

SUBSTITUSI TANAH LIAT MENGGUNAKAN CAMPURAN SLUDGE IPAL DAN BOTTOM ASH TERHADAP PREDIKSI KUALITAS CLINKER DENGAN METODE RAW MIX DESIGN

Elsa Damayanty¹, Windi Zamrud¹, Ilham Dirga Laksono²

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

²PT Semen Gresik Pabrik Rembang, Desa Kajar, Kecamatan Gunem, Rembang 59263, Jawa Tengah, Indonesia

elsadamayanty1112@gmail.com; [windi.zamrud@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Sludge Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang semakin menumpuk di Indonesia. Meskipun dikategorikan sebagai limbah B3, *sludge* IPAL memiliki kemiripan dengan tanah liat sebesar 45,17%. Hal tersebut tentu menjadi solusi untuk dapat memanfaatkan *sludge* IPAL kawasan industri Dumai sebagai pengganti tanah liat pada industri semen khususnya pada PT Semen Gresik Pabrik Rembang melalui unit Alternatif *Fuel, Raw Material* (AFR) & *Waste Management*. Dengan adanya unit ini, *sludge* IPAL akan digunakan sebagai *alternatif raw material*. Namun, dikarenakan kandungan air yang cukup besar *sludge* IPAL memerlukan *treatment* khusus seperti dicampur dengan *alternatif raw material* yang sudah ada yaitu *bottom ash*. Hal ini yang mendasari penelitian terkait substitusi tanah liat menggunakan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* terhadap bahan baku utama pembuatan semen yaitu *clinker*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis seberapa besar *sludge* IPAL dan *bottom ash* dapat menyubstitusi tanah liat ditinjau dari segi prediksi kualitas *clinker* dengan menggunakan metode *raw mix design*. Substitusi tanah liat dengan menggunakan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* dilakukan dengan persentase yaitu 10; 20; 30; 40; dan 50%. Penggunaan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* mulai dari 10 – 50% terjadi penurunan prediksi kualitas *clinker* yang ditinjau dari C₃S; C₂S; C₃A; dan C₄AF, tetapi substitusi hingga 50% tersebut masih memenuhi prediksi kualitas *clinker* dengan kandungan C₃S; C₂S; C₃A; dan C₄AF sebesar 65,471; 9,826; 8,985; dan 10,642%.

Kata kunci: *bottom ash, clinker, raw mix design, sludge IPAL*

ABSTRACT

Waste Water Treatment Plant (WWTP) sludge is a hazardous and toxic waste (B3) that is increasingly accumulating in Indonesia. Although categorized as B3 waste, WWTP sludge is similar to clay by 45.17%. This is certainly a solution to be able to utilize the Dumai industrial estate WWTP sludge as a substitute for clay in the cement industry, especially at PT Semen Gresik Rembang Factory through the Alternatif Fuel, Raw Material (AFR) & Waste Management unit. With this unit, WWTP sludge will be used as an alternative raw material. However, due to the large water content, WWTP sludge requires special treatment such as mixing with alternative raw materials that already exist, namely bottom ash. This underlies research related to clay substitution using a mixture of WWTP sludge and bottom ash for the main raw material for cement production, namely clinker. This research was conducted with the aim of analyzing how much WWTP sludge and bottom ash can substitute clay in terms of predicting clinker quality using the raw mix design method. Clay substitution using a mixture of WWTP sludge and bottom ash was carried out with a percentage of 10; 20; 30; 40; and 50%. The use of a mixture of WWTP sludge and bottom ash ranging from 10 - 50% decreased the prediction of clinker quality in terms of C₃S; C₂S; C₃A; and C₄AF, but substitution up to 50% still fulfills the prediction of clinker quality with C₃S; C₂S; C₃A; and C₄AF contents of 65.471; 9.826; 8.985; and 10.642%.

Keywords: *bottom ash, clinker, raw mix design, WWTP sludge*

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan berjalannya waktu industri di Indonesia kian meningkat. Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) perusahaan manufaktur pada tahun 2022 mencapai sekitar 30 ribu perusahaan untuk skala menengah dan besar. Sedangkan pada tahun 2023 jumlah industri manufaktur menengah dan besar di Indonesia telah tercatat sebanyak 32.193 perusahaan [1]. Peningkatan jumlah industri yang cukup banyak ini tentunya membawa pengaruh positif bagi masyarakat terutama dalam ranah lapangan pekerjaan. Namun, tidak hanya dampak positif semakin meningkatnya jumlah industri juga akan membawa dampak negatif yang tidak bisa dihindari yakni semakin meningkatnya jumlah limbah di Indonesia jika tidak dilakukan pengolahan.

Pengolahan limbah pada suatu industri dapat menghasilkan hasil samping berupa *sludge* yang merupakan endapan suspensi yang berasal dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) [2]. Semakin meningkatnya jumlah *sludge* akan menimbulkan dampak yang kurang baik bagi suatu industri. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya limbah *sludge* yang tidak dimanfaatkan dapat memperbesar anggaran biaya penanganan serta perluasan area penumpukan limbah [3]. Selain itu, penumpukan *sludge* dapat mengganggu estetika pabrik serta dikhawatirkan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dikarenakan bau dari *sludge* yang tidak sedap.

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, lumpur dari IPAL diklasifikasikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). Hal ini disebabkan oleh kandungan zat, energi, atau komponen lainnya yang, baik secara langsung maupun tidak langsung, memiliki potensi untuk mencemari dan/atau merusak lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya, akibat sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya [4]. Meskipun dikategorikan sebagai limbah B3 bukan berarti *sludge* IPAL tidak bisa dimanfaatkan, kandungan yang terdapat dalam *sludge* seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan MgO memiliki kemiripan dengan tanah liat sebesar 45,17% [5]. Tanah liat merupakan salah satu bahan baku utama yang digunakan dalam proses pembuatan semen [6].

Semen adalah bahan yang bersifat adhesif dan kohesif yang digunakan bersamaan dengan pasir dan batu kerikil sebagai bahan pengikat atau perekat [7]. Salah satu industri semen yang terkenal dengan kualitas yang tidak diragukan di Indonesia adalah PT Semen Gresik Pabrik Rembang yang tergabung pada Semen Indonesia *Group* (SIG). Pada proses produksinya, industri ini memiliki tambang batu kapur dan tanah liat yang berfungsi sebagai bahan baku untuk pembuatan *clinker* semen. Namun, jumlah ketersediaan tanah liat di alam yang semakin menipis membuat PT Semen Gresik terus berupaya mencari alternatif *raw material* khususnya untuk tanah liat guna menunjang proses produksi. Salah satu bahan baku alternatif yang telah digunakan oleh PT Semen Gresik adalah *bottom ash*, yakni limbah sisa pembakaran batu bara yang tertinggal di dasar tungku pembakaran [8]. *Bottom ash* mengandung beberapa komponen utama, termasuk oksida atau mineral yang memiliki silika, aluminium, besi, kalsium, natrium, dan magnesium. Kandungan yang terdapat pada *bottom ash* ini memiliki kemiripan dengan kandungan dari tanah liat yaitu SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan MgO [9].

Meskipun sudah memiliki alternatif *raw material* berupa *bottom ash*, PT Semen Gresik melalui unit AFR & *Waste Management* terus berupaya mencari *source* baru untuk alternatif *raw material* dengan tujuan dapat menguntungkan industri dan masyarakat. Melihat kondisi ini, *sludge* IPAL berpotensi menjadi alternatif *raw material* sebagai pengganti tanah liat karena kemiripannya dengan tanah liat. Namun, dalam aplikasinya *sludge* IPAL akan dicampur dengan menggunakan *bottom ash*. Substitusi tanah liat menggunakan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* dilakukan pada beberapa variabel yaitu 10; 20; 30; 40; dan 50% dengan perbandingan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* 1:1. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis seberapa besar *sludge* IPAL dan *bottom ash* dapat menyubstitusi tanah liat ditinjau dari segi prediksi kualitas *clinker* dengan menggunakan metode *raw mix design*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode eksperimen dan pengumpulan data. Proses penelitian dilakukan di laboratorium QA dan QC PT Semen Gresik Pabrik Rembang. Dalam menunjang hal tersebut, alat XRF digunakan untuk mendapatkan kualitas bahan baku yang selanjutnya disimulasikan dengan *raw mix design* sebagai metode untuk menentukan prediksi kualitas *clinker* semen.

2.1. Tahap Persiapan Alat dan Bahan

Langkah awal dalam penelitian ini adalah persiapan alat dan bahan. Alat yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi *X-Ray Fluorescence (XRF)*, *Grinding Herzog*, *Press Herzog*, dan neraca analitik. Sedangkan, bahan yang akan digunakan adalah *sludge* IPAL dan *bottom ash* sebesar 10 gram.

2.2. Tahap Pengujian XRF

Sludge IPAL dan *bottom ash* yang telah ditimbang sebesar 10 gram dihaluskan menggunakan alat *Grinding Herzog*. Setelah halus, sampel tersebut dimasukkan ke dalam cincin uji XRF lalu ditekan hingga mencapai tekanan 120 psi menggunakan alat *Press Herzog*. Selanjutnya, sampel dimasukkan ke dalam alat uji XRF selama ± 20 menit. Hasil komposisi dari sampel dapat dilihat pada komputer.

2.3. Tahap Analisis Raw Mix Design

Metode yang digunakan adalah *raw mix design* yang merupakan perhitungan perencanaan pemakaian bahan baku dengan tujuan untuk mendapatkan kualitas produk sesuai yang diharapkan [10]. Bahan perhitungan ini menggunakan data hasil analisis XRF *sludge* IPAL, *bottom ash*, serta bahan baku pembuatan lainnya yang didapatkan pada Laboratorium QC PT Semen Gresik Pabrik Rembang. Perhitungan dari *raw mix design* harus mempertimbangkan kualitas *clinker*, kualitas bahan baku, pemakaian bahan bakar serta biaya yang digunakan.

Dalam menggunakan metode ini, sangat penting untuk menentukan *mix pile* serta *raw meal/kiln feed* yang ditargetkan. Parameter kunci dalam melakukan perhitungan kualitas dari *mix pile* dan *raw meal/kiln feed* adalah *lime saturation factor (LSF)*, silika modulus (SM) dan alumina modulus (ALM).

Setelah dilakukan perhitungan pada *raw meal/kiln feed*, selanjutnya dilakukan perhitungan lanjutan untuk menentukan prediksi kualitas *clinker* ditinjau dari 4 senyawa utama semen yaitu trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A),

dan tetracalcium aluminoferrite (C_4AF) menggunakan rumus Bogue yang ditunjukkan oleh Persamaan (1), (2), (3), dan (4) [11].

$$C_3S = 4,0710 (CaO) - 7,6024 (SiO_2) - 1,4297 (Fe_2O_3) - 6,7187 (Al_2O_3) \quad (1)$$

$$C_2S = 8,6024 (SiO_2) - 1,0785 (Fe_2O_3) + 5,0683 (Al_2O_3) - 3,0710 (CaO) \quad (2)$$

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

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

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sludge yang berasal dari pengolahan air limbah merupakan material padat yang dipisahkan dari suspensi dalam cairan limbah [12]. Pada penelitian ini, *sludge* IPAL yang digunakan berasal dari kawasan industri Dumai yang diaplikasikan bersama *bottom ash* menggunakan perbandingan 1:1 menjadi pengganti tanah liat dengan metode perhitungan *raw mix design*. Metode *raw mix design* merupakan metode yang digunakan untuk mencampurkan lebih dari satu material yang memiliki kandungan oksida logam seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan MgO untuk pembuatan semen yang digunakan sebagai prediksi kualitas *clinker* [13].

Clinker memiliki 4 senyawa penting antara lain C_3S , C_2S , C_3A , dan C_4AF yang digunakan dalam penentuan kualitasnya. Kandungan dari C_3S pada *clinker* akan memberikan kontribusi terhadap kekuatan awal semen sebelum 28 hari, sedangkan kekuatan akhir semen akan dipengaruhi oleh kandungan C_2S [14], [15]. Senyawa C_3A dalam *clinker* akan berkontribusi terhadap panas waktu ikat semen, dan senyawa C_4AF yang terdapat pada *clinker* hanya akan memengaruhi warna dari semen [16, 17].

Tabel 1. Karakteristik *sludge* IPAL, *bottom ash*, dan tanah liat hasil uji XRF di PT Semen Gresik Pabrik Rembang

Bahan	Senyawa (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	H_2O
<i>Sludge</i> IPAL (SI)	4,510	17,060	9,770	3,050	1,630	1,170	1,040	86,260
<i>Bottom Ash</i> (BA)	45,660	10,260	10,870	12,040	4,370	1,100	1,230	13,310
Campuran SI dan BA	25,090	13,660	10,320	7,550	3,000	1,140	1,140	24,160
Tanah Liat	50,470	24,710	7,010	2,440	2,010	1,380	0,130	17,000

Sludge IPAL yang digunakan dalam penelitian mengandung Al_2O_3 sebesar 17,06% (ditunjukkan pada Tabel 1) hampir serupa dengan tanah liat yang berkisar 16,5%. Namun, *sludge* IPAL hanya memiliki kandungan SiO_2 sebesar 4,51% yang tentunya berbeda jauh dengan tanah liat yang memiliki nilai SiO_2 dengan kisaran 50 - 60% [18]. Tidak hanya itu, hal lain yang perlu diperhatikan dari hasil analisis *sludge* IPAL tersebut adalah kadar air yang terkandung di dalamnya. *Sludge* IPAL mengandung kadar air hingga 86,26%, sehingga memiliki tekstur yang menyerupai lumpur. Hal ini tentunya menjadi pertimbangan dalam pemanfaatan

sludge IPAL untuk substitusi tanah liat dikarenakan kadar air tertinggi yang dipatok untuk alternatif *raw material* pada PT Semen Gresik Pabrik Rembang adalah 35%. Bahan lain yang juga memiliki karakteristik menyerupai tanah liat ditinjau dari kandungan SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 adalah *bottom ash* seperti ditunjukkan pada Tabel 1 [19]. Kandungan SiO_2 pada *bottom ash* memiliki kemiripan dengan tanah liat mencapai 90% sehingga membuat PT Semen Gresik Pabrik Rembang memanfaatkan *bottom ash* menjadi alternatif *raw material*. Hal tersebut tentu membuka peluang untuk dapat memanfaatkan *sludge* IPAL menjadi alternatif *raw material* pada proses produksi semen melalui *treatment* khusus, dengan cara mencampur *sludge* IPAL dengan *bottom ash* yang bertujuan untuk mengurangi kadar air di dalam *sludge* IPAL hingga mencapai nilai kurang dari 35%.

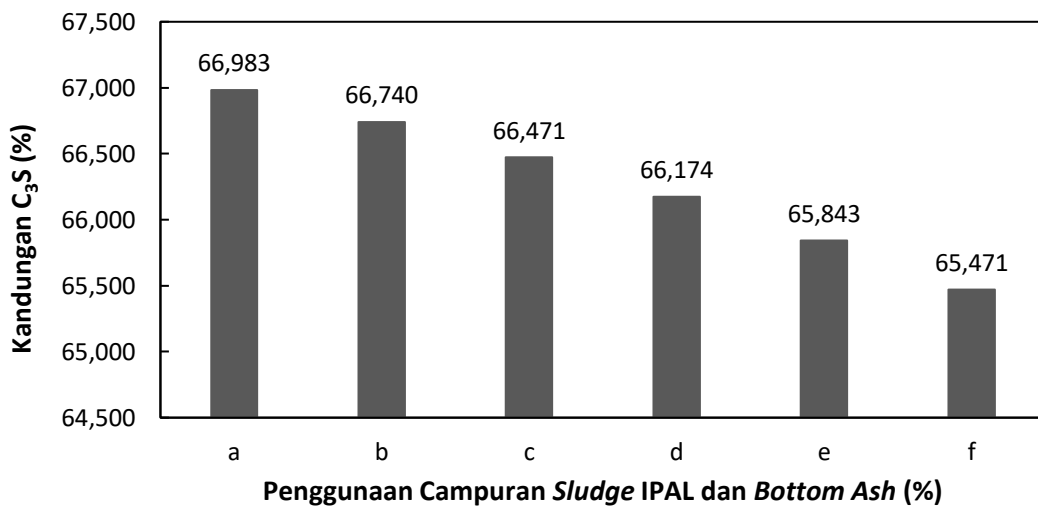
Penggunaan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* dengan metode *raw mix design* pada penelitian ini didasarkan pada hasil analisis XRF dari *sludge* IPAL dan *bottom ash* yang ditunjukkan pada Tabel 1. Selain itu, pada penelitian ini juga ditunjukkan data kualitas tanah liat yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan semen yang tercantum pada Tabel 1. Setelah dilakukan *mixing* antara *sludge* IPAL dan *bottom ash* maka selanjutnya dilakukan simulasi dengan menggunakan *raw mix design* dengan rasio sebesar 10; 20; 30; 40; dan 50% untuk mengetahui prediksi kualitas *clinker* ditinjau dari C_3S , C_2S , C_3A dan C_4AF , serta dilakukan simulasi prediksi kualitas *clinker* tanpa substitusi alternatif *raw material* yang bertujuan untuk melihat perbandingan prediksi kualitas *clinker* sebelum dan sesudah substitusi *raw material* seperti yang terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2. Prediksi kandungan *clinker* hasil perhitungan *raw mix design* menggunakan persentase campuran SI dan BA sebagai substitusi *tanah liat*

Penggunaan Campuran 1:1 antara SI dan BA (%)	Kandungan <i>Clinker</i> (%)			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
0 (Tanpa Substitusi)	66,983	9,850	9,172	10,855
10	66,740	9,846	9,141	10,821
20	66,471	9,842	9,108	10,783
30	66,174	9,837	9,072	10,741
40	65,843	9,832	9,031	10,694
50	65,471	9,826	8,985	10,642

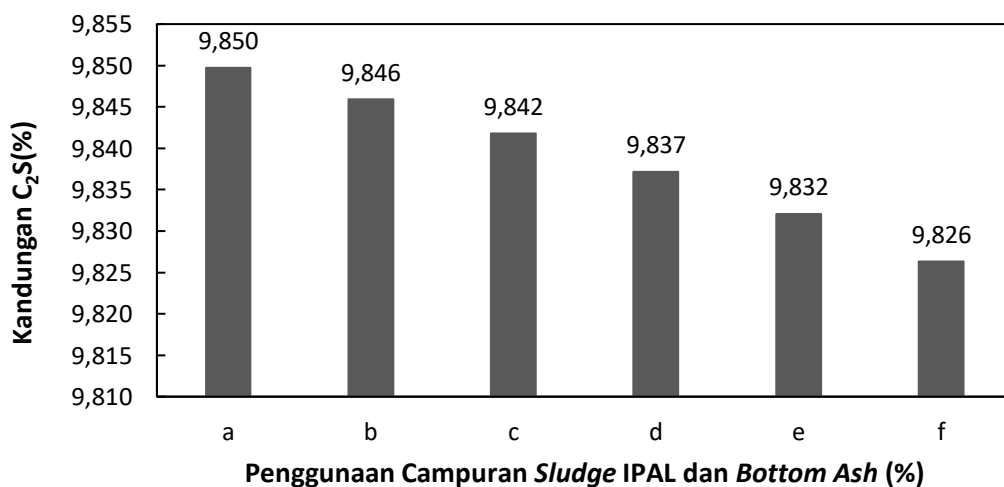
PT Semen Gresik Pabrik Rembang dalam menentukan kualitas *clinker* menetapkan target tertentu salah satunya adalah target kandungan C_3S dalam *raw mix design*. Target minimal yang ditetapkan oleh PT Semen Gresik adalah 60% dan target maksimalnya adalah 64%. Target yang telah ditetapkan oleh pabrik tentunya menjadi patokan dalam permodelan *raw mix design* pada penelitian ini. Hubungan antara prediksi kandungan C_3S dengan kenaikan persen substitusi tanah liat ditunjukkan pada Gambar 1. Kualitas *clinker* ditinjau dari prediksi kandungan C_3S pada masing-masing variabel berkisar 65 - 66% yang sudah melebihi dari standard pabrik yaitu 60 - 64%. Seiring dengan kenaikan persen substitusi tanah liat, kandungan C_3S dalam *clinker* semakin menurun dengan prediksi kandungan C_3S tertinggi didapatkan dari percobaan tanpa substitusi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Hal ini disebabkan oleh nilai silika dari campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* 49% lebih rendah dari

tanah liat, sehingga nilai silika pada *clinker* semakin turun yang akan berpengaruh pada penurunan C_3S . Nilai C_3S akan berpengaruh terhadap kuat tekan awal pada semen [20].

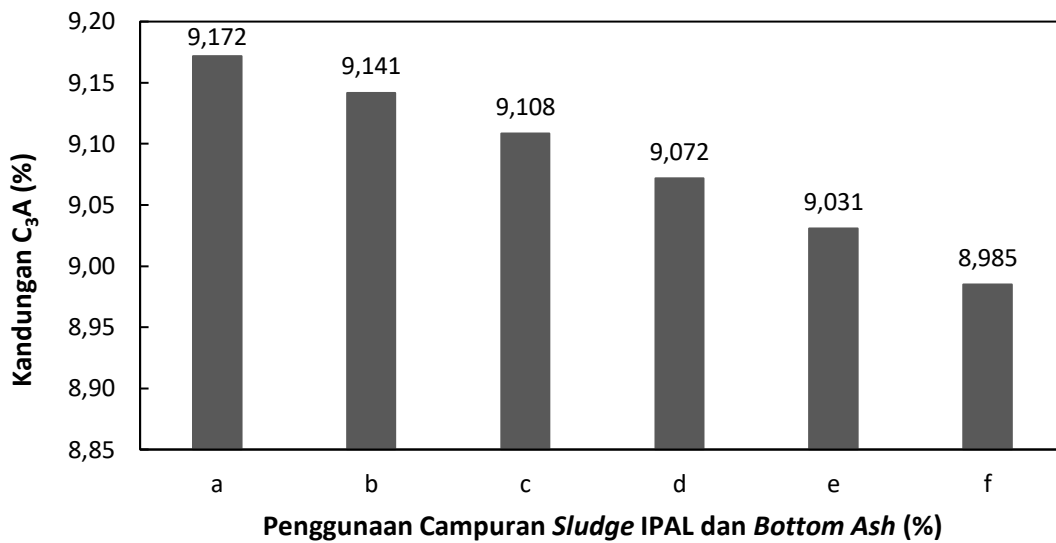


Gambar 1. Prediksi kualitas *clinker* ditinjau dari kandungan C_3S menggunakan persentase campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash*
 [a = 0 (tanpa substitusi); b = 10; c = 20; d = 30; e = 40; f = 50]

Penggunaan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* untuk prediksi nilai C_2S berdasarkan hasil perhitungan *raw mix design* diperoleh pada kisaran 9,82 – 9,85% (ditunjukkan pada Gambar 2), sedangkan target sesuai standard pabrik berkisar 15 – 16%. Semakin tinggi persentase substitusi tanah liat dengan campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* maka prediksi kandungan C_2S dalam *clinker* semakin turun yang akan berpengaruh pada kuat tekan akhir semen [20]. Hal tersebut dimungkinkan terjadi karena jumlah kandungan SiO_2 pada campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* 49% lebih rendah dari tanah liat seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

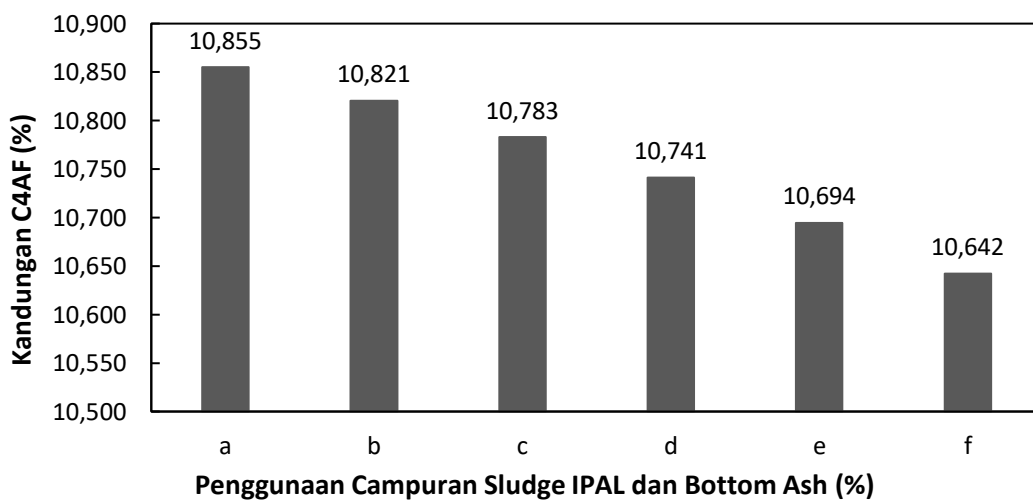


Gambar 2. Prediksi kualitas *clinker* ditinjau dari kandungan C_2S menggunakan persentase campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash*
 [a = 0 (tanpa substitusi); b = 10; c = 20; d = 30; e = 40; f = 50]



Gambar 3. Prediksi karakteristik *clinker* ditinjau dari kandungan C₃A menggunakan persentase campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash*
 [a = 0 (tanpa substitusi); b = 10; c = 20; d = 30; e = 40; f = 50]

Prediksi nilai C₃A dari hasil perhitungan *raw mix design* diperoleh dalam kisaran 9%, sedangkan standard pabrik yang harus dipenuhi adalah 8%, kelebihan 1% prediksi kandungan nilai C₃A dari standard tersebut dipengaruhi oleh kandungan Al₂O₃ dan Fe₂O₃ (Persamaan 3) pada *sludge* IPAL dan *bottom ash*. Hasil prediksi nilai C₃A pada *clinker* semakin menurun seiring dengan kenaikan persen substitusi tanah liat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, hal ini disebabkan oleh Al₂O₃ yang rendah dan Fe₂O₃ yang tinggi dari campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash*. Kandungan C₃A pada *clinker* akan berpengaruh pada lamanya waktu ikat dari semen (*setting time*) [16].



Gambar 4. Prediksi karakteristik *clinker* ditinjau dari kandungan C₄AF menggunakan persentase campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash*
 [a = 0 (tanpa substitusi); b = 10; c = 20; d = 30; e = 40; f = 50]

Nilai C_4AF hasil prediksi perhitungan menggunakan *raw mix design* berkisar 10% yang ditunjukkan pada Gambar 4. Kandungan C_4AF dalam *clinker* sudah tergolong memenuhi syarat karena pada umumnya kandungan C_4AF dalam *clinker* berkisar antara 5 - 10% dengan rata-rata yaitu 8% [14].

Pada permodelan *raw mix design*, C_4AF tidak memiliki nilai target tertentu dikarenakan C_4AF dalam *clinker* hanya berdampak pada kualitas warna pada semen [17]. Semakin tinggi kandungan C_4AF pada *clinker* akan menyebabkan warna pada semen yang semakin gelap. Hasil prediksi kandungan C_4AF pada Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi tanah liat maka C_4AF yang dihasilkan juga semakin kecil yang disebabkan oleh kandungan Fe_2O_3 yang rendah pada *clinker*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis substitusi campuran *sludge* IPAL dan *bottom ash* mulai dari 10 hingga 50% jika ditinjau dari analisis *clinker* menunjukkan bahwa substitusi tanah liat hingga 50% masih dapat dilakukan. Hal ini dikarenakan pada persentase substitusi tersebut masih menunjukkan hasil yang cukup bagus ditinjau dari C_3S yang masih berada di atas nilai minimum yakni 60%. Selain itu, kandungan C_3A juga diatas nilai minimum yang telah ditetapkan yaitu 8%. Meskipun kandungan C_2S belum mencapai nilai minimum yaitu 15% dan C_4AF mengalami penurunan menjadi 10,642% tetapi masih tergolong memenuhi syarat dikarenakan nilainya yang tidak jauh berbeda dengan hasil percobaan tanpa dilakukan substitusi.

Dalam penelitian selanjutnya, disarankan untuk lebih menambah variasi persentase substitusi tanah liat dengan *sludge* IPAL dan *bottom ash* serta diperlukan percobaan pada skala laboratorium untuk mendapatkan hasil dengan tingkat akurasi yang tinggi.

REFERENSI

- [1] Badan Pusat Statistik, *Direktori Industri Manufaktur Indonesia 2022*. Badan Pusat Statistik, 2022.
- [2] I. Setiawan, M. Septiana, And Ratna, "Pengaruh Aplikasi Limbah Lumpur Padat (Sludge) Pabrik Kelapa Sawit Terhadap Sifat Kimia Tanah Podsolik Merah Kuning Di Kotawaringin Barat", *Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*, vol. 3, no. 2, hal. 28–36, 2020.
- [3] M. R. Hidayat And S. A. Mulyono, "Pemanfaatan Limbah Lumpur Aktif Dari Industri Crumb Rubber Untuk Memperbaiki Kualitas Lahan Persawahan", *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*, vol. 6, no. 1, hal. 12–17, 2021.
- [4] Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021", 2021.
- [5] Ruliansyah, F. Rahman, And Z. Maimun, "Pemanfaatan Limbah Sludge IPAL PT BSKP Sebagai Bahan Substitusi Pembuatan Bata Beton", 2012.
- [6] S. A. Abdul-Wahab, H. Al-Dhamri, G. Ram, And V. P. Chatterjee, "An Overview Of Alternative Raw Materials Used In Cement And Clinker Manufacturing", 2021.
- [7] N. M. Joses, A. P. Setiawan, And Jean. F. Poillot, "Penelitian Berbahan Dasar Semen Dan Kain Untuk Elemen Interior", *Jurnal Intra*, vol. 7, no. 2, hal. 949–953, 2019.
- [8] W. Hioewono Chandra, K. Saputra Yusuf, And Dan Djwantoro Hardjito, "Penggunaan Bottom Ash Dari Sistem Pembakaran Circulated Fluidizes Bed Burning Dan Dari Boiler

- Sebagai Agregat Halus Dalam Pembuatan Mortar”, *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, hal. 244–251, 2019.
- [9] H. Suseno, Prastumi, L. Susanti, And D. Setyowulan, “Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Sebagai Pengganti Tanah Liat Pada Campuran Bata Terhadap Kuat Tekan Bata,” *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, vol. 6, no. 3, hal. 272–281, 2012.
- [10] R. Azizah, “Penggunaan Crude Oil Contaminated Soil Sebagai Bahan Tambahan Clay Di Pt. Semen Indonesia (Persero) Tbk”, 2018.
- [11] Tirianto, “Penurunan Persamaan Bogue Untuk Kompisisi Clinker”, 2018.
- [12] D. Mina Intan Permadi, A. Ahmad, And S. Elystia, “Efisiensi Penyisihan COD Dan Pembentukan Biogas Dalam Pengolahan Sludge IPAL Industri Pulp And Paper Dengan Menggunakan Bioreaktor Hibrid Anaerobik”, 2015.
- [13] S. Sabri, “Pengaruh Komposisi Ash Fine Coal Terhadap Kualitas Klinker Pt. Semen Baturaja (Persero) Tbk. Sumatera Selatan”, 2021.
- [14] N. Dahliar, S. Widodo, And A. Tonggiroh, “Pengaruh Komposisi Ash Batubara Terhadap Kualitas Klinker Portland Cement Pada Pt. Semen Tonasa Unit III”, 2014.
- [15] Suharto, M. Amin, M. Al Muttaqii, Syafriadi, And K. Nurwanti, “Pengaruh Penggunaan Batu Basalt Lampung Dan Batubara Dalam Bahan Baku Terhadap Karakteristik Klinker The Effect Of The Use Of Basalt Stone From Lampung And Coal In Raw Material On Clinker Characteristic,” *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, vol. 10, no. 1, hal. 49–57, 2020.
- [16] M. Hardianti, H. D. Fahyuan, M. Peslinof, N. Mz, F. Maulana, And E. Dopri, “Peningkatan Waktu Ikat Semen Ppc Akibat Penambahan Abu Sekam Padi Sebagai Substitusi Pozolan”, *Journal Online of Physucs*, vol. 4, no. 1, hal. 7–11, 2018.
- [17] R. Burg, “Concrete Basics (Track Cement Chemistry To Help Predict Performance)”, 1993.
- [18] C. Tiffany, T. Winarno, And J. Marin, “Kualitas Batuan Di Tambang Tanah Liat Sebagai Bahan Campuran Semen Pt Semen Gresik Kabupaten Rembang”, *Jurnal Geosains Dan Teknologi*, vol. 3, no. 2, hal. 96–106, 2020.
- [19] H. Winarno, D. Muhammad, R. Ashyar, And Y. G. Wibowo, “Pemanfaatan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Dari PLTU Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan Paving Block”, *Jurnal Teknika*, vol. 11, no. 1, 2019.
- [20] E. I. Habibbah And Y. R. Giana, “Pengaruh Penambahan Sugarcane Bagasse Ash Terhadap Setting Time Dan Kuat Tekan Mortar Pada Semen OPC Dan GU PT Solusi Bangun Indonesia Tbk Tuban Plant”, Malang, 2020.