

OPTIMASI SUBSTITUSI FABA TERHADAP TANAH LIAT MENGUNAKAN PERHITUNGAN *RAW MIX DESIGN*

Widyaiswara Nirmala Wulandari¹, Rucita Ramadhana¹, Andris Syahrul Risyat²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT Semen Gresik Pabrik Rembang Desa Kajar Gunem, Kabupaten Rembang 59263, Indonesia

widyaiswarad@gmail.com ; [rucita.ramadhana@polinema.ac.id]

ABSTRAK

PT Semen Gresik merupakan industri yang berperan untuk memenuhi kebutuhan semen dalam negeri pada pembangunan infrastruktur. *Fly Ash Bottom Ash* (FABA) yang termasuk dalam kategori limbah berbahaya merupakan salah satu limbah yang dihasilkan. FABA dimanfaatkan kembali menjadi bahan alternatif yang dapat menggantikan tanah liat. Pemanfaatan FABA sebagai bahan alternatif pengganti tanah liat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi limbah berbahaya, menekan biaya produksi dan juga dapat meminimalisir dampak dari aktivitas pertambangan. Namun, penggunaan FABA dapat mengubah komposisi produk semen sehingga tanpa pengaturan yang tepat justru berpotensi menimbulkan masalah baru. Untuk itu, diperlukan bahan korektif yang merupakan material tambahan untuk menyesuaikan komposisi kimia dan fisika bahan baku agar memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Penelitian ini menjadi penting untuk mengoptimalkan pemanfaatan FABA dalam menggantikan tanah liat tanpa mengorbankan kualitas produk akhirnya. Parameter kualitas yang digunakan mengacu pada standar laboratorium PT Semen Gresik melalui perhitungan *raw mix design*. Dalam penelitian ini, dilakukan uji substitusi FABA dengan variasi 50%, 75%, dan 100% (%wt). Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi FABA sebesar 75% (%wt) paling optimal, dengan komposisi bahan korektif berupa batu kapur *high grade* sebesar 14,33% (%wt), pasir besi 1,66% (%wt), dan pasir silika 6,28% (%wt). Komposisi bahan baku ini menghasilkan nilai LSF sebesar 100,09, SIM 2,35, dan ALM 1,72. Nilai-nilai tersebut berada dalam rentang standar produksi klinker, sehingga dapat disimpulkan bahwa substitusi FABA sebesar 75% (%wt) mampu menghasilkan *raw mix design* yang sesuai dengan spesifikasi teknis untuk pembuatan semen.

Kata kunci: FABA, industri semen, substitusi tanah liat, *raw mix design*, bahan korektif

ABSTRACT

PT Semen Gresik is an industrial company that plays a crucial role in meeting domestic cement demand for infrastructure development. *Fly Ash Bottom Ash* (FABA), which is classified as hazardous waste, is one of the by-products generated. FABA can be reutilized as an alternative material to replace clay. This utilization offers a solution to reduce hazardous waste, lower production costs, and minimize the environmental impacts of mining activities. However, the use of FABA may alter cement composition and, without proper control, may lead to technical issues. Therefore, corrective materials are required to adjust the chemical and physical composition of raw materials to meet specified standards. This study aims to optimize the utilization of FABA as a clay substitute without compromising final product quality. Quality parameters were evaluated based on the laboratory standards of PT Semen Gresik through *raw mix design* calculations. FABA substitution tests were conducted at 50%, 75%, and 100% (wt%). The results indicate that a 75% (wt%) FABA substitution is the most optimal, requiring corrective materials consisting of 14.33% (wt%) high-grade limestone, 1.66% (wt%) iron sand, and 6.28% (wt%) silica sand. This composition yields an LSF value of 100.09, SIM of 2.35, and ALM of 1.72, which fall within the standard range for clinker production, confirming its suitability for cement manufacturing.

Keywords: FABA, cement industry, clay substitution, *raw mix design*, corrective materials

1. PENDAHULUAN

PT Semen Gresik memegang peranan penting dalam pembangunan infrastruktur dan ekonomi, karena produk semen merupakan bahan utama dalam berbagai konstruksi seperti gedung, jalan, dan jembatan. PT Semen Gresik bergerak di bidang manufaktur untuk memenuhi kebutuhan semen dalam negeri.

Semen merupakan suatu campuran bahan yang apabila dihomogenkan dengan air pada jumlah tertentu dapat mengikat bahan lain menjadi satu kesatuan yang dapat mengeras. Salah satu bahan utama produksi semen adalah tanah liat. Senyawa yang terkandung dalam tanah liat antara lain SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , dan lainnya dimana berperan penting dalam proses pengikatan serta pengerasan beton [1]. Tanah liat adalah salah satu sumber daya alam yang ketersediaannya melimpah di alam. Biasanya tanah liat didapatkan dari aktivitas pertambangan. Namun, penambangan tanah liat dari alam secara terus menerus dapat berdampak buruk bagi lingkungan. Oleh sebab itu, dalam upaya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan diperlukan adanya bahan alternatif yang dapat menggantikan tanah liat.

Pada PT Semen Gresik, tanah liat dapat disubstitusi menggunakan suatu material yang disebut dengan *Fly Ash Bottom Ash* (FABA). Penggunaan FABA sebagai substitusi tanah liat didasarkan pada karakteristik kimia dan fisiknya yang mampu meningkatkan kualitas tanah liat [2,3]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa FABA mengandung komponen kimia kunci seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang memiliki kemiripan fungsional dengan tanah liat [4]. FABA sendiri merupakan material sisa hasil pembakaran batu bara sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) serta bahan bakar pembentukan klinker pada PT Semen Gresik [5]. Hasil pembakaran ini menghasilkan limbah yang sangat berbahaya bagi lingkungan. *Fly ash* merupakan material yang melayang terbawa oleh gas buang, sedangkan *bottom ash* adalah material hasil pembakaran yang berada di bawah tungku. Unsur silika (Si) merupakan penyusun terbesar dari *fly ash* dengan berat jenis yang lebih ringan dibandingkan dengan besi (Fe) sehingga menyebabkan *fly ash* dapat dengan mudah melayang di udara. Sebaliknya, *bottom ash* berada di bagian bawah tungku dikarenakan unsur penyusun terbesar dari *bottom ash* adalah besi (Fe) yang memiliki berat jenis lebih besar dibandingkan silika (Si) [6]. *Bottom ash* biasa dimanfaatkan sebagai bahan baku pengganti pasir pada pembuatan mortar semen karena *bottom ash* mampu meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur semen pada umur 28 hari dibandingkan mortar semen tanpa *bottom ash* [7]. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, FABA diklasifikasikan sebagai limbah B3 jika tidak dimanfaatkan kembali. Namun, apabila dimanfaatkan secara sesuai, FABA tidak termasuk dalam kategori limbah B3 [8,9]. Apabila tidak diolah, limbah ini dapat mengontaminasi air tanah karena mengandung pengotor seperti arsenik, barium, boron, berilium, thallium, komium, molibdenum, selenium, dan merkuri [10]. Sehingga perlu dilakukan suatu proses dalam pengolahan limbah agar tidak berbahaya bagi lingkungan. Pada PT Semen Gresik, FABA dimanfaatkan sebagai bahan alternatif dalam menggantikan tanah liat. Hal ini didasari oleh komposisi FABA yang kaya akan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 menjadikannya potensial sebagai bahan yang dapat menggantikan tanah liat [11]. Selain dapat mengurangi limbah, pemanfaatan FABA dapat mengefisiensi biaya proses produksi baik dalam biaya bahan baku maupun dalam biaya pengolahan limbahnya. Penggunaan FABA pada proses produksi semen ini juga dapat mengurangi aktivitas penambangan tanah liat

yang akan berdampak negatif bagi lingkungan.

Pada penelitian sebelumnya, substitusi FABA sebesar 25% (%wt) terhadap tanah liat dapat memenuhi target spesifikasi laboratorium berdasarkan hasil XRF (*X-Ray Fluorescence*). Metode analisis menggunakan XRF ini digunakan untuk mengidentifikasi kandungan senyawa yang terdapat dalam material. Hasilnya berupa persentase maupun *ratio* senyawa dalam material yang diuji dengan batasan deteksi mencapai 1 ppm (*part per million*) [12]. Namun, substitusi yang lebih tinggi membutuhkan kajian lanjut untuk memastikan keseimbangan komposisi *raw mix*. Dalam hal ini, perhitungan *raw mix design* diperlukan untuk merencanakan pemakaian bahan baku dengan tujuan agar kualitas produk yang terbentuk sesuai dengan yang diinginkan [13]. Rencana penggunaan bahan baku ini harus memenuhi parameter utama yang telah ditentukan, seperti *Lime Saturation Factor* (LSF), *Silica Ratio* (SIM), dan *Alumina Ratio* (ALM). LSF merupakan parameter yang merepresentasikan kandungan CaO di dalam bahan baku [14]. SIM merupakan perbandingan antara oksida silika dengan oksida alumina dan oksida alumina [15]. Sedangkan ALM merupakan perbandingan antara oksida alumina terhadap oksida besi [16]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai LSF, SIM, dan ALM yang sesuai dapat dicapai apabila proporsi bahan korektif sesuai dengan kebutuhan [17]. Untuk itu, dalam memaksimalkan substitusi FABA terhadap tanah liat, diperlukan penyesuaian perhitungan bahan korektif untuk menjaga kualitas dari produk semen.

Penggunaan FABA sebagai bahan alternatif pengganti tanah liat pada proses produksi semen dapat mempengaruhi komposisi produk semen yang terbentuk sehingga diperlukan bahan korektif yang merupakan material tambahan untuk menyesuaikan komposisi kimia dan fisika bahan baku produksi agar sesuai dengan target yang telah ditetapkan. Bahan korektif yang digunakan dalam produksi semen ini yaitu batu kapur *high grade*, *copper slag*, dan pasir silika. Penelitian ini berfokus pada penentuan proporsi substitusi FABA paling optimal dengan pertimbangan proporsi bahan korektif yang diperlukan melalui perhitungan *raw mix design*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Metode Penelitian dan Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif untuk menganalisis jumlah bahan korektif yang diperlukan dan mengoptimalkan substitusi FABA terhadap tanah liat.

2.2. Data yang Dibutuhkan

Untuk melakukan perhitungan *raw mix design* ada beberapa data yang dibutuhkan yaitu target *raw meal*, komposisi FABA, komposisi bahan baku utama dan korektif, serta hasil XRF *mix pile*.

Parameter target *raw meal* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada data PT Semen Gresik yang disajikan pada Tabel 1 Sebagai berikut :

Tabel 1. Target *raw meal*

LSF	SIM	ALM	MgO (%wt)
100 ± 3	2,2 ± 0,2	1,6 ± 0,2	Max. 2

Komposisi kimia FABA yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2

sebagai berikut:

Tabel 2. Komposisi FABA (%wt)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LSF	P ₂ O ₅	LOI
43,12	11,50	9,85	3,64	1,85	1,14	0,42	1,53	2,59	1,93	4,88

Komposisi kimia batu kapur yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3. Komposisi batu kapur (%wt)

Blok	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LSF	H ₂ O
dr	0,71	0,42	0,17	54,90	0,28	0,02	0,01	0	2105,73	2,49
dr	1,80	0,63	0,20	53,90	0,40	0,03	0,01	0	1380,40	3,11
dr	1,34	0,64	0,19	54,49	0,27	0,03	0,01	0	1179,87	3,35
dr	4,53	1,60	0,32	53,09	0,32	0,07	0,02	0	359,32	4,98
dr	0,45	0,34	0,13	39,43	13,76	0,01	0,09	0	2254,37	2,52
dr	1,51	0,72	0,19	38,45	12,52	0,02	0,08	0	738,38	3,78
dr	1,56	0,82	0,20	39,77	11,76	0,02	0,08	0	726,83	4,04
dr	6,12	2,06	0,51	37,37	10,70	0,06	0,08	0	187,8	4,03

Komposisi kimia tanah liat yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Komposisi tanah liat (%wt)

Blok	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	H ₂ O
B	55,78	20,23	4,74	0,49	1,39	1,35	0,13	1,76	14,00
C	58,54	20,78	5,27	0,69	0,78	1,14	0,08	0,37	22,00

Komposisi kimia bahan korektif yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5. Komposisi bahan korektif (%wt)

Bahan Korektif	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Batu Kapur <i>High Grade</i>	0,71	0,42	0,17	54,90	0,28
Pasir Silika	71,08	9,32	4,26	2,41	0,21
<i>Copper Slag</i>	30,34	5,25	50,79	5,45	5,53

Dalam mendapatkan komposisi *mix pile*, bahan baku yang telah ditentukan dicampurkan sesuai dengan persentase yang telah ditetapkan yaitu 24% (%wt) tanah liat dan 76% (%wt) batu kapur dengan substitusi FABA terhadap tanah liat sesuai dengan variabel. Kemudian campuran bahan tersebut dilakukan identifikasi komponen menggunakan XRF (*X-Ray Fluorescence*). Berikut adalah data komposisi *mix pile* tiap variabel FABA yang diperoleh :

Tabel 6. Komposisi *mix pile* (%wt)

Komposisi	FABA		
	50%	75%	100%
SiO ₂	11.83	10.48	11.3
Al ₂ O ₃	3.35	3.05	3.17
Fe ₂ O ₃	1.67	1.9	2.39
CaO	44.41	45.33	43.8
MgO	0.75	0.8	0.97
LSF	116.33	132.61	118.58
SIM	2.35	2.12	2.03
ALM	2	1.61	1.32
SO ₃	0.59	0.49	0.56
Na ₂ O	0.11	0.12	0.14
K ₂ O	0.24	0.22	0.25
LOI	35.72	36.51	35.48

2.3. Metode Perhitungan Bahan Korektif

Dari target *raw meal* yang telah diberikan, proporsi bahan baku harus disesuaikan agar memenuhi parameter LSF, SIM, dan ALM. Perhitungan parameter kualitas *raw mix* dapat dihitung menggunakan Persamaan (1), (2), dan (3) [18].

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

$$SIM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$ALM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Dari hasil perhitungan parameter di atas, kemudian dilakukan perhitungan determinan masing-masing parameter kualitas sehingga membentuk matriks 4x3 menggunakan Persamaan (4), (5), dan (6).

$$DLSF = \text{Komposisi CaO} \times \left(1 - \left(\frac{\text{Target LSF}}{\text{LSF perhitungan}} \right) \right) \quad (4)$$

$$DSIM = \text{Komposisi SiO}_2 \times \left(1 - \left(\frac{\text{Target SIM}}{\text{SIM perhitungan}} \right) \right) \quad (5)$$

$$DALM = \text{Komposisi Al}_2\text{O}_3 \times \left(1 - \left(\frac{\text{Target ALM}}{\text{ALM perhitungan}} \right) \right) \quad (6)$$

Selanjutnya dilakukan pembentukan matriks untuk menghitung proporsi bahan menggunakan Persamaan (7).

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Setelah diperoleh hasil invers matriks dilanjutkan perkalian dengan matriks ordo 1x1 sehingga didapatkan proporsi kering tiap bahan korektif. Untuk mendapatkan proporsi basah bahan korektif (mengandung H₂O) dapat menggunakan Persamaan (8).

$$\text{Prop. basah} = \frac{\text{prop.kering}}{100 - \text{H}_2\text{O}} \times 100\% \quad (8)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

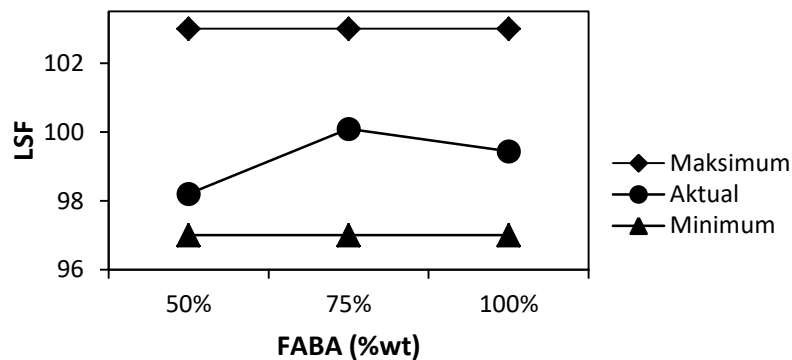
Pada proses produksi semen, pengujian seluruh bahan merupakan salah satu upaya dalam menjaga kualitas produk semen. Acuan dalam proses produksi semen ini ditetapkan oleh laboratorium. Aspek yang diperhatikan dalam pengujian pada laboratorium yaitu *Lime Saturation Factor (LSF)*, *Silica Modulus (SIM)*, dan *Alumina Modulus (ALM)*.

Berdasarkan Tabel 7, terlihat bahwa proporsi bahan baku mengalami perubahan seiring dengan peningkatan persentase substitusi FABA. Pada substitusi FABA 50% (%wt), proporsi bahan baku didominasi oleh proporsi bahan mix yang terdiri dari batu kapur, tanah liat, dan FABA sebesar 59,29% (%wt), diikuti dengan batu kapur *high grade* sebesar 32,44% (%wt). Namun, adanya peningkatan persentase FABA menjadi 75% (%wt) menurunkan proporsi batu kapur *high grade* menjadi 14,33% (%wt). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan substitusi FABA dapat mengurangi penggunaan bahan korektif lainnya, terutama batu kapur *high grade* [19].

Tabel 7. Hasil perhitungan *raw mix design*

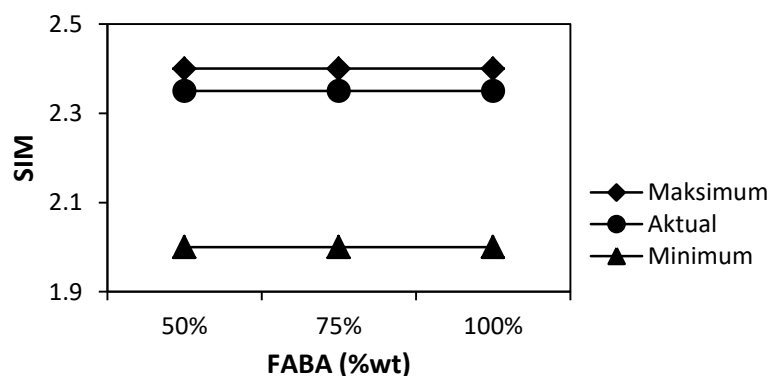
%FABA	Proporsi Bahan (%wt)			
	<i>Mix Pile</i>	Batu Kapur <i>High Grade</i>	<i>Copper Slag</i>	Pasir Silika
50	59.29	32.44	1.69	6.57
75	77.73	14.33	1.66	6.28
100	71.39	20.56	1.67	6.38

Berdasarkan Gambar 1, nilai LSF dari seluruh variabel substitusi FABA berada dalam batas aman. Nilai LSF tertinggi berada pada substitusi FABA 75% (%wt), yang menunjukkan bahwa komposisi bahan pada variabel ini optimal dalam memenuhi kebutuhan kalsium terhadap oksida lainnya sehingga campuran dapat digunakan untuk produksi semen. Peningkatan nilai LSF yang masih dalam batas aman ini, menunjukkan bahwa campuran dapat memenuhi kebutuhan pembentukan senyawa utama klinker seperti alit (C₃S). Apabila nilai LSF meningkat lebih dari standar yang telah ditetapkan, material campuran di dalam *kiln* akan sulit untuk dibakar [17]. Selain itu, terbentuknya senyawa bebas CaO akibat nilai LSF yang terlalu tinggi berdampak negatif terhadap kualitas produk akhir.



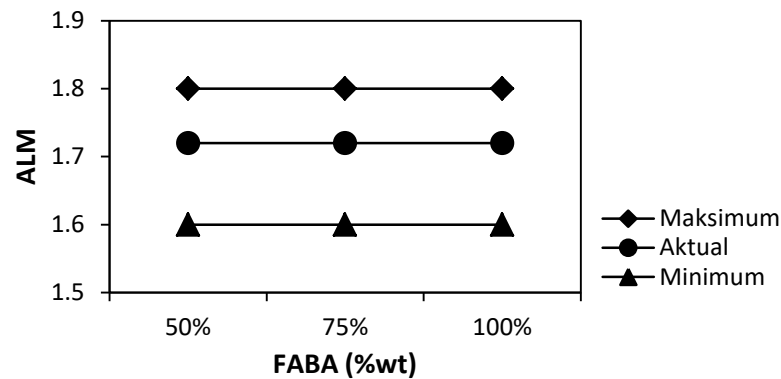
Gambar 1. Grafik LSF terhadap persentase substitusi FABA

Pada Gambar 2, nilai SIM untuk seluruh variabel substitusi FABA relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi FABA tidak secara drastis mempengaruhi kandungan MgO dalam campuran. Keberadaan MgO yang berlebih menyebabkan kenaikan ekspansi semen yang mempengaruhi produk akhir semen [20]. Dengan nilai SIM yang berada dalam batas aman menunjukkan bahwa substitusi FABA hingga 100% tetap memenuhi kriteria kualitas bahan baku untuk produksi klinker tanpa menimbulkan resiko akibat ketidakseimbangan MgO. Selain itu, keberadaan SIM berpengaruh terhadap fase cair bahan pada suhu tertentu di dalam *kiln*. Peningkatan SIM dapat menurunkan proporsi fase cair material yang dibakar di dalam *kiln*. Hal ini menyebabkan proses pembakaran dalam pembentukan klinker menjadi lebih sulit [16].



Gambar 2. Grafik SIM terhadap persentase substitusi FABA

Berdasarkan Gambar 3, nilai ALM dari seluruh variabel substitusi FABA relatif sama dan tetap di dalam batas aman yang telah ditetapkan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi FABA tidak berpengaruh besar terhadap rasio alumina dengan oksida besi dalam campuran bahan baku semen. Dengan demikian, campuran tersebut memenuhi kriteria yang digunakan dalam produksi semen. Nilai ALM yang stabil menandakan bahwa komposisi kimia campuran tidak berpotensi mengganggu kualitas klinker yang terbentuk. Selain itu, keberadaan ALM yang tinggi dapat meningkatkan pembentukan *tricalcium aluminate* yang merupakan salah satu komponen utama klinker yang berpengaruh terhadap waktu pengikatan awal dan ketahanan terhadap sulfat [18].



Gambar 3. Grafik ALM terhadap persentase substitusi FABA

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan hasil pengolahan data yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa substitusi optimal FABA terhadap tanah liat yaitu sebesar 75% (%wt) dengan proporsi basah bahan korektif yang diperlukan yaitu batu kapur *high grade* sebesar 14,33% (%wt), pasir besi sebesar 1,66% (%wt), dan pasir silika sebesar 6,28% (%wt). Komposisi bahan baku ini menghasilkan nilai LSF sebesar 100,09, SIM sebesar 2,35, dan ALM sebesar 1,72. Nilai-nilai tersebut berada dalam rentang standar produksi klinker, sehingga dapat disimpulkan bahwa substitusi FABA sebesar 75% (%wt) mampu menghasilkan *raw mix design* yang sesuai dengan spesifikasi teknis untuk pembuatan semen. Selain mendukung pemanfaatan limbah industri, penggunaan FABA dalam proporsi ini juga dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku alami tanpa menurunkan kualitas produk akhir.

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan pengujian lebih lanjut terhadap karakteristik fisik dan mekanik semen yang dihasilkan dari substitusi FABA tersebut, seperti kuat tekan, *setting time*, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif, guna memastikan performa dan daya tahan produk secara menyeluruh. Selain itu, penelitian juga dapat diperluas dengan melakukan analisis dampak lingkungan serta uji coba pada skala industri agar hasil yang diperoleh lebih aplikatif dalam proses produksi semen secara nyata.

REFERENSI

- [1] G. Marino dan Y. D. Setiyarto, "Penggunaan Tanah Liat Untuk Mengurangi Jumlah Semen pada Beton Geopolimer," *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, vol. 1, no. 2, hal. 82–88, Okt 2020.
- [2] M. I. Alfiros dan Z. Kamil, "Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Penambahan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)," Tugas Akhir, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, 2024.
- [3] L. Khasanah dan A. Budiono, "Pengaruh Penambahan FABA Terhadap Sifat Fisik dan Derajat Keasaman (pH) Kompos," *Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 3, hal. 460–468, Sep 2022.
- [4] S. A. Mohammed, S. Koting, H. Y. B. Katman, A.M. Babalghaith, M. F. A. Patah, M. R. Ibrahim, M. R. Karim., "A Review of the Utilization of Coal Bottom Ash (CBA) in the Construction Industry," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, hal. 1–16, Jul

- 2021.
- [5] V. Ansari dan E. Prianto, "Ciptakan Rumah Ramah Lingkungan dengan Material Dinding Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, vol. 1, no. 1, hal. 1–6, Nov 2021.
- [6] M. Asof, S. Arita, Mukiat, Luthfia, W. Andalia, dan M. Naswir, "Analisis Karakteristik, Potensi dan Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash PLTU Industri Pupuk," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 28, no. 1, hal. 2721–4885, Des 2022.
- [7] A. Susilowati dan T. Oktaviana, "Pengaruh Variasi Bottom Ash terhadap Sifat Fisik dan Sifat Mekanik pada Mortar Semen," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 07, no. 03, hal. 163–171, Nov 2021.
- [8] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun," April 2021
- [9] T. Indriyati, A. Malik, dan Y. Alwinda, "Kajian Pengaruh Pemanfaatan Limbah FABA (Fly Ash dan Bottom Ash) pada Konstruksi Lapisan Base Perkerasan Jalan," *Jurnal Teknik*, vol. 13, hal. 112–119, Okt 2019.
- [10] D. A. Fajarwati, P. Lepong, dan A. Alamsyah, "Analisis Potensi Swabakar (Self-Combustion) Berdasarkan Data Proksimat pada Batubara PT. Geoservices Samarinda," *Jurnal Geosains Kutai Basin*, vol. 5, no. 2, hal. 80, Des 2022.
- [11] I. W. Suarnita, "Kuat Tekan Beton dengan Aditif Fly Ash Ex. PLTU Mpanau Tavaeli," *SMARTek : Sipil Mesin Arsitektur Elektro*, vol. 9, no. 1, hal. 1–10, Feb 2011.
- [12] N. S. Putri, A. Rahim, O. Patiung, dan M. M. T. Afasedanja, "Pengujian X-Ray Fluorescence Terhadap Kandungan Mineral Logam Pada Endapan Sedimen di Sungai Amamapare Kabupaten Mimika, Papua Tengah," *Jurnal Teknik AMATA*, vol. 04, no. 1, hal. 6–10, Jun 2023.
- [13] R. Azizah, "Penggunaan Crude Oil Contaminated Soil Sebagai Bahan Tambahan Clay di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk.," Tugas Akhir, Politeknik ATI Makassar, Makassar, 2018.
- [14] F. Alemayehu, "Minimization of Variation in Clinker Quality," *Advances in Materials*, vol. 2, no. 2, hal. 23–28, Mei 2013.
- [15] N. Dahliar, S. Widodo, dan A. Tonggiroh, "Pengaruh Komposisi Ash Batubara Terhadap Kualitas Klinker Portland Cement pada PT. Semen Tonasa Unit III," *GEOSAINS*, vol. 10, no. 2, hal. 58–67, Jul 2016.
- [16] H. F. W. Taylor, *Cement chemistry*, 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.
- [17] A. J. Galenica, "Optimasi Perhitungan Lime Saturated Factor pada Raw Mill Berdasarkan Kadar CaO dan TOC," *Jurnal Eksakta Kebumihan*, vol. 1, no. 1, hal. 21–25, Nov 2020.
- [18] R. Rimadhina, J. Arsadha, A. Jannah, Robiansyah, dan Safaruddin, "Analisa Mineral Klinker Terhadap Kuat Tekan Awal Semen dan Pengaruh Penurunan Faktor Klinker Terhadap Parameter Kualitas Klinker," *Applicable Innovation of Engineering and Science Research (AVoER)*, vol. 14, no. 1, hal. 159–165, Okt 2022.
- [19] R. Fitriyanti dan M. Fatimura, "Aplikasi Produksi Bersih pada Industri Semen," *Jurnal Redoks*, vol. 4, no. 1, hal. 10–15, Jun 2019.

- [20] D. Purnama, R. M. Yudha Permana, dan V. N. Garjati, "Analisa Pengaruh Variasi Kandungan Magnesium Oksida terhadap Nilai Ekspansi Semen," *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, vol. 1, no. 1, hal. 271–281, Jun 2022.