

PENGARUH PERSENTASE FABA SEBAGAI *ALTERNATIVE RAW MATERIAL* TERHADAP LSF, SIM, DAN ALM PADA PT. SEMEN GRESIK

Aisha Shabrina Ramadhani¹, Rucita Ramadhana¹, Ilham Dirga Laksono²

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

aisharmdh5@gmail.com; [rucita.ramadhana@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Semen merupakan produk yang menjadi salah satu kebutuhan penting bagi masyarakat. Bahan baku utama pembuatan semen terdiri dari batu kapur dan tanah liat yang diperoleh dari hasil penambangan. Namun, apabila dilakukan penambangan secara terus menerus maka cadangan sumber daya tersebut akan menurun dan mengalami kelangkaan seiring berjalannya waktu. Oleh karena itu, PT Semen Gresik menggunakan *alternative raw material* yang dapat disubstitusikan pada bahan baku utama seperti *fly ash bottom ash* atau yang dikenal dengan FABA. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui persentase penambahan FABA yang optimal untuk dicampur dengan tanah liat sehingga menghasilkan angka LSF, SIM, dan ALM yang memenuhi target pembentukan mix pile. Hal ini penting dilakukan karena FABA tidak dapat menggantikan tanah liat sepenuhnya, sehingga apabila rasio FABA dan tanah liat tidak sesuai maka akan berpengaruh pada proses pembentukan semen. Manfaat penelitian ini bagi industri semen adalah memperpanjang masa pakai bahan baku utama namun tetap mampu menghasilkan semen dengan kualitas unggul. Metodologi yang digunakan yaitu mencampurkan FABA dengan batu kapur dan tanah liat kemudian dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence*. Parameter yang diamati adalah nilai LSF, SIM, dan ALM. Hasil yang didapatkan yaitu komposisi optimal FABA sebesar 25% wt untuk digunakan sebagai substitusi tanah liat.

Kata kunci: *alternative raw material, FABA, LSF, SIM, ALM*

ABSTRACT

Cement is a product that is one of the important needs of society. The main raw materials for cement production consist of limestone and clay obtained from mining. However, if mining is carried out continuously, these resources will decrease and become scarce over time. Therefore, PT Semen Gresik uses *alternative raw materials* that can be substituted for the main raw materials, such as *fly ash bottom ash* (FABA). The objective of this study is to determine the optimal percentage of FABA mixed with clay to produce LSF, SIM, and ALM values that fulfill the target for mix pile formation. This is important because FABA cannot completely replace clay, so if the ratio of FABA to clay is not appropriate, it will affect the cement production process. The benefits of this for the cement industry is extending the lifespan of primary raw materials while still producing high-quality cement. The methodology used was to mix FABA with limestone and clay, then analyze it using *X-Ray Fluorescence*. The parameters observed were LSF, SIM, and ALM values. The results indicated that the optimal FABA composition for clay substitution is 25% by weight.

Keywords: *alternative raw material, FABA, LSF, SIM, ALM*

1. PENDAHULUAN

PT. Semen Gresik adalah anak perusahaan PT. Semen Indonesia Tbk yang memproduksi semen dengan kualitas unggul untuk memenuhi kebutuhan masyarakat yang beragam. Perusahaan ini berlokasi di Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah, tepatnya di Desa Kajar. Kebutuhan semen di Indonesia mencapai 66,8 juta ton per tahun [1]. Angka ini tergolong dalam kebutuhan yang tinggi sehingga produksi semen diharapkan terus mengalami peningkatan. Bahan baku produksi semen terdiri dari dua bahan utama yakni batu kapur dan tanah liat yang didapat dari proses penambangan. Sehingga, dalam hal ini bahan baku semen berasal dari sumber daya alam tidak terbarukan yang cadangannya akan menurun dan mengalami kelangkaan apabila digunakan secara terus menerus seiring berjalannya waktu. Untuk memperpanjang masa pakai bahan baku tersebut, diperlukan penambahan bahan substitusi. PT Semen Gresik memiliki berbagai macam *Alternative Raw Material* yang digunakan untuk substitusi bahan utama pembuatan semen seperti *Paper Sludge*, *Sludge IPAL*, *Spent Bleaching Earth (SBE)*, *Fly Ash Bottom Ash (FABA)*. *Alternative Raw Material* merupakan bahan yang digunakan untuk menggantikan sebagian dari bahan utama dengan syarat memiliki karakteristik yang sama, dalam hal ini adalah kandungan kimia.

FABA adalah hasil samping dari proses pembakaran batu bara yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada industri pembangkit listrik. Setiap pembakaran dengan sejumlah batu bara dapat menghasilkan sekitar 2-10% hasil samping. Abu batu bara dengan komposisi 80-90% berupa *fly ash* dan 10-20% berupa *bottom ash* merupakan limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun) yang berdampak pada pencemaran lingkungan oleh karena itu akan menjadi lebih baik apabila dapat dimanfaatkan kembali [2]. *Fly ash* merupakan hasil samping dengan ukuran 45 μm bahkan lebih kecil dari ukuran semen yaitu 75 μm sehingga dapat menyebabkan pencemaran udara. *Bottom ash* merupakan sisa pembakaran batu bara dengan ukuran lebih besar dan berat dibandingkan *fly ash* [3]. Sehingga ketika hasil sisa tersebut tidak dikendalikan dengan bijak maka akan menyebabkan permasalahan pada lingkungan.

FABA dapat dimanfaatkan sebagai *alternative raw material* pengganti tanah liat [4]. Bahan ini mengandung senyawa kimia berupa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dengan kandungan terbesarnya yaitu silika [5]. Kandungan-kandungan tersebut memiliki kesamaan dengan kandungan yang dimiliki tanah liat sehingga dapat dimanfaatkan sebagai *alternative raw material*.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya, FABA dan *stone ash* langsung ditambahkan dengan produk semen untuk dijadikan batako maupun lapis fondasi jalan dalam mendukung *green infrastructure*, bahan-bahan tersebut menghasilkan nilai kuat tekan yang cukup tinggi [6]. Oleh karena itu, dilakukan pembaharuan penelitian mengenai persentase FABA apabila disubstitusikan dalam bahan baku utama saat proses pembuatan semen berlangsung.

Pada proses pembuatan semen, setiap bahan yang dihasilkan mulai dari proses penambangan hingga produk keluaran *cement mill* dilakukan pengecekan dan pemantauan oleh unit *Quality Control* agar *final product* yang dihasilkan memenuhi parameter-parameter kualitas semen yang telah ditentukan.

Pembuatan *mix pile* berpengaruh terhadap kualitas umpan *raw mill*. Kualitas ini ditentukan dengan parameter yang dihasilkan dari konsentrasi kimia berupa Kalsium Oksida (CaO), Silikon Dioksida (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), Besi Oksida (Fe_2O_3) [7]. *Lime Saturation Factor*

(LSF) merupakan banyaknya CaO yang diperlukan agar dapat bereaksi dengan oksida lain sehingga tidak menghasilkan *free lime* yang berlebihan [8]. *Silica Modulus* atau SIM menyatakan rasio oksida silika terhadap oksida besi dan alumina. Nilai *Silica Modulus* yang terlalu tinggi menyebabkan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak serta pengerasan semen yang lambat [9]. Sementara itu, *Alumina Modulus* merupakan perbandingan antara oksida alumina dan besi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase penambahan FABA yang optimal untuk dicampur dengan tanah liat sehingga menghasilkan angka LSF, SIM, dan ALM yang memenuhi target pembentukan *mix pile*. Target *standart* ini harus dipenuhi agar tidak mengganggu proses penggilingan pada *raw mill* yang dapat berpengaruh pada kualitas semen yang dihasilkan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode pengumpulan data pada penelitian ini dimulai dengan melakukan observasi dan pengambilan *sample* di lapangan. Setelah mendapatkan *sample* di lapangan kemudian dilakukan penelitian pada laboratorium *Quality Assurance* dan *Quality Control* dengan menggunakan alat *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mendapatkan data yang nantinya akan diolah pada *Microsoft Excel* dan *software SCADA* yang terdapat pada unit *Quality Control*. Kemudian hasil pengolahan data akan dibandingkan dengan parameter *standart* yang tertera pada Tabel 1.

2.1. Observasi Lapangan

Observasi dimulai dengan pengamatan serta pengambilan *sample* tanah liat yang ada pada *Clay Storage* PT. Semen Gresik Rembang. *Clay Storage* memiliki macam-macam blok berdasarkan karakteristik tanah liat yang diperoleh. Hal ini bertujuan untuk memudahkan pengambilan *clay* yang akan dijadikan bahan baku setelah dilakukan *raw mix design*. Adapun karakteristiknya yaitu *High Silica Clay*, *Low Silica Clay*, *High Alumina Clay*, dan *Low Alumina Clay*. Selanjutnya menganalisis kandungan tiap *sample* dengan menggunakan XRF. Tanah liat yang dijadikan *sample* dalam penelitian ini adalah campuran dari blok B dan C yang memiliki karakteristik *High Silica*. Analisis dilanjutkan untuk mendapatkan kandungan kimia pada FABA dari PT Metatu Nusantara Jaya yang digunakan oleh PT Semen Gresik, analisis ini diperlukan untuk mengetahui karakteristik FABA yang akan dicampurkan dengan tanah liat sehingga dapat dilakukan perencanaan *raw mix design*.

2.2. Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dimulai dengan menganalisis kandungan/profil dari masing-masing bahan yang digunakan dalam penelitian seperti batu kapur, tanah liat, dan FABA. Kemudian dilakukan *mixing* antara FABA dengan tanah liat menggunakan variabel komposisi FABA sebesar 10; 25; 50; 75; dan 100% wt. Batu kapur ditambahkan ke dalam hasil *mixing* FABA dengan tanah liat lalu diuji menggunakan X-RF untuk mengetahui hasil parameter LSF, SIM, ALM.

A. Karakteristik Bahan Baku dengan Analisis XRF

Untuk melihat karakteristik dari *Fly Ash Bottom Ash* (FABA) digunakan uji X-Ray dengan prinsip yaitu interaksi antara sinar X yang mengenai sampel sehingga panjang gelombang komponen, oleh karena itu uji X-Ray dapat membantu mengidentifikasi komposisi suatu material [10]. Berikut adalah parameter pembuatan *mix pile* serta karakteristik dari FABA, batu kapur, dan tanah liat.

Tabel 1. Parameter Pembuatan *Mix Pile*

LSF	SIM	ALM	MgO
98±7	2.5 ± 0.2	2.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2

Tabel 2. Karakteristik 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
C	58,54	20,78	5,27	0,69	0,78	1,14	0,08	0,37	22
B	55,78	20,23	4,74	0,49	1,39	1,35	0,13	1,76	14
Rata -Rata	57,16	20,505	5,005	0,59	1,085	1,245	0,105	1,065	18

Tabel 3. Karakteristik *Fly Ash Bottom Ash* (% 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
43,12	11,5	9,85	3,64	1,85	1,14	0,42	1,53	2,59	1,93

Tabel 4. Karakteristik 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	54,9	0,28	0,02	0,01	0	2105,73	2,49
Dr	1,8	0,63	0,2	53,9	0,4	0,03	0,01	0	1380,4	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	1,6	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	0,2	39,77	11,76	0,02	0,08	0	726,83	4,04
Dr	6,12	2,06	0,51	37,37	10,7	0,06	0,08	0	187,8	4,03
Rata-Rata	2,2525	0,90375	0,23875	46,42	6,25	0,0325	0,0475	0	1116,58	3,5375

B. Parameter Kualitas Bahan Baku**1. Lime Saturation Factor (LSF)**

LSF merupakan *standart* yang merepresentasikan jumlah maksimum senyawa kimia CaO yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan oksida lain agar tidak terjadi kadar kapur bebas [11].

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

2. Silica Modulus (SIM)

Rasio silika yang tinggi memiliki artian bahwa kalsium silikat yang terkandung dalam *clinker* lebih banyak dibandingkan alumina dan fero. Angka ini juga dapat menunjukkan seberapa banyak bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan *clinker* [12].

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

3. Alumina Modulus (ALM)

Alumina Modulus adalah perbandingan antara oksida alumina dan besi [13].

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

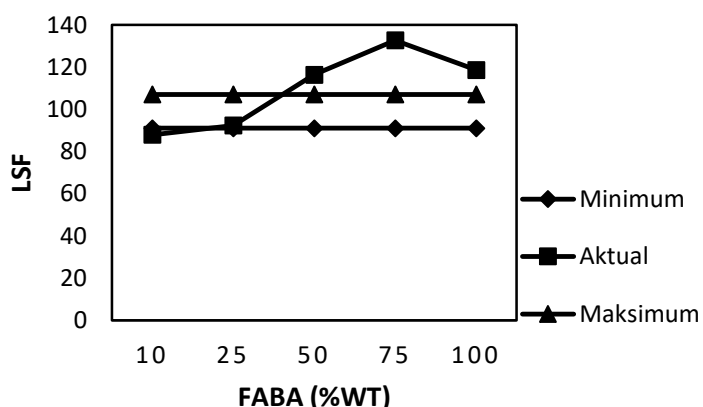
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pembuatan semen, komposisi batu kapur yang ditambahkan sebesar 76% dan tanah liat sebesar 24% sehingga dalam penelitian ini variabel FABA yang digunakan sebesar 10; 25; 50; 75; dan 100% wt dari 24% wt tanah liat. Setelah dilakukan *grinding* dan *mixing*, sampel dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* untuk melihat kandungan dan parameter yang ada didalamnya. Hasil analisis terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil XRF *Sample* dengan Penambahan FABA

Sample Group (%wt)	Si (%wt)	Al (%wt)	Fe (%wt)	Ca (%wt)	Mg (%wt)	SUM+LOI	LSF	SIM	ALM
100	11,30	3,17	2,39	43,80	0,97	98,07	118,58	2,03	1,32
75	10,48	3,05	1,90	45,33	0,80	98,90	132,61	2,12	1,61
50	11,83	3,35	1,67	44,41	0,75	98,68	116,33	2,35	2,00
25	14,34	4,04	1,62	42,42	0,73	98,36	92,28	2,54	2,50
10	15,01	4,19	1,61	42,20	0,73	98,84	87,88	2,59	2,60

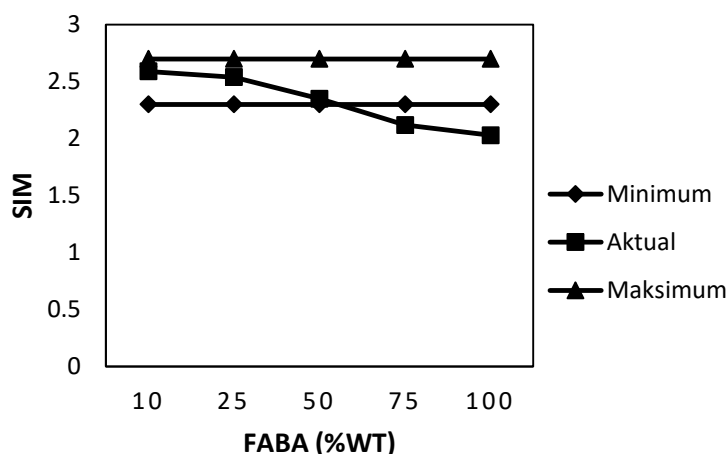
Proses pencampuran bahan baku memiliki pengaruh atas keberhasilan produk akhir yang berkualitas tinggi sehingga dalam prosesnya banyak parameter yang harus dipantau termasuk LSF, SIM, dan ALM. Untuk mencapai saturasi kapur yang lengkap pada *clinker*, total silika harus digabungkan sebagai C_3S , semua oksida besi harus digabungkan dengan jumlah alumina yang setara dengan C_4AF , dan alumina yang tersisa harus digabungkan menjadi C_3A .



Gambar 1. Grafik LSF terhadap persentase FABA

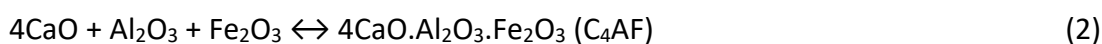
Pada Gambar 1, LSF dengan nilai yang tinggi mempunyai arti yaitu kandungan CaO dalam campuran tersebut memiliki jumlah berlebih dari yang dibutuhkan untuk bereaksi dengan oksida lainnya seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan Fe_2O_3 yang akan berpengaruh

terhadap *heat consumption* saat proses kalsinasi karena sulit dibakar [14]. Selain itu akan menyebabkan keretakan karena kandungan kapur bebas yang tinggi. Ketika nilai LSF tinggi, maka akan berpotensi dalam pembentukan *free lime*. *Free lime* adalah kadar kapur yang tidak bereaksi dengan oksida lainnya. Hal ini dapat berpengaruh pada waktu pengerasan semen dimana ketika pengerasan semen lambat akan mengganggu proses konstruksi [15]. Karena dapat memungkinkan terjadinya kerusakan sebelum mencapai kekuatan yang sempurna. Namun, jika nilai LSF ini kurang atau tidak memenuhi *standart* artinya elemen pembentuk semen yaitu C_3S memiliki persentase yang rendah sehingga apabila dilanjutkan dalam proses produksi akan menghasilkan produk akhir dengan kekuatan yang rendah [7].

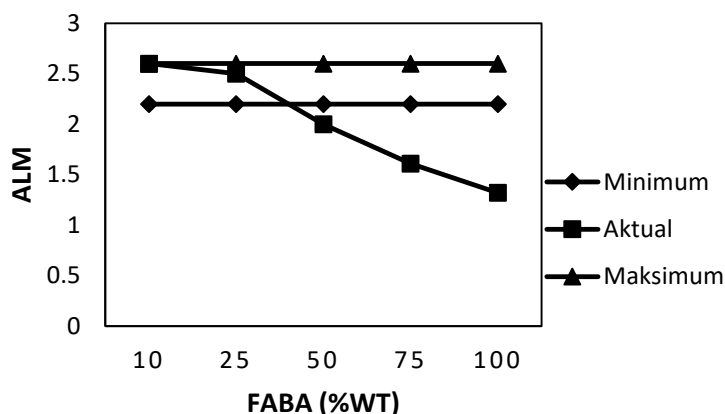


Gambar 2. Grafik SIM terhadap persentase FABA

Nilai SIM merepresentasikan kadar SiO_2 terhadap total Al_2O_3 dan Fe_2O_3 , nilai ini berada pada range 1,9 dan 3,2. Namun terkadang nilai SIM bisa lebih tinggi daripada yang seharusnya, khususnya semen dengan kandungan silika tinggi dan semen *portland* putih. Nilai SIM yang tinggi akan berpengaruh dalam proses pembakaran yang artinya akan sulit terbakar karena *liquid phasenya* rendah dan menyebabkan kemampuan membentuk *coating* akan berkurang. Sementara itu, nilai SIM berbanding terbalik dengan *liquid phase*. Semakin rendah nilai SIM maka *liquid phasenya* akan semakin tinggi. Daya bakar atau *burnability* dalam hal ini diartikan sebagai seberapa mudah *raw material* yang dapat diubah menjadi *clinker*. Reaksinya terjadi dalam fase lelehan sehingga semakin banyak *liquid phase* maka reaksi pembentukan *clinker* akan semakin mudah. Berikut adalah reaksi pembentukan fase *clinker* [16].



Nilai SIM yang rendah menghasilkan kuat tekan semen yang rendah pada hari ke 3-7. Kemudian untuk nilai ALM, akan berpengaruh pada fase *liquid clinker* nantinya. Umumnya nilai alumina modulus berkisar dari 1,5 hingga 2,5.



Gambar 3. Grafik ALM terhadap persentase FABA

Ketika nilai alumina modulus tinggi bersamaan dengan nilai silika modulus rendah maka akan berpengaruh terhadap kecepatan pengerasan semen. Hal ini memerlukan penambahan kadar gipsum yang lebih tinggi untuk mengendalikan waktu pengerasan semen.

Pada Gambar 3, FABA dengan komposisi sebanyak 25% wt menghasilkan nilai LSF, SIM, dan ALM yang memenuhi *standart* parameter pembuatan *mix pile*. Berbeda dengan komposisi FABA lainnya yang menghasilkan nilai tidak sesuai dengan *standart* yang akan menyebabkan ketidakstabilan pada produk semen. Pada saat pembuatan *mix pile*, ketika komposisi oksida yang ada belum terpenuhi maka dapat ditambahkan bahan baku *corrective* yang umumnya mengandung oksida alumina, oksida besi, dan oksida silika. Contoh bahan baku korektif adalah pasir silika dan *copper slag* [17].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penambahan FABA yang optimal yaitu sebesar 25% wt ditinjau dari parameter LSF, SIM, dan ALM. Pada penambahan FABA sebesar 25% wt, nilai LSF, SIM, dan ALM telah sesuai dengan parameter kualitas yang telah ditetapkan oleh laboratorium *Quality Control* PT Semen Gresik Rembang. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mendukung keberlanjutan dari bahan-bahan yang bisa digunakan kembali pada sektor industri, terlebih bahan tersebut merupakan limbah yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan apabila tidak dimanfaatkan kembali. Selain itu, manfaat bagi industri semen yaitu memperpanjang masa pakai bahan baku yang berasal dari tambang namun tetap mampu menghasilkan semen dengan kualitas unggul.

Untuk penelitian berikutnya, disarankan melakukan penelitian dari berbagai variabel tambahan seperti blok tanah liat yang berbeda serta melanjutkan analisa hingga parameter kualitas *kiln feed*. Peneliti diharapkan melakukan preparasi sesuai dengan SOP yang dianjurkan.

REFERENSI

- [1] I. M. S. Sayekti, "Kemenperin Pacu Industri Semen Berdaya Saing dan Berkelanjutan," Press Release. [Daring]. Tersedia pada: <https://pressrelease.kontan.co.id/news/kemenperin-pacu-industri-semen-berdaya-saing-dan-berkelanjutan>. Diakses pada Tanggal 11 November 2024.
- [2] Y. Yudiartono, J. Windarta, dan A. Adiarto, "Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 3, hal. 201–217, Okt 2022.
- [3] M. Setiawati, "Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton," *Jurnal Universitas Muhammadiyah Jakarta*, vol. 17, hal. 2, Okt 2018.
- [4] V. Ansari dan E. Prianto, "Ciptakan Rumah Ramah Lingkungan dengan Material Dinding Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)," dalam *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, Nov 2021, hal. 4–5.
- [5] F. F. Amaliyah, N. Hayati, dan M. Syai, "Komposisi Efektif FABA (Fly Ash dan Bottom Ash) Pada Proses Fabrikasi Paving Block," *Journal of Chemistry Sciences & Education*, vol. 01, no. 01, hal. 13–20, Mei 2024.
- [6] K. Bangun, M. Syah, H. Sabirin, dan M. Anggara, "Optimalisasi Pemanfaatan Limbah Fly Ash, Bottom Ash, dan Stone Ash Menjadi Batako," Sumbawa: Universitas Teknologi Sumbawa, Feb 2022.
- [7] S. P. Deolalkar, *Designing Cement Plants*. Sultan Bazar, India: BS Publications, 2009.
- [8] I. Andhini Puspita Sari, D. Pramusanto, dan I. Sriwidayati, "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*, vol. 4, no. 1, hal. 1–10, 2018.
- [9] Cement Manufacturers Association, "Material Quality Control in Cement Manufacturing," Cement Manufacturers Association. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.cmaindia.org/material-quality-control-cement>. Diakses pada Tanggal 11 November 2024.
- [10] 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.
- [11] D. A. Fithry, D. Parmanaon, A. Rahmad, dan R. A. Arbi, "Pengaruh Lime Saturation Faktor (LSF) Terhadap Kualitas C3S Dan Free Lime (FcaO) Pada Produksi Klinker PT. Semen Padang," *JUTIN : Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 8, no. 2, hal. 1631–1639, Mar 2025.
- [12] M. M. Basir, "Analisis Kadar CaO Bebas dan Lime Saturation Factor (LSF) Pada Klinker di PT. Semen Bosowa Maros Menggunakan X-Ray Fluorescence," Politeknik ATI Makassar, 2021.
- [13] M. I. Kadar, A. M. Y. Rusdi, A. Hafram, dan H. Bakri, "Analisis Proses Pencampuran Bahan Baku Utama Portland Composite Cement," *Mining Science and Technology Journal*, vol. 1, no. 2, hal. 77–85, Des 2022.

- [14] Y. Bao, Y. Zhu, W. Zhong, dan F. Qian, "A novel chemical composition estimation model for cement raw material blending process," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 11, hal. 2734–2741, Nov 2019.
- [15] M. Shofi'ul Amin, G. R. Mirza, dan Y. S. Tri, "Pengaruh Penambahan Batu Kapur (Limestone) Terhadap Karakteristik Semen," *Construction and Material Journal*, vol. 1, hal. 141–149, Jul 2019.
- [16] A. Lara Sati dan R. Anugrah, "Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem Rotary Kiln RKC-2 Pada PT. Semen Baturaja," *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, vol. 01, no. 03, hal. 523–537, Okt 2022.
- [17] M. Karnoha Amir, Z. Kurniawan Hasnur, S. Widodo, dan A. Nawir, "Simulation & Control Of Clay Warehouse Filling In Unit 2 And Unit 3 At PT. Semen Tonasa," *Mining Science and Technology Journal*, vol. 1, no. 2, hal. 94–103, Des 2022.