

## ANALISA MINERAL KLINKER TERHADAP KUAT TEKAN AWAL SEMEN DAN PENGARUH PENURUNAN FAKTOR KLINKER TERHADAP PARAMETER KUALITAS KLINKER

R. Rimadhina<sup>1\*</sup>, J. P. Arsadha.<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, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang

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

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

**ABSTRAK:** Saat ini pemerintah sedang menerapkan penurunan emisi gas rumah kaca (GRK). Pada industri semen, emisi CO<sub>2</sub> yang termasuk emisi GRK dihasilkan dari salah satunya adalah penggunaan klinker di *kiln*. Penggunaan klinker dapat diminimalisir dengan penurunan faktor klinker. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa mineral klinker terhadap kuat tekan semen awal dan pengaruh penurunan faktor klinker terhadap parameter kualitas klinker. Mineral klinker dianalisa terhadap kuat tekan semen berumur 3 hari dengan batas 190 kg/cm<sup>2</sup> setelah dilakukan penurunan faktor klinker dari 67,15% menjadi 65%. Kemudian, parameter kualitas klinker yang dianalisa adalah komposisi oksida klinker (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan modulus klinker (LSF, SM, AM, dan LP). Bahan baku pada penelitian ini diperoleh dari PT Semen Baturaja (Persero) Tbk begitu juga dengan analisisnya dilakukan ditempat yang sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mineral C<sub>3</sub>S bernilai positif sedangkan mineral C<sub>2</sub>S bernilai negatif terhadap kuat tekan semen awal. Penurunan faktor klinker sebesar 2,15% akan menaikkan persentasi mineral klinker dan dapat menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub> sebesar ±81,872 Ton CO<sub>2</sub> ekuivalen/Ton batubara per hari. Komposisi oksida klinker dan modulus klinker setelah penurunan faktor klinker masih memenuhi standarisasi yang terdapat dalam pabrik.

**Kata Kunci:** Klinker, modulus klinker, kuat tekan awal, faktor klinker, emisi gas CO<sub>2</sub>,

**ABSTRACT:** The government of Indonesia is currently implementing the reduction of Greenhouse Gases (GHG) Emissions. In cement industry, CO<sub>2</sub> emissions which include GHG emissions are produced from using of clinker in the kiln. Using clinker can be minimized by decreasing clinker factor. This study aimed to analyze mineral clinker on initial compressive strength of cement and the effect of decreasing clinker factor on quality parameters of clinker. Clinker mineral were analyzed for the compressive strength of 3 days with a limit of 190 kg/cm<sup>2</sup> after reducing clinker factor from 67,15% to 65%. Furthermore, the clinker quality parameters which is clinker oxide compositions (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and clinker modulus (LSF, SM, and AM) were analyzed. Raw materials in this study were obtained from PT Semen Baturaja (Persero) Tbk as well as the analysis carried out in the same place. The results showed that C<sub>3</sub>S mineral were positive while C<sub>2</sub>S mineral were negative for the initial compressive strength of cement. The decreasing in the clinker factor of 2,15%, increased the percentage of clinker minerals and can reduced CO<sub>2</sub> emissions by ±81.872 Ton CO<sub>2</sub> equivalent/Ton coal per day. The clinker oxide compositions and clinker modulus after decreasing the clinker factor still met the standards contained in the factory.

**Keywords:** Clinker, clinker modulus, initial compressive strength, clinker factor, CO<sub>2</sub> gas emissions

### PENDAHULUAN

Persaingan dalam dunia industri di Indonesia saat ini semakin ketat sehingga menyebabkan berbagai masalah

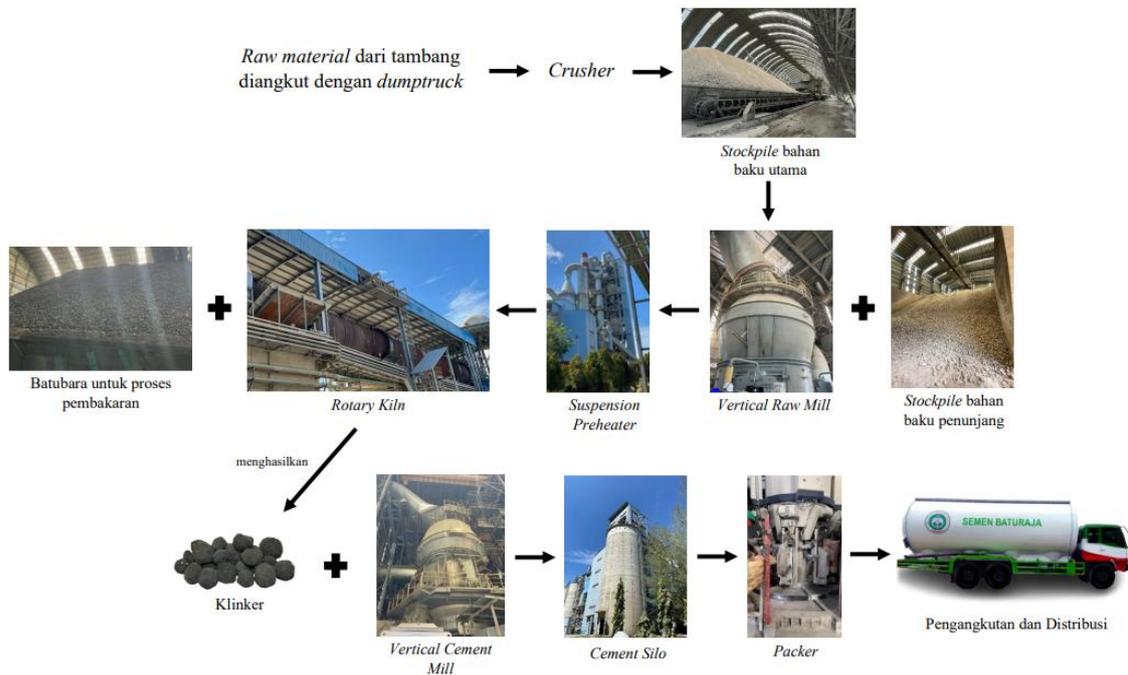
yang ditimbulkan pada lingkungan, seperti adanya efek Gas Rumah Kaca (GRK). Efek GRK tersebut membuat Pemerintah Indonesia prihatin terhadap bumi saat ini sehingga di tahun 2030, pemerintah Indonesia

mengharapkan penurunan emisi GRK sebesar 29% atau sekitar 834 juta ton CO<sub>2</sub> ekuivalen (Kementerian ESDM, 2020). Program pemerintah saat ini untuk mengatasi hal tersebut dengan mengeluarkan Peraturan Presiden RI Nomor 61 Tahun 2011 Tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN GRK) dan Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12/M-IND/PER/1/2012 Tahun 2012 Tentang Peta Panduan (*Roadmap*) Pengurangan Emisi CO<sub>2</sub> Industri Semen di Indonesia.

Industri semen di Indonesia sudah berkembang secara pesat untuk menghasilkan semen dengan kualitas yang bagus. Berbagai industri semen berkompetisi untuk mendapatkan produk semen dengan menetapkan standar pabrik masing-masing. Di Indonesia sendiri sudah mengeluarkan Standar Nasional Indonesia untuk memproduksi semen diantaranya SNI 2049:2015 untuk *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan SNI 7064:2014 untuk *Portland Composite Cement* (PCC). Standar yang sudah ditetapkan memiliki nilai minimum dan maksimum pada masing-masing parameternya tergantung dari produk semen yang dihasilkan.

Industri yang sangat mendukung program pemerintah salah satunya adalah PT Semen Baturaja (Persero) Tbk.

Industri ini merupakan industri semen yang termasuk Badan Usaha Milik Negara (BUMN) terletak di Ogan Komering Ulu, Baturaja, Sumatera Selatan. Industri ini menerapkan *Green Cement Industry*, dimana hal tersebut menyelaraskan pembangunannya dengan kelestarian lingkungan hidup. Salah satu upaya untuk menerapkan *green industry* adalah dengan mengurangi pemakaian energi yang dapat menyebabkan emisi GRK. Industri semen menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> dari tiga sumber antara lain pembakaran bahan bakar dalam kiln, dekarbonasi batu kapur dalam kiln (proses kalsinasi), dan penggunaan listrik di instalasi pabrik. Industri semen membutuhkan  $\pm 5\%$  konsumsi energi dari konsumsi energi global (Mutia & Hadiyanto, 2013). Penyumbang paling besar emisi gas CO<sub>2</sub> pada proses pembuatan semen adalah proses pembakaran di *kiln* atau proses kalsinasi karena membutuhkan banyak bahan bakar (Ratnawati & Frista, 2012). Penggunaan batubara pada proses pembakaran dapat diminimalisir dengan penurunan faktor klinker. Dengan penggunaan klinker yang minimal, maka pembakaran batubara dapat menurun. Proses pembuatan semen dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Proses Pembuatan Semen

Produksi semen yang baik harus sesuai dengan standar yang ada. Untuk mengetahui apakah semen tersebut layak atau tidak harus dilakukan beberapa uji secara fisika dan kimia semen. Pengujian sifat fisika antara lain kuat tekan semen, kehalusan semen, waktu pengikatan, dan pengikatan semu (Yusuf et al., 2019). Uji kuat tekan semen merupakan pengujian yang penting

untuk mengetahui kemampuan semen dengan gaya tekan atau beban yang diterima per satuan luas. Kuat tekan semen dipengaruhi oleh kualitas klinker yang digunakan, dimana mineral klinker berperan penting dalam menentukan kekuatan tekan. Komposisi mineral klinker utama yaitu C<sub>3</sub>S atau trikalsium silikat (3CaO.SiO<sub>2</sub>) memberikan kontribusi yang besar pada kuat tekan awal,

sedangkan mineral  $C_2S$  atau dikalsium silikat ( $2CaO.SiO_2$ ) memberikan kontribusi yang negatif terhadap kuat tekan awal (berumur 3 hari) (Salih et al., 2020). Pengaruh mineral  $C_3A$  atau trikalsium aluminat ( $3CaO.Al_2O_3$ ) dan tetrakalsium aluminoferrit ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ) atau  $C_4AF$  terhadap kuat tekan semen awal hanya menyumbangkan kontribusi yang sangat sedikit (Salih et al., 2020).

Mineral klinker mempengaruhi kandungan oksida klinker didalamnya. Klinker mengandung senyawa oksida yaitu  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , dan oksida lainnya. Oksida-oksida ini digunakan untuk mendapatkan modulus klinker antara lain *Lime Saturation Factor* (LSF), *Silica Modulus* (SM), dan *Alumina Modulus* (AM). LSF merupakan perbandingan kebutuhan jumlah maksimal  $CaO$  untuk bereaksi dengan oksida lain sehingga tidak terbentuknya *free lime* berlebih di dalam klinker. SM merupakan perbandingan oksida silika dengan total oksida alumina dan besi. AM merupakan perbandingan antara alumina dan besi. Oleh karena itu, perlu analisa mineral klinker dan parameter LSF, SM, dan AM setelah penurunan faktor klinker untuk tetap menjaga kualitas klinker (Winter, 2009).

## METODOLOGI PENELITIAN

Terdapat beberapa metodologi penelitian yang digunakan dimana data terlebih dahulu diolah lalu dibagi menjadi beberapa langkah diantaranya yaitu pengumpulan data dan perhitungan data, lalu diakhiri dengan analisa.

### Pengambilan Data

Pengambilan data-data yang diperlukan dalam analisa pengaruh mineral klinker terhadap kuat tekan awal semen dan pengaruh penurunan faktor klinker terhadap parameter kualitas klinker. Data diperoleh dari Laboratorium *Quality Control* dan *Central Control Room* di PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Data yang diperoleh meliputi persentase klinker yang dipakai di dalam *vertical cement mill* (VCM), komposisi oksida klinker, dan nilai kuat tekan umur 3 hari.

### Metode Perhitungan

Pada penelitian ini data yang diperoleh dihitung dengan metode kuantitatif. Kualitas klinker, seperti kuat tekan, untuk menghasilkan semen yang bagus harus disertai dengan perhitungan mineral klinker serta perhitungan parameternya seperti modulus klinker dan komposisi oksida tersebut.

### Perhitungan dan Penentuan Mineral Klinker

Perhitungan mineral klinker meliputi  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ , dan  $C_4A$  dibutuhkan data komposisi oksida dalam klinker. Persamaan *Bogue* digunakan untuk menghitung mineral klinker yang ditunjukkan oleh Tabel 1.

Setelah mineral klinker didapatkan, maka harus ditentukan untuk memperoleh hasil klinker sesuai dengan standar. Mineral klinker  $C_3S$  ditentukan dari grafik hubungan antara nilai  $C_3S$  dengan kuat tekan berumur 3 hari sebesar  $190 \text{ kg/cm}^2$ . Mineral klinker  $C_2S$  dengan  $C_3S$  berbanding terbalik sehingga dengan persamaan korelasinya maka diperoleh nilai  $C_2S$ . Untuk menentukan nilai  $C_3A$  dan  $C_4AF$  menyesuaikan dengan standar modulus klinker di pabrik. Persamaan mineral klinker ditunjukkan dibawah ini (Shim et al., 2021).

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

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

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

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

### Penurunan Faktor Klinker

Penurunan faktor klinker dilakukan dengan menggunakan rasio perbandingan antara faktor klinker sebelum diturunkan dengan faktor klinker setelah diturunkan.

### Penentuan Komposisi Oksida Klinker

Oksida klinker merupakan salah satu parameter kualitas klinker. Komposisi oksida klinker setelah penurunan faktor klinker perlu ditentukan terlebih dahulu dengan membalik Persamaan Bogue, sehingga ditunjukkan pada persamaan dibawah ini (Winter, 2009).

$$CaO = \frac{C_3S + 7,6024SiO_2 + 1,4297Fe_2O_3 + 6,718Al_2O_3}{4,071} \quad (5)$$

$$SiO_2 = \frac{C_2S + 0,754C_3S}{2,867} \quad (6)$$

$$Al_2O_3 = \frac{C_3A + 1,692Fe_2O_3}{2,65} \quad (7)$$

$$Fe_2O_3 = \frac{C_4AF}{3,043} \quad (8)$$

### Penentuan Modulus Klinker

Modulus klinker termasuk juga parameter kualitas klinker yang harus ditentukan. Modulus klinker ditentukan dengan komposisi oksida klinker yang sudah diperoleh dengan menggunakan rumus yang ditunjukkan persamaan dibawah ini (Winter, 2009).

$$LSF = \frac{100 \times CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3} \quad (9)$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (10)$$

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (11)$$

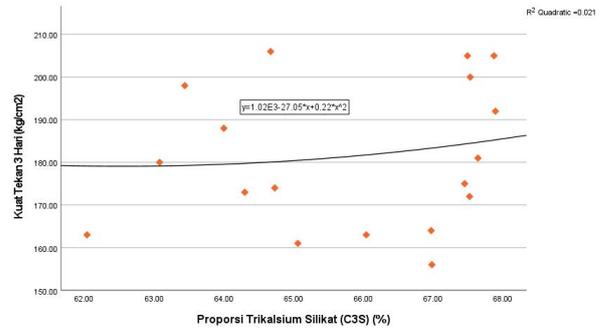
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data berasal dari Pabrik II PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. mulai bulan Februari-Juni 2022. Data ini diambil secara tidak konstan dikarenakan pabrik memiliki target produksi yang berbeda setiap hari. Semen yang dianalisa berjenis *Portland Composite Cement* (PCC) yang menduduki penjualan nomor 1 tahun 2021 pada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. Tabel dan grafik di bawah ini menunjukkan hubungan mineral C<sub>3</sub>S pada klinker dengan kuat tekan awal semen PCC

Tabel 1. Mineral C<sub>3</sub>S Terhadap Kuat Tekan 3 Hari Semen PCC

No.	C <sub>3</sub> S (%)	STr <sub>3</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )
1.	64,00	188
2.	63,44	198
3.	66,04	163
4.	67,49	205
5.	67,52	172
6.	66,98	156
7.	64,89	192
8.	66,97	164
9.	67,53	200
10.	65,45	192
11.	65,06	161
12.	62,04	163
13.	64,30	173
14.	67,45	175
15.	67,87	205
16.	67,89	192
17.	63,08	180
18.	64,73	174
19.	67,64	181

C<sub>3</sub>S merupakan mineral yang paling berpengaruh terhadap kuat tekan semen dikarenakan reaksinya dengan air yang membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrates* (CSH) (Marhaini et al., 2021). Senyawa CSH bertindak sebagai pengikat utama di dalam semen, sehingga menjadikan C<sub>3</sub>S sebagai mineral yang paling mempengaruhi kuat tekan semen. Korelasi antara C<sub>3</sub>S dengan kuat tekan awal semen berhubungan secara positif (Salih et al., 2020). Hasil yang sama juga terlihat pada Gambar 1, secara analisa statistika terlihat korelasi yang positif antara C<sub>3</sub>S dengan kuat tekan awal semen, yaitu pada umur 3 hari. Semen dengan persentase C<sub>3</sub>S yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan awal semen yang tinggi pula dan akan mempengaruhi percepatan penggunaan produk semen (Rahmawati & Damayanti, 2017).



Gambar 2. Pengaruh C<sub>3</sub>S Terhadap Kuat Tekan Awal

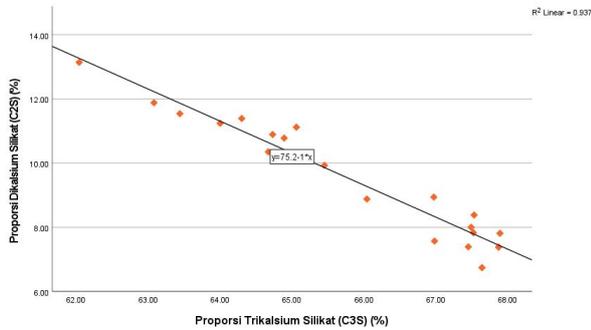
Kuat tekan awal semen diatur batas minimumnya pada SNI 15-7064-2004 yaitu minimal 130 kg/cm<sup>2</sup>, tetapi PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. memiliki standar nilai minimum kuat tekan awal yang lebih tinggi yaitu 180-190 kg/cm<sup>2</sup>. Persamaan korelasi antara C<sub>3</sub>S dengan kuat tekan awal semen dapat digunakan untuk menentukan proporsi mineral-mineral di dalam klinker untuk mencapai target kuat tekan awal semen sebesar 190 kg/cm<sup>2</sup>, yaitu:

$$STr_3 = 1,02E^3 - (27,05 \times C_3S) + (0,22 \times C_3S^2) \quad (12)$$

Angka 190 kg/cm<sup>2</sup> diambil sebagai target kuat tekan awal dengan harapan didapatkan kuat tekan awal atau 3 hari yang tinggi dan memenuhi standarisasi. Dengan menggunakan fungsi *goal seek* dapat ditentukan nilai C<sub>3</sub>S pada klinker untuk mencapai kuat tekan awal 190 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai C<sub>3</sub>S yang didapatkan adalah 64,07% pada faktor klinker untuk mencapai kuat tekan awal 190 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai C<sub>3</sub>S yang didapatkan adalah 64,07% pada faktor klinker untuk mencapai kuat tekan awal 190 kg/cm<sup>2</sup>. Angka faktor klinker tersebut merupakan rata-rata penggunaan faktor klinker pada PT Semen Baturaja (Persero)Tbk.

Berbeda dengan C<sub>3</sub>S yang diperoleh menggunakan *goalseek* dari persamaan diatas, mineral klinker C<sub>2</sub>S didapatkan dari hubungan linear antara C<sub>3</sub>S dengan C<sub>2</sub>S di dalam klinker. Kedua hubungan tersebut dinyatakan dalam korelasi linear negatif pada kuat tekan umur 3 hari. Apabila nilai C<sub>3</sub>S meningkat maka akan menurunkan nilai C<sub>2</sub>S, hubungan ini merupakan saling berbanding terbalik. C<sub>3</sub>S dipengaruhi oleh kandungan *free lime* (FCaO) yang terdapat pada klinker. Proses pembentukan C<sub>3</sub>S dimana ketika C<sub>2</sub>S yang sudah terbentuk dengan FCaO pada suhu 1300 °C kemudian C<sub>2</sub>S dengan FCaO akan bereaksi membentuk C<sub>3</sub>S (Marhaini et al., 2021). Berikut persamaan yang diperoleh untuk menentukan nilai C<sub>2</sub>S.

$$C_2S = 75,2 - (1 \times C_3S) \tag{13}$$



Gambar 3. Korelasi C<sub>3</sub>S dengan C<sub>2</sub>S

Mineral klinker C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF yang dilanjutkan untuk menyelesaikan perhitungan ditentukan dengan menyesuaikan nilai yang ada pada data modulus klinker di pabrik. Pengaruh C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF terhadap kuat tekan umur 3 hari adalah sangat kecil dibandingkan dengan C<sub>3</sub>S dan C<sub>2</sub>S (Salih et al., 2020). Setelah dilakukan beberapa *trial and error* diperoleh proporsi C<sub>3</sub>A yang sesuai dengan menggunakan rasio perbandingan dengan C<sub>3</sub>S. Hasil yang diperoleh  $\frac{C_{3A}}{C_{3S}}$  adalah 0.1091. Dengan faktor klinker 67,15%, diperoleh masing-masing proporsi mineral klinker adalah 64,07% C<sub>3</sub>S, 11,13% C<sub>2</sub>S, 6,99% C<sub>3</sub>A, dan 11,00% C<sub>4</sub>AF.

Tabel 2. Mineral Klinker pada Variasi Faktor Klinker

Mineral Klinker (%)	Faktor Klinker (%)	
	67,15	65,00
C <sub>3</sub> S	64,07	66,20
C <sub>2</sub> S	11,13	11,50
C <sub>3</sub> A	6,99	7,22
C <sub>4</sub> AF	11,00	11,36

Angka faktor klinker 67,15% merupakan rata-rata penggunaan faktor klinker pada PT Semen Baturaja (Persero)Tbk. pada bulan Februari-Juni 2022. Penurunan faktor klinker perlu dilakukan karena adanya himbuan dari pemerintah mengenai pengurangan emisi gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) yang dapat merusak lingkungan di sekitar pabrik (Haryanto, 2015). Penurunan faktor klinker dilakukan sebesar 2,15% menjadi 65%, dengan adanya penurunan faktor klinker diperlukan penyesuaian proporsi mineral di dalam klinker untuk mencapai kuat tekan awal semen sesuai dengan standar pabrik. Setelah dilakukan penurunan faktor klinker maka didapatkan kenaikan pada hasil mineral klinker. Hasil setelah penurunan tersebut adalah 66,20% C<sub>3</sub>S, 11,50% C<sub>2</sub>S, 7,22% C<sub>3</sub>A, dan C<sub>4</sub>AF.

Tujuan penurunan faktor klinker dikarenakan untuk menghemat penggunaan klinker. Apabila pemakaian klinker yang besar pada proses klinkerisasi, maka menyebabkan penggunaan batubara yang semakin banyak yang dapat menaikkan emisi GRK. Setiap penurunan 1% faktor klinker dapat mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub> sebesar 38,08 Ton CO<sub>2</sub> ekuivalen/Ton batubara per hari (Mutiara & Hadiyanto, 2013). Sehingga, setelah penurunan faktor klinker 2,15%, pabrik dapat menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub> sebesar ± 81,872 Ton CO<sub>2</sub> ekuivalen/Ton batubara per hari.

Tabel 3. Komposisi Oksida Klinker

Komposisi Oksida Klinker	(%)
CaO	66,00
SiO <sub>2</sub>	21,42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,73
MgO	1,50
FCaO	1,00
Other Compositions	1,24
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Hasil perhitungan komposisi kimia klinker diperoleh menggunakan *Bogue Equation*. Setelah penurunan faktor klinker, diperolehlah hasil diatas dan sesuai dengan standarisasi (Cadix & James, 2022). Pada standarisasi tersebut menunjukkan bahwa nilai CaO sebesar 60-70%, nilai SiO<sub>2</sub> sebesar 18-22%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 4-6%, nilai Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 2-4%, sementara untuk senyawa MgO, FCaO, dan lainnya yang diperoleh haruslah sekecil mungkin karena dapat mengganggu proses apabila melebihi 2%.

Tabel 4. Parameter Modulus pada Klinker

Modulus pada Klinker	(%)
----------------------	-----

LSF	96.45
SM	2.42
AM	1.37
LP	26.46

Parameter kualitas produk seperti LSF, SM dan AM klinker harus dikontrol untuk menjaga kualitas hasil produk dengan kuat tekan 3 hari sebesar 190 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai LSF klinker dan *raw meal* pada pabrik harus dijaga pada 95-98%. Reaksi antara senyawa CaO dengan oksida lain di dalam klinker tidak dijamin sempurna yang menyebabkan nilai LSF tidak 100%.

Nilai SM didapatkan sebesar 2,38% dan sudah sesuai dengan standarisasi di pabrik yaitu 2,3-2,5 %. Nilai SM yang kurang akan menyebabkan klinker akan berbentuk seperti bola dan sulit untuk digiling (Sari et al., 2017). Hasil AM diperoleh sebesar 1,38% dan sudah sesuai dengan standar pabrik yaitu 1,3-1,4 %.

*Liquid phase* (LP) klinker atau *clinker melt* merupakan fraksi *kiln feed* yang meleleh antara fase zona transisi atas dan zona pembakaran. LP yang diperhitungkan untuk mengetahui banyaknya *liquid* yang terdapat dalam klinker. Pabrik sudah menetapkan nilai LP yaitu berkisar 25-29%. Hasil LP yang tidak mencapai 25% dapat menyebabkan beban termal yang tinggi dan adanya debu pada klinker sehingga klinker sulit dibakar. Apabila LP melebihi 29% dapat mengakibatkan klinker menjadi tidak matang dan terbentuknya balling (bentuk klinker terlalu besar), batu api dapat rusak, dan lebih mudah terjadinya coating. Dengan berkurangnya *liquid*, C<sub>2</sub>S akan sulit bereaksi dengan FCaO membentuk C<sub>3</sub>S, karena itu nilai FCaO dalam klinker dapat meningkat. Hasil LP setelah penurunan faktor klinker sudah memenuhi standar pabrik.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan dengan penurunan faktor klinker sebesar 2,15% didapatkan bahwa analisa mineral klinker terhadap kuat tekan awal adalah masih memenuhi standar klinker. Nilai C<sub>3</sub>S diperoleh adalah 64,07%, dimana range nilai tersebut berkisar 45-70% dari massa total klinker. Mineral klinker C<sub>2</sub>S dan C<sub>3</sub>S berbanding terbalik sehingga dibuat plot didapatkan nilai tersebut adalah 11,13%, dimana rangenya berkisar 5-30%. Mineral C<sub>3</sub>A dan C<sub>4</sub>AF tidak terlalu berpengaruh terhadap kuat tekan sehingga ditentukan dengan penyesuaian nilai yang ada pada data modulus klinker di pabrik. Penurunan faktor klinker ini, pabrik dapat menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub> sebesar ± 81,872 Ton CO<sub>2</sub> ekuivalen/Ton batubara per hari.

Komposisi oksida klinker diperoleh yaitu 66% CaO, 21,42% SiO<sub>2</sub>, 5,11% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan 3,73% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan masih memenuhi tetapan di pabrik. Parameter kualitas produk seperti LSF, SM, AM, dan LP klinker harus dikontrol untuk menjaga kualitas hasil produk dengan kuat tekan awal sebesar 190 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai tersebut masing-masing adalah 96,45%, 2,42%, 1,37%, dan 26,46%. Dengan penurunan faktor klinker, harus dipastikan terlebih dahulu bahwa parameter kualitas klinker yang diperoleh harus disesuaikan dengan standar yang ada. Setelah itu, disimpulkan bahwa dengan faktor klinker 65% penggunaan klinker dapat mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub>.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada PT Semen Baturaja (Persero) Tbk. khususnya kepada pembimbingan lapangan serta semua yang terlibat dalam menyelesaikan artikel ini sehingga artikel ini dapat dipublikasikan. Harapan kedepannya artikel ini dapat dimanfaatkan dengan baik untuk tujuan penelitian berikutnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional [BSN]. 2014. Standar Nasional Indonesia (SNI) 7064:2014. *Syarat Fisika Semen PCC*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Cadix, A., & James, S. (2022). Cementing Additives. In Qiwei Wang (Ed.), *Fluid Chemistry, Drilling, and Completion* (Volume 1, pp. 187–254). Elsevier Science & Technology.
- Haryanto, J. T. (2015). *Kodifikasi dan Efektivitas Kebijakan Fiskal untuk Menurunkan Emisi Gas Rumah Kaca pada Industri Semen, Baja dan Pulp*. 19(1), 78–97.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2020. *Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi*. Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Marhaini, Sri Yusmartini, E., & Aini, K. (2021). The Effect of Tricalcium Silicate (C<sub>3</sub>S) Percentage in Clinker on the Cement Quality. *International Journal of Engineering & Technology*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.14419/ijet.v10i1.31294>
- Mutiara, F. R., & Hadiyanto. (2013). Evaluasi Efisiensi Panas dan Emisi Gas Rumah Kaca pada Rotary Kiln Pabrik Semen. *Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Kerekayasaan*, 34(1), 9–13.
- Rahmawati, B., & Damayanti, R. W. (2017). Pengendalian Kualitas Produk Klinker Pada PT. XYZ Dengan Menggunakan Grafik T<sub>2</sub> Hotteling. *Prosiding Seminar Dan Konferensi Nasional IDEC*, 365–374.

- Ratnawati, R., & Frista, R. (2012). Penggunaan Limbah Media Jamur Sebagai Bahan Bakar Alternatif Dalam Upaya Penurunan Emisi CO<sub>2</sub> Pada Industri Semen. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.37209/jtbtt.v2i1.18>
- 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), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012059>
- Sari, I. A. P., Pramusanto, & Sriwidayati. (2017). Analisa Klinker Berdasarkan Lime Saturation Factor ( LSF ), Silica Modulus ( SM ) dan Alumina Modulus ( AM ) Untuk Menjaga Kualitas Produk Di PT Cemindo Gemilang Desa Darmasari Kecamatan Bayah Kabupaten Lebak Provinsi Banten. *Prosiding Teknik Pertambangan*, 63–72.
- Shim, S. H., Lee, T. H., Yang, S. J., Noor, N. B. M., & Kim, J. H. J. (2021). Calculation of Cement Composition Using a Wew Model Compared to The Bogue Model. *Materials*, 14(16), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma14164663>
- Winter, N. (2009). Understanding cement (An Introduction to Cement Production, Cement Hydration, and Deleterious Processes in Concrete). *WHD Microanalysis Consultants Ltd*, 196.
- Yusuf, Y., Aziz, H., Aulana, F. M., & Ilfa, C. A. (2019). Penggunaan Pozzolan dan Limestone Basah Terhadap Sifat Fisika dan Kimia Semen Tipe OPC. *Jurnal Kimia UNAND*, 8(8), 1–7.