

PENINGKATAN KUALITAS PASIR SILIKA LOKAL ASAL SIDRAP SEBAGAI PASIR STANDAR UNTUK PENGUJIAN MUTU SEMEN

THE QUALITY IMPROVEMENT OF SILICA SAND FROM SIDRAP AS STANDARD SAND IN TESTING OF CEMENT QUALITY

Wieke Pratiwi*, Gaos Abdul Karim, Titi Rachmawati

Balai Besar Bahan dan Barang Teknik – Kementerian Perindustrian RI
Jl. Sangkuriang no. 14, Bandung
*Email: wieke-p@kemenperin.go.id

Diterima: 20 September 2018 Direvisi: 18 Oktober 2018 Disetujui: 5 November 2018

ABSTRAK

Pasir silika asal Sidrap, Sulawesi Selatan telah diolah untuk dijadikan pengganti pasir Ottawa sebagai pasir standar untuk pengujian mutu semen. Pengolahan utama adalah penggerusan di dalam sebuah *ball mill* replika volum 3,5 L yang dibuat dari baja 2 mm dan kecepatan putar 30 rpm selama 30 menit. Penggilingan dilakukan dengan bantuan bola-bola penggerus dengan diameter 13 dan 17 mm dari bahan keramik atau bola baja. Penggerusan ini berhasil menjadikan pasir Sidrap memiliki distribusi ukuran partikel kumulatif sebagai berikut 9,6% (+18, tertahan pada ayakan 18 mesh), 66,0% (+35), 11,6% (+50), 7,2% (+100), 3,6% (+170) dan 2,0% lolos ayakan 170 mesh. Distribusi partikel hasil penggerusan dengan *ball mill* replika ini mirip dengan yang dari *standard laboratory ball mill* dengan dimensi sama. Distribusi ukuran partikel ini juga memenuhi distribusi ukuran partikel pasir standar untuk pengujian mutu semen. Penggerusan juga menghasilkan abrasi permukaan partikel pasir Sidrap, sehingga terjadi perubahan *roundness* (indeks kebundaran) yang mencerminkan kemulusan permukaan. Penggerusan dengan *ball mill* replika menghasilkan indeks kebundaran 0,27 (dengan bola penggerus keramik), dan 0,24 (bola baja), sedangkan pasir Ottawa sebagai pembanding memiliki indeks kebundaran antara 0,27 – 0,30.

Kata Kunci: penggerusan, distribusi ukuran partikel, bola penggerus, *ball mill* replika

ABSTRACT

Silica sand from Sidrap, South Sulawesi has been processed to substitute for Ottawa sand as a standard sand in testing of cement quality. The main processing was milling in a 3.5 L replica ball mill made of 2 mm steel with a rotational speed of 30 rpm for 30 minutes. Milling was carried out using ceramic or steel grinding balls with diameters of 13 and 17 mm. This milling resulted the following cumulative particle size distribution: 9.6% (+18, retained in 18 mesh sieve), 66.0% (+35), 11.6% (+50), 7.2% (+100), 3.6% (+170) and 2.0% passed through 170 mesh sieves. This particle size distribution was more or less similar to that obtained from a standard laboratory ball mill having the same dimensions. This particle size distribution also met that the standard sand for the testing of cement quality. Milling caused a surface abrasion of Sidrap sand particles resulting a change in roundness (representing the smoothness of the surface). Milling of Sidrap sand using this replica ball mill gave a roundness of 0.27 (using ceramic milling balls), and 0.24 (steel balls), while Ottawa sand as a comparison has a roundness in the range of 0.27 - 0.30.

Keywords: milling, particle size distribution, milling ball, replica ball mill

PENDAHULUAN

Sejalan dengan kebijakan pemerintah untuk mengolah sebanyak mungkin bahan tambang yang terdapat di dalam negeri, kegiatan pengembangan dan rekayasa unit pemanfaatan pasir silika telah dilakukan di Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T). Pasir silika dari Sidrap (Sulawesi Selatan) memiliki potensi sebagai bahan baku *pasir standar* untuk menggantikan *pasir Ottawa* yang digunakan dalam pengujian mutu semen. Saat ini pasir standar *Ottawa* masih diimpor dengan jumlah sekitar 150 ton/tahun. Pasir silika dari berbagai daerah di Indonesia telah dikaji sebagai calon pengganti pasir Ottawa (kadar SiO_2 97,12%), misalnya yang berasal dari Belitung (98,64%), Bangka (96,40%), Tuban (95,18%) dan Sidrap (90,09%). Meskipun kadar silika pasir Sidrap paling rendah diantara pasir Belitung, pasir Bangka, dan pasir Tuban, namun hasil evaluasi pendahuluan menunjukkan bahwa pasir Sidrap memiliki karakteristik yang mendekati pasir standar Ottawa berdasarkan analisis SEM (Scanning Electrone Microscope) dan uji kuat tekan mortar semen pada umur 3, 7 dan 28 hari. Pengujian kuat tekan mortar semen ini dilakukan pada kondisi laboratorium yang sama. Ketika dilakukan uji banding di 8 laboratorium pabrik semen di Indonesia dan laboratorium B4T, ternyata nilai kuat tekan mortar semen pasir Sidrap pada umur 3 dan 7 hari sama dengan pasir Ottawa, sedangkan pada umur 28 hari nilai kuat tekan mortar semen pasir Sidrap tidak sama dengan pasir Ottawa. Oleh sebab itu disarankan untuk dilakukan pengolahan yang sesuai untuk mendapatkan kualitas pasir yang mendekati pasir Ottawa seperti yang dilakukan oleh Amir [1,5].

Dengan kadar silika sekitar 90%, pasir Sidrap dipilih dalam kajian selanjutnya atas dasar bahwa *ASTM C778-13 Standard Specification for Standard Sand* lebih menekankan distribusi ukuran partikel dan tidak mensyaratkan kadar silika. Selanjutnya hasil penelitian ini dapat diterapkan untuk meningkatkan kegiatan ekonomi setempat melalui Unit UKM (Usaha Kecil-Menengah) sehingga terjalin kerja sama bisnis dengan pabrik semen Tonasa di Sulawesi Selatan.

Pengolahan pasir silika lokal menjadi pasir standar untuk mengujian mutu semen, secara garis besar mencakup:

- a. pencucian pasir hasil penambangan dan dilanjutkan dengan pengeringan agar pasir bebas lumpur dan berbagai pengotor lainnya
- b. analisis kandungan silika
- c. pengukuran distribusi ukuran partikel dengan ayakan
- d. abrasi secara mekanik dengan *ball mill* untuk meningkatkan indeks kebundaran
- e. pengukuran kembali distribusi ukuran partikel setelah abrasi
- f. pengukuran indeks kebundaran partikel.

Tahap paling penting dalam operasi penyiapan pasir silika lokal menjadi pasir standar adalah persyaratan distribusi ukuran partikel dan indeks kebundaran. Kedua sifat ini dapat dicapai dengan abrasi atau penggerusan pasir silika lokal dengan menggunakan *ball mill*. Dalam penelitian ini, sebuah *ball mill* replika telah dibuat atas dasar *rules of thumb* rekayasa *ball mill* industrial [2,3,4]. Teknik pengukuran indeks kebundaran juga dikembangkan untuk mengatasi kendala ketersediaan pengujian dan biaya mahal. Keberhasilan penelitian ini diharapkan dapat dijadikan panduan dalam pengembangan teknologi tepat guna unit pengolahan pasir silika lokal menjadi pasir standar untuk pengujian mutu semen.

Menurut *ASTM C778-13* dan *ASTM C109/109M-13* pasir silika standar untuk uji kualitas semen harus memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a. berbentuk bulat dan kadar silika hampir murni
- b. lolos ayakan *mesh 20* (bukaan $850 \mu\text{m}$) dan tertahan pada *mesh 100* ($150 \mu\text{m}$)
- c. dari partikel $-20/+100$ tersebut, ukuran terbanyak adalah *mesh 30* ($600 \mu\text{m}$).

Di dalam ketentuan di atas, kadar silika dalam pasir tidak dicantumkan secara kuantitatif.

Peneliti Bangladesh juga mengevaluasi potensi pasir silika empat sumber pasir silika di daerah setempat [5]. Kadar silika dari satu lokasi penambangan pasir, ternyata sangat tergantung pada ukuran partikel, karena pasir silika yang diamati diperkirakan terbasuh alamiah. Kadar silika (dinyatakan dalam kadar SiO_2) berkisar

antara 87-99%. Dari hasil uji kuat tekan mortar, pasir silika lokal dengan kadar silika 90% dapat digunakan sebagai pasir standar dalam uji mutu semen. Indeks kebundaran pasir lokal termasuk kelompok *angular*, sedangkan pasir Ottawa berada pada kelompok bulat (*spherical* sampai dengan *semi-spherical*).

Peneliti Nigeria juga telah melakukan kajian penggunaan pasir silika lokal sebagai pasir standar [7]. Pasir silika dari lokasi-1 mengandung SiO₂ 93,81-94,75% (rata-rata 94,24%), yang dari lokasi-2 adalah 87,42-89,57% (rata-rata 88,52%). Kadar silika rata-rata dalam pasir lokasi-3 adalah 85,26%, dan lokasi-4 adalah 77,15%. Peneliti mengusulkan penggunaan pasir dari lokasi-1 sebagai pasir standar uji mutu semen.

Sebuah penelitian di Afrika Selatan difokuskan pada efek distribusi ukuran partikel terhadap kuat tekan mortar dalam uji-mutu semen [6]. Hasil kajiannya menyebutkan bahwa partikel pasir standar harus berkisar antara 80 sampai dengan 2000 μm (2mm). Peneliti ini juga menyebutkan distribusi ukuran partikel pasir menentukan kuat tekan mortar dalam uji mutu semen. Sehingga hubungan kuat tekan mortar dengan pasir silika lokal dan pasir Ottawa perlu dikalibrasi. Makalah ini dilengkapi data hubungan antara waktu *ageing* dengan kuat tekan mortar.

Parameter-parameter kinerja sebuah *ball mill* dapat dibagi menjadi dua kelompok:

- yang terkait dengan karakteristik partikel: densitas curah (*bulk density*), massa jenis (*particle density*) dan kekerasan
- yang terkait dengan masalah teknik *ball mill*: bola-penggerus (*grinding media*), dimensi silinder putar, kecepatan putar, kapasitas penggerusan, dan perbandingan massa partikel umpan terhadap massa bola-penggerus, dan kebutuhan daya penggerak silinder putar.

Kekerasan partikel umpan yang digerus dinyatakan sebagai besaran *work index* yaitu kebutuhan energi penggilingan untuk mendapatkan partikel yang 80%-nya lolos ayakan dengan lubang 100 μm [2]. *Work index* (W_i, kWh/ton) beberapa partikel adalah sebagai berikut:

- partikel lunak: 7 – 9
- partikel menengah: 9 – 10
- partikel keras: 14 – 20
- partikel sangat keras: di atas 20

Pasir silika memiliki *work index* sekitar 15,5 kWh/ton.

Dengan data *work index* ini, kebutuhan daya penggerak *ball mill* dapat diperkirakan dengan persamaan berikut ini [2, 5]:

$$P = m \cdot 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{d_p^{0,5}} - \frac{1}{d_f^{0,5}} \right) \quad (1)$$

dengan:

- P : daya penggerak yang dibutuhkan, kW
 i : indeks
 W_i : *work index*, kWh/ton
 m : kapasitas *ball mill*, ton/h
 d_p : lubang ayakan yang meloloskan 80% produk abrasi (diameter partikel yang diinginkan)
 d_f : lubang ayakan yang meloloskan 80% partikel umpan.

Bola-bola penggerus (*grinding media*) merupakan salah satu parameter kerja *ball mill*. Bola-bola penggerus harus bulat dan lebih keras daripada partikel yang digerus [2]. Pemilihan diameter bola-bola penggerus dipengaruhi oleh diameter partikel pasir asal. Sebaliknya, ukuran bola-bola penggerus dan kecepatan putar drum penggerus mempengaruhi distribusi ukuran dan kebulatan partikel hasil abrasi, serta kebutuhan daya pemutar drum [10,11].

Diameter bola-bola penggerus (d_{bo}) diperkirakan dengan persamaan berikut [12].

$$d_{bo} = 19,69 \cdot d^{0,67} \quad (2)$$

dengan:

- d_{bo} = diameter bola-bola penggerus, mm
 d = diameter partikel pasir yang digerus, mm

Nilai konstanta 19,69 dalam persamaan (2) adalah konstanta empirik untuk abrasi partikel silika. Contoh lain: nilai konstanta dalam persamaan (2) tembaga adalah 12,23. Untuk partikel umpan pasir silika berupa campuran berbagai ukuran, ukuran bola-bola penggerus dapat dihitung dari ukuran partikel pasir terbesar dan yang terkecil, sebagai berikut:

- a. atas dasar partikel umpan terbesar yang 80% lolos 18 mesh (bukaan ayakan 1 mm):

$$d_{b,maks} = 19,69 \cdot d^{0,67} = 19,69 \cdot 1,000^{0,67}$$

jadi diameter bola penggerus terbesar

$$d_{b,maks} = 19,69 \text{ mm}$$

- b. atas dasar partikel silika terkecil yang 80% lolos 50 mesh (0,297 mm),

$$d_{b,min} = 19,69 \cdot d^{0,67} = 19,69 \cdot 0,297^{0,67}$$

jadi diameter bola penggerus terkecil

$$d_{b,min} = 8,73 \text{ mm.}$$

Partikel pasir silika umumnya memiliki kekerasan 7 Mohs dan densitas curah 2,65 kg/L.

Roundness atau indeks kebundaran berbeda dengan derajat *sphericity* (kebolaan) yang banyak digunakan pada kajian *hidrodinamika fluida dan partikel*. Salah satu definisi indeks kebundaran adalah besaran yang menyatakan rata-rata dari perbandingan jari-jari ujung lancip terhadap jari-jari fiktif sebuah partikel [13,14]. Definisi indeks kebundaran dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$R_w = \frac{\sum r_i}{N} = \frac{\sum r_i}{N \cdot R} \quad (3)$$

dengan:

- R_w : indeks kebundaran partikel
- R : jari-jari terbesar sebuah partikel
- r_i : jari-jari ujung lancip partikel
- N : banyaknya bagian lancip yang ada pada sebuah partikel.

Sebuah partikel dengan bentuk permukaan tidak teratur memiliki banyak ujung-ujung lancip.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan rekayasa *ball mill* replika untuk meningkatkan kualitas pasir silika lokal asal Sidrap sebagai pasir standar pengganti pasir Ottawa.

BAHAN DAN METODE

Perancangan *ball mill* replika dimulai dengan ketentuan bahwa volum bola-bola penggerus kira-kira 30-40% volum silinder putar, dan volum partikel yang digerus sekitar 20% volum bola-bola penggerus. Densitas curah (*bulk*

density) bola-bola penggerus dan partikel pasir silika diukur dengan penimbangan massa dan pengukuran volum. Besaran-besaran teknis *ball mill* replika dihitung dengan persamaan-persamaan (1 dan 2) serta batasan-batasan karakteristik partikel di atas.

Pada percobaan ini, dua macam bola penggerus yang digunakan adalah:

- a. bola keramik dengan diameter sekitar 26 mm; densitas partikel = 2,6 kg/L
- b. bola baja (bekas lagger) dengan diameter 10, 13, atau 17 mm; densitas partikel = 13 kg/L.

Kekerasan bola keramik dan bola baja hampir sama dengan kekerasan pasir silika.

Percobaan abrasi dengan *ball mill* replika dan standar (*standard laboratory ball mill*) dilakukan pada beberapa kondisi. Dari berbagai variasi kondisi tersebut, pengamatan difokuskan pada kondisi berikut ini:

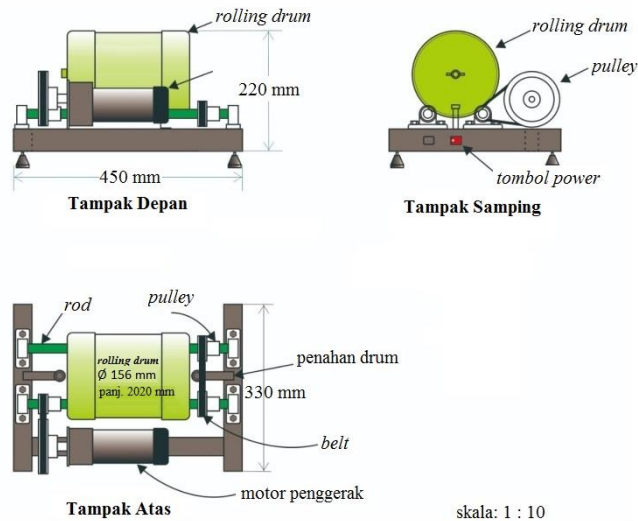
- a. kecepatan putar drum 30 rpm
- b. lama abrasi 30 min
- c. umpan abrasi adalah campuran ukuran partikel dan distribusi ukuran mendekati pasir standar, yaitu: 20%-massa dengan ukuran 1000 μ m, 78% dari 800 μ m, dan 2% dari 400 μ m.

Terhadap partikel silika hasil abrasi dilakukan pengukuran distribusi ukuran partikel dengan ayakan, dan indeks kebundaran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Rekayasa *Ball Mill* Replika

Hasil rekayasa *ball mill* replika disajikan di Tabel 1 dan Gambar 1. Perbedaan mencolok antara *ball mill* replika terhadap yang standar terdapat pada berat silinder putar, dan motor listrik penggerak silinder putar. Sehingga berat keseluruhan sangat berbeda, yaitu: 18 kg dibandingkan dengan 75 kg berturut-turut untuk *ball mill* replika dan yang standar. Disamping itu, perbedaan berat dan dimensi keseluruhan juga diakibatkan oleh penggunaan *speed reducing box* pada *ball mill* standar.



Gambar 1. Ball Mill Replika

Tabel 1. Spesifikasi Teknik Dua Macam Ball Mill

No.	Spesifikasi	Ball Mill replika	Ball Mill standar Paul O Abbe (1970)
1.	Spesifikasi umum		
a.	dimensi total: panjang, lebar dan tinggi, cm	45 x 35 x 28	71 x 54 x 48
b.	berat total, termasuk silinder putar, kg	18	75
2.	Silinder putar:		
a.	bahan konstruksi	stainless steel	keramik
b.	diameter luar, mm	156	220
c.	diameter dalam, mm	152	180
d.	tebal dinding, mm	2	20
e.	panjang bagian dalam, mm	200	180
f.	panjang keseluruhan, mm	220	240
g.	volum, L	3,63	4,58
h.	berat kosong, kg	2,4	10,0
i.	kecepatan putar silinder		
3.	Motor listrik penggerak		
a.	daya nominal, W	350	500
b.	kecepatan putar nominal, rpm	1420	1420

Dalam penelitian ini, kapasitas *ball mill* sekitar 10 kg/jam (0,01 ton/h), dan pasir silika termasuk dalam kategori *hard material* dengan *work index*, $W_i = 15,5$ kWh/ton [2]. Umpan pasir silika memiliki 80% partikel yang lolos ayakan 5000 μm (5 mm), sedangkan produknya diharapkan berupa partikel yang 80% lolos ayakan 200 μm (0.2 mm). Dengan persamaan (1), kebutuhan daya diperkirakan 90 watt. Selanjutnya, dengan memperhatikan gesekan dan rugi-rugi lainnya, motor listrik penggerak *ball mill* replika disediakan dengan daya 350 watt. Daya ini dirancang juga untukantisipasi beban dari massa bola-bola penggerus dan partikel silika [9]. Spesifikasi teknik *ball mill* replika dan standar (sebagai pembanding dan telah tersedia) disajikan pada Tabel 1.

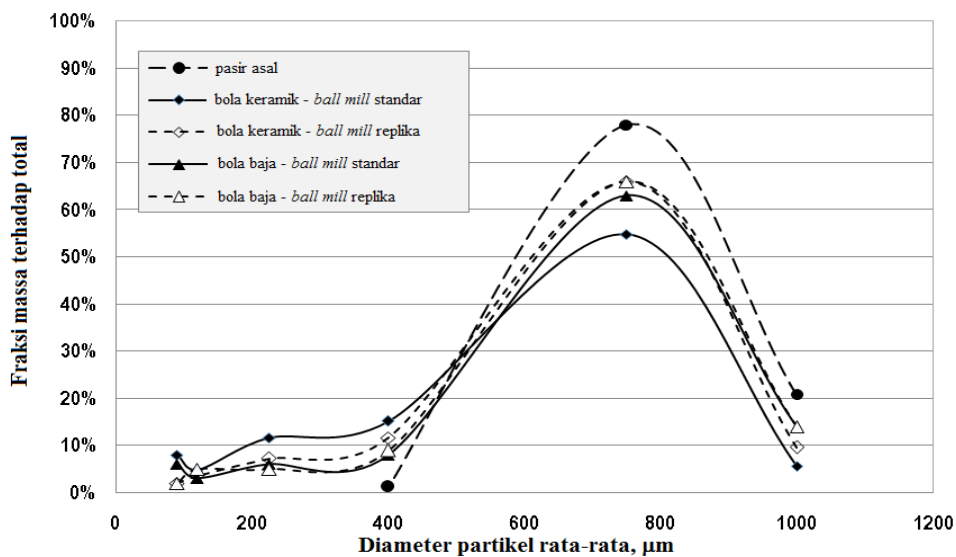
Hasil Percobaan Abrasi

Dari hasil-hasil percobaan dengan berbagai variasi kecepatan putar dan lama abrasi, resume hasil yang penting disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2 (untuk kecepatan putar 60 rpm, dan waktu abrasi 30 menit). Dalam percobaan ini, umpan abrasi adalah campuran partikel pasir Sidrap dari beberapa hasil pengayakan untuk dijadikan distribusi ukuran partikel sesuai dengan pasir standar. Karakteristik campuran tersebut: (i) ukuran terkecil 400 μm ; (ii) ukuran terbesar 1000 μm ; dan ukuran terbanyak di sekitar 800 μm . Abrasi dengan *ball mill* replika maupun dengan yang standar tidak banyak mengubah bentuk kurva distribusi ukuran partikel. Hal ini memang dikehendaki, karena abrasi ditujukan untuk meningkatkan indeks kebundaran partikel.

Tabel 2. Hasil Percobaan Abrasi dengan *Ball Mill* Replika dan Standar

	1	2	-
1. bola-bola penggerus	keramik	<i>stainless steel</i>	
2. diameter bola penggerus, mm	26	17	13
3. banyaknya bola penggerus, butir	60	125	200
4. berat bola penggerus, g	2075	2800	1665
5. <i>bulk density</i> bola penggerus, g/mL		4,52	
5. berat total bola penggerus, g	2075	4465	
6. volum bola penggerus	kira-kira 30% of volum silinder putar		
7. berat pasir silika umpan, g	250	450	
8. <i>bulk density</i> pasir, g/L	1,41		
10. lama abrasi, menit	30	30	

No.	ukuran ayakan (mesh)	ukuran partikel rata-rata, μm	distribusi ukuran partikel partikel tertahan pada ayakan, % terhadap massa total				pasir asal
			<i>ball mill</i> replika	<i>ball mill</i> standar	<i>ball mill</i> replika	<i>ball mill</i> standar	
1.	+18	1000	9,6%	5,6%	14,0%	13,8%	20,8%
2.	-18/+35	750	66,0%	54,8%	66,4%	63,1%	78,0%
3.	-35/+50	400	11,6%	15,2%	8,9%	8,2%	1,2%
4.	-50/+100	225	7,2%	11,6%	5,1%	6,0%	-
5.	-100/+170	120	3,6%	4,8%	2,0%	2,7%	-
6.	-170	90	2,0%	8,0%	3,6%	6,2%	-
		Total	100%	100%	100%	100%	100%



Gambar 2. Distribusi Ukuran Partikel

Namun demikian, abrasi menambah fraksi partikel halus (di bawah 400 μm) dan sangat banyak mengurangi fraksi partikel ukuran 800 μm . Penurunan fraksi partikel ukuran partikel 800 μm sangat terlihat (turun dari 80% menjadi sekitar 55%) pada hasil abrasi dengan *laboratory standard ball mill* dengan bola-bola keramik.

Sedangkan abrasi dengan bola-bola baja (*stainless steel*), penurunan fraksi 800 μm hanya dari 80% menjadi sekitar 65%. Besar kemungkinan pukulan bola-bola keramik pada dinding silinder putar keramik terlalu kuat. Sedangkan pada abrasi dengan bola-bola baja, bola-bola abrasi berupa campuran bola-bola baja

dengan dua ukuran diameter: 13 dan 17 mm. Jadi dapat disimpulkan bahwa diameter dan densitas bola penggerus sangat menentukan hasil pengecilan ukuran sesuai dengan pengamatan [11]. Jenis atau densitas bola penggerus memang merupakan salah satu karakteristik kunci dalam pengecilan ukuran [15].

Pengaruh jenis bola-bola abrasi dan material silinder putar sangat terlihat pada indeks

kebundaran hasil abrasi (Tabel 3). Penggunaan bola keramik dan silinder putar keramik justru menjadikan partikel pasir pecah sehingga menjadi partikel dengan banyak ujung-ujung lancip dengan indeks kebundaran 0,20. Ditinjau dari indeks kebundaran ini, partikel dengan indeks kebundaran terbaik diperoleh dari abrasi dengan *ball mill* standar (dinding keramik) dan bola abrasi baja.

Tabel 3. Indeks Kebundaran Partikel

Diameter Terbesar Satu Partikel, R, μm			
	partikel terkecil	partikel terbesar	Roundness, R_w
a. Hasil Abrasi dengan Bola Keramik			
1. <i>ball mill</i> replika	450	565	0,27
2. <i>ball mill</i> standar	350	525	0,20
b. Hasil Abrasi dengan Bola Baja			
3. <i>ball mill</i> replika	375	550	0,24
4. <i>ball mill</i> standar	350	500	0,30
5. pasir standar Ottawa: klasifikasi <i>sub-rounded</i> [12]			0,27 – 0,30

Abrasi dengan *ball mill* replika (dinding *stainless steel*) dan bola baja kelihatannya kurang efektif, terlihat dari nilai indeks kebundaran masih 0,24 yang menyatakan bahwa permukaan partikel masih seperti semula. Kemungkinan penggunaan *ball mill* replika dan bola baja dengan waktu penggerusan lebih lama akan efektif untuk maksud abrasi. Dalam kondisi ini, tingkat abrasi permukaan partikel pasir dapat dikendalikan dari lama waktu abrasi tanpa mengakibatkan pecahnya partikel.

KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan mutu pasir silika asal Sidrap, Sulawesi Selatan telah berhasil dilakukan dengan bantuan *ball mill* replika buatan sendiri dan hasilnya dibandingkan terhadap perlakuan dengan *ball mill* standar. Berdasarkan parameter utama, hasil pengolahan pasir Sidrap memiliki distribusi ukuran partikel yang memenuhi standar pasir Ottawa, standar untuk pengujian mutu semen. Indeks kebundaran hasil pengolahan pasir Sidrap (0,24–0,27) hampir mencapai nilai pasir Ottawa (0,27–0,30). Peningkatan indeks kebundaran diperkirakan dapat dilakukan dengan variasi parameter operasional *ball mill*, misalnya ukuran bola-bola penggerus, kecepatan putar dan lama penggerusan.

Keberhasilan rekayasa *ball mill* replika yang dibuat berdasarkan rumusan-rumusan sederhana dalam *rule of thumb* memberi harapan untuk penggunaan *ball mill* replika sebagai pengganti *ball mill* standar. Keberhasilan pengolahan pasir Sidrap sebagai pasir standar untuk pengujian mutu semen diharapkan dapat dijadikan rujukan dalam pemanfaatan pasir lokal pada skala Usaha Kecil Menengah. Dalam upaya pengembangan bisnis ini, kerja sama dengan pabrik semen sangat diharapkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada Ir. Yudi Kuswoto yang telah membantu dalam rekayasa *ball mill* replika dan uji-coba karakteristiknya pada awal penelitian. Kegiatan ini merupakan bagian dari program pemanfaatan pasir silika lokal yang tersedia di berbagai daerah di Indonesia

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pratiwi, W, Abdul Karim, G, Rachmawati, T, "Pemanfaatan Pasir Silika sebagai Bahan Pengganti Pasir Standar Ottawa untuk Pengujian Mutu Semen Nasional",

- Laporan Akhir, Balai Besar Bahan dan Barang Teknik*, 2015
- [2] Bond, F.C., “Crushing and Grinding Calculations (Part I No 6, 378-385 and Part II, No 8, 543-548)”, *British Chemical Engineering*, Vol. 6, 1961.
- [3] Kimura M., Narumi M., Kobayashi T., “Design Method of Ball Mill by Discrete Element Method”, *Sumitomo Chemical CO. Ltd.*, Tokyo, 2007.
- [4] Monov, V., Sokolov, B., Stoenchev, S., “Grinding in Ball Mills: Modelling and Process Control”, *Institute of Information and Communication Technologies*, Sofia, 2012.
- [5] Amin, A.F.M.S., M.M. Haque, M.Z.R. Siddiqi, M.A. Rahman, M.S. Islam, A.A. Rana, M.M. Karim, and M.K. Alam, “Use of selected Silica Deposits of Bangladesh as Standard Sand in Testing Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars: A Proposal for Strength Correlataion”, *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 40(2), 181-202, 2012.
- [6] Ekolu, S.O., “Potential South African Standard Sand for Cement Mortar Testing and Research”, *Proceedings of the First International Coference on Construction Materials and Structures*, pp 253-260, 2014.
- [7] Ojuri, O.O., and D.O. Fijabi, “Standard sand for geotechnical engineering and geoenvironmental research in Nigeria: Igbokoda Sand”, *Advances in Enviromental Research*, Vol.1, no.4, 305-321, 2012.
- [8] Lameck, N.N.S, “Effect of Grinding Media Shapes on Ball Mill Performance”, *Master Thesis at University of Witwatersrand, Johannesburg*, 2005.
- [9] Sahoo, A., “Simulation Studies on Energy Requirement, Work Input and Grindability of Ball Mill”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 4, Issue 2, February 2014, (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008), website: www.ijetae.com.
- [10] Fuerstenau D.W., and J.J. Lutch, “The Effect of Ball Size on the Energy Efficiency of Hybrid High Pressure Roll Mill Ball Mill Grinding”, *Powder Technology*, 105 (1-3), 199-204, 1999.
- [11] Kotake, N., K., Daibo, T., Yamamoto, and Y., Kanda, “Experimental Investigation on a Grinding Rate Constant of Solid Materials by a Ball Mill – Effect of Ball Mill Diameter and Feed Size”, *Powder Technology*, 143-144, 2004.
- [12] Magdalinovic, N., Trumic, M., and Trumic, G., “The Optimal Ball Diameter in a Mill”, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48 (2), 329-339, ISSN 2084-4735, Serbia, 2012.
- [13] Dunlop, Heather, *Computing the Sphericity and Roundness of Rock*, website (July 2016):hdcouture.com/doc/sphericity_roundness_presentation.
- [14] Wadell, H, “Volume, Shape, and Roundness of Rock Particles”, *The Journal of Geology*, 40(5), 443-451, 1932.
- [15] Francioli, DM., “Effect of Operational Variables on Ball Milling”, *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Brazil, 2015.
- [16] Smith, Graham T., “Industrial Metrology, Surfaces and Roundness”, *Springer-Verlag*, London Limited, 2002.
- [17] “Standard Specification for Standard Sand”, ASTM C778-13