

PEMANFAATAN KAPUR (CaCO_3) DAN LUMPUR SIDOARJO SEBAGAI BAHAN DASAR PEMBUATAN SEMEN PORTLAND

Vandi Alextrianto, Januarti Jaya Ekaputri
 Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
 Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
 Jl. Arief Rahman Hakim, 60111, Surabaya Indonesia
 e_mail : alexvandi92@gmail.com

Abstrak — Volume produk sampingan dari pabrik berupa limbah padat kalsium karbonat dan semburan lumpur Sidoarjo telah berada dalam jumlah yang kritis. Dengan volume jutaan ton ini tidak akan bermanfaat dan akan mengganggu lingkungan apabila keberadaannya tidak segera ditangani. Dalam rangka mengurangi volume lumpur dan kapur yang ada, salah satu solusi yang bisa digunakan adalah pemanfaatan lumpur Sidoarjo dan limbah kapur industri sebagai bahan dasar pembuatan semen dengan mengadopsi proses pabrik dalam skala laboratorium menggunakan briket kiln feed bahan dasar limbah yang dibakar pada muffle furnace pada suhu 1483°C dan klinker yang dihasilkan dievaluasi menurut SNI 15-2049-2004 tentang Portland Semen. Karakter fisik dan kimia dari semen berbahan dasar limbah ini menunjukkan potensi untuk menggantikan bahan dasar alam dan layak untuk diinvestasikan menjadi skala pabrik.

Kata kunci : Kapur, Lumpur Sidoarjo, Klinker, muffle furnace, Semen, Investasi.

Abstract — The volume of by-products from the factory in the form of calcium carbonate solid waste and Sidoarjo mudflow has been in critical quantities. With a volume of millions of tons this will not be beneficial and will disturb the environment if its presence is not immediately handled. In order to reduce the volume of existing mud and lime, one solution that can be used is the utilization of Sidoarjo mud and industrial lime waste as a base for making cement by adopting a laboratory-scale manufacturing process using kiln feed briquettes based on waste that is burned in muffle furnaces at 1483°C and linkers produced are evaluated according to SNI 15-2049-2004 concerning Portland Cement. The physical and chemical character of this waste-based cement shows the potential to replace natural raw materials and is feasible to be invested on a factory scale.

Keywords: Lime, Sidoarjo Mud, Clinker, muffle furnace, Cement, Investment.

I. PENDAHULUAN

PT. Petrokimia Gresik, Tbk sebagai produsen pupuk nasional, mempunyai kapasitas produksi pupuk 6.087.600 ton/tahun dengan produk sampingan dari produksi pupuk ini adalah limbah padat kalsium karbonat, CaCO_3 , yang belum dikelola sebanyak 2,15 juta ton. Berdasarkan ekstrapolasi yang dilakukan oleh PT. Petrokimia Gresik dengan dibukanya pabrik ZAIL, maka limbah padat CaCO_3 yang dihasilkan mencapai 600 ribu ton per tahun (Gresik, 2012). Jumlah limbah yang dihasilkan ini akan menimbulkan berbagai macam dampak lingkungan apabila tidak dilakukan penanganan yang tepat. Dampak lingkungan yang bisa dihasilkan seperti pencemaran tanah dan air, polusi udara, serta mengganggu kesehatan manusia yang ada disekitar lokasi limbah. Salah satu upaya yang telah dilakukan adalah dengan memanfaatkan kembali untuk proses penetralan

air limbah dan sebagai material timbunan/reklamasi (Gresik, 2012).

Disisi lain, semburan lumpur Sidoarjo sejak Mei tahun 2006, volume yang dikeluarkan oleh semburan lumpur panas ini sama dengan 50.000 m³ per hari dan meningkat hingga 126.000 m³ sejak September 2006 (Ekaputri & Triwulan, 2006). Hingga tahun 2013, volume lumpur Sidoarjo mencapai 40,1 juta m³ dan diperkirakan meningkat hingga 48 juta m³ (Sidoarjo, 2014).

Penelitian yang telah dilakukan dalam rangka pemanfaatan limbah hasil produksi pupuk antara lain dengan pemanfaatan *phosphochalk* sebagai bahan dasar pembuatan semen sulfoaluminat (Singh, Kapur, & Pradip, 2008) sebagai perbandingan kualitas semen sulfoaluminat dengan OPC yang diproduksi secara massal.

Dengan semakin meningkatnya kapasitas produksi semen, tentunya semakin banyak bahan alam yang akan digunakan dan cadangan kapur yang ada di alam akan habis, sehingga menimbulkan dampak ketidak seimbangan alam yang akan berdampak pada munculnya bencana baru.

Bahan dasar kapur alam ini diharapkan bisa diganti dengan limbah CaCO₃ dari produksi pupuk, sehingga material yang digunakan lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Kapur PT. Petrokimia Gresik

Produk samping ini berbentuk powder berwarna putih dengan kadar air rendah. Produk samping ini memiliki pH 7,6-7,7 ; *Bulk density* 1,2ton/m³ dan sedikit larut dalam air. Kandungan utama daripadatan produk samping kapur ini adalah Kalsium Karbonat (CaCO₃) yaitu 86,7%.Kandungan lain dalam produk samping kapur ini adalah Kalsium Sulfat Dihidrat(CaSO₄.2H₂O) 4,7% ; Ammonium Karbonat ((NH₄)₂CO₃) 0,05% ; Inert Solid(SiO₂) 6,3% ; dan sedikit sisa pupuk ZA ((NH₄)₂SO₄) 2,3% (Gresik, 2012). Dalam penggunaannya, kapur dikondisikan kering oven dengan kehalusan lolos ayakan no. 200 dengan komposisi oksida pada Tabel 1.

Tabel 1 Oksida raw material kiln feed

Oksida	Limbah CaCO ₃ %	CaCO ₃ Alam %	Lumpur Sidoarjo %	Copp Slag %	Fly Ash F %	Gypsum %
SiO ₂	5,95%	0,37%	53,83%	24,43%	40,71%	0,41%
Al ₂ O ₃	0,31%	0,18%	18,39%	2,65%	35,37%	0,08%
Fe ₂ O ₃	0,20%	0,14%	6,95%	46,30%	12,54%	0,04%
CaO	45,47%	55,91 %	2,64%	3,69%	2,81%	37,61 %
MgO	0,91%	0,27%	2,53%	1,82%	0,10%	1,67%
K ₂ O	0,02%	0,02%	1,49%	1,06%	1,74%	0,03%
Na ₂ O	0,14%	0,00%	4,38%	0,74%	0,47%	0,10%
P ₂ O ₅	0%	0,00%	0%	0,00%	0,00%	0%
SO ₃	6,75%	0,00%	0,91%	0,42%	0,89%	48,53 %
TiO ₂	0%	0,00%	0,70%	0,00%	0,92%	0%
LOI	40%	43,11 %	8%	18,89%	4,45%	11,53 %

Lumpur Sidoarjo

Untuk mengaktifkan oksida silika, oksida besi, oksida alumunium dalam lumpur Sidoarjo kering dibutuhkan suhu kalsinasi minimal 700°C (Ekaputri J. , Triwulan, S.Junaedi, Fansuri, & Aji, 2013). Lumpur Sidoarjo dipersiapkan dalam bentuk serbuk kering oven dengan kehalusan lolos ayakan no. 200. Komposisi oksida lumpur Sidoarjo yang digunakan ada pada Tabel 1.

Material Koreksi

Gypsum

Gypsum (CaSO₄.2H₂O) sebagai bahan tambahan untuk semen Portland berfungsi sebagai penahan *flash setting* pada semen (Salah, 2010), selain itu penambahan gypsum juga berpengaruh pada hidrasi semen(Zajac, Rosberg, Saout, & Lothenbach, 2013). Gypsum berasal dari PT. Petrokimia Gresik berbentuk serbuk dengan kehalusan lolos ayakan no. 200 mempunyai karakter oksida yang ada pada Tabel 1.

Bahan koreksi lainnya

Bahan pengkoreksi untuk penambahan kekurangan oksida tersebut antara lain *copper slag* yang berasal dari PT. Smelthing yang berfungsi untuk menambah kadar Fe₂O₃, dan *fly ash* kelas F yang berasal dari PT. Petrokimia Gresik berfungsi sebagai penambah kadar SiO₂ pada klinker semen. Jumlah penambahan bahan pengkoreksi ini diperhitungkan berdasarkan kadar kandungan Fe₂O₃ dan SiO₂ pada masing-masing bahan pengkoreksi, dan penambahannya tidak lebih dari 3% dari keseluruhan *raw material* (Singh, Kapur, & Pradip, 2008) dengan komposisi oksida dari bahan pengoreksi dapat dilihat pada Tabel 1.

Target Klinker

Dibutuhkan rasio oksida dari pada proses perhitungan klinkerisasi. Rasio-rasio yang dibutuhkan antara lain *Lime Saturation Factor (LSF)*, *Alumina-Iron Ratio (AR)*, *Silica Ratio (SR)*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung LSF, AR dan SR akan dijabarkan sebagai berikut (Nasional):

- *Lime Saturation Factor (LSF)* = $95 - 100 : 100CaO / (2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3)$(1)
- *Silica Ratio (SR)* = $2 - 3 : SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ (2)
- *Alumina Ratio (AR)*= $1-4 : Al_2O_3 / Fe_2O_3$(3)

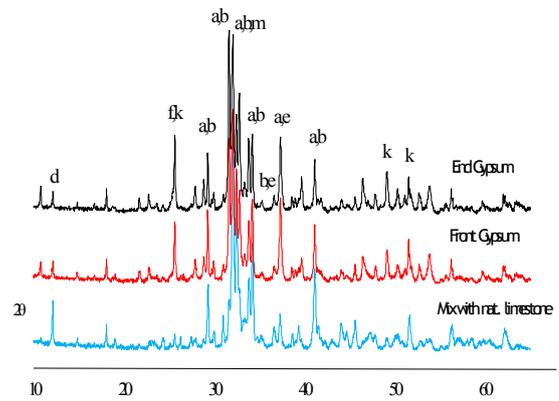
Permodelan komposisi berdasarkan *Bogue Equation* yang dijelaskan di SNI 15 2049 2004 untuk mendapatkan C₃S, C₂S, C₃A, dan C₄AF dihitung dengan persamaan :

- $C_3S = 3CaO.SiO_2 = (4,701 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (6,718 \times \% Al_2O_3) - (1,430 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$ (4)
- $C_2S = 2CaO.SiO_2 = (2,867 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S)$ (5)
- $C_3A = 3CaO.Al_2O_3 = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3)$ (6)
- $C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = (3,043 \times \% Fe_2O_3)$ (7)

Mixing dan Briquetting

Kiln feed dibuat dengan model briket (Chen, 2015) dengan ukuran 50×50×50 mm, dilubangi keempat sisi permukaannya sedalam 50 mm untuk memudahkan api masuk ke dalam briket, sehingga pembakaran akan sampai kedalam inti briket.

Kiln feed dibuat menjadi 3 variasi utama dengan komposisi tertentu dengan nama sebagai berikut : *mix with natural limestone* ; yaitu variasi *kiln feed* yang proporsi kapur sintesis digantikan beberapa bagian oleh kapur alam untuk menurangi kadar SO₃ yang ada pada *raw material* kapur limbah, *frontgypsum* ; yaitu variasi *kiln feed* yang diberikan perlakuan penambahan gypsum pada *raw mix* bertujuan untuk mengetahui perilaku klinker apabila tanpa diberikan tambahan gypsum pada proses grinding akhir , *end gypsum* ; yaitu variasi *kiln feed* tanpa ditambahkan gypsum pada *raw mix* maupun proses grinding akhir sebagai kontrol jumlah SO₃ yang berlebih pada kapur limbah. Ilustrasi *raw mix* pada variasi *kiln feed* dapat dilihat pada Tabel 2



Gambar 1 Profil XRD klinker dari hasil pembakaran tiga variasi *kiln feed*

Tabel 2 Komposisi variasi kiln feed yang digunakan dalam penelitian

Variasi Kiln Feed	Lime Petro	Lime Gresik	Lumpur Sidoarjo	Copp Slag	Fly Ash F	Gypsum
Mix with Nat. Limestone	✓	✓	✓	✓	✓	×
Front Gypsum	✓	×	✓	✓	✓	✓
End Gypsum	✓	×	✓	✓	✓	×

III. METODE PENELITIAN

Metode Pengujian

Muffle Furnace merupakan alat bakar modifikasi yang digunakan untuk meleburkan *kiln feed* pada suhu 1400°C hingga dapat ditingkatkan sampai temperatur diatas 1450°C (Stanek & Sulovsky, 2015). Pengujian kimia semen untuk mendapatkan mineralogi klinker dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction (XRD)* dengan alat Bruker Diffractometer, dan untuk mendapatkan oksida klinker dilakukan pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)* dengan alat Thermo-Advantx.

Pengujian untuk menentukan kelayakan fisik dari semen yang dihasilkan mengacu pada SNI 15-2049-2004 antara lain kehalusan menggunakan alat *Particle Size Distribution (PSD)* Malvern Mastersizer 2000, pengujian kuat tekan mortar kubus ukuran 50×50×50 mm menggunakan *filler* pasir alam dengan kehalusan pasir masuk gradasi zona 2, konsistensi normal dan waktu pengikatan awal dan akhir menggunakan alat uji Vicat sesuai SNI 15-2049-

2004. Selain itu untuk mengetahui temperatur reaksi hidrasi digunakan alat data logger dengan ujung sensor *thermocouple* sebagai pembaca temperature yang dihasilkan pada proses reaksi hidrasi (Stanek & Sulovsky, 2015).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Kimia Klinker

Pada bagian ini dijabarkan hasil dari analisis mineralogi dan analisis oksida dari semen yang terbentuk pada pembakaran dengan suhu yang tercapai yaitu 1483°C serta perilaku fisik dan mekanik dari semen yang telah dihasilkan

Analisis kimia dilakukan dengan analisis X-Ray untuk mempercepat proses sekaligus menyederhanakan langkah untuk mendapatkan mineralogi klinker dan oksida yang dihasilkan dari proses pembakaran semen.

Tabel 3 Mineralogi hasil *klinker* hasil pembakaran kiln feed dengan masing-masing variasi dengan suhu 1483° C

No	Mineralogi	Rumus Kimia	Mix with Nat. Limestone	Front Gypsum	End Gypsum
a	C3S monoclinic (NISHI)	Ca ₃ SiO ₅	24,62	25,35	24,48
b	C2S Beta (MUMME)	Ca ₂ SiO ₄	42,73	13,69	9,32
c	C3A cubic	Ca ₃ Al ₂ O ₆	0,47	0,18	0,13
d	C2Fe2-xAlxO5 (Colville)	Ca ₂ FeAlO ₅	13,51	7,37	7,29
e	Lime	CaO	1,54	8,13	6,98
f	Anhydrite	CaSO ₄	0,15	0,76	1,58
g	Bassanite Bezou	CaSO ₄ (H ₂ O) _{0,5}	0,3	0,76	0,72
h	Gypsum	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	0,13	0,23	0,19
i	Calcite	CaCO ₃	0,52	0,47	0,54
j	Portlandite	Ca(OH) ₂	0,94	1,53	1,42
k	Spurrite (Smith)	Ca ₃ (SiO ₄) ₂ CO ₃	5,1	20,58	23,72
l	Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	0,57	1,37	1,84
m	Larnite	Ca ₂ (SiO ₄)	4,75	14,4	16,78

Hasil X-Ray Diffraction pada pada Tabel 3 dari semen menunjukkan bahwa ada perbedaan jumlah mineral utama dari perhitungan dengan hasil pengujian XRD. Terdapat mineral-mineral bentukan lain yang tidak dikehendaki. Mineral-mineral tersebut memiliki kontribusi pada sifat-

sifat mekanik dari semen. Grafik hasil uji XRD dapat dilihat pada .Mineral yang terbentuk pada Gambar 1 menunjukkan bahwa mineral utama klinker mengalami kekurangan jumlah apabila dibandingkan dengan perhitungan. Seperti pada mineral C₃A, Alumina yang ada di C₃A mengalami kekurangan jumlah, alumina lebih mengikat pada C₄AF. Selain itu C₃S terbentuk lebih sedikit daripada C₂S. Hal ini diakibatkan kurang sempurnanya pembakaran sehingga *calcium* dan *silicate* membentuk mineral yang lain seperti *larnite* dan *spurrite* sehingga mengurangi jumlah pembentukan daripada mineral utama semen.

Berdasarkan persyaratan komposisi oksida, klinker dari hasil pengujian XRF yang dihasilkan dari seluruh variasi *kiln feed* pada Tabel 4 dapat diketahui bahwa oksida yang dihasilkan dari pembakaran *kiln feed* limbah ini menghasilkan klinker yang sudah masuk dalam keluarga klinker pada SNI 15-2049-2004

Tabel 4 Oksida *klinker* yang dihasilkan dari pembakaran kiln feed pada suhu 1483° C

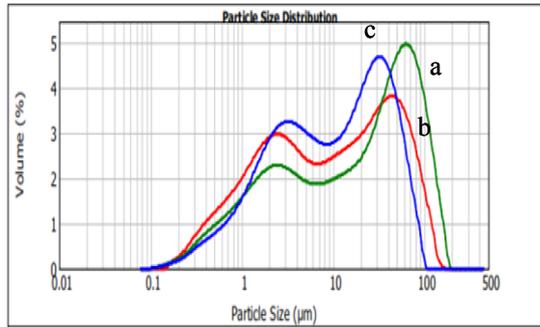
	Mix with Nat Limestone		Front Gypsum		End Gypsum	
	Disain	Real (Bogue)	Disain	Real (Bogue)	Disain	Real (Bogue)
Komposisi Oksida (%massa)						
SiO ₂	19,16	20,00	19,05	17,42	19,18	16,87
Al ₂ O ₃	6,13	6,75	4,36	4,73	4,36	4,55
Fe ₂ O ₃	3,44	5,11	2,03	2,91	2,10	2,52
CaO	64,43	61,53	61,37	64,07	61,78	63,32
MgO	1,36	1,05	1,75	0,68	1,74	0,67
K ₂ O	0,49	0,24	0,34	0,30	0,34	0,32
Na ₂ O	1,28	0,61	1,07	0,65	1,07	0,66
P ₂ O ₅	0,00	1,49	0,00	2,39	0,00	2,35
SO ₃	3,50	1,60	9,88	4,64	9,28	6,17
TiO ₂	0,21	0,30	0,15	0,22	0,15	0,21
f.CaO	1,00	1,54	1,00	8,13	1,00	6,98
LOI	54,24	1,32	55,26	1,99	55,99	2,36

Karakteristik Fisik Klinker

Kehalusan Semen

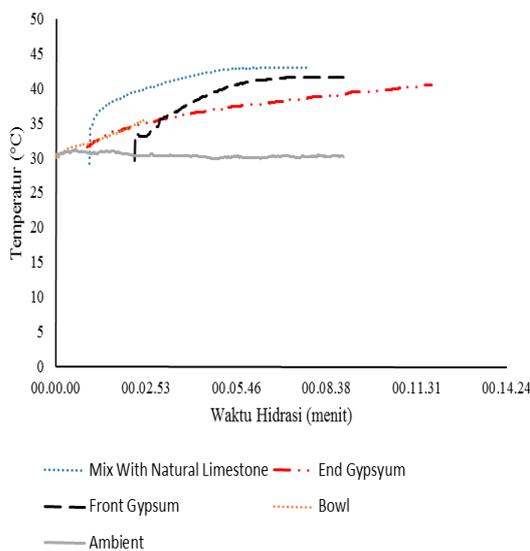
Pengukuran kehalusan digunakan alat *Particle Size Distribution* (PSD) dengan alat Malvern-Mastersizer 2000. Hasil pengukuran kehalusan didapatkan distribusi partikel semen seperti pada Gambar 2, partikel semen membentuk dua puncak distribusi partikel dengan kehalusan yang tidak seragam. Pada proses *milling* terjadi *aglomerasi* antar

permukaan partikel dikarenakan konsumsi energi saat proses *milling* berlangsung sehingga dapat menurunkan performa alat *milling* ketika material uji mencapai peningkatan kehalusan (Sverak, Baker, & Kozdas, 2013).



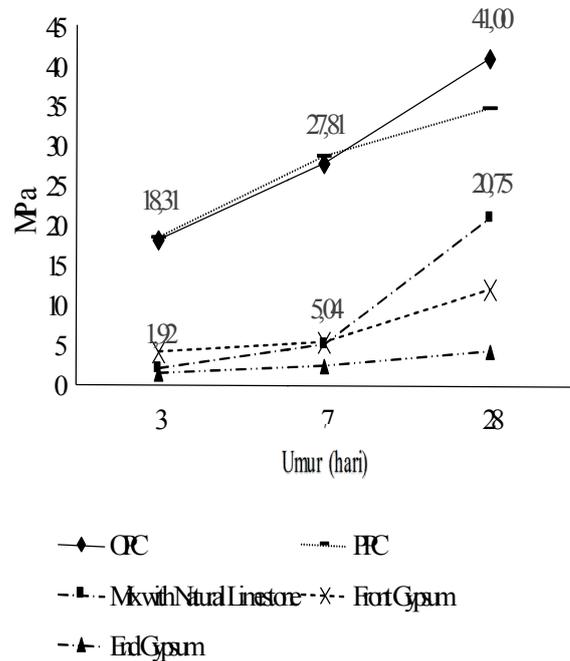
Gambar 2 Profil pengukuran particle size distribution (PSD) pada klinker a) End Gypsum, b) Front Gypsum, c) Mix with Natural Limestone

Pada pembacaan alat Particle Size Distribution (PSD) dapat didapatkan nilai specific surface area (SSA). Nilai specific surface area (SSA) merupakan nilai kehalusan suatu partikel dengan ukuran luasan total partikel per unit massa. Nilai dari pengujian specific surface area (SSA) dapat mewakili proses pengujian Blaine pada SNI-2049-2004. Nilai kehalusan yang disyaratkan adalah 280 m²/kg, sehingga untuk syarat kehalusan pada Tabel 5 ,ketiga variasi semen tersebut telah memenuhi syarat.



Gambar 3 Temperatur hidrasi final setting pasta semen

Kuat Tekan Mortar



Gambar 4 Kuat tekan mortar kubus ukuran 50 × 50 × 50 mm pada ketiga variasi hasil pembakaran (klinker) kiln feed dibandingkan dengan kuat tekan OPC dan PPC

Konsistensi Normal Setting time dan Waktu Pengikatan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa lama semen mengalami *setting* atau pengerasan dan kebutuhan air yang digunakan untuk mencapai *workability* standar dengan digunakannya alat uji Vicat sesuai standar SNI 15-2049-2004.

Ketiga semen yang digunakan untuk pengujian mengalami pengikatan yang sangat cepat. Hal ini berpengaruh pada pembentukan kuat tekan pada umur awal hingga mampu memberikan pengaruh pada pengurangan kuat tekan (Kurdowski, 2014). Gypsum sebagai pengontrol *setting* sangat berperan dalam waktu pengikatan. Dilihat pada Tabel 5 bahwa *setting time* dari variasi klinker *mix with natural limestone* hingga variasi *end gypsum*, *setting time* yang terjadi lebih lambat, hal ini dikarenakan jumlah gypsum yang dimiliki oleh variasi klinker *mix with natural limestone* lebih sedikit dibanding dengan klinker variasi *end gypsum*.

Tabel 5 Karakter fisik semen yang dihasilkan dari pembakaran tiga variasi kiln feed dibandingkan dengan SNI 15-2049-2004

	SNI 15-2049-2004	Mix with Natural Limestone	Front Gypsum	End Gypsum
Kuat Tekan (Mpa)				
3 hari	12,26	1,92	4,03	1,46
7 hari	19,62	5,04	5,35	2,47
28 hari	27,47	20,75	11,90	4,28
Spesific Surface Area (m²/Kg)	280	682	826	677
Konsistensi Normal (w/c)	-	48	40	35
Setting Time (min)				
<i>Initial Setting</i>	45	2,5	3	8
<i>Final Setting</i>	375	4,5	5	11
W/C mortar kubus 50×50×50 mm				
	0,48	0,73	0,76	1

Kuat Tekan Mortar

Semen dari ketiga variasi ini memiliki kuat tekan mortar kubus 50 × 50 × 50 mm yang masih rendah berdasarkan data pada Tabel 5 dan pada Gambar 4. Hal ini dikarenakan masih sedikitnya alite yang terbentuk akibat dari pembakaran dan klinkerisasi yang kurang sempurna (Stanek & Sulovsky, 2015). Akibat dari hal tersebut, klinker yang terbentuk menghasilkan mineral-mineral lain seperti *spurrite*, *larnite* dan masih adanya *freelime* yang tidak ikut menjadi mineral utama klinker sehingga mineral utama tidak terbentuk secara sempurna. Jika ditinjau dari kuat tekan yang lemah, dikarenakan rendahnya kadar mineralogi C₃S dan bentukan mineralogi *spurrite* yang masih mengandung mineral karbonat. Hal ini mengganggu pertumbuhan kekuatan dari mortar, sehingga kuat tekan menurun. Selain itu tingginya jumlah mineral *larnite* mengakibatkan pertumbuhan kuat tekan pada umur awal menurun pula. Hal ini diakibatkan reaksi hidrasi dari mineral berbentuk Ca₂SiO₄ bereaksi lambat dibandingkan mineral dengan bentuk Ca₃SiO₅ akibat dari jumlah ion kalsium yang dimiliki oleh mineral tersebut lebih sedikit dibandingkan dengan ion dari Ca₃SiO₅ (Kurdowski, 2014; Lea, 1970).

Pada proses hidrasi, mineral C₃A terhidrasi terlebih dahulu dengan diikuti proses hidrasi dari mineral C₃S. Secara kualitatif, semen

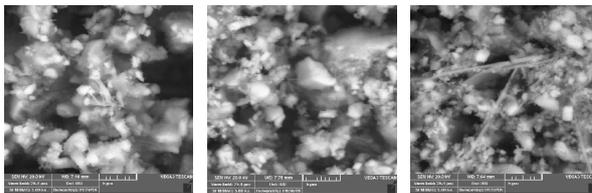
dengan ketiga variasi ini memiliki pengikatan awal dan akhir yang cepat dikarenakan mineral C₃A dan C₃S telah habis terhidrasi dahulu, sehingga dalam proses hidrasi lanjut, semen tidak memiliki cukup mineral C₃S untuk membentuk Calcium Silicate Hydrate (CSH) dari mortar lalu ditambah dengan bentukan deposit Ca(OH)₂ pada reaksi hidrasi serta semen masih memiliki kadar *free lime* yang tinggi sehingga menambah deposit bentukan Ca(OH)₂ yang dalam kondisi bebas yang mengganggu pembentukan *strength* apabila tidak diikat dengan jumlah silikat yang aktif sejumlah dengan deposit Ca(OH)₂ yang terbentuk pada semen. Selain itu, semen sulit dikerjakan dikarenakan *setting time* yang sangat cepat sehingga membutuhkan w/c yang lebih banyak dibandingkan dengan semen OPC normal. Oleh karena itu pembentukan kuat tekan menjadi tidak sempurna apabila dibandingkan syarat kuat tekan yang ada pada SNI 15-2049-2004 dengan kehalusan yang lebih daripada syarat yang dituangkan dalam SNI 15-2049-2004 seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Temperatur Hidrasi dan Morfologi Mineral

Pengukuran temperatur hidrasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh akibat dari komposisi Untuk ketiga variasi semen, suhu ketika *initial setting* sampai *final setting* berada pada temperature hidrasi yang tertinggi pada semen variasi *mix with natural limestone* dengan temperature 43,10°C, diikuti dengan variasi *front gypsum* dengan temperature 41,60°C dan paling rendah dengan variasi semen *end gypsym* dengan temperature 40,5°C seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Morfologi dari klinker yang dihasilkan ini didominasi oleh mineral belite, alite, dan calcium aluminoferrite. Selain itu terdapat mineral lain yang terbentuk yaitu *spurrite* dan *larnite*. Dilakukan pengamatan dengan menggunakan *backscattered scanning electron*. Bentuk dari kristal-kristal dari klinker variasi ini didominasi oleh bentuk-bentuk mineral yang berukuran kecil namun saling berikatan satu sama lain membentuk suatu kesatuan yang rigid dan kasar. Pada Gambar 5 menunjukkan bentuk mineral yang berupa hexagonal yaitu alite, *rounded* berupa belite, dan sebagian kecil berbentuk *cubic* yaitu C₃A dan ada pula

berbentuk *dendritic* yaitu ferrite. Bentuk mineralogi ini juga turut memberikan pengaruh terhadap reaksi hidrasi yang berlangsung (Stutzman, 2004). Tingkat reaktivitas dari mineral semen sendiri antara lain *aluminat* > *alite* > *ferrite* > *belite*. C₃A merupakan yang paling cepat bereaksi dengan air dan mendominasi kecepatan reaksi lalu diikuti reaksi hidrasi dari mineral *silicate* yang memberikan kontribusi kuat tekan terhadap semen itu sendiri (Philip A Alsop, Hung Chen, & Herman Tseng, 2007).



Gambar 5 Bentuk *hydrate* dengan menggunakan metode pengukuran Backscattered Electron Microscope pada ketiga klinker hasil pembakaran tiga variasi kiln feed a) Mix with Natural Limestone, b) Front Gypsum c) End Gypsum

V. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa semen yang berbahan dasar dari limbah kapur PT. Petrokimia Gresik dan Lumpur Sidoarjo berpotensi sebagai alternatif bahan dasar pembuatan semen Portland, walaupun secara fisika, semen dari ketiga variasi *kiln feed* ini belum memenuhi SNI 15-2049-2004. Oksida klinker yang dihasilkan dari semen limbah sudah masuk dalam oksida batas minimum untuk menjadi semen Portland, memiliki karakter temperatur hidrasi yang tinggi, memiliki *workability* yang kurang baik, serta *settingtime* kurang dari 15 menit. Semen dengan variasi *kiln feed mix with natural limestone* memenuhi semen Portland tipe IV SNI 15-2049-2004 sedangkan variasi *kiln feed front gypsum* maupun *end gypsum* memenuhi semen Portland tipe V SNI 15-2049-2004 walaupun dari segi jumlah, kadar SO₃ belum memenuhi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Petrokimia Gresik atas penyediaan material kapur limbah dan Bapak Tri Eddy

Susanto, ST, MT dari PT. Semen Indonesia atas fasilitas proses produksi semen dan pengujian kimia maupun fisika selama riset dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Breizh. (2015, September Selasa). Retrieved from <http://www.cherresources.com/>: <http://www.cherresources.com/invision/topic/21446-chemical-engineering-plant-cost-index-cepci/>
- Chen, H. (2015). Technical benefit and risk analysis on cement clinkering process with compact internal burning of carbon. *Applied Thermal Engineering*, 75, 239-247.
- Ekaputri, J. J., & Triwulan. (2006). Study on Porong Mud-Based Geopolymer Concrete.
- Ekaputri, J., Triwulan, S., Junaedi, Fansuri, & Aji, R. (2013). Light Weight Geopolymer Paste made with Sidoarjo Mud (Lusi). *Material Science Forum*, 803, 63-74.
- Gresik, P. P. (2012). *Sustainable Commitment in Developing Economic, Environmental and Social Aspects*. Gresik: PT. Petrokimia Gresik.
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Krakow, Poland: Springer.
- Lea, F. (1970). *The Chemistry of Cement and Concrete* (3rd ed.). Glasgow: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- Lin Yang, Y. Y. (2013). Utilization of phosphate fertilizer industry waste for belite-ferroaluminate cement production. *Construction and Building Materials*, 38, 8-13.
- Nasional, B. S. *SNI 15-2049-2004 Semen Portland*. BSN.
- Philip A Alsop, P., Hung Chen, P., & Herman Tseng, P. (2007). *The Cement Plant Operations Handbook* (5th ed.). Tradeship Publications Ltd.

- Pujawan, I. N. (2008). Ekonomi Teknik. In I. N. Pujawan, *Ekonomi Teknik*. Surabaya: Penerbit Guna Widya.
- Richardson, I. (2008). The Calcium Silicate Hydrates. *Cement and Concrete Research* (38), 137-158.
- Salah, D. B. (2010). *University of Technology Iraq*. Retrieved Maret Minggu, 2015, from <http://www.uotechnology.edu.iq/>
- Singh, M., Kapur, P., & Pradip. (2008). Preparation of Calcium Sulphoaluminate Cement Using Fertilizer Plant Wastes. *Journal of Hazardous Material*, 157, 106-113.
- Stanek, T., & Sulovsky, P. (2015). Active low-energy belite cement. *Cement and Concrete Research*, 203-210.
- Stutzman, P. (2004). Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. *Cement & Concrete Composites*, 957-966.
- Sverak, T., Baker, C., & Kozdas, O. (2013). Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. *Minerals Engineering* (43-44), 52-57.
- Taylor, H. F. (1990). *Cement Chemistry*. London: Academic Press Inc.
- www.chemengonline.com. (2015, September Selasa). *Chemical Engineering*. Retrieved from www.chemengonline.com: <https://id.scribd.com/doc/254840379/C-EPCI-January-2015#download>
- Zajac, M., Rosberg, A., Saout, G. L., & Lothenbach, B. (2013). Influence of Limestone and Anhydrite in The Hydration of Portland Cement. *Cement & Concrete Composite* (46), 99-108.