

Feasibility test of Phosphogypsum on the Portland Cement Properties

Risky Fawardi Yuliarta¹, Muhammad Subhan², Saiful Arif³, Damai Suhendri⁴,
Yustia Wulandari Mirzayanti^{5*}

Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya^{1 2 3 4 5}

e-mail: riskyuliarta@gmail.com¹, yustiawulandari_che@itats.ac.id^{5*}

ABSTRACT

Phosphogypsum is a by-product of the process of making phosphoric acid, usually used as an additional fertilizer for tillage. Alternatively, disposal of this material in the form of TPA requires large areas of land with a risk of harm to the environment. Therefore, these materials have been tried to be incorporated in the manufacture of cement in view of their sustainable use. Phosphogypsum can be used as a substitute for natural gypsum in the production of Portland cement to control the hydration reaction rate of the cement. Raw phosphogypsum is collected from the local fertilizer industry. The properties of phosphogypsum were evaluated and then the effect of adding various levels of Phosphogypsum (2, 5, 10 and 15 weight percent of cement) with Portland cement clinker. Raw materials are treated to remove additional air and impurities by washing, air drying and oven drying. Both treated and untreated materials were used in the experimental work. Timing, flow, and compressive strength behavior of prepared samples of paste, mortar, and concrete were evaluated to find an effective proportion of Phosphogypsum for use in the manufacture of Portland cement. By assessing the properties of cement paste, mortar and concrete concluded that the addition of 5-10% Phosphogypsum in cement clinker gives good results. Besides that, the use of phospho gypsum as a substitute for natural gypsum can also provide benefits for the industry. Due to the same Usage Percent but a much cheaper price can save production costs.

Kata kunci: by-products, phosphogypsum, Portland cement

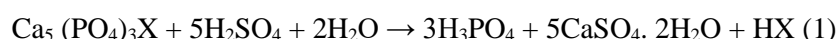
ABSTRAK

Phosphogypsum Merupakan Produk samping proses pembuatan asam fosfat, biasanya digunakan sebagai pupuk tambahan pengolahan tanah. Alternatifnya, pembuangan bahan ini dalam bentuk TPA membutuhkan lahan yang luas dengan resiko bahaya terhadap lingkungan. Karena itu, bahan tersebut telah mencoba untuk digabungkan dalam pembuatan semen mengingat penggunaannya yang berkelanjutan. Phosphogypsum dapat digunakan sebagai pengganti gipsum alami dalam produksi semen Portland untuk mengontrol laju reaksi hidrasi semen. Phosphogypsum mentah dikumpulkan dari industri pupuk lokal. Sifat phosphogypsum dievaluasi dan kemudian efek penambahan berbagai tingkat Phosphogypsum (2, 5, 10 dan 15 persen berat semen) dengan klinker semen Portland diselidiki. Bahan mentah diperlakukan untuk menghilangkan air tambahan dan kotoran dengan mencuci, mengeringkan udara dan mengeringkan oven. Baik bahan yang diolah maupun yang tidak diolah digunakan dalam pekerjaan eksperimental. Pengaturan waktu, aliran, dan perilaku kekuatan tekan dari sampel pasta, mortar, dan beton yang disiapkan dievaluasi untuk menemukan persentase Phosphogypsum yang efektif untuk digunakan dalam pembuatan semen Portland. Dengan mengevaluasi sifat pasta semen, mortar dan beton disimpulkan bahwa penambahan Phosphogypsum 5-10% dalam klinker semen memberikan hasil baik. Disamping itu penggunaan phospo gypsum sebagai bahan pengganti gypsum alami juga dapat memberikan keuntungan bagi industri. Dikarenakan dengan Persen Penggunaan yang sama namun harga yang jauh lebih murah dapat menghemat biaya produksi.

Kata kunci: produk sampingan, phosphogypsum, semen Portland

PENDAHULUAN

Phosphogypsum adalah produk sampingan dari proses pembuatan basah asam fosfat (pupuk amonium fosfat) melalui reaksi asam sulfat pada batuan fosfat. Sekitar 4,5-5,5 ton Phosphogypsum dihasilkan per ton produksi asam fosfat menggunakan proses basah. Asam fosfat diproduksi dengan mereaksikan bijih fosfat (apatite) dengan asam sulfat menurut reaksi berikut, di mana X dapat berupa OH, F, Cl, atau Br.



Pembuangan Phosphogypsum ke lahan terbuka dapat menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan. Bahan timbunan didominasi oleh kalsium sulfat dehidrasi (sekitar 94-98% berat), juga mengandung sekitar 5-6% pengotor termasuk logam berat, fluorida dan radionuklida. Zat beracun ini dapat terbawa angin dalam jarak jauh. Akibatnya, dapat mencemari tanah dan atau air tanah. Studi terperinci diperlukan untuk memahami sepenuhnya proses transfer zat beracun ke lingkungan yang berdekatan dan untuk menilai dampaknya tetapi tidak dalam lingkup pekerjaan ini. Phosphogypsum yang telah diolah dapat digunakan sebagai bahan plester. Penggunaan Phosphogypsum yang paling penting dan memotivasi adalah dalam industri konstruksi. Dalam proses pembuatan semen, Phosphogypsum dapat digunakan sebagai pengganti gipsum alami yang berperan sebagai penghambat setting time, atau untuk mengurangi suhu klinkerisasi. Studi juga dilakukan dengan lapuk (disimpan di udara terbuka) Phosphogypsum sebagai retarder set dalam semen Portland.

Campuran asam borat dan Phosphogypsum yang dimurnikan sebagian dapat digunakan sebagai pengganti gipsum alami untuk semen Portland dan Trass. Ini dapat diproses dengan pengayakan basah dan proses pencucian di pabrik. Pengotor fosfat, fluorida, bahan organik, dan alkali berkurang secara signifikan. Phosphogypsum yang diuntungkan dapat digunakan sebagai aditif sebagai pengganti gipsum mineral dalam pembuatan semen Portland dan semen terak Portland. Agregat berbahan dasar Phosphogypsum -slag dibuat dan diuji kekuatan tarik tekan, lentur dan belah dengan menggunakan beton. Direkomendasikan agar agregat terak bekerja dengan baik sebagai agregat kasar dalam beton semen dan harus bekerja dengan baik dalam sistem perkerasan jalan raya. Dalam pembuatan bahan bangunan Phosphogypsum digunakan sebagai bahan baku dan dikalsinasi, namun sifat mekaniknya tidak memuaskan. Phosphogypsum yang dipanaskan digunakan sebagai pengikat, meningkatkan kekuatan tekan dan lentur material. Agregat berbahan dasar Phosphogypsum yang digunakan pada pelat Roller Compacted Concrete (RCC) memberikan hasil yang baik untuk retardasi set dan kompensasi susut pengeringan. Studi tentang penggantian sebagian semen dengan berbagai persentase Phosphogypsum memberikan hasil yang baik dengan spesimen beton. Penelitian pada sifat teknik dasar dari campuran beton berbasis Phosphogypsum menyimpulkan bahwa sifat unik dari dihidrat Phosphogypsum di bawah pemadatan-konsolidasi dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kuat tekan campuran beton. Namun, dengan persentase Phosphogypsum yang lebih tinggi, kekuatan campuran beton dipengaruhi oleh kelembapan pada saat pengujian. Kekuatan tekan yang lebih baik dicapai dengan Phosphogypsum terkalsinasi. Studi dengan penggantian semen hingga 40% oleh Phosphogypsum memberikan tingkat optimal 10% [20]. Studi lain dengan penggantian OPC dan PPC pada mortar menemukan penurunan kekuatan tekan tetapi peningkatan kekuatan lentur dibandingkan dengan campuran konvensional [21]. Kehadiran Phosphogypsum dalam semen telah meningkatkan kekuatan awalnya dengan cepat. Perkembangan kekuatan ini disebabkan oleh pembentukan anhidrat pada suhu yang lebih tinggi. Campuran beton yang memadat sendiri menggunakan penggantian semen 0-30% persen juga memberikan kekuatan lentur maksimum dengan Phosphogypsum 10%. Studi tentang sifat-sifat pasta semen dan mortar menggunakan semen Portland Biasa, Semen Limestone Blended, dan semen Slag memberikan kekuatan tekan pada 7 dan 28 hari yang memuaskan hingga 8% penggantian Phosphogypsum untuk ketiga jenis semen pada proporsi campuran standar. Ketiga jenis semen ini juga telah memenuhi batas waktu pengikatan awal dan syarat kekokohan yang ditetapkan oleh standar. Studi menyarankan modifikasi dalam proses campuran beton untuk memasukkan Phosphogypsum mentah sebagai pengganti sebagian dalam mortar semen dan beton.

Mengingat karakteristik Phosphogypsum dan potensi ekonominya yang menarik saat ini, ada rasa ingin tahu yang luar biasa dalam menggunakan Phosphogypsum sebagai bahan baku alternatif untuk banyak aplikasi. Penggantian natural gypsum dengan persentase Phosphogypsum tertentu dapat memberikan hasil positif pada mortar dan beton meskipun masih ada perdebatan dalam literatur terkait. Penelitian ini terutama menyelidiki pengaruh penambahan Phosphogypsum dengan klinker semen terhadap sifat pasta, mortar dan beton. Dalam hal ini, baik kondisi lapangan maupun Phosphogypsum terkalsinasi digunakan dalam mortar dan beton pada tingkat penggantian 0%, 2%, 5%, 10% dan 15% dimana rasio air semen dipertahankan 0,45.

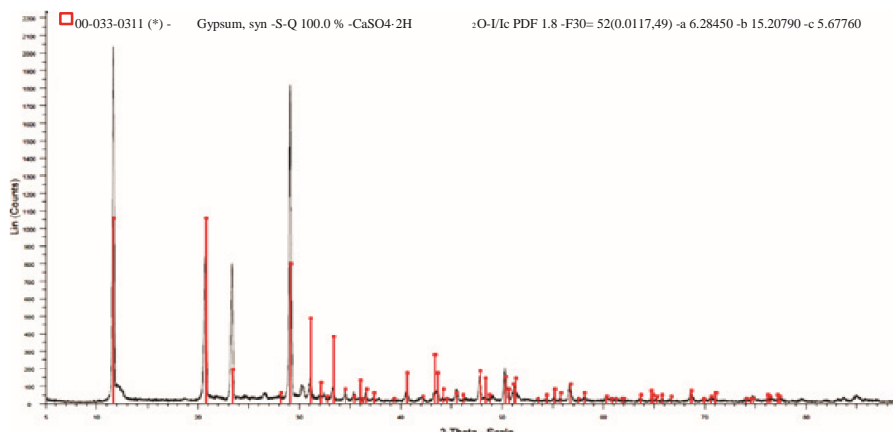
2. Persiapan Bahan & Spesimen

2.1. Sifat fisik Phosphogypsum

Kalsium sulfat dapat berupa dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) atau hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) tergantung pada suhu reaksi yang digunakan untuk menghasilkan asam fosfat. Biasanya kadar air bebas antara 25-30% terdapat pada gypsum cake setelah penyaringan. Bentuk Phosphogypsum hemihidrat yang dihasilkan, dengan adanya air bebas dapat dengan cepat berubah menjadi bentuk dehidrasi [24]. Selain itu, jika proses dibiarkan tidak terganggu akan membentuk massa semen yang relatif keras. Di-hidrat terutama terdiri dari ukuran lanau ($<0,075\text{mm}$) dan muncul sebagai agregat lunak kristal [25]. Itu tergantung pada sumber batuan fosfat dan kondisi reaktor.

2.2. Sifat kimia Phosphogypsum

Phosphogypsum terutama terdiri dari kalsium sulfat dehidrasi dengan sejumlah kecil silika. Komposisi mineralogi bijih fosfat dijelaskan oleh berbagai peneliti dan didominasi oleh fluorapatit, goetit dan kuarsa, dengan sejumlah kecil Al-fosfat, anatase, magnetit, monasit dan barit. Pola Difraksi sinar-X dari Phosphogypsum yang diperoleh diberikan pada Gambar. 1 menunjukkan bahan yang sebagian besar terdiri dari Gypsum.



Gambar. 1. X-ray Diffraction pattern of the Phosphogypsum sample

2.3. Properti material lainnya dan persiapan spesimen

Klinker semen Portland biasa, Phosphogypsum, pasir sungai bertingkat dan batu pecah digunakan untuk melakukan pengujian dalam penelitian ini. Modulus kehalusan pasir adalah 2,7 yang dicuci dan dikeringkan sebelum digunakan untuk menghindari adanya partikel debu dan tanah liat. Itu bebas dari bahan organik. Air minum biasa digunakan untuk pekerjaan pasta, mortar dan beton.

Sampel Phosphogypsum dikumpulkan dari kompleks triple superphosphate (TSP), Chittagong, Bangladesh. Industri ini memiliki produksi asam fosfat yang cukup besar dan akhirnya Phosphogypsum. Dua kategori sampel disiapkan menggunakan Phosphogypsum. Satu menggunakan Phosphogypsum mentah (ditemukan dalam kondisi lapangan setelah produksi) dan sampel lainnya dicuci. Setelah dicuci sampel dikeringkan dengan oven untuk mendapatkan Phosphogypsum kering.

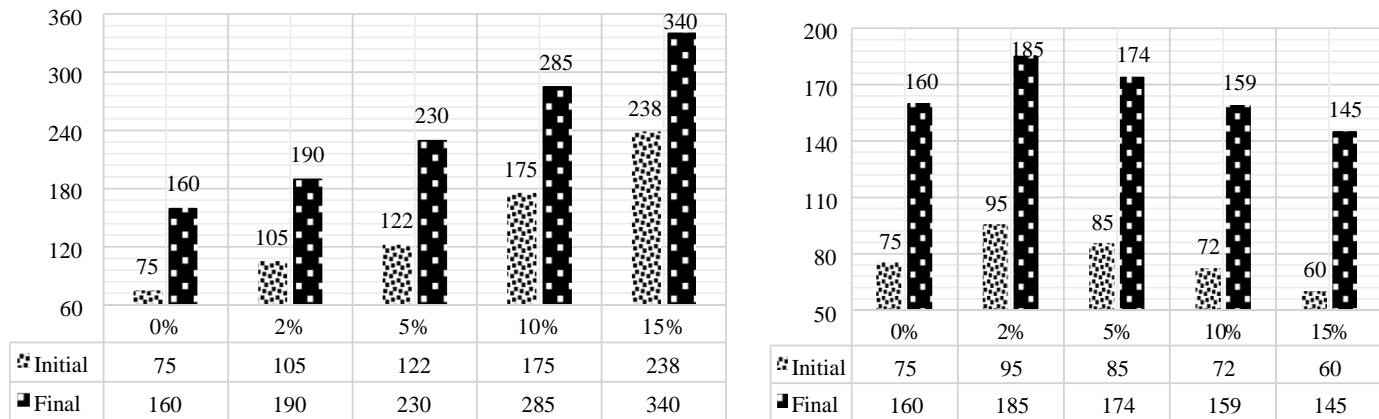
Pengaturan waktu pasta dan aliran sampel mortar dilakukan masing-masing sesuai dengan ASTM C191 dan ASTM 1437. Uji kuat tekan mortar dan beton dilakukan sesuai ASTM C109 dan ASTM C39.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Setting Time

Hasil pengujian setting time disajikan pada Gambar. 2 dan 3. Konsistensi pasta semen diperkirakan sebelum dilakukan pengujian setting time. Setting time selalu ditemukan lebih tinggi pada kondisi proses

dibandingkan kondisi lapangan. Menggunakan lebih dari dua persen Phosphogypsum , waktu pengerasan berkurang secara bertahap untuk kondisi diproses, namun hal ini berlawanan dengan sampel basah. Pada kondisi lapangan penambahan 2% Phosphogypsum ke dalam campuran memberikan waktu pengerasan hingga 3 jam 10 menit. Dalam kondisi kering lebih dari 5% Phosphogypsum menurunkan nilai setting time dibandingkan sampel kontrol. Ini mungkin karena pembentukan anhidrat pada tahap awal [21]. Sampel yang diproses memberikan penambahan 10% sebagai optimum untuk waktu pengerasan awal dan akhir (sebanding dengan sampel kontrol).

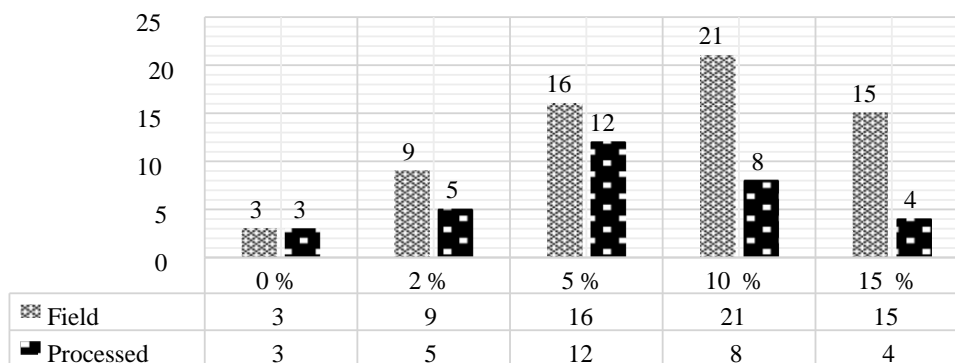


Gambar. 2. Setting time of cement clinker and phosphogypsum (field condition)

Gambar. 3. Setting time of cement clinker and phosphogypsum (processed sample)

3.2. Flow Mortar

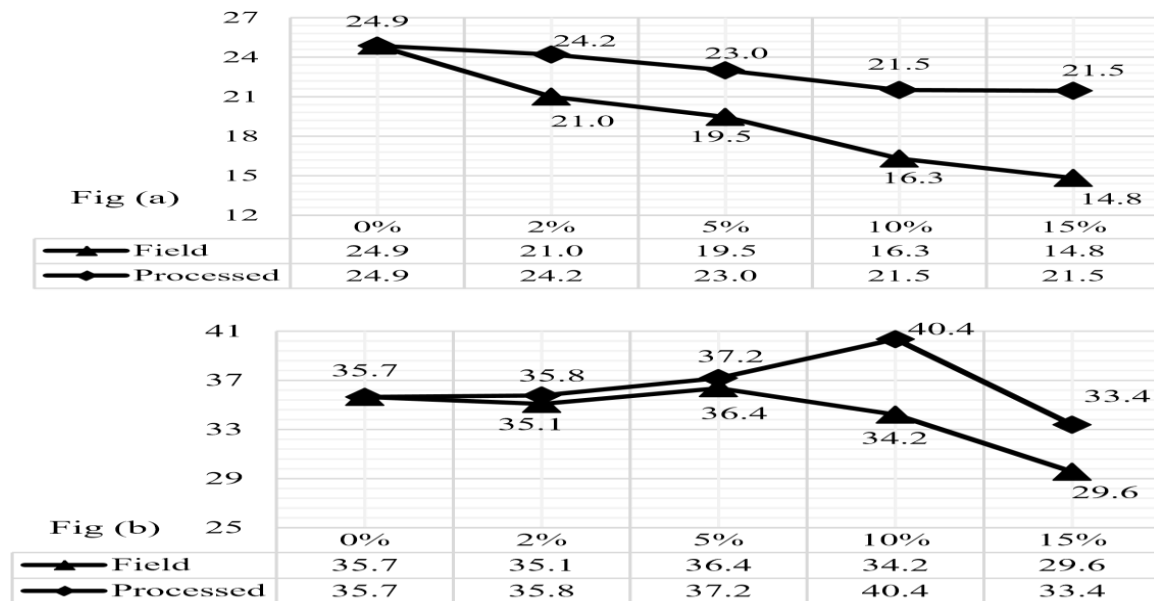
Aliran sampel mortar dengan persentase Phosphogypsum yang berbeda disajikan pada Gambar. 4. Aliran mortar yang lebih tinggi diperoleh dengan semua tingkat penggantian dibandingkan dengan mortar kontrol. Sampel lapangan memberikan hasil yang lebih baik daripada sampel olahan. Hal ini mungkin karena adanya jumlah air yang lebih tinggi dalam kondisi lapangan. Selain itu, sampel yang diproses dapat menggumpal selama pengeringan dan mungkin tidak terpisah sepenuhnya selama pencampuran dan pengujian. Untuk kondisi lapangan dan proses, penambahan 10% dan 5% ditemukan paling baik untuk pertimbangan aliran.



Gambar. 4. Flow of mortar using various level field and processed phosphogypsum addition

3.3. Kekuatan tekan mortar

Kuat tekan sampel mortar pada umur curing 7 & 28 hari disajikan pada Gambar. 5(a) dan 5(b). Pada hari ke 7 kekuatan menurun dengan kandungan Phosphogypsum memberikan hasil yang lebih baik untuk sampel yang diproses. Pada hari ke 28 sampel basah memberikan optimum pada tingkat penggantian 5% sementara kekuatan ditingkatkan hingga 10% penambahan sampel yang diproses.



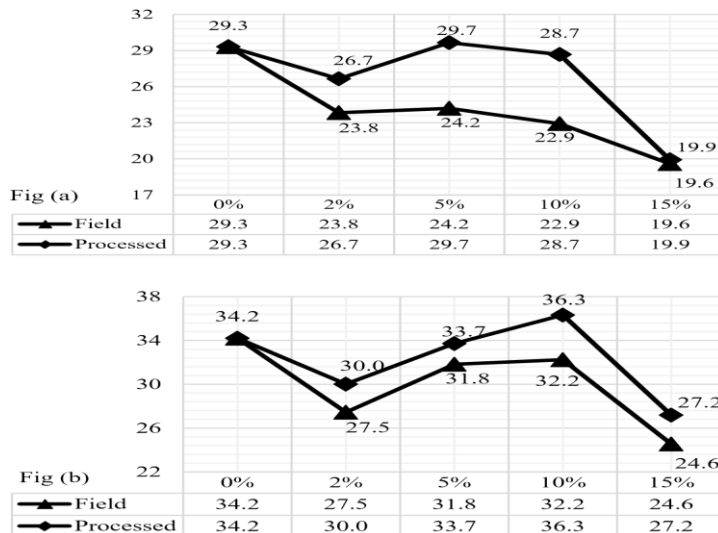
Gambar 5. Kuat tekan mortar pada (a) 7 hari dan (b) 28 hari

Ini menunjukkan keunggulan sampel yang diproses dibandingkan sampel yang diajukan mentah. Kondisi lapangan banyak mengandung air yang dapat mempengaruhi rasio w/c campuran. Dapat juga dicatat bahwa pada pemrosesan sampel kotoran yang ada dalam sampel mentah dihilangkan yang memberikan hasil yang lebih baik. Untuk mendapatkan penyebab sebenarnya peningkatan kekuatan dengan sampel yang diproses, penelitian lebih lanjut mengingat proses kimia yang terlibat diperlukan.

3.4. Kekuatan tekan beton

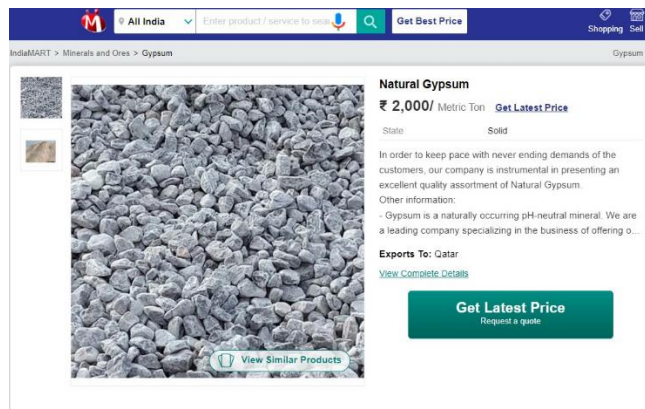
Kekuatan beton dirancang untuk 28 MPa dan semen yang dihitung diganti dengan Phosphogypsum dengan berat 0%, 2%, 5%, 10% dan 15%. Hasil uji kuat tekan 7 hari dan 28 hari diberikan pada Gambar. 6(a) dan 6(b). Seperti halnya mortar, secara umum diamati bahwa bahan yang diproses memberikan kekuatan yang lebih tinggi daripada sampel lapangan. Hasil menunjukkan bahwa penambahan Phosphogypsum 5% dan 10% pada kondisi olahan menunjukkan hasil yang mirip dengan beton tanpa Phosphogypsum pada 7 hari. Pada usia ini kecenderungan penurunan kekuatan dengan penambahan Phosphogypsum dicatat untuk kondisi lapangan. Pada hari ke 28 bahan yang diproses memberikan kekuatan beton yang lebih tinggi dari sampel kontrol pada penambahan 10% dan untuk kondisi lapangan tingkat ini memberikan kekuatan yang lebih rendah tetapi ditemukan optimal mengingat semua tingkat penggantian. Menambahkan lebih dari 10% Phosphogypsum mengurangi kekuatan beton secara signifikan baik untuk kondisi lapangan maupun proses.

Penelitian ini mempelajari sifat pasta, mortar dan beton yang berbeda dengan menambahkan berbagai proporsi Phosphogypsum dengan semen. Penambahan Phosphogypsum hingga 5-10% memberikan hasil yang lebih baik. Secara umum, pengolahan Phosphogypsum dengan pencucian dan pengeringan memberikan kinerja yang lebih baik pada semua media. Investigasi detail lebih lanjut tentang sifat Phosphogypsum dan mekanisme reaksi dapat memberikan pemahaman yang lebih baik.

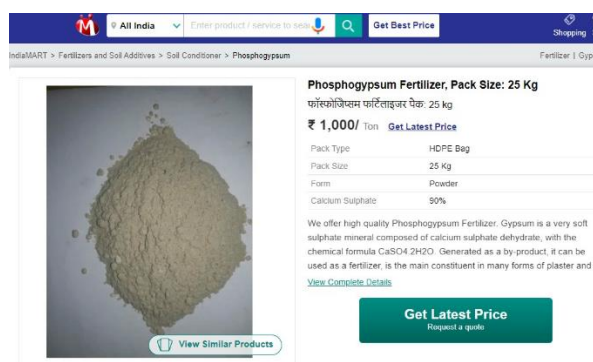


Gambar 6 Kuat tekan beton dengan penambahan Phosphogypsum pada (a) 7 hari dan (b) 28 hari

3.5 Analisa ekonomi



Gambar 7. Harga natural gypsum



Gambar 8. Harga Phosphogypsum

Berdasarkan beberapa sumber harga natural gypsum berkisar IDR 380.000,00 per ton atau setara, sedangkan harga phosphogypsum sekitar IDR 180.000,00 per ton. Dengan kualitas kandungan SO₃ yang setara jumlah penggunaan relatif sama. Sehingga Dengan demikian bisa kita kalkulasi bahwa penggunaan phosphogypsum dapat menghemat Lebih dari 50% untuk biaya material gypsum, bahkan biaya ini bisa lebih murah lagi jika phosphogypsum didapatkan dari industri dalam negeri ataupun local yang jaraknya lebih dekat, sehingga biasa transportnya lebih rendah. Hal ini jauh lebih ekonomis jika dibandingkan dengan pembelian material natural gypsum yang hampir semuanya didapatkan secara import dari negara lain.

KESIMPULAN

Industri kadang-kadang menjual produk dengan harga rendah tetapi terutama digunakan untuk penimbunan. Penambahan Phosphogypsum 5-10% dengan klinker semen Portland memberikan hasil yang menjanjikan saat menguji berbagai sifat segar dan keras dari pasta semen, mortar dan beton. Sampel lapangan mentah diproses dengan pencucian dan selanjutnya pengeringan. Secara umum pengolahan Phosphogypsum memberikan kinerja yang lebih baik pada semua media. Sampel yang diproses memberikan kinerja yang lebih baik atau setidaknya serupa daripada sampel kontrol (100% klinker) dalam bentuk pasta, mortar dan beton pada tingkat penambahan 10%. Secara ekonomi phosphogypsum dapat menekan biaya material dan produksi dan berdampak positif pada pemanfaatan limbah industri fertilizer. Dengan demikian produk sampingan industri dapat digunakan secara berkelanjutan sebagai pengganti gipsum alami (umumnya menggunakan 5% dari total semen) dalam pembuatan semen. Industri semen kemudian dapat mengurangi ketergantungan pada gipsum alami untuk produksinya. Disamping Itu Penggunaan Gypsum Phospo yang di dapat dari produk samping Industri Petrokimia dalam Negeri dapat Meningkatkan % TKDN industri sehingga sejalan dengan Program pemerintah yang berjalan. Pekerjaan penelitian dan pengembangan yang lebih rinci dapat membantu memastikan penggunaan bahan ini dengan lebih baik dalam industri konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Banu, S. S., & Haq, M. N. A Study on the Mechanical Properties Such as Compressive Strength, Split Tensile Strength and Flexural Strength for Various Percentages of Phosphogypsum. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 2015, Issue 5, Vol. 4, pp. 264-387.
- [2] Szykowska, Malgorzata Iwona, Aleksandra Pawlaczyk, and Jacek Rogowski. *Characterization of Particles Transmitted by Wind from Waste Dump of Phosphatic Fertilizers Plant Deposited on Biological Sample Surfaces*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [3] Al-Masri, M. S., et al. "Distribution of some trace metals in Syrian phosphogypsum." *Applied Geochemistry* 19.5 (2004): 747-753.
- [4] Arocena, J. M., P. M. Rutherford, and M. J. Dudas. "Heterogeneous distribution of trace elements and fluorine in phosphogypsum by-product." *Science of the total environment* 162.2 (1995): 149-160.
- [5] Rutherford, P. M., M. J. Dudas, and J. M. Arocena. "Radioactivity and elemental composition of phosphogypsum produced from three phosphate rock sources." *Waste Management & Research* 13.5 (1995): 407-423.
- [6] Singh, Manjit. "Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture." *Cement and Concrete Research* 32.7 (2002): 1033-1038.
- [7] Singh, Manjit. "Effect of phosphatic and fluoride impurities of phosphogypsum on the properties of selenite plaster." *Cement and Concrete Research* 33.9 (2003): 1363-1369.
- [8] Singh, Manjit. "Role of phosphogypsum impurities on strength and microstructure of selenite plaster." *Construction and building materials* 19.6 (2005): 480-486.
- [9] Potgieter, J. H., et al. "An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement." *Cement and concrete research* 33.8 (2003): 1223-1227.
- [10] Potgieter, J. H., et al. "An investigation into the effect of various chemical and physical treatments of a South African phosphogypsum to render it suitable as a set retarder for cement." *Cement and concrete research* 34.4 (2004): 677-680.

- [11] Kacimi, Larbi, et al. "Reduction of clinkerization temperature by using phosphogypsum." *Journal of hazardous materials* 137.1 (2006): 129-137.
- [12] Erdogan, Yunus, Ayhan Demirbas, and Hasan Genc. "Partly-refined chemical by-product gypsums as cement additives." *Cement and concrete research* 24.4 (1994): 601-604.
- [13] Foxworthy, Paul T., Elfriede Ott, and Roger K. Seals. Utilization of phosphogypsum-based slag aggregate in portland cement concrete mixtures. No. 1437. 1994.
- [14] DWL on of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products." *Construction and Building Materials* 22.8 (2008): 1857-1862.
- [15] Nanni, Antonio, and Wen F. Chang. "Phosphogypsum-based roller compacted concrete." *Concrete International* 11.11 (1989): 48-53.
- [16] Bagade, Mahesh A., and S. R. Satone. "An experimental investigation of partial replacement of cement by various percentage of Phosphogypsum in cement concrete."
- [17] Ghafoori, Nader, and Wen F. Chang. "Investigation of phosphate mining waste for construction materials." *Journal of materials in civil engineering* 5.2 (1993): 249-264.
- [18] Lin, K. T., and W. F. Chang. "Strength properties of compacted phosphogypsum-based mixtures, Volume II." *Proceedings of the second International symposium on phosphogypsum, University of Miami, Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, (January 1988).*
- [19] Taher, M. A. "Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement." *Resources, Conservation and Recycling* 52.1 (2007): 28-38.
- [20] Reddy, T. Siva Sankar, D. Rupesh Kumar, and H. Sudarsana Rao. "A study on the strength characteristics of Phosphogypsum concrete" *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* 11.4 (2010): 411-420.
- [21] Smadi, M. M., Haddad, R. H., & Akour, A. M. (1999). Potential use of phosphogypsum in concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (9), 1419-1425.
- [22] El Nouhy, Hanan, Enas Khattab, and Sayieda Zeedan. "Behavior of Cement Pastes and Mortar Containing Phosphogypsum." *Key Engineering Materials*. Vol. 668. Trans Tech Publications, 2015.
- [23] Bhadauria, S. S., and Rajesh B. Thakare. "Utilisation of phosphogypsum in cement mortar and concrete." *31st Conference on Our World in Concrete & Structures*. 2006.
- [24] Bhawan, Parivesh, and East Arjun Nagar. "Guidelines for Management and Handling of Phosphogypsum Generated from Phosphoric Acid Plants (Final Draft)." (2012).
- [25] Wissa, A. E. Z., M.A., Phosphogypsum Disposal and the Environment. Available online at: www.ardaman.com/phosphogypsum_disposal.htm (last accessed on October, 2015)
- [26] Carbonell-Barrachina, A., R. D. DeLaune, and A. Jugsujinda. "Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions" *Waste Management* 22.6 (2002): 657-665.
- [27] de Oliveira, Sonia Maria Barros, and Rosely Aparecida Liguori Imbernon. "Weathering alteration and related REE concentration in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil" *Journal of South American Earth Sciences* 11.4 (1998): 379-388.
- [28] <https://www.indiamart.com/proddetail/white-gypsum-granules-23791499973.html?>

[29] <https://anugrahmineralindustri.com/produk/harga-tepung-gypsum-natural-dan-kalsinasi>