

## Analisa Pengaruh Mineral Klinker Terhadap Kuat Tekan Semen untuk Mendapatkan Proporsi Bahan Baku *Portland Composite Cement* (PCC) dengan Penurunan Faktor Klinker

J.P. Arsadha<sup>1</sup>, R. Rimadhina<sup>1</sup>, A.M. Jannah<sup>1</sup>, R. Robiansyah<sup>2</sup>, dan S. Safaruddin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang – Indonesia

<sup>2</sup>PT Semen Baturaja (Persero) Tbk., Baturaja – Indonesia

Corresponding author: asyeni@ft.unsri.ac.id

**ABSTRAK:** *Portland Composite Cement* termasuk ke dalam produk hijau oleh *Green Building Council* Indonesia. Industri semen memiliki peran penting dalam sektor pembangunan di Indonesia, seiring dengan meningkatnya pembangunan nasional di Indonesia, konsumsi energi juga terus meningkat. Sektor industri menempati posisi kedua dalam konsumsi energi per sektor di Indonesia pada tahun 2019 yaitu 39%. Sebagian besar sumber energi pada industri semen didominasi oleh batu bara yaitu mencapai 90%. Produksi klinker menggunakan sekitar 80% dari total energi produksi semen. Mineral dalam klinker meliputi Trikalسيوم Silikat ( $C_3S$ ), Dikalسيوم Silikat ( $C_2S$ ), Trikalسيوم Aluminat ( $C_3A$ ), dan Tetrakalsium Aluminoferrit ( $C_4AF$ ) sangat berpengaruh dalam kualitas semen, terutama kuat tekan. Oleh karena itu, untuk menganalisa penurunan faktor klinker pada semen diperlukan juga penyesuaian mineral klinker dan modulus bahan mentah untuk menghasilkan semen dengan kuat tekan baik dan menentukan proporsi bahan mentah yang diperlukan. Data yang digunakan berasal dari PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. mulai dari bulan Februari hingga Juni 2022. Pada penelitian ini dilakukan pengumpulan data dengan variasi komposisi oksidan dan mineral pada klinker. Data yang diambil meliputi penggunaan klinker pada *Vertical Cement Mill* (VCM), komposisi oksida pada klinker, *ash*, dan bahan mentah, kuat tekan semen pada umur 28 hari, produksi klinker dan pemakaian batubara per hari, serta persentase *ash* di dalam batubara. Dari data yang didapatkan kemudian dihitung modulus terhadap *raw meal* selanjutnya ditentukan proposi bahan baku dengan *raw mix design*. Hasil menunjukkan bahwa mineral  $C_3S$  memiliki korelasi yang positif terhadap kuat tekan semen umur 28 hari dan adanya penurunan 2,18% faktor klinker akan menaikkan proporsi mineral di dalamnya guna mencapai target kuat tekan. Untuk mendapatkan hasil produk semen yang baik, bahan baku harus memiliki kuat tekan sebesar 300 Kg/cm<sup>2</sup> pada umur 28 hari. Berdasarkan hasil yang didapatkan bahan mentah yang diperlukan untuk menghasilkan semen dengan kuat tekan umur 28 hari sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup> pada 65% faktor klinker adalah 85,22% batu kapur, 13,54% tanah liat, dan 1,24% pasir besi.

**Kata Kunci:** *portland composite cement*, penurunan faktor klinker, mineral klinker, proporsi bahan baku, emisi gas CO<sub>2</sub>.

**ABSTRACT:** *Portland Composite Cement* is included in green products by *Green Building Council* Indonesia. The cement industry has an important role in the development sector in Indonesia, as national development increased in Indonesia, energy consumption also continued to increase. The industrial sector ranked second in energy consumption per sector in Indonesia in 2019 at 39%. Most of the energy resources in the cement industry are dominated by coal, reaching 90%. Clinker production used about 80% of total cement production energy. The clinker minerals Tricalcium Silicate ( $C_3S$ ), Dicalcium Silicate ( $C_2S$ ), Tricalcium Aluminate ( $C_3A$ ), and Tetracalcium Aluminoferrite ( $C_4AF$ ) are highly influential in cement quality, especially compressive strength. Therefore, in order to analyze the reduction of the clinker factor it is also necessary to adjust the clinker mineral and raw material modulus to produced cement with good compressive strength and determining the proportion of the raw material are required. In this study data were taken from PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. from February until June 2022 that showed positive correlation with the 28 day's compressive strength. In this study, data were collected with variations in the composition of oxidants and minerals in clinker. The data taken include the use of clinker at the *Vertical Cement Mill* (VCM), the composition of oxides in clinker, *ash*, and raw materials, the compressive strength of cement at 28 days, clinker production and coal

consumption per day, and the percentage of ash in coal. From the data obtained, the modulus of the raw meal was calculated and then the proportion of raw materials is determined using the raw mix design. The study results showed that with the decreasing of 2.18% on the clinker factor would increase the proportion of minerals in order to achieve a strong compressive strength. To produce the best product of cement, the raw material used must have compressive strength of 300 Kg/cm<sup>2</sup> in 28 days process. Based on the results obtained, the raw materials needed to produce cement with a 28 days compressive strength of 300 kg/cm<sup>2</sup> at 65% clinker factor were 85.22% limestone, 13.54% clay, and 1.24% iron sand.

**Keywords:** portland composite cement, clincker factor decrease, clincker's mineral, raw meal proportion, CO<sub>2</sub> gas emission.

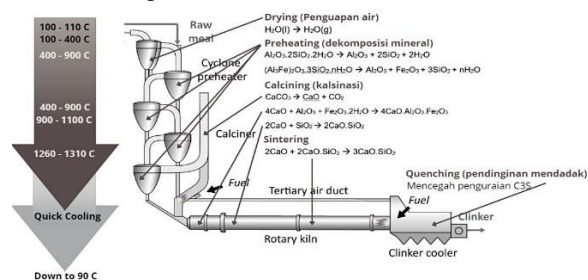
## PENDAHULUAN

Semen berbentuk serbuk abu-abu bersifat hidrolis dan berfungsi sebagai perekat ketika dicampur dengan air. Semen memiliki banyak tipe berdasarkan karakteristiknya, salah satunya adalah *Portland Composite Cement* (PCC). Semen tipe PCC termasuk ke dalam produk hijau dari *Green Listing* Indonesia yang diterbitkan oleh *Green Building Council* Indonesia. Pemakaian bahan bakar dalam produksi semen PCC dapat dikurangi hingga 20% dengan adanya substitusi Sebagian klinker dengan bahan komposit lain (Yanita, 2020). PCC merupakan produk semen yang tingkat produksi dan penjualannya paling tinggi pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Hal ini terlampir pada Laporan Tahunan dan Keuangan PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. dimana penjualan semen tipe PCC mencapai 90,32% dari total penjualan pada tahun 2021.

Proses produksi semen dimulai dari pemecahan bahan baku yang ditujukan untuk memperkecil ukuran dan homogenisasi. Bahan baku dalam produksi semen meliputi batu kapur dan tanah liat, serta terdapat pasir silika dan pasir besi yang berperan sebagai bahan baku korektif (Mulyani, 2011). Seluruh bahan baku dengan proporsi tertentu kemudian diteruskan ke *vertical raw mill* dengan bantuan *belt conveyor* yang dilengkapi dengan *metal detector*. Pada *Vertical Raw Mill* terjadi empat proses yang berlangsung simultan yaitu penggilingan, pengeringan, transportasi, dan separasi. *Vertical raw mill* dilengkapi dengan *cyclone* dan *bag house filter* sebagai pemisahan material bahan baku yang masih kasar.

Bahan baku yang telah melewati *raw mill* dihomogenisasikan di dalam silo kemudian diteruskan ke dalam *kiln* sebagai *raw meal* atau *kiln feed*. *Kiln* dilengkapi dengan *suspension preheater* dan *grate cooler*. *Rotary kiln* merupakan alat utama pada produksi semen karena seluruh proses kimia yang berkaitan dengan pembentukan klinker terjadi didalamnya. Proses

di dalam *kiln* terbagi ke dalam 3 zona yaitu kalsinasi, transisi, dan pembakaran.



Gambar 1 Pembentukan Klinker.

Gambar 1 merupakan ilustrasi proses pembentukan klinker yang terjadi pada *suspension preheater*, *rotary kiln*, dan *grate cooler*. *Grate cooler* diperlukan dalam proses pendinginan mendadak untuk mencegah terjadinya reaksi inversi C<sub>3</sub>S menjadi C<sub>2</sub>S pada proses pendinginan lambat. Produk keluaran *grate cooler* disebut klinker berupa butiran padat komponen utama produksi semen. Setelah keluar dari *grate cooler* klinker akan ditampung di dalam silo lalu dicampurkan dengan bahan aditif lain seperti *gypsum*, *fly ash*, *pozzolan*, dan batu kapur kemudian diteruskan menuju *vertical cement mill* untuk menghasilkan semen sesuai spesifikasi.

Seiring dengan meningkatnya pembangunan nasional di Indonesia, konsumsi energi juga terus meningkat. Sektor industri menempati posisi kedua dalam konsumsi energi per sektor di Indonesia pada tahun 2019 yaitu 39% (BPPT, 2021). Intensitas energi global untuk produksi semen mencapai 3,4 GJ/Ton pada tahun 2018 (Dirjen EBTKE, 2020). Sebagian besar sumber energi pada industri semen didominasi oleh batu bara yaitu mencapai 90% (Direktorat Jendral EBTKE, 2020). Konsumsi energi paling banyak terjadi pada *kiln* untuk memproduksi klinker karena kondisi operasinya berada pada suhu sekitar 1450°C. Produksi klinker menggunakan sekitar 80% dari total energi produksi semen (Maulidiany & Tomo, 2012). Proses dekomposisi CaCO<sub>3</sub> dan MgCO<sub>3</sub> yang terjadi pada pembentukan klinker menyumbang 50% emisi gas CO<sub>2</sub> pada industri

*Pengaruh Mineral Klinker Terhadap Kuat Tekan Semen untuk Mendapatkan Proporsi Bahan Baku dengan Penurunan Faktor Klinker*

semen (Faizah, 2018). Semen tipe PCC memerlukan campuran 80% klinker, 16% batu kapur, dan 4% *gypsum* (Anggraini dan Safaruddin, 2022). Pemakaian klinker 80% masih terbilang sangat tinggi dan tentunya memerlukan banyak energi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu penurunan faktor klinker dalam pembuatan semen untuk menekan angka emisi gas CO<sub>2</sub>.

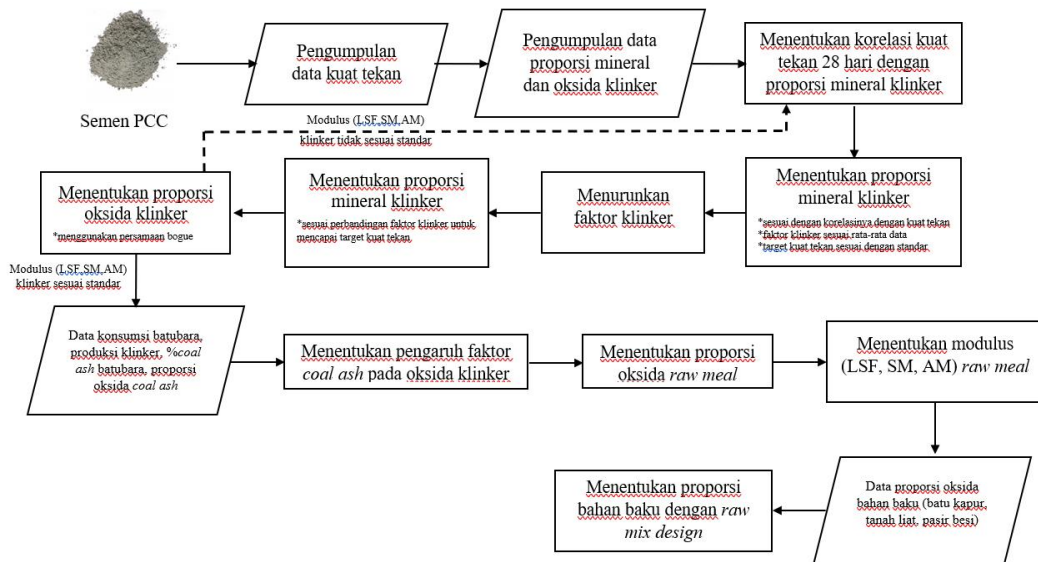
Kualitas dari klinker harus dijaga dengan ketat untuk menghasilkan semen dengan kualitas baik. Mineral dalam klinker meliputi Trikalsium Silikat (C<sub>3</sub>S), Dikalsium Silikat (C<sub>2</sub>S), Trikalsium Aluminat (C<sub>3</sub>A), dan Tetrakalsium Aluminoferrit (C<sub>4</sub>AF) sangat berpengaruh dalam kualitas semen, terutama kuat tekan. Komposisi C<sub>3</sub>S yang tinggi pada klinker ataupun semen dapat menghasilkan kuat tekan awal yang besar dan memberikan efek penambahan kekuatan secara kontinu pada umur berikutnya. Sama seperti C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S memberikan kuat tekan semen pada umur 7-28 hari (Marhaini et al., 2021). Mineral C<sub>2</sub>S melepaskan panas yang cenderung lebih lambat dibandingkan C<sub>3</sub>S dan berkontribusi besar pada kuat tekan semen di umur yang lebih panjang. Sedangkan C<sub>3</sub>A menghasilkan sedikit kenaikan pada kuat tekan setelah umur 24 hari (Ewadh, 2013). Mineral C<sub>4</sub>AF memiliki pengaruh ke kuat tekan semen yang kurang besar dan cenderung memberikan warna pada semen (Pratama et al., 2014). Mineral-mineral tersebut memiliki proporsi masing-masing di dalam klinker ataupun semen. C<sub>3</sub>S merupakan mineral utama dalam klinker dan memiliki proporsi 45-70%, proporsinya berbanding terbalik dengan C<sub>2</sub>S yang

biasanya memiliki proporsi 5-30%. Mineral minor di dalam klinker atau semen adalah C<sub>3</sub>A dengan proporsi di bawah 10% dan C<sub>4</sub>AF dengan proporsi tertentu.

Mineral di dalam klinker atau semen dipengaruhi oleh kandungan oksida di dalamnya atau yang berasal dari bahan mentah. Oksida utama dalam industri semen adalah CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Oksida-oksida ini biasanya diukur dalam bentuk modulus seperti *Lime Saturation Factor* (LSF), *Silica Modulus* (SM), dan *Alumina Modulus* (AM). LSF merupakan perbandingan antara total CaO dengan oksida lain. Persentase LSF memiliki pengaruh positif terhadap proporsi mineral C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S di dalam klinker (Winter, 2009). *Silica Modulus* (SM) merupakan perbandingan oksida silika dengan total oksida alumina dan besi, sedangkan perbandingan antara oksida alumina dan besi disebut *Alumina Modulus* (AM). Oleh karena itu, untuk menganalisa penurunan faktor klinker pada semen diperlukan juga penyesuaian mineral klinker dan modulus bahan mentah untuk menghasilkan semen dengan kuat tekan baik dan menentukan proporsi bahan mentah yang diperlukan.

**METODOLOGI PENELITIAN**

Metode penelitian yang digunakan berupa pengolahan data yang terdiri dari beberapa bagian seperti pengumpulan data, perhitungan data, hingga analisa dan pembahasan. Runtutan tahap pada penelitian kali ini digambarkan dalam diagram di bawah ini.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

**Pengumpulan Data**

Data diperlukan dalam analisa pengaruh mineral klinker terhadap kuat tekan akhir semen dan proporsi bahan baku semen tipe PCC setelah dilakukan

penurunan faktor klinker. Pengumpulan data dilakukan pada Laboratorium *Quality Control* dan *Central Control Room* pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Data yang dikumpulkan meliputi penggunaan klinker pada *Vertical Cement Mill* (VCM); komposisi oksida pada klinker, *ash*, dan bahan mentah; kuat tekan semen pada umur 28 hari; produksi klinker dan pemakaian batubara per hari; serta persentase *ash* di dalam batubara.

#### Metode Perhitungan

Penurunan faktor klinker perlu disertai dengan penyesuaian mineral dan modulus di dalamnya. Untuk menghasilkan semen dengan kuat tekan yang baik diperlukan serangkaian perhitungan, seperti:

#### Perhitungan Mineral Klinker

Komposisi oksida utama di dalam klinker diperlukan dalam penelitian ini. Oksida utama dalam klinker adalah kalsium oksida (CaO), silika oksida (SiO<sub>2</sub>), aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dan besi oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Mineral klinker dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan Bogue seperti yang terlihat pada persamaan 1-6.

$$C_3S = 4,0710CaO - 7,6024SiO_2 - 1,4297 Fe_2O_3 - 6,718Al_2O_3 \quad (1)$$

$$C_2S = 8,6024SiO_2 + 1,0785Fe_2O_3 + 5,0683 Al_2O_3 - 3,071CaO \quad (2)$$

$$C_3A = 2,6504Al_2O_3 - 1,6920Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$C_4AF = 3,0432Fe_2O_3 \quad (4)$$

(Winter, 2009)

#### Penentuan Mineral Klinker

Mineral C<sub>3</sub>S dapat ditentukan proporsinya sesuai dengan kuat tekan yang diinginkan setelah mendapatkan persamaan korelasi antara C<sub>3</sub>S dan kuat tekan semen pada umur 28 hari. Persamaan korelasi antara C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S yang saling berbanding terbalik dapat digunakan untuk menentukan proporsi C<sub>2</sub>S. Sedangkan untuk proporsi C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF ditentukan dengan menyesuaikan nilai modulusnya dengan standar yang sudah ada.

#### Penurunan Faktor Klinker

Proporsi mineral klinker setelah dilakukan penurunan faktor klinker dapat ditentukan menggunakan rasio.

#### Penentuan Modulus Klinker

Langkah pertama sebelum menentukan modulus klinker adalah menghitung komposisi oksida klinker dengan membalik Persamaan Bogue. Modulus klinker dapat dihitung dengan rumus pada persamaan 5-7.

$$LSF = \frac{100 \times CaO}{[(2,8 \times SiO_2) + (1,18 \times Al_2O_3) + 0,65 \times Fe_2O_3]} \quad (5)$$

$$SM = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3) \quad (6)$$

$$AM = Al_2O_3 / Fe_2O_3 \quad (7)$$

(Winter, 2009)

#### Perhitungan Kontribusi Oksida Coal Ash

Kontribusi oksida *coal ash* juga harus diperhitungkan di dalam klinker. *Coal ash* berpengaruh pada proporsi oksida klinker sehingga perlu dilakukan pengujian kadarnya di dalam *fine coal* untuk menghitung faktor pengaruhnya terhadap klinker. Proporsi oksida klinker dikurangi dengan oksida dari *coal ash* untuk mendapatkan komposisi oksida *kiln feed*. Rumus yang digunakan ditunjukkan dengan persamaan 8-10.

$$Coal \text{ yang dibutuhkan} = \frac{\text{Pemakaian batubara}}{\text{Produksi klinker}} \times 100 \quad (8)$$

$$Coal \text{ ash absorption} = \frac{\text{Coal yang dibutuhkan} \times \text{Ash}}{\text{coal}} / 100 \quad (9)$$

$$Kontribusi oksida coal \text{ ash} = \frac{\text{Coal ash absorption} \times \text{Proporsi oksida coal ash}}{100} \quad (10)$$

#### Penentuan Modulus Raw Meal

Komposisi oksida *kiln feed* yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya dapat digunakan untuk menentukan modulusnya dengan persamaan 5-7. Modulus *kiln feed* sama dengan *raw meal* dengan mengasumsikan tidak ada pengaruh *return dust* terhadap oksida *kiln feed*.

#### Perhitungan Proporsi Raw Meal

Proporsi *raw meal* dapat dihitung dengan serangkaian sistem "*raw mix design*" pada *Microsoft Excel*. Modulus *raw meal* dijadikan target untuk mendapatkan proporsi yang sesuai. Modulus yang dapat dijadikan sebagai target memiliki aturan n-1, dimana "n" adalah jumlah komponen *raw meal*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan berjumlah 17 data yang merupakan data terbaru dari bulan Februari 2022 – Juni 2022. Semen tipe PCC mendominasi angka produksi dan penjualan pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Menurut Laporan Tahunan dan Keuangan Perseroan pada tahun 2021, produksi semen tipe PCC mencapai angka 1.769.100 Ton/tahun dan penjualannya mencapai 90,32% dari total penjualan semen. Variabel yang dijaga pada pengambilan data adalah kualitas fisik semen berupa LOI, IR, dan Residu 45 yang ditujukan untuk mendapatkandata dengan kualitas semen yang serupa.

Oksida klinker dipengaruhi oleh bahan baku utama, penunjang, dan aditif dalam produksi semen. Klinker tersusun dari beberapa mineral utama seperti C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, dan C<sub>4</sub>AF yang memiliki proporsi dan pengaruhnya masing-masing terhadap karakteristik semen.

Tabel 4 menunjukkan komposisi oksida di dalam klinker. Komposisi oksida klinker dapat digunakan dalam penentuan mineral di dalamnya dengan persamaan Bogue. Data yang digunakan berjumlah 17 yang diambil dari bulan Februari hingga Juni 2022.

Tabel 4 Komposisi Oksida Klinker dari Februari 2022 – Juni 2022

No.	Komposisi Oksida Klinker (%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	FCaO
1.	20,75	5,22	3,89	65,36	1,80	0,92	0,91
2.	20,47	5,04	3,76	65,05	1,74	0,88	1,00
3.	20,83	4,90	4,15	65,42	1,77	1,00	1,06
4.	20,73	5,01	3,68	65,45	1,74	0,88	0,74
5.	20,54	4,86	3,86	65,34	1,68	1,02	1,04
6.	20,68	4,92	3,57	65,67	1,61	0,74	1,09
7.	20,68	5,05	3,59	65,39	1,66	0,82	1,13
8.	20,90	5,16	4,05	65,20	1,78	0,87	1,02
9.	20,89	4,98	3,87	65,36	1,66	0,91	1,00
10.	20,49	5,01	3,29	65,48	1,32	0,96	1,22
11.	19,84	5,00	3,25	64,44	1,44	0,94	1,09
12.	20,42	5,05	3,35	65,64	1,30	0,97	1,34
13.	20,58	5,12	3,46	65,89	1,41	0,99	1,13
14.	20,73	5,30	3,53	65,38	1,48	0,99	1,20
15.	20,14	5,19	3,50	65,22	1,49	0,94	1,21
16.	20,62	5,26	3,35	65,17	1,47	1,01	0,95
17.	20,25	4,81	3,80	64,66	1,67	0,91	1,13
Rata-rata	20,56	5,05	3,64	65,30	1,59	0,93	1,07

Tabel 5 Komposisi Mineral Klinker

No.	Komposisi Mineral Klinker (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1.	64,00	11,24	7,25	11,85
2.	66,04	8,88	6,99	11,43
3.	64,89	10,78	5,96	12,62
4.	66,97	8,94	7,05	11,20
5.	67,49	8,00	6,35	11,75
6.	67,53	8,38	7,00	10,86
7.	65,45	9,93	7,31	10,91
8.	62,04	13,14	6,82	12,31
9.	64,30	11,39	6,66	11,76
10.	67,52	7,83	7,72	10,00
11.	68,89	4,94	7,74	9,89
12.	67,87	7,38	7,71	10,19
13.	67,89	7,81	7,72	10,52
14.	63,08	11,88	8,08	10,73
15.	67,64	6,74	7,83	10,66
16.	64,67	10,35	8,27	10,18
17.	66,98	7,57	6,30	11,57
Rata-rata	20,56	5,05	3,64	65,30

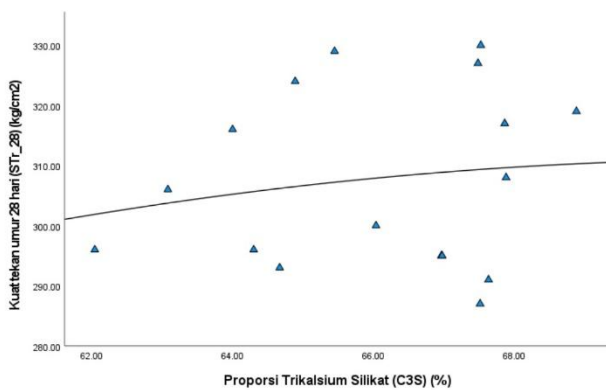
Proporsi mineral di dalam klinker perlu diketahui untuk mengukur kualitasnya terutama kuat tekan. Oksida klinker diperlukan dalam penentuan mineral dengan menggunakan Persamaan Bogue. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan mineral klinker.

Mineral klinker mempengaruhi kualitas semen terutama kuat tekan. Semen dengan proporsi C<sub>3</sub>S tinggi cenderung diminati karena menghasilkan kuat tekan yang baik (Bazari et al., 2021). Oleh karena itu, C<sub>3</sub>S dipilih sebagai mineral yang dicari korelasinya terhadap kuat tekan. Reaksi hidrasi antara C<sub>3</sub>S dan air (H<sub>2</sub>O) menghasilkan senyawa 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O (CSH) atau *Calcium Silicate Hydrates* (Marhaini et al., 2021). CSH bertindak sebagai senyawa pengikat utama dan menyumbang kuat tekan pada semen.

Gambar 3 menunjukkan grafik korelasi antara C<sub>3</sub>S terhadap kuat tekan akhir semen atau umur 28 hari. Dimana STr<sub>28</sub> pada grafik melambangkan kuat tekan semen umur 28 hari. Korelasi antara C<sub>3</sub>S dan STr<sub>28</sub> pada grafik adalah positif, dimana hal yang sama ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Salih, dkk. (2020) yang menunjukkan peningkatan C<sub>3</sub>S berpengaruh pada kenaikan kuat tekan umur 3, 7, 28, dan

60 hari secara positif. Kenaikan kuat tekan disebabkan oleh C<sub>3</sub>S yang akan terhidrasi sebesar 80% pada umur 28 hari (Marhaini et al., 2021). Mineral C<sub>3</sub>S memiliki proporsi terbesar dari total mineral semen, yaitu sekitar 50-70 % dan paling berpengaruh terhadap kuat tekan semen. Korelasi antara C<sub>3</sub>S dan STr<sub>28</sub> juga menghasilkan suatu persamaan kuadrat yang dapat digunakan untuk menentukan proporsi C<sub>3</sub>S di dalam klinker dengan kuat tekan semen yang diinginkan atau sesuai dengan standar. Persamaan kuadrat yang didapatkan dari korelasi antara C<sub>3</sub>S dan STr<sub>28</sub> adalah sebagai berikut:

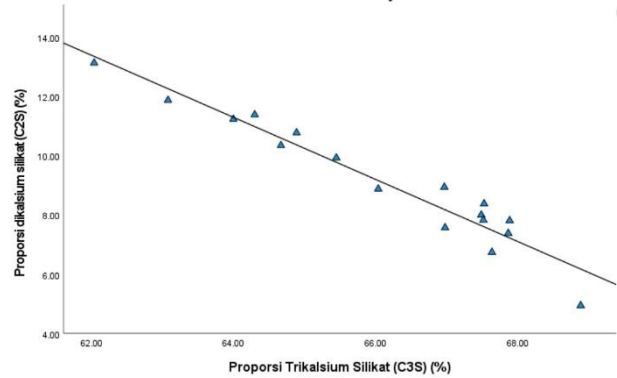
$$STr_{28} = -1,95E^2 + 14,11 \times C_3S - 0,1 \times C_3S^2 \quad (11)$$



Gambar 3 Korelasi Trikalsium Silikat (C<sub>3</sub>S) dan Kuat Tekan Semen Umur 28 Hari STr<sub>28</sub>.

Kuat tekan semen PCC diatur dalam SNI 15-7064-2004 yaitu minimal 250 kg/cm<sup>2</sup> untuk umur 28 hari. Dengan tujuan mendapatkan semen dengan kualitas lebih baik, target kuat tekan 28 hari ditargetkan menjadi 300 kg/cm<sup>2</sup>. Proporsi C<sub>3</sub>S yang dibutuhkan untuk mencapai kuat tekan 28 hari sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup> adalah 65,32%.

Mineral klinker lainnya seperti C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, dan C<sub>4</sub>AF juga memiliki pengaruh terhadap kuat tekan semen. Oleh karena itu, juga perlu dilakukan penyesuaian terhadap proporsinya di dalam klinker. Gambar grafik di bawah ini menunjukkan korelasi linear negatif antara C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S.



Gambar 4 Korelasi Trikalsium Silikat (C<sub>3</sub>S) dan Dikalsium Silikat (C<sub>2</sub>S).

C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S saling berbanding terbalik, dimana semakin tinggi nilai C<sub>3</sub>S akan menurunkan proporsi C<sub>2</sub>S. Proporsi C<sub>3</sub>S dipengaruhi oleh C<sub>2</sub>S dan keberadaan *free lime* (FCaO) karena reaksi kedua senyawa tersebut akan membentuk C<sub>3</sub>S pada suhu ±1300°C (Marhaini et al., 2021). Persamaan yang didapatkan dari korelasi linear kedua mineral tersebut dapat digunakan untuk menentukan proporsi C<sub>2</sub>S klinker.

$$C_2S = 78,44 - 1,05 \times C_3S \quad (12)$$

Proporsi C<sub>2</sub>S yang diperlukan dengan 65,32% C<sub>3</sub>S untuk mencapai kuat tekan 300 kg/cm<sup>2</sup> adalah 9,85%. Persamaan yang didapatkan dari korelasi adalah sebagai berikut. Tidak seperti dua mineral sebelum ini, C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF tidak memiliki korelasi antar mineral, sehingga untuk menentukan proporsinya diperlukan *trial and error* serta penyesuaian nilainya dengan modulus klinker. Tabel di bawah ini menunjukkan proporsi mineral klinker pada faktor klinker 67,18%.

Tabel 6 Proporsi Mineral Klinker pada 67,18% Faktor Klinker

Mineral Klinker	Persen (%)
C <sub>3</sub> S	65,32
C <sub>2</sub> S	9,85
C <sub>3</sub> A	7,14
C <sub>4</sub> AF	11,10

Faktor klinker 67,18% merupakan rata-rata penggunaan klinker dari bulan Februari – Juni 2022 pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Penurunan faktor klinker dilakukan sebesar 2,18% menjadi 65%. Seiring dengan penurunan faktor klinker, diperlukan penyesuaian proporsi mineral di dalamnya untuk

mempertahankan target kuat tekan semen. Tabel di bawah ini menunjukkan kenaikan proporsi mineral setelah dilakukan penurunan yaitu pada faktor klinker 65%.

Tabel 7 Proporsi Mineral Klinker pada 65% Faktor Klinker

Mineral Klinker	Persen (%)
C <sub>3</sub> S	67,51
C <sub>2</sub> S	10,18
C <sub>3</sub> A	7,38
C <sub>4</sub> AF	11,47

Dengan proporsi mineral pada faktor klinker 65% terdapat 66,26% CaO; 21,31% SiO<sub>2</sub>; 5,19% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; dan 3,77% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Modulus klinker yang dihasilkan adalah 97,11% LSF; 2,38% SM, dan 1,38% AM. Oksida di klinker dipengaruhi oleh kontribusi *coal ash* yang berasal dari proses pembakaran bahan bakar *fine coal*. Kontribusi oksida *coal ash* harus dikurangi dari oksida klinker untuk mendapatkan oksida *kiln feed* dengan menggunakan rumus pada persamaan 8-10. Data yang dibutuhkan untuk menentukan oksida *kiln feed* ditunjukkan pada Tabel 8 dan 9 yang merupakan rata-rata data bulan Februari – Juni 2022. Data tersebut meliputi kandungan *ash* pada *fine coal*, pemakaian batubara, dan produksi klinker. Selain itu juga diperlukan data Analisa oksida pada *fine coal*.

Tabel 8 Rata-rata bulan Februari – Juni 2022

No.	Keterangan	Rata-rata
1.	<i>Ash</i>	13,35 %
2.	Pemakaian batubara	719,06 Ton/hari
3.	Produksi klinker	4575,18 Ton/hari

Tabel 9 Senyawa Oksida pada *Fine Coal*

No.	Oksida	Proporsi (%)
1.	SiO <sub>2</sub>	3,14
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,08
3.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,31
4.	CaO	26,5
5.	MgO	1,32

Oksida *kiln feed* dapat ditentukan dengan mengurangi proporsi oksida klinker dengan pengaruh oksida dari *coal ash*. Proporsi oksida *kiln feed* yang dihasilkan sebagai berikut 65,70% CaO; 21,24% SiO<sub>2</sub>; 4,96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; dan 1,47% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*Kiln feed* dan *raw meal* memiliki kesamaan nilai dalam bentuk modulus, hanya saja berbeda dalam proporsi oksidanya. Sehingga LSF, SM, dan AM *kiln feed* yang berturut-turut 97,01%; 2,45%; 1,34% sama dengan pada *raw meal*. *Raw mix design* merupakan suatu rangkaian perhitungan untuk mendapatkan proporsi *raw meal* dari oksida yang terdapat di dalamnya. *Raw meal* yang digunakan terdiri dari batu kapur, tanah liat, dan pasir besi. Tabel di bawah menunjukkan rata-rata komposisi oksida pada *raw meal* dari bulan Februari – Juni 2022. Hasil proporsi *raw meal* yang diperoleh adalah 85,22% batu kapur, 13,54% tanah liat, dan 1,24% pasir besi dengan basis *feeding vertical raw mill 450 Ton/jam*.

Tabel 10 Rata-Rata Komposisi Oksida *Raw Meal* Bulan Februari – Juni 2022

No.	<i>Raw meal</i>	Komposisi Oksida (%DB)					H <sub>2</sub> O (%WB)
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
1.	Batu kapur	46,83	8,19	2,14	0,97	0,61	10,20
2.	Tanah liat	6,39	53,59	12,00	5,56	1,48	26,24
3.	Pasir silika	3,64	13,64	11,45	50,25	0,00	12,48

## KESIMPULAN

Pada penelitian kali ini digunakan 17 data semen tipe PCC dari bulan Februari – Juni 2022 pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Hasil menunjukkan bahwa mineral C<sub>3</sub>S memiliki korelasi yang positif terhadap kuat tekan semen umur 28 hari, yang dimana semakin tinggi kuat tekan semen maka akan semakin besar proporsi C<sub>3</sub>S yang diperlukan. Berbanding terbalik dengan C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S memiliki korelasi linear negatif dengan keberadaan C<sub>3</sub>S. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan faktor

klinker akan menaikkan proporsi mineral di dalamnya demi mencapai target kuat tekan semen. Penelitian juga menunjukkan bahwa penurunan faktor klinker sebesar 2,18% dengan rata-rata komposisi oksida *raw meal* yang ada dapat dan layak dilakukan demi menekan angka emisi gas CO<sub>2</sub>. Bahan mentah yang diperlukan untuk menghasilkan semen dengan kuat tekan umur 28 hari sebesar 300 kg/cm<sup>2</sup> pada 65% faktor klinker adalah 85,22% batu kapur, 13,54% tanah liat, dan 1,24% pasir besi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan sebesar-besarnya kepada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk., pembimbing lapangan, dan seluruh pihak yang terlibat dalam menyusun artikel ini sehingga dapat dipublikasikan. Harapan kedepannya artikel ini dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, D., dan Safaruddin. (2022). Evaluasi Vertical Cement Mill pada Proses Pembuatan Semen di PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. *Jurnal Terapan Internship & Multidisiplin*, 1(7).
- Bazari, A. A. K., Chini, M., Nikfal, Z., & Vatani, M. (2021). Effect of clinker phase changes on cement performance and its reactivity with super plasticizer additive. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 5(4), 211–221. <https://doi.org/10.22034/JCEMA.2021.143620>
- Direktorat Jendral EBTKE. (2020). Industri Semen. (Online). [https://simebtke.esdm.go.id/sinergi/sektor\\_pengguna\\_energi/detail/11/industri-semen](https://simebtke.esdm.go.id/sinergi/sektor_pengguna_energi/detail/11/industri-semen). Diakses pada 24 September 2020.
- Ewadh, H. A. (2013). Compressive Strength in Sulphate Resisting Portland Cement (SRPC). *KUFA Journal of Engineering*, 4(2), 53–68.
- Marhaini, Sri Yusmartini, E., & Aini, K. (2021). The Effect of Tricalcium Silicate (C3S) Percentage in Clinkerson the Cement Quality. *International Journal of Engineering & Technology*, 10(1), 23–27. <https://doi.org/10.14419/ijet.v10i1.31294>
- Maulidiany, N. D., & Tomo, H. S. (2012). Investigasi Teknik “Clustering” Dalam Metode Perhitungan Emisi Secara Top-Down Dari Industri Semen. *Jurnal Tehnik Lingkungan*, 18(1), 65–74. <https://doi.org/10.5614/jtl.2012.18.1.7>
- Mulyani, E. (2011). Produksi, Konsumsi Semen Dan Bahan Bakunya di Indonesia Periode 1997–2009 dan Prospeknya 2010–2015. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 7(2), 82–89.
- Pratama, S. W. I., Rauf, N., & Juarlin, E. (2014). Pembuatan dan Pengujian Kualitas Semen Portland Yang Diperkaya Silikat Abu Ampas Tebu ( Fabrication and Quality Test of Cement Portland With Enriched by Silicate Sugarcane Bagasse Ash ). *Jurnal Fisika FMIPA Unhas*, 1–5.
- Salih, M. A., Aldikheeli, M. R., & Shaalan, K. A. (2020). Evaluation of factors influencing the compressive strength of Portland cement statistically. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012059>
- Winter, N. (2009). Understanding cement (An Introduction to Cement Production, Cement Hydration, and Deleterious Processes in Concrete). In *WHD Microanalysis Consultants Ltd*.
- Yanita, R. (2020). Semen PCC Sebagai Material Green Construction dan Kinerja Beton yang Dihasilkan. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 19(1), 13–18.