruh reaksi alkali agregat, semen PCC pada umumnya menunjukkan ketahanan yang lebih baik dibandingkan semen *Portland* biasa pada kondisi tertentu. Karena sifat-sifat tersebut maka PCC dapat digunakan pada bangunan-bangunan yang memiliki massa besar seperti dam, atau komponen pondasi yang memiliki volume besar dan dengan kondisi air tanah yang korosif atau juga untuk bangunan sipil pada lingkungan yang agresif sulfat seperti dermaga dan bangunan-bangunan lain yang mengkondisikan panas hidrasi rendah dan tidak memerlukan kekuatan awal beton yang tinggi. Penggunaan semen *Portland* komposit dapat digunakan untuk konstruksi umum seperti pekerjaan beton, pemasangan bata, selokan, jalan, pagar dinding, dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, panel beton, bata beton, dan sebagainya. Komposisi kimia dari semen PCC terdapat dalam SNI 15-2049-2015 (Badan Standardisasi Nasional 2015). Tabel 5 menunjukkan sifat fisik dari semen PCC. Pada semen PCC, komposit kandungan SO₃ maksimum 4,0%.

Tabel 5 Sifat Fisik Semen PCC

No.	Sifat Fisik	Satuan	Peryaratan
1.	Kehalusan dengan alat <i>Blaine</i>	m ² /kg	Min. 280
2.	Kekekalan, pemuaiian dengan <i>Autoclave</i>	%	Maks. 0,8
3.	Kekekalan, penyusutan dengan <i>Autoclave</i>	%	Maks. 0,2
3.	Kuat tekan:		
	- 3 hari	Kg/cm ²	Min. 125
	- 7 hari	Kg/cm ²	Min. 200
	- 28 hari	Kg/cm ²	Min. 250
4.	Waktu pengikatan dengan alat vicat:		
	- Pengikatan awal	Menit	Min. 45
	- Pengikatan akhir	Menit	Min. 375
5.	Pengikatan semu	%	Min. 50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% dari volume	Maks. 12

Sumber: (SNI 15 - 2049 -2015)

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, beton yang menggunakan semen *Portland slag* mempunyai durabilitas yang sangat baik. Menurut penelitian Wang dan Luan (2018) slag dapat meningkatkan kekuatan beton pada usia lanjut akan tetapi menghambat kekuatan beton pada usia

dini. Untuk itu diperlukan penambahan material lain yang dapat mempercepat terjadinya proses hidrasi awal. Pengujian permeabilitas beton dilakukan untuk mengetahui tingkat durabilitas dari beton tersebut. Permeabilitas beton adalah kemudahan beton untuk dapat dilalui air. Jika beton tersebut dapat dilalui air, maka beton tersebut dikatakan permeabel. Jika sebaliknya, maka beton tersebut dikatakan impermeabel. Maka sifat permeabilitas yang penting pada beton adalah permeabilitas terhadap air. Nilai permeabilitas beton tergantung dari faktor air semen (Yang et al. 2018). Untuk mengetahui dan mengukur permeabilitas beton perlu dilakukan pengujian. Uji permeabilitas ini terdiri dari dua macam: uji aliran (*flow test*) dan uji penetrasi (*penetration test*). Uji yang pertama digunakan untuk mengukur permeabilitas beton terhadap air bila ternyata air dapat mengalir melalui sampel beton. Uji penetrasi digunakan jika dalam percobaan permeabilitas tidak ada air yang mengalir melalui sampel. Dari data yang dihasilkan oleh uji permeabilitas ini dapat ditentukan koefisien permeabilitas, suatu angka yang menunjukkan kecepatan rembesan fluida dalam suatu zat (Bungey, Milard, dan Grantham 1982). Wirma, Kurniawandy, dan Ermiyaty (2016) melakukan penelitian uji permeabilitas beton dengan penambahan 30% *steel slag* sebagai substitusi bahan agregat halus. Berdasarkan hasil pengujian laboratorium diperoleh angka permeabilitas beton dengan *steel slag* lebih kecil 33% dari beton tanpa *steel slag*. Artinya bahwa beton dengan penambahan *steel slag* lebih kedap terhadap air.

Uji *resistivity* dilakukan untuk mengetahui ketahanan beton terhadap laju korosi. Laju korosi dapat didefinisikan sebagai besarnya kehilangan berat bahan persatuan waktu. Satuan laju korosi yang digunakan adalah *mils per years* (mpy), *millimeter per years* (mmpy) dan *micrometer per years* (μ mpy). Dengan asumsi bahwa serangan korosi terjadi secara merata, maka laju korosi dapat dinyatakan sebagai laju penetrasi atau kehilangan ketebalan per satuan waktu. Menurut Vijayagowri, Sravana, dan Rao (2015) laju korosi merupakan salah satu parameter untuk mengetahui tingkat ketahanan beton terhadap serangan lingkungan yang agresif. Proses muai susut pada beton akibat temperatur maupun beban yang bekerja dapat menyebabkan terjadinya retak mikro dan perubahan volume beton.

METODE

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi eksperimental di laboratorium. Kegiatan pengujian yang dilakukan adalah pembuatan rancangan campuran beton yang mengacu pada SNI 03-2834-2000 (Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal).

Pengujian sifat mekanik dilakukan pada umur 7, 14, 28, 56, dan 90 hari (Badan Standardisasi Nasional 2000). Untuk pengujian kuat tekan beton, dibuat benda uji silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Jumlah benda uji untuk masing-masing pengujian kuat tekan pada umur tertentu sebanyak (2-3) silinder. Variasi komposisi rancangan campuran terdiri dari beton konvensional (menggunakan semen PCC), beton *slag* dengan tipe LH, dan beton *slag* dengan tipe *general*. Agregat halus yang digunakan berupa pasir vulkano eks Muntilan dan untuk agregat kasar menggunakan batuan pecah yang berasal dari Purworejo. Pengujian kuat lentur balok dilakukan pada umur 14, 28, dan 56 hari. Metode uji lentur mengacu ke SNI 03-4431-2011 (Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan)(Badan Standardisasi Nasional 2011).

Untuk mengetahui durabilitas beton dilakukan uji permeabilitas dan *resistivity*. Uji permeabilitas dilakukan pada beton umur 56 hari, sedangkan uji *resistivity* dilakukan pada beton umur 7, 14, 28, 56, dan 90 hari. Pengujian *resistivity* adalah properti material yang tidak bergantung pada geometri spesimen dan konfigurasi elektroda. Namun, resistivitas ditentukan berdasarkan uji listrik ketahanan material. Adanya retak dalam struktur mikro beton dapat mengubah sifat aliran gelombang listrik dari beton sehingga pengujian *resistivity* dapat digunakan untuk mendeteksi dan memantau inisiasi dan propagasi retakan dalam beton (Layssi et al. 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum dibuat rancangan campuran beton, semua komponen material pembentuk beton diuji terlebih dahulu. Dalam rancangan campuran beton, kuat tekan rata-rata yang ditargetkan pada umur 28 hari adalah 35 MPa. Jumlah komposisi agregat kasar, agregat halus, semen, dan air masing-masing adalah 40%, 33%, 18%, dan 9% dari volume beton. Komposisi campuran untuk beton yang menggunakan semen PCC dapat dilihat dalam Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6, jumlah komposisi agregat kasar, agregat halus, semen, dan air masing-masing adalah 953,60 kg (40% dari volume beton); 780,20 kg (33% dari volume beton); 436,17 kg (18% dari volume beton), dan 205,00 kg (9% dari volume beton). Jumlah komposisi semen PCC sama dengan komposisi semen *Portland slag* tipe LH dan *general*, yaitu 436,17 kg untuk setiap volume beton. Setelah dilakukan pengecoran, kemudian beton segar dimasukkan dalam cetakan silinder berukuran 100 mm x 200 mm. Setelah 24 jam, dilakukan proses perawatan basah (perendaman di dalam air). Dari hasil uji laboratorium, beton segar dengan semen *Portland slag* memiliki sifat dan karakteristik yang

Tabel 6 Komposisi Campuran Beton

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan yang disyaratkan / <i>Specified compressive strength</i>	30	MPa
2	Jenis benda uji / <i>Type of specimen</i>	Silinder / <i>cylinder</i>	
3	Deviasi standar / <i>Standard deviation</i>	3	MPa
4	Faktor pengali standar deviasi	-	
5	Nilai tambah / <i>margin</i>	5	MPa
6	Kekuatan tekan rata-rata yang ditargetkan / <i>target strength</i>	35	MPa
7	Jenis semen / <i>type of cement</i>	PCC	
8	Jenis agregat / <i>type of aggregates</i> : kasar / <i>coarse</i>	Batu pecah / <i>crushed rock</i>	
9	Halus / <i>Fine</i>	Pasir alam / <i>natural sand</i>	
10	Faktor air-semen bebas / W.C.F	0.47	
11	<i>Slump</i>	60-180	mm
12	Ukuran agregat maksimum / <i>max. aggregate size</i>	20	mm
13	Kadar air bebas / <i>free water content</i>	205	Kg/m ³
14	Jumlah Sementitious / <i>amount of cementitious</i>	436,17	Kg/m ³
15	Susunan besar butir agregat halus / <i>fine aggregate composition graph</i>	No. 2	
16	Modulus kehalusan agregat halus / <i>fineness modulus of fine aggregate</i>	2,69	
17	Persen agregat halus / <i>Percentage of Fine Aggregate</i>	45	%
18	Berat jenis agregat kasar (JKP) / <i>specific gravity of coarse aggregate (SSD)</i>	2,53	
19	Berat jenis agregat halus (JKP) / <i>specific gravity of fine aggregate (SSD)</i>	2,82	
20	Berat jenis relatif agregat gabungan / <i>aggregate relative density</i>	2,66	
21	Berat isi beton / <i>wet density of concrete</i>	2375	Kg/m ³
22	Kadar agregat gabungan / <i>contents of combined aggregate</i>	1733,8	Kg/m ³
23	Kadar agregat halus (JKP) / <i>contents of fine aggregate (SSD)</i>	780,2	Kg/m ³
24	Kadar agregat kasar (JKP) / <i>contents of coarse aggregate (SSD)</i>	953,6	Kg/m ³
Proporsi campuran/(m ³)			
25	- Semen / <i>portland cement (PC)</i>	436,17	Kg/m ³
26	- Air / <i>water</i>	205,00	Kg/m ³
27	- Agregat halus (JKP) / <i>fine aggregate (SSD)</i>	780,20	Kg/m ³
28	- Agregat kasar (JKP) / <i>coarse aggregate (SSD)</i>	953,60	Kg/m ³

Sumber: Litbang, 2018

Tabel 7 Perbedaan Sifat dan Karakteristik Beton Segar

No.	Sifat dan Karakteristik Beton Segar	PCC	Slag Tipe LH	Slag Tipe General	Satuan
1.	Slump tercapai	120	130	120	mm
2.	<i>Flow</i>	-	-	-	mm
3.	Bobot isi Beton / <i>unit weight</i>	2360	2400	2380	kg/m ³
4.	Kadar Udara / <i>air content</i>	-	-	-	%
5.	Waktu pengikatan:				
	- Pengikatan awal	241	302	296	menit
	- Pengikatan akhir	361	430	409	menit

Sumber: (Pusajatan dan Indocement 2018)

berbeda dengan semen PCC. Hal ini ditunjukkan dalam Tabel 7 (Pusajatan dan Indocement 2018).

Berdasarkan Tabel 7 nilai *slump* beton dengan semen *Portland slag* tipe LH lebih besar dari pada tipe *general* dan tipe semen PCC (8,33% lebih besar). Bobot isi beton dengan *slag* tipe LH lebih besar dari tipe *general* dan PCC. Waktu pengikatan awal dan pengikatan akhir beton dengan *slag* tipe LH lebih

lama dari tipe *general* dan PCC. Setelah mencapai umur 7, 14, 28, 56, dan 90 hari dilakukan pengujian kuat tekan terhadap ketiga variasi beton tersebut. Hasil uji tekan beton ditunjukkan dalam Tabel 8.

Berdasarkan Tabel 8, nilai kuat tekan pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari untuk beton yang menggunakan semen PCC lebih besar dari kuat tekan beton yang menggunakan semen *Portland slag*. Pada umur 90

hari, beton dengan komposisi semen *Portland slag* mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan dan lebih besar dari beton konvensional. Pengujian lentur pada balok dilakukan pada umur beton 14, 28, dan 56 hari. Hasil uji lentur balok ditunjukkan dalam Tabel 9.

Tabel 8 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No.	Umur (Hari)	Kuat tekan (MPa)		
		Tipe Semen PCC	Tipe Semen Slag LH	Tipe Semen Slag General
1.	7	32,63	18,83	23,91
2.	14	36,15	27,33	31,46
3.	28	40,70	35,51	38,73
4.	56	46,85	44,18	48,05
5.	90	46,41	53,34	48,60

Sumber: Litbang, 2018

Hasil uji kuat lentur pada Tabel 9 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antara beton konvensional dengan beton *slag*.

Tabel 9 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

No.	Umur (Hari)	Kuat Lentur (MPa)		
		Tipe Semen PCC	Tipe Semen Slag LH	Tipe Semen Slag General
1.	14	3.88	2.83	2.83
2.	28	3,93	3.60	3.99
3.	56	4,02	4.52	4.20

Sumber: Litbang, 2018

Pengujian permeabilitas untuk mengetahui tingkat durabilitas beton dilakukan pada balok beton umur 56 hari sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1. Pengujian permeabilitas digunakan untuk mengetahui kedekatan permukaan beton. Pengujian



Sumber: Litbang 2018

Gambar 1 Pengujian Permeabilitas Beton

permeabilitas dilakukan menggunakan alat *Torrent Proceq*.

Berdasarkan uji permeabilitas diperoleh nilai *KT* untuk beton dengan komposisi semen PCC, *slag* tipe LH, dan *slag* tipe *general* berturut-turut adalah $0,259 \times 10^{-16} \text{ mm}^2$; $0,019 \times 10^{-16} \text{ mm}^2$; dan $0,084 \times 10^{-16} \text{ mm}^2$. Pengujian *resistivity* dilakukan untuk mengetahui ketahanan beton terhadap laju korosi. Uji *resistivity* dilakukan pada benda uji silinder beton umur 7, 14, 28, 56, dan 90 hari (Gambar 2).



Sumber: Litbang 2018

Gambar 2 Pengujian *Resistivity* Beton

Hasil uji *resistivity* untuk semua variasi beton ditunjukkan dalam Tabel 10.

Tabel 10 Hasil Pengujian *Resistivity* Beton

No.	Umur (Hari)	<i>Resistivity</i> ($k\Omega\text{cm}$)		
		Tipe Semen PCC	Tipe Semen Slag LH	Tipe Semen Slag General
1.	7	5	8	5
2.	14	5	15	8
3.	28	7	23	17
4.	56	11	44	31
5.	90	14	59	45

Sumber: Litbang, 2018

Berdasarkan Tabel 10, pada umur beton 14, 28, 56, dan 90 hari nilai *resistivity* untuk beton yang menggunakan semen *Portland slag* lebih besar dari beton konvensional yang menggunakan semen PCC.

Pembuatan rancangan campuran untuk ketiga variasi jenis beton (beton konvensional dengan semen PCC, beton yang menggunakan semen *Portland slag* tipe LH dan tipe *general*) menghasilkan komposisi yang sama dari material penyusunnya sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 6. Setelah dilakukan pengadukan dari ketiga variasi beton tersebut,

tampak masing-masing adukan tersebut menunjukkan perbedaan sifat dan karakteristik (Tabel 7). Nilai *slump* untuk variasi beton yang menggunakan semen *Portland slag* tipe LH lebih besar dibandingkan tipe *general* dan beton konvensional. Selisih nilai *slump* sebesar 10 mm. Bobot isi beton *slag* tipe LH lebih besar dibanding tipe *general* dan konvensional. Selisih perbedaan bobot isi antara beton *slag* tipe LH sebesar (20-40) kg/m³. Waktu pengikatan (*setting time*) antara beton *slag* dengan beton konvensional menunjukkan perbedaan yang signifikan. Beton *slag* mempunyai waktu ikat lebih lama dari beton konvensional, hal ini disebabkan panas hidrasi yang dicapai beton *slag* lebih lama dari beton konvensional.

Kondisi ini menyebabkan kekuatan beton *slag* pada umur kurang dari 28 hari akan lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Data hasil uji kuat tekan rata-rata silinder beton untuk berbagai variasi dan umur diberikan pada Tabel 8, dimana nilai kuat tekan yang didapat terus meningkat secara parabolik hingga umur 90 hari. Gambar 3 merupakan penjabaran lebih lanjut dari Tabel 8.

Berdasarkan Gambar 3, nilai kuat tekan beton konvensional lebih besar daripada beton *slag* pada umur kurang dari 56 hari. Beton yang menggunakan semen *Portland slag* tipe LH dan *general* mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan pada umur lebih dari 56 hari. Pada umur 90 hari, kuat tekan beton yang menggunakan semen *Portland slag* tipe LH dan *general* berturut-turut lebih besar 15% dan 5% dari beton konvensional. Peningkatan kuat tekan beton umur 90 hari dengan menggunakan *slag* tipe

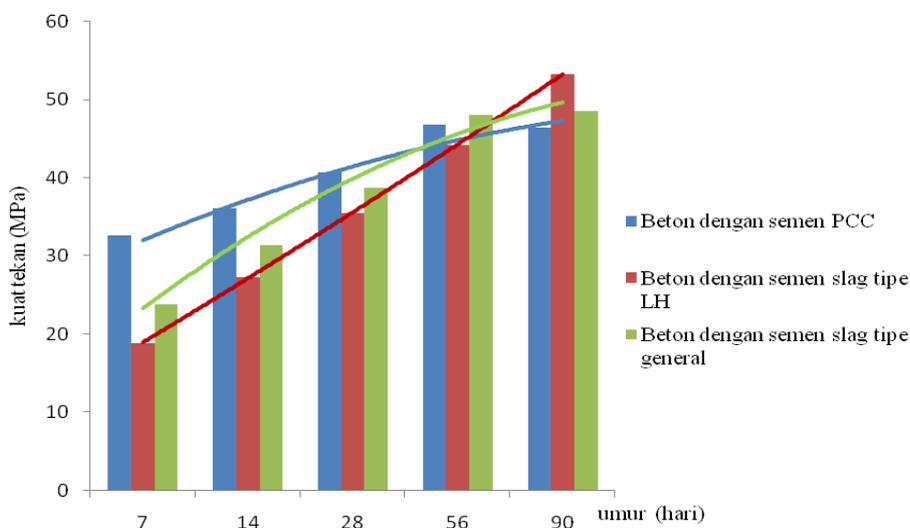
LH lebih unggul dibanding tipe *general*. Kuat tarik lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan padanya, sampai benda uji patah yang dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya tiap satuan luas (SNI 03-4431-2011). Grafik nilai kuat lentur rata-rata hingga umur 56 hari diberikan pada Gambar 4 yang merupakan penjabaran dari Tabel 9.

Pada beton konvensional makin besar kuat tekan makin besar pula nilai kuat lenturnya. Keadaan ini juga terjadi pada beton dengan semen *slag* tipe LH dan *general*. Dilihat dari hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur menunjukkan bahwa semakin besar nilai kuat tekan beton semakin besar pula kuat lenturnya. Persentase perbandingan kuat lentur terhadap kuat tekan pada beton umur 14, 28, dan 56 hari adalah 10%. Peningkatan kuat lentur beton umur 56 hari dengan menggunakan *slag* tipe LH lebih unggul dibanding tipe *general*.

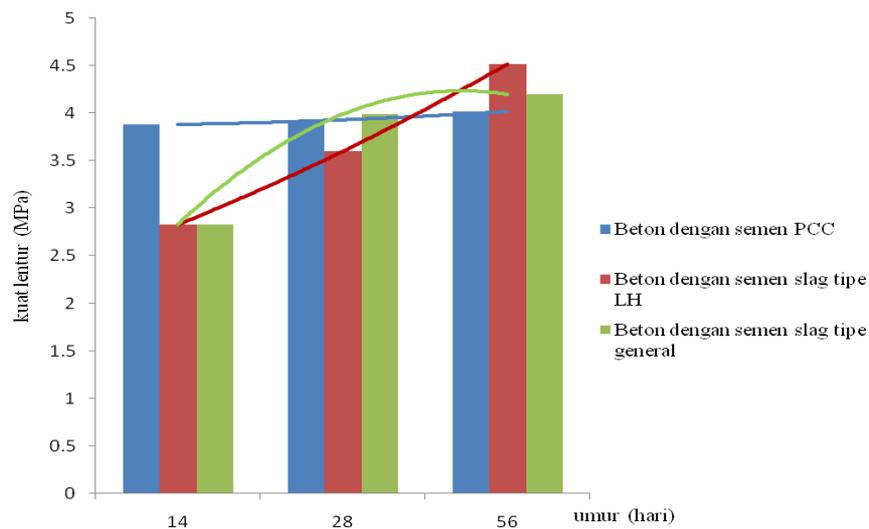
Selain sifat mekanik, beberapa sifat durabilitas beton dapat diketahui dengan uji *resistivity* dan permeabilitas. Penjabaran hasil uji *resistivity* dari Tabel 10 ditunjukkan dalam Gambar 5.

Nilai *resistivity* berbanding terbalik dengan laju korosi. Semakin tinggi nilai *resistivity* dari beton maka tingkat laju korosi akan semakin rendah.

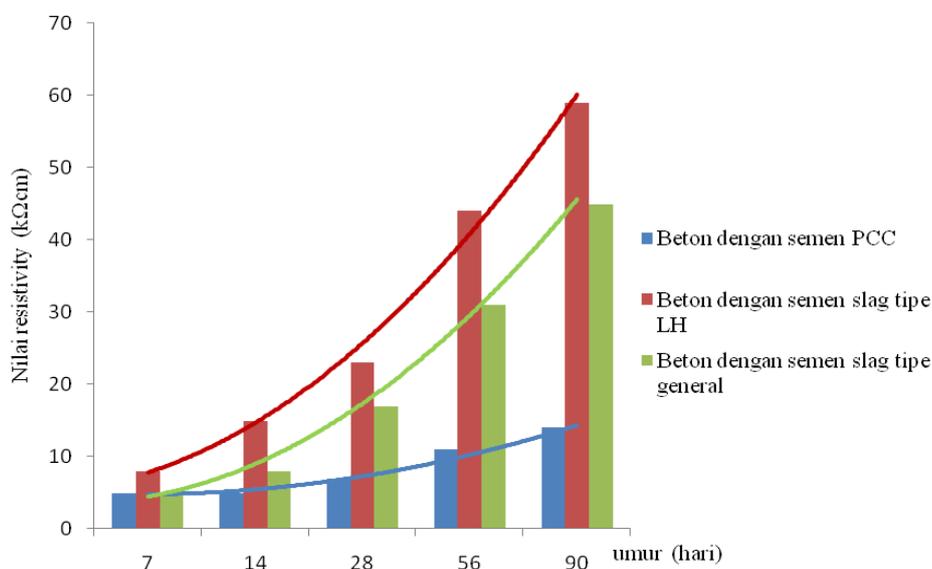
Berdasarkan Gambar 5, nilai *resistivity* untuk beton dengan menggunakan *slag* tipe LH lebih tinggi dari tipe *general* dan beton konvensional yang menggunakan semen PCC. Peningkatan nilai



Gambar 3 Grafik Hubungan Kuat Tekan Terhadap Umur Beton



Gambar 4 Grafik Hubungan Kuat Lentur Terhadap Umur Beton



Gambar 5 Grafik Hubungan Nilai Resistivity Terhadap Umur Beton

resistivity dari beton *slag* tipe LH sangat signifikan pada umur lebih dari 14 hari, yaitu 15 kΩcm. Nilai ini lebih besar 3 (tiga) kali dari beton konvensional. Pada umur 90 hari, nilai *resistivity* dari beton *slag* tipe LH menjadi 4 (empat) kali lebih besar dari beton konvensional. Interpretasi pengujian *resistivity* terhadap tingkat laju korosi berdasarkan Wenner Probe ditunjukkan dalam Tabel 11.

Jika dihubungkan dengan Tabel 11, pada umur 28 hari nilai *resistivity* beton konvensional sebesar 7 kΩcm sehingga memiliki kecenderungan tingkat korosi tinggi. Berbeda dengan beton *slag* tipe LH nilai

resistivity pada umur 28 hari memiliki kecenderungan tingkat korosi rendah. Sedangkan untuk tipe *general* tingkat korosinya sedang. Untuk umur beton lebih dari 28 hari, tingkat laju korosi beton *slag* tipe LH dan *general* tergolong rendah. Nilai permeabilitas beton dengan semen *slag* tipe LH menunjukkan nilai KT yang lebih kecil dari tipe *general* dan semen PCC pada umur 56 hari. Output dari alat uji permeabilitas Torrent Proceq adalah kelas kualitas permukaan beton sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 12.

Untuk mengetahui kriteria indeks dalam menentukan kelas kualitas beton dapat dilihat dalam nomogram pada Gambar 6.

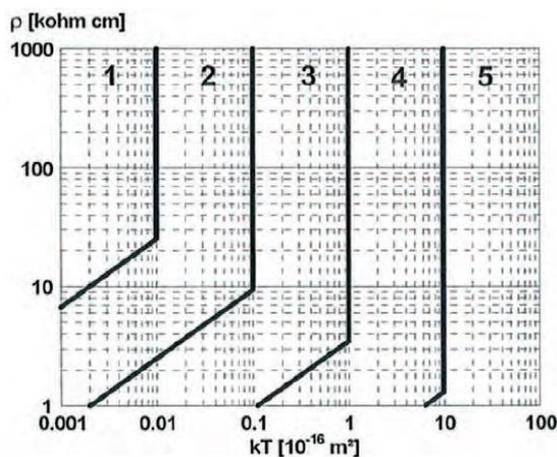
Tabel 11 Hubungan Hasil Uji *Resistivity* Terhadap Tingkat Korosi Beton

No.	Pengukuran <i>Resistivity</i> (kΩcm)	Kategori
1.	> 20	Tingkat korosi rendah
2.	10 – 20	Tingkat korosi sedang
3.	5 – 10	Tingkat korosi tinggi
4.	< 5	Tingkat korosi sangat tinggi

Sumber: (Gudimetla dan Crawford 2016)

Tabel 12 Kriteria Hasil Uji Permeabilitas

No.	Kelas Kualitas	Indeks	KT (10^{-16} m^2)
1.	Sangat buruk	5	>10
2.	Buruk	4	1,0 – 10
3.	Normal	3	0,1 – 1,0
4.	Baik	2	0,01 – 0,1
5.	Sangat baik	1	< 0,01



Gambar 6 Nomogram untuk Penentuan Kelas Kualitas Beton Dalam Kondisi Lembab

Berdasarkan Tabel 12 dan grafik nomogram dalam Gambar 6, beton dengan semen *slag* tipe LH dan *general* mempunyai nilai permeabilitas dengan kualitas baik dan nilai indeks 2, karena berada dalam rentang KT $(0,01 - 0,1) \times 10^{-16} \text{ m}^2$. Sedangkan beton konvensional nilai permeabilitasnya berada dalam kelas normal dengan indeks 3 karena berada dalam rentang KT $(0,1 - 1,0) \times 10^{-16} \text{ m}^2$. Untuk perbandingan faktor air semen tertentu, hubungan kuat tekan dengan permeabilitas dari beton adalah linier. Semakin tinggi kuat tekan maka nilai

permeabilitas beton tersebut menjadi semakin kecil dan sebaliknya. Peningkatan kekuatan beton menunjukkan penurunan nilai koefisien permeabilitas (Ahmad dan Hossain 2017)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, semen *Portland slag* yang dibuat dari limbah *slag* dapat digunakan sebagai semen dalam campuran beton. Penggunaan semen *Portland slag* pada campuran beton dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton *slag* tersebut. Berdasarkan sifat mekanik, peningkatan kuat tekan dan lentur dari beton *slag* baru dapat dicapai setelah mencapai umur 56 hari. Hal ini disebabkan karena waktu pengikatan (*setting time*) yang menghasilkan panas hidrasi dari beton *slag* lebih lama dibandingkan beton konvensional (beton dengan semen PCC). Peningkatan kuat tekan beton *slag* terjadi sangat signifikan pada umur 90 hari. Beton dengan semen *slag* tipe LH peningkatan kuat tekannya 15% lebih tinggi dari beton konvensional. Komposisi kimia dan sifat fisik dari *slag* tipe LH dan *general* sangat mempengaruhi sifat mekanik beton, dimana beton yang menggunakan *slag* tipe LH lebih unggul dibandingkan tipe *general*.

Peningkatan durabilitas beton yang menggunakan semen *slag* secara signifikan terjadi pada umur 14 hari. Ketahanan beton *slag* terhadap laju korosi 3 (tiga) kali lebih besar dibandingkan beton konvensional dan pada umur 90 hari mencapai 4 (empat) kali lebih tahan terhadap laju korosi. Penggunaan semen *Portland slag* pada campuran beton menjadikan beton tersebut juga lebih kedap. Berdasarkan hasil uji permeabilitas pada umur 56 hari, beton *slag* mempunyai nilai permeabilitas dengan kualitas baik dibandingkan beton konvensional.

Pemanfaatan limbah *slag* sebagai semen dalam campuran beton dapat dimanfaatkan dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan (*sustainable*). Perlu penelitian lanjutan mengenai komposisi campuran beton dengan semen *Portland slag* untuk mendapatkan nilai kuat tekan awal yang tinggi dalam percepatan pembangunan infrastruktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Puslitbang Jalan dan Jembatan yang sudah memberikan dukungan atas terselenggaranya kegiatan penelitian terkait penggunaan semen *Portland slag* dalam campuran beton. Ucapan terima kasih penulis sampaikan juga kepada pihak PT.

Indocement Tunggal Prakarsa Tbk. atas kerjasama penelitian khususnya di bidang teknologi beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Syed Ishtiaq, dan Mohammad Anwar Hossain. 2017. "Water Permeability Characteristics of Normal Strength Concrete Made from Crushed Clay Bricks as Coarse Aggregate." *Advances in Materials Science and Engineering* 2017: 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/7279138>.
- ASTM C618. 1993. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral in Portland Cement Concrete." *Annual Book of ASTM Standards*.
- Awoyera, Paul O., Olurotimi M. Olofinnade, Ayobami A. Busari, Isaac I. Akinwumi, Moyosore Oyefesobi, dan Michael Ikemefuna. 2016. "Performance of Steel Slag Aggregate Concrete with Varied Water - Cement Ratio." *Jurnal Teknologi* 78 (10): 125–31. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8819>.
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. "SNI 03-2834-2000, Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal."
- . 2004a. "SNI 15-2049-2004 Semen Portland."
- . 2004b. "SNI 15-7064-2004, Semen Portland Komposit."
- . 2011. "SNI 4431:2011, Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan."
- . 2014. "SNI 2461:2014, Spesifikasi Semen Portland Slag."
- . 2015. "SNI 15-2049-2015, Semen Portland - Bahan Bangunan, Jakarta, BSN."
- . 2016. "SNI 6385:2016, Spesifikasi Semen Slag untuk Digunakan dalam Beton dan Mortar."
- . 2017. "SNI 8363:2017 Semen Portland."
- Bonavetti, V. L., C. Castellano, H. Donza, V. F. Rahhal, dan E. F. Irassar. 2014. "Cement with Silica Fume and Granulated Blast-furnace Slag: Strength Behavior and Hydration." *Materiales de Construcción* 64 (315): e025. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.04813>.
- Bungey, J H, S G Milard, dan M G Grantham. 1982. "The Testing of Concrete in Structures." Surrey University Press.
- Castellano, C. C., V. L. Bonavetti, H. A. Donza, dan E. F. Irassar. 2016. "The Effect of w/b and Temperature on the Hydration and Strength of Blastfurnace Slag Cements." *Construction and Building Materials* 111: 679–88. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.001>.
- EN 197-1. 2011. "Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements." *British Standard*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.88>.
- Gudimettla, Jagan, dan Gary Crawford. 2016. "Resistivity Tests for Concrete-recent Field Experience." *ACI Materials Journal* 113 (4): 505–12. <https://doi.org/10.14359/51688830>.
- Kadhafi, Muhammad. 2015. "Pemanfaatan Copper Slag Sebagai Substitusi Semen Pada Campuran Beton Mutu K-225." *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan* 3 (1): 734–40.
- Karolina, R., dan A. L.A. Putra. 2018. "The Effect of Steel Slag as a Coarse Aggregate and Sinabung Volcanic Ash a Filler on High Strength Concrete." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309:12009. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012009>.
- Kushartomo, Widodo, dan Citra Wijaya Supiono. 2014. "Pengaruh Copper Slag Terhadap Sifat Mekanis Reactive." *Jurnal Kajian Teknologi* 10 (3): 175–82.
- Layssi, H., P. Ghods, A. R. Alizadeh, dan M. Salehi. 2015. "Electrical Resistivity of Concrete." *Concrete International* 37 (5): 41–46.
- Pusajatan, dan Indocement. 2018. "Laporan Hasil Uji Semen Portland Slag, Kerjasama Pusjatan dengan PT. Indocement Tunggal Prakarsa."
- Rosianda, Yonna, Alex Kurniawandy, dan Zulfikar Djauhari. 2016. "Sifat Mekanis Beton Dengan Menggunakan Steel Slag Sebagai Bahan Subtitusi Agregat Halus Dan Fly Ash Sebagai Bahan Subtitusi Semen." *Jom FTEKNIK* 3 (2): 1–8.
- Saranya, P., Praveen Nagarajan, dan A. P. Shashikala. 2018. "Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330:12057. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012057>.
- "Slag Cement (Low Heat) Certificate (2)-PT. Indocement.pdf." n.d.
- Subathra Devi, V., dan B. K. Gnanavel. 2014. "Properties of Concrete Manufactured Using Steel Slag." *Procedia Engineering* 97: 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.229>.
- Takehisa, D., N. Nakajima, Y. Uno, dan S. Date. 2017. "Effect of Setting Accelerator to the Initial Strength of Mortar with Blast Furnace Slag Cement." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 264:12003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/264/1/012003>.

- Vijayagowri, T., P. Sravana, dan P. Srinivasa Rao. 2015. "Rapid Chloride Permeability Test on High Volumes of Slag Concrete." *i-manager's Journal on Structural Engineering* 4 (1): 19–26. <https://doi.org/10.26634/jste.4.1.3464>.
- Wang, Xiao Yong, dan Yao Luan. 2018. "Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12 (1): 12. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0241-z>.
- Wirma, Rizki, Alex Kurniawandy, dan Ermiyaty. 2016. "Sifat Mekanis Beton Akibat Pengaruh Steel Slag Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus dengan Agregat Lokal Riau." *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains* 3 (2): 1–11.
- Yang, Honglu, Rentai Liu, Zhuo Zheng, Haojie Liu, Yan Gao, dan Yankai Liu. 2018. "Experimental Study on Permeability of Concrete." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/2/022067>.