

PEMANFAATAN *FLUE GAS DESULFURIZATION* (FGD) GIPSUM SEBAGAI BAHAN RETARDER PADA *PORTLAND COMPOSITE CEMENT* (PCC)

Robiansyah¹, I.R. Umroh¹ dan K. Aini¹

¹ Unit of Quality Control, PT. Semen Baturaja Tbk, Baturaja
Corresponding author: robiansyah.1191@sig.id

ABSTRAK: *Flue Gas Desulfurization* (FGD) gipsum adalah produk samping industri yang berasal dari gas buang pembangkit listrik. FGD gipsum termasuk ke dalam limbah B3 dan dapat digunakan dalam industri manufaktur semen. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik FGD gipsum sebagai bahan retarder semen jenis *Portland Composite Cement* (PCC) ditinjau dari *setting time* dan kuat tekan mortar semen yang dihasilkan. Pada penelitian ini dibuat mix desain variasi FGD gipsum dari 2% sampai dengan 5% dengan kenaikan sebesar 0.5%. Bahan baku terdiri dari clinker, FGD gipsum, *limestone* dan *fly ash* digiling bersamaan di dalam mini *ball mill*. Dari variasi tersebut dilakukan pengujian untuk melihat pengaruh penambahan FGD gipsum terhadap kadar SO_3 dalam semen dan pengaruhnya terhadap *setting time* dan kuat tekan mortar semen. Data hasil pengujian menunjukkan kadar SO_3 semen PCC meningkat seiring dengan naiknya proporsi FGD gipsum. Variasi penambahan FGD gipsum dari 2% sampai dengan 5%, semua sampel semen masih memenuhi standar SNI baik untuk *setting time* awal maupun *setting time* akhir, dimana seiring penambahan FGD gipsum, maka nilai *setting time* akan semakin meningkat. Kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur, dimana laju peningkatannya tergantung pada kandungan FGD gipsum dan umurnya. Penambahan FGD gipsum dari 2% sampai dengan 3% memenuhi standar SNI untuk semua umur kuat tekan, dengan optimum penggunaan FGD gipsum sebesar 2.5% untuk mencapai kuat tekan maksimum pada umur 28 hari. Kuat tekan mortar semen mengalami penurunan seiring dengan penambahan FGD gipsum di atas 3%.

Kata Kunci: FGD gipsum, *Portland Composite Cement* (PCC), *setting time*, kuat tekan mortar semen

ABSTRACT: *Flue Gas Desulfurization* (FGD) gypsum is an industrial by-product originating from flue gas of power plant. Gypsum FGD is hazard waste and can be used in the cement manufacturing industry. This research aims to study the characteristics of gypsum FGD as a *Portland Composite Cement* (PCC) in terms of *setting time* and compressive strength of the cement mortar produced. In this research, a mix design for FGD gypsum variations was created from 2% to 5% with an increase of 0.5%. The raw materials consist of clinker, FGD gypsum, *limestone* and *fly ash* which are ground together in a mini *ball mill*. From these variations, tests were carried out to see the effect of adding FGD gypsum on SO_3 content in cement and its effect on *setting time* and compressive strength of cement mortar. Test result data shows that the SO_3 content of PCC cement increases along with the increase in the proportion of FGD gypsum. Varying the addition of FGD gypsum from 2% to 5%, all cement samples still meet Indonesian Standards for both initial *setting time* and final *setting time*, where as FGD gypsum is added, the *setting time* value will also increase. Compressive strength increases with age, where the rate of increase depends on the FGD gypsum content and age. The addition of gypsum FGD from 2% to 3% meets Indonesian Standards for all compressive strength ages, with the optimum use of FGD gypsum of 2.5% to achieve maximum compressive strength at 28 days. The compressive strength of cement mortar decreased with the addition of FGD gypsum above 3%.

Keywords: FGD gypsum, *Portland Composite Cement* (PCC), *setting time*, compressive strength

PENDAHULUAN

Portland Composite Cement (PCC) adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan lebih dari satu bahan anorganik (*supplementary cementitious material*), atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain (SNI 7064, 2022).

Clinker atau terak dihasilkan dari proses pembakaran batu kapur dan tanah liat pada temperatur sekitar 1450 °C di dalam mesin *rotary kiln*. Kandungan clinker terdiri atas kalsium silikat (C₃S dan C₂S) dan aluminat (C₃A dan C₄AF) (Mohammed & Safiullah, 2018).

Industri manufaktur semen merupakan konsumen terbesar dalam penggunaan gipsium sebagai bahan tambahan dalam produksi semen, dimana dalam pembuatan semen jenis *Portland Composite Cement (PCC)* gipsium yang ditambahkan berkisar 2-4% tergantung dengan kadar kemurniannya.

Saat ini di industri manufaktur semen dalam memproduksi semen jenis PCC sebagian besar menggunakan *phosphogypsum* yang merupakan produk samping dari industri pembuatan pupuk fosfat.

Selain *phosphogypsum* yang berasal dari produk samping industri pupuk fosfat, terdapat juga gipsium yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yaitu *Flue Gas Desulfurization (FGD) gypsum* yang bisa juga dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam memproduksi semen jenis *Portland Composite Cement (PCC)*.

Flue Gas Desulfurization (FGD) gypsum adalah produk samping industri dari reaksi kalsium karbonat dengan sulfur dioksida yang terkandung dalam gas buang yang berasal dari gas buang pembangkit listrik (Duan *et al*, 2012).



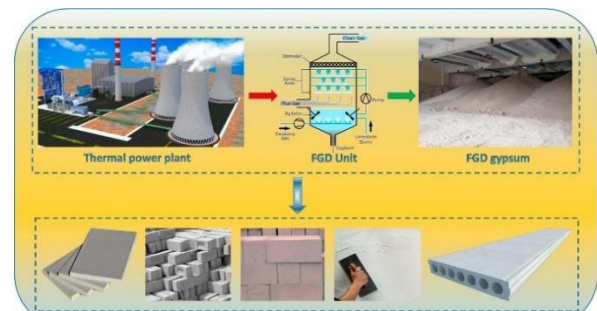
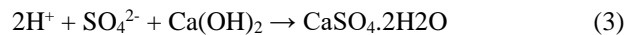
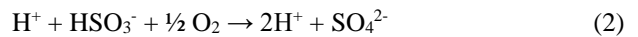
Gambar 1 Serbuk *Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum*

FGD gipsium sebagian besar terdiri dari *bassanit* (CaSO₄.0,6H₂O) dan *hannebachite* (CaSO₃.0,5H₂O) (Caillahua & Moura, 2018). Ini adalah gas buang yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara, minyak dan bahan bakar yang mengandung sulfur dengan

menggunakan teknologi pemurnian desulfurisasi (Yang *et al*, 2013).

Teknologi FGD ini dapat mengurangi sulfur dioksida (SO₂) dari emisi gas buang pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Namun dari proses ini menghasilkan gipsium sebagai produk samping.

Komposisi kimia dari FGD gipsium adalah CaSO₄.2H₂O, identik dengan gipsium alami (Aakriti *et al*, 2023). Reaksi yang terjadi pada proses konversi gas SO₂ menjadi FGD gipsium adalah sebagai berikut:



Gambar 2 Proses *Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum*.

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, gipsium yang berasal dari dari proses desulfurisasi PLTU termasuk kedalam jenis limbah B3 dari sumber spesifik khusus dengan kode limbah B414 dengan kategori bahaya 2. Limbah B3 kategori 2 merupakan limbah B3 yang mengandung B3, memiliki efek tunda (*delay effect*) dan berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan hidup serta memiliki toksisitas sub-kronis atau kronis.

Limbah B3 seperti FGD gipsium ini yang tidak diolah dengan baik seperti ditempatkan pada lahan terbuka dikhawatirkan dapat mempengaruhi air tanah dan air permukaan yang bisa menyebabkan pencemaran lingkungan. Salah satu alternatif pengolahan dari FGD gipsium adalah dengan memanfaatkannya sebagai bahan tambahan dalam proses pembuatan semen. Penggunaan limbah dari hasil produk samping industri dalam produksi semen mempunyai peran yang berharga dalam melestarikan lingkungan regional (Yamashita *et al*, 2020).

Gipsium didalam semen dibutuhkan sebagai retarder untuk mengontrol laju pengerasan semen. Tanpa gipsium, semen yang dihasilkan akan mengalami cepat kaku dan mengganggu *workability*. Saat ini penggunaan FGD gipsium sebagai retarder semen merupakan sarana yang

efektif dalam pemanfaatan FGD gipsum sebagai sumber daya (Duan *et al*, 2012).

Saat ini pengaruh FGD gipsum sebagai bahan tambahan di semen jenis *Portland Composite Cement* (PCC) belum ada yang melaporkan dalam bentuk penelitian. Penting bagi kita untuk memanfaatkan FGD gipsum sebagai bahan retarder sesuai dengan karakteristiknya. Sehingga pemanfaatan ini dapat menghasilkan manfaat ekonomi, sosial dan lingkungan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari karakteristik FGD gipsum sebagai bahan retarder semen jenis *Portland Composite Cement* (PCC) ditinjau dari *setting time* dan kuat tekan mortar semen yang dihasilkan.

METODOLOGI PENELITIAN

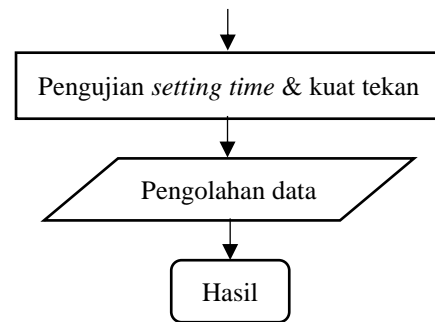
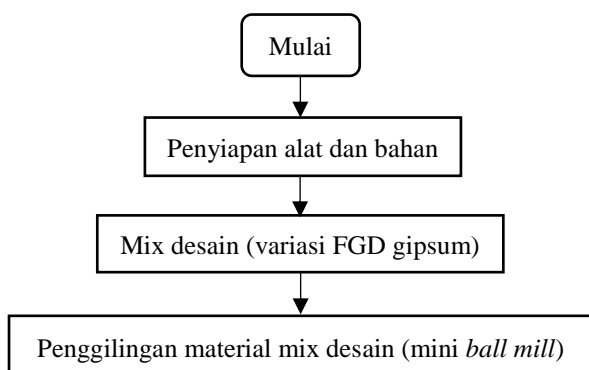
Metode yang digunakan adalah metode eksperimental di laboratorium dan mencakup tinjauan pustaka. Persiapan bahan dan peralatan pengujian dilakukan selanjutnya dilakukan proses penelitian. Pada penelitian ini dibuat 7 variasi sampel dengan mix desain variasi FGD gipsum yang berbeda-beda.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu XRF, mini *ball mill*, *oven*, *jaw crusher*, timbangan, *vicat*, *mixer*, *sieve 100 mesh* dan *stop watch*. Bahan yang digunakan yaitu clinker dan *limstone* yang berasal dari PT. Semen Baturaja Tbk, *fly ash* dari PT. Pusri, FGD gipsum dari PLTU Sumsel 8, air demineral dan pasir otawa.

Tahapan Proses

Tahapan proses penelitian seperti pada Gambar 3. Tahapan berupa persiapan bahan baku dan penggilingan menggunakan mini *ball mill* dengan variasi komposisi material seperti pada Tabel 1 dan dilanjutkan dengan pengujian *setting time* dan kuat tekan mortar semen yang dihasilkan dari proses penggilingan. Pada proses ini menyerupai proses penggilingan pada manufaktur. Berdasarkan variasi tersebut dilakukan untuk mempelajari pengaruh persentase FGD gipsum yang digunakan terhadap kadar SO_3 dalam semen hasil penggilingan dan pengaruhnya terhadap *setting time* dan kuat tekan mortar semen.



Gambar 3 Tahapan Proses Penelitian

Tabel 1 Mix Desain *Portland Composite Cement* (PCC)

Kode Sampel	Komposisi Bahan (%)			
	Clinker	FGD Gipsum	Limestone	Fly Ash
FGD-2	60.0	2.0	34	4
FGD-2.5	59.5	2.5	34	4
FGD-3	59.0	3.0	34	4
FGD-3.5	58.5	3.5	34	4
FGD-4	58.0	4.0	34	4
FGD-4.5	57.5	4.5	34	4
FGD-5	57.0	5.0	34	4

Pengujian *Setting Time*

Pengujian *setting time* dilakukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan oleh semen untuk mengalami pengerasan. Metode pengujian mengacu ke SNI 2049-8:2021. Metode pengujian ini mencakup penentuan waktu pengikatan semen hidrolik dengan jarum *vicat*.

Pengujian Kuat Tekan Mortar

Pengujian kuat tekan mortar semen dilakukan untuk mengetahui kemampuan menahan beban semen yang dihasilkan. Metode pengujian mengacu ke SNI 2049-7:2022. Metode ini mencakup penentuan kuat tekan

mortar semen hidraulis, menggunakan spesimen kubus ukuran 2 in atau 50 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi dan persentase dari FGD gipsum sangat tergantung dari asal sumber nya. Berdasarkan hasil analisa XRF, FGD gipsum memiliki kesamaan komposisi kimia dibandingkan dengan laporan FGD gipsum sesuai dengan literatur (Caillahua & Moura, 2018).

Tabel 2 Komposisi Kimia FGD Gipsum

Parameter	Sampel FGD Gipsum	FGD Gipsum Refrensi		
		China	Yunani	Turki
CaO	35.10	31.84	33.4	31.91
SiO ₂	1.94	1.85	0.30	2.03
Al ₂ O ₃	0.95	0.24	0.10	0.52
Fe ₂ O ₃	0.24	0.12	-	0.21
MgO	0.37	0.05	0.10	0.42
SO ₃	41.94	43.79	42.19	43.13
P ₂ O ₅	0.02	-	-	-
K ₂ O	0.10	0.06	-	-
LOI	20.90	20.22	-	20.88

Tabel 2 menunjukkan perbandingan komposisi FGD gipsum yang digunakan pada penelitian yaitu FGD gipsum yang berasal dari PLTU Sumsel 8 dengan FGD gipsum yang berasal dari China, Yunani dan Turki berdasarkan literatur.

Secara umum berdasarkan komposisi kimia tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara FGD gipsum yang digunakan sebagai sampel pada penelitian dengan FGD gipsum dari literatur, hanya nilai SO₃ nya yang cenderung lebih rendah. Nilai SO₃ yang lebih rendah

mengindikasikan kemurnian FGD gipsum yang digunakan sebagai sampel pada penelitian lebih rendah dibandingkan dengan FGD gipsum refrensi.

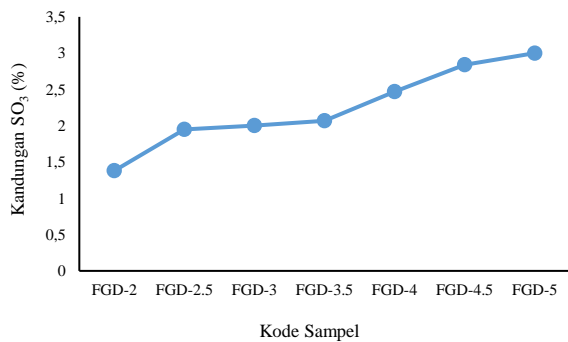
Semen yang dihasilkan dari proses penggilingan menggunakan mini *ball mill* dengan berbagai variasi FGD gipsum yang berbeda dilakukan pengujian yaitu kadar SO₃ untuk melihat tren peningkatan kandungan SO₃ dalam semen, *setting time* untuk melihat pengaruh laju pengerasan semen dan kuat tekan mortar semen pada umur 3, 7 dan 28 hari.

Tabel 3 Data Pengujian *Portland Composite Cement* (PCC)

Kode Sampel	SO ₃ (%)	Setting Time (menit)		Kuat Tekan (kg/cm ²)		
		Awal	Akhir	3	7	28
				Hari	Hari	Hari
FGD-2	1.38	119	201	184	226	302
FGD-2.5	1.95	123	202	183	229	305
FGD-3	2.00	128	204	185	228	290
FGD-3.5	2.07	130	211	174	210	276
FGD-4	2.47	134	215	161	201	253
FGD-4.5	2.84	136	215	159	188	245
FGD-5	3.00	138	217	136	175	235

Tabel 3 menunjukkan data pengujian semen hasil penggilingan menggunakan mini *ball mill* dengan berbagai variasi FGD gipsum mulai dari 2% sampai dengan 5% dengan kenaikan sebesar 0.5%. Data hasil pengujian menunjukkan kadar SO₃ dalam semen PCC semakin meningkat seiring dengan naiknya proporsi FGD gipsum. Kenaikan ini disebabkan sumbangsih dari kandungan SO₃ yang terdapat dalam FGD gipsum sebesar 41.94%.

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara peningkatan variasi penggunaan FGD gipsum dengan peningkatan kandungan SO_3 di dalam semen. Hal ini dikarenakan gipsum dengan rumus kimia $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ merupakan sumber utama SO_3 .



Gambar 4 Pengaruh Penambahan FGD Gipsum Terhadap Kandungan SO_3 Semen PCC

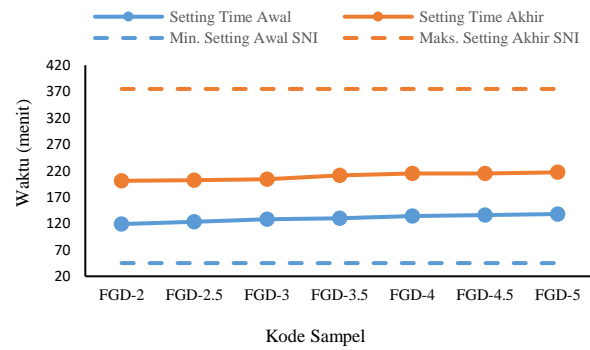
Pengaruh Variasi FGD Gipsum Terhadap *Setting Time*

Setting time adalah waktu yang diperlukan oleh semen untuk mengalami pengerasan sejak semen bercampur dengan air menjadi pasta.

Berdasarkan data hasil pengujian pada Tabel 3, dengan kenaikan variasi FGD gipsum, *setting time* juga mengalami kenaikan baik untuk *setting time* awal maupun *setting time* akhir. Hal ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Islam dkk, 2017.

Di dalam semen C_3A akan bereaksi paling cepat menghasilkan CAH (kalsium aluminat hidrat) yang berbentuk gel dan kaku (Herliati et al, 2021). Dengan adanya gipsum, CAH akan bereaksi membentuk *ettringite* yang akan membungkus permukaan CAH dan C_3A sehingga mencegah reaksi C_3A dan menunda waktu *setting*.

Akibat adanya fenomena osmosis, lapisan *ettringite* akan pecah dan reaksi C_3A akan terjadi kembali, namun tak lama kemudian *ettringite* baru juga terbentuk. Proses yang terjadi ini menghasilkan waktu *setting*. Semakin banyak *ettringite* yang terbentuk maka waktu *settingnya* akan semakin lama.



Gambar 5 Pengaruh Penambahan FGD Gipsum Terhadap *Setting Time* Semen

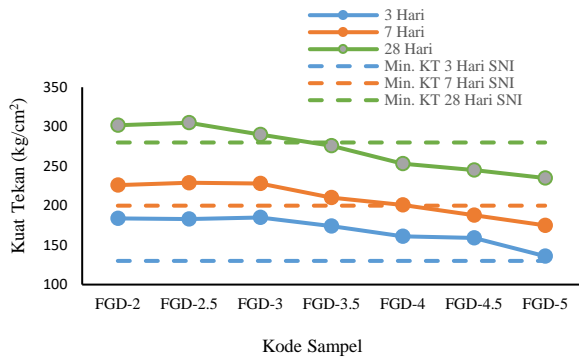
Gambar 5 menunjukkan hubungan antara peningkatan variasi penggunaan FGD gipsum dengan peningkatan waktu *setting time*. Dari hasil penelitian, variasi FGD gipsum sebesar 2%, *setting time* awal selama 119 menit kemudian meningkat seiring kenaikan FGD gipsum mencapai 5% dengan *setting time* awal selama 201 menit, begitu juga dengan *setting time* akhir.

Berdasarkan SNI 7064: 2022, standar *setting time* untuk semen jenis PCC adalah minimal 45 menit untuk *setting time* awal dan maksimal 375 menit untuk *setting time* akhir. Dari data yang didapatkan pada penelitian ini sesuai pada Tabel 3, variasi penambahan FGD gipsum dari 2% sampai dengan 5%, semua sampel semen masih memenuhi standar SNI baik untuk *setting time* awal maupun *setting time* akhir.

Pengaruh Variasi FGD Gipsum Terhadap Kuat Tekan Mortar Semen

Kuat tekan mortar semen adalah kemampuan yang dimiliki oleh semen untuk menahan beban tekanan. Mortar adalah campuran antara semen, air dan pasir dengan perbandingan tertentu. Dalam penelitian ini mortar semen diuji kuat tekan pada umur 3, 7 dan 28 hari dengan data hasil pengujian pada Tabel 3.

Kuat tekan semen dapat dipengaruhi oleh gipsum, karena gipsum dapat mengatur reaksi hidrasi ketika semen bercampur dengan air. Apabila kandungan gipsum kurang didalam semen, maka akan terdapat kelebihan mineral C_3A yang dapat meningkatkan panas hidrasi sehingga semen mudah retak saat digunakan (Herliati et al, 2021). Sedangkan jika kandungan gipsum berlebih, dapat menyebabkan waktu pengerasan yang lambat dan bisa menurunkan kuat tekan.

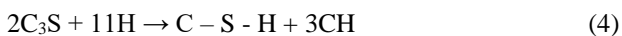


Gambar 5 Pengaruh Penambahan FGD Gypsum Terhadap Kuat Tekan Mortar Semen PCC

Pengaruh kandungan FGD gypsum terhadap kuat tekan mortar semen ditunjukkan pada Gambar 5, kuat tekan akan meningkat seiring bertambahnya umur, dimana laju peningkatannya tergantung pada kandungan FGD gypsum dan umurnya. Pada umur kuat tekan 3 dan 7 hari, variasi FGD gypsum 2-3% cukup stabil, namun pada umur kuat tekan 28 hari mengalami penurunan pada variasi FGD gypsum sebesar 3% dan semakin menurun seiring bertambahnya variasi FGD gypsum untuk semua umur kuat tekan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kuat tekan mortar semen optimum pada penambahan FGD gypsum sebesar 2-3% pada umur kuat tekan 3 dan 7 hari, sedangkan pada umur 28 hari kuat tekan optimum di variasi FGD gypsum sebesar 2.5%. Di atas penambahan ini kuat tekannya meningkat seiring bertambahnya umur dan menurun dengan meningkatnya kandungan FGD gypsum.

Diketahui bahwa gypsum meningkatkan *dissolution* kalsium silikat (C_3S dan C_2S) dan mempercepat reaksi hidrasinya menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan *portlandite* menurut reaksi 4 dan 5 (Mohammed & Safiullah, 2018).



Selain itu gypsum memiliki efek yang menguntungkan pada jumlah C-S-H yang terbentuk (Kurdowski, 2014). Kuat tekan tergantung dari produk hidrasi yang dihasilkan terutama C-S-H. Dengan adanya gypsum laju *dissolution* kalsium silikat (C_3S dan C_2S) meningkat terutama pada umur kuat tekan awal.

Variasi FGD Gypsum 2-3% menegaskan adanya optimum penggunaan gypsum didalam semen, dimana pada penelitian ini variasi FGD gypsum diatas 3% kuat tekan mortar semen umur 3 dan 7 hari mengalami penurunan seiring penambahan FGD gypsum. Sedangkan

pada umur kuat tekan 28 hari, penurunan kuat tekan terjadi pada penambahan FGD gypsum sebesar 3%.

Penggunaan kandungan gypsum yang sesuai meningkatkan kualitas C-S-H, sedangkan kelebihan gypsum menghasilkan C-S-H yang lebih rendah dengan rasio C/S yang lebih tinggi yang menurunkan kuat tekan (Mohammed & Safiullah, 2018).

Berdasarkan SNI 7064: 2022, standar kuat tekan mortar untuk semen jenis PCC adalah minimal 135 kg/cm² pada umur 3 hari, 200 kg/cm² pada umur 7 hari dan 280 kg/cm² pada umur 28 hari. Dari data yang didapatkan pada penelitian ini sesuai pada Tabel 3, variasi penambahan FGD gypsum dari 2% sampai dengan 3%, memenuhi standar SNI untuk semua umur kuat tekan, dengan optimum penggunaan FGD gypsum sebesar 2.5% untuk mencapai kuat tekan maksimum pada umur 28 hari.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, FGD gypsum dapat digunakan sebagai bahan retarder semen jenis *Portland Composite Cement* (PCC). Ditinjau dari parameter *setting time* awal dan *setting time* akhir, penambahan FGD gypsum dari 2-5% masih memenuhi standar SNI 7064:2022. Dimana seiring penambahan FGD gypsum, maka nilai *setting time* akan semakin bertambah juga.

Ditinjau dari kuat tekan mortar semen, penambahan FGD gypsum dari 2-3% masih memenuhi standar SNI 7064:2022, sedangkan penambahan diatas 3% kuat tekan mortar semen tidak masuk standar SNI 7064:2022, dengan optimum penambahan FGD gypsum sebesar 2.5% untuk mencapai kuat tekan maksimum pada umur 28 hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Aakriti, Soumitra, M., Neeraj, J., Jaideep, M. (2023). A comprehensive review of flue gas desulphurized gypsum: Production, properties, and applications. *Construction and Building Materials*. Volume 393. ISSN 0950-0618.
- Caillaha, M. C., & Moura, F. J. (2018). Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(2), 190–197.
- Duan, P. X., Zhang, Y., Miao, Y. C., & Li, Y. (2012). A Study of the Influence of FGD Gypsum Used as Cement Retarder on the Properties of Concrete. In *Advanced Materials Research* (Vols. 374–377, pp. 1311–1319). Trans Tech Publications, Ltd.
- Herliati, Sagitha, A., & Puspita, D., A., Dwi, P., R., & Salasa, A. (2021). Optimization of Gypsum Composition Against Setting Time And Compressive

- Strength In Clinker For PCC (Portland Composite Cement). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1053. 012116.
- Islam, G. M. S., Chowdhury, F. H., Raihan, M. T., Amit, S. K. S., & Islam, M. R. (2017). Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. *Procedia Engineering*, 171, 744–751
- Kurdowski, W. Chapter 4: Cement Hydration. *Cement and Concrete Chemistry*. 2014, 205-277.
- Mohammed, S., & Safiullah, O. (2018). Optimization of the SO₃ content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties. *Construction and Building Materials*, 164, 362–370.
- Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2022). Metode uji kuat tekan mortar semen hidraulic (dengan menggunakan spesimen kubus ukuran 2 in. atau [50 mm]) (SNI 2049-7:2022). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2021). Metode uji penentuan waktu pengikatan semen hidraulic dengan jarum vicat (SNI 2049-8:2021). Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2022). Semen portland komposit (SNI 7064:2021). Badan Standardisasi Nasional.
- Yang, Z. Y., Zhao, S., Hu, J., & Lu, Z. C. (2013). The Effects of FGD Gypsum on the Performance of Cement. *Applied Mechanics and Materials*, 422, 35–38.
- Yamashita, M., Harada, T., Sakai, E., & Tsuchiya, K. (2020). Influence of sulfur trioxide in clinker on the hydration heat and physical properties of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 250, 1188