

PENYULUHAN METODE MUDAH DAN PRAKTIS KARAKTERISASI FLY ASH SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN

Wiwik Dwi Pratiwi¹,
Mochamad Yusuf Santoso^{2*},
Endang Pudji Purwanti³,
Adhi Setiawan⁴

¹) Magister Sains Terapan Teknik
Keselamatan dan Resiko,
Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya

²) D4 Teknik Keselamatan dan
Kesehatan Kerja, Politeknik
Perkapalan Negeri Surabaya

³) D4 Teknik Perancangan dan
Konstruksi Kapal, Politeknik
Perkapalan Negeri Surabaya

⁴) D4 Teknik Pengolahan
Limbah, Politeknik Perkapalan
Negeri Surabaya

Article history

Received : 15 September 2023

Revised : 17 September 2023

Accepted : 18 Oktober 2023

*Corresponding author

Yusuf Santoso

Email :

yusuf.santoso@ppns.ac.id

Abstrak

Fly ash yang merupakan residu pembakaran batu bara memiliki potensi untuk digunakan sebagai *supplementary cementitious material* (SCM), yaitu material yang fungsinya mengganti sebagian semen. Jika dievaluasi, harga fly ash berkisar antara Rp 130.000 sampai Rp 140.000 per ton. Namun, fly ash perlu dikarakterisasi terlebih dahulu untuk memastikan potensi tersebut. Permasalahan yang melatarbelakangi pengabdian kepada masyarakat ini adalah banyaknya fly ash yang dihasilkan oleh mitra dan belum dimanfaatkan dengan baik. Selain itu, untuk karakterisasi fly ash diperlukan pengujian di laboratorium tertentu. Sehingga, pada kegiatan ini dilakukan penyuluhan metode mudah dan praktis karakterisasi fly ash sebagai bahan substitusi semen. Berdasarkan identifikasi permasalahan mitra, didapatkan informasi bahwa limbah fly ash yang dihasilkan sebanyak 6-ton per hari dan langsung diangkut oleh pengolah sampah. Melihat potensi tersebut, kegiatan dilanjutkan dengan menguji sampel fly ash dari mitra. Hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik *water requirement* dari sampel melebihi batas maksimum dari persyaratan dari ASTM C618-19, sehingga masih perlu peningkatan kualitas dari fly ash jika akan digunakan sebagai bahan pembuatan beton. Hal ini dikarenakan semakin tinggi *water requirement* nya, maka kekuatan beton akan semakin rendah. Hasil ini kemudian dijadikan sebagai bahan paparan dalam kegiatan penyuluhan berbentuk grup diskusi dengan mitra. Selain hasil pengujian sampel, rekomendasi terkait perbaikan karakteristik fly ash juga dipaparkan ketika penyuluhan. Rekomendasi yang diberikan berupa beberapa alternatif teknik untuk optimalisasi pembakaran batu bara dan mendapat respon positif dengan tindak lanjut berupa koordinasi internal dalam rangka perencanaan strategi pemanfaatan fly ash.

Kata Kunci: Fly Ash; Karakterisasi; Penyuluhan; Substitusi Semen; Water Requirement

Abstract

Fly ash, a residue from burning coal has the potential to be used as a *supplementary cementitious material* (SCM), namely a material whose function is to replace some of the cement. If valued, the price of fly ash ranges from IDR 130,000 to IDR 140,000 per ton. However, fly ash needs to be characterized first to confirm this potential. The problem that leads to this community service activity is that partners produce a lot of fly ash, which needs to be appropriately utilized. Besides, tests must be conducted in specific laboratories to characterize fly ash. Thus, this activity provided education on easy and practical methods of characterizing fly ash as a cement substitute material. Based on the partner problem identification, information was obtained that 6 tons of fly ash waste was produced per day and was directly transported by waste processors. Regarding this potential, activities continued by testing fly ash samples from partners. The test results show that the water requirement characteristics of the sample exceed the maximum limit of the requirements of ASTM C618-19, indicating that the quality of fly ash needs to be improved before it can be utilized as a component in concrete. This is because the higher the water requirement, the lower the strength of the concrete. These results were then presented in outreach activities through discussion groups with the partner. In addition to the sample testing results, recommendations for enhancing the qualities of fly ash were also made during the outreach. The recommendations made include several additional methods for improving coal combustion. This suggestion was well-received, and action was taken in the form of internal coordination within the framework of strategic planning to exploit fly ash.

Keywords: Characterization; Counseling; Fly Ash; Cement Substitution; Water Requirement

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara produsen batubara yang memiliki cadangan sekitar 21 milyar ton atau 2,2% dari cadangan dunia. Produksi batubara nasional sebesar 614 juta ton pada tahun 2021. Pada tahun 2022 produksi batubara Indonesia mencatat angka yang paling besar sepanjang sejarah, yaitu sebesar 687 juta ton. Konsumsi batubara domestik tahun 2021 dan 2022 masing-masing sebesar 133 dan 193 juta ton (Rizaty & Bayu, 2023). Peningkatan konsumsi batubara dalam negeri tak lepas dari kebijakan pemerintah dengan menerbitkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 34 tahun 2009 tentang Pengutamaan Pemasokan Kebutuhan Mineral dan Batubara untuk Kepentingan Dalam Negeri. Kebijakan tersebut sejalan dengan proyek listrik 35 GW karena 85% batubara domestik dikonsumsi PLTU (Arinaldo & Adiatma, 2019). Alasan batu bara tetap dijadikan sebagai sumber energi di Indonesia diantaranya karena keamanan infrastruktur, kuatnya rantai pasok dan ekonomisnya biaya operasi (Petrus et al., 2022).

Pembakaran batubara dapat menghasilkan limbah padat berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA), kira-kira 10% dari berat batubara, dengan komposisi 65-95% *fly ash* dan 5-35% *bottom ash* (Jayaranjan et al., 2014). Peningkatan konsumsi batubara dalam negeri secara langsung menyebabkan peningkatan jumlah FABA. Pembakaran batubara di PLTU dilakukan pada temperatur tinggi, sehingga kandungan karbon yang tidak terbakar relatif rendah dan bersifat stabil saat disimpan. Pengujian FABA PLTU Kementerian LHK tahun 2020 memberikan hasil bahwa FABA PLTU memiliki karakter di bawah baku mutu karakter berbahaya dan beracun. Peraturan Pemerintah No. 22 tahun 2021, Lampiran XIV, mencantumkan bahwa limbah FABA dari PLTU dikelompokkan sebagai limbah Non-Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Dalam lampiran tersebut, kode untuk *fly ash* adalah N106 untuk dan *bottom ash* adalah N107. Walaupun FABA dari PLTU bukan termasuk B3, namun pengelolaannya harus dilakukan sesuai prosedur sebagaimana diatur pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2021 tentang Tata Cara Pengelolaan Limbah Non-Bahan Berbahaya dan Beracun. Pemanfaatan FABA di Indonesia masih tertinggal jauh dibandingkan negara lain, oleh karena itu perlu dilakukan upaya-upaya agar FABA bisa dimanfaatkan secara lebih luas.

FABA dapat digunakan untuk bahan konstruksi, seperti keramik, blok paving, batako, bata ringan atau beton *High Volume Fly Ash* (HVFA). Selain itu, *fly ash* juga kerap kali dimanfaatkan sebagai filler dan material pozzolan maupun sebagai material substitusi semen (15-35% dari berat semen) (Lianasari & Aji, 2017). Proses produksi semen portland menghasilkan karbon dioksida (CO_2) yang berdampak pada pemanasan global. Peningkatan produksi semen setiap tahunnya akan berakibat pada peningkatan emisi CO_2 global (Adelizar et al., 2020). Sehingga, dengan memanfaatkan *fly ash* sebagai material substitusi semen, diharapkan dapat berkontribusi dalam upaya pengurangan emisi karbon.

Berdasarkan ASTM C 618-19 (ASTM International, 2019) *fly ash* diklasifikasikan menjadi dua kelas yaitu C dan F. Baik *fly ash* kelas C maupun F, mengandung ($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) minimal 50%, SO_3 maksimal 5%, *loss on ignition* (LOI) maksimal 6%, *water requirement* maksimal 105% terhadap kontrol, serta partikel tertahan di ayakan No. 325 (45 mikron) maksimal 34%. Perbedaan antara kelas C dan F hanya terletak pada kadar CaO, yaitu untuk kelas C mengandung CaO lebih dari 18% sedangkan untuk kelas F kurang dari 18%.

Fly ash merupakan bahan *pozzolan*, yaitu bahan yang bisa bereaksi dengan air dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ membentuk bahan yang bersifat mengikat seperti halnya semen. Sifat tersebut membuat *fly ash* memiliki potensi untuk digunakan sebagai *supplementary cementitious material* (SCM), yaitu material yang fungsinya mengganti sebagian semen (Ayuningtyas et al., 2022; Jayaranjan et al., 2014; Matos et al., 2019). *Fly ash* merupakan bahan SCM yang paling sering digunakan karena ketersediaan yang relatif banyak, murah, dan memiliki kecocokan yang baik dengan semen. Pemanfaatan *fly ash* sebagai material substitusi semen dengan tingkat substitusi rendah atau menengah sudah umum diaplikasikan (Naik, 2002; Thomas, 2007; Triwulan & Utama, 2008). Pemanfaatan *fly ash* dengan tingkat substitusi yang tinggi (lebih dari 50%) telah diteliti beberapa dekade belakangan ini dan dikenal sebagai *high-volume fly ash* (Aydin & Arel, 2018; Hemalatha et al., 2016; Huang et al., 2017; Shaikh & Supit, 2015).

Salah satu industri asam amino di Pasuruan menggunakan batu bara untuk proses dan kelistrikan perusahaan. Perusahaan tersebut (selanjutnya disebut PT X) menjadi mitra sasaran yang akan berkolaborasi dalam pengabdian kepada masyarakat kali ini. Sebagai perusahaan non PLTU, maka *fly ash* yang dihasilkan oleh PT. X dikelompokkan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Menurut Peraturan Pemerintah No. 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3, limbah B3 didefinisikan sebagai zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain. Lebih lanjut, pengelolaan limbah B3 dilakukan dengan mengacu kepada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 6 Tahun 2021. Sesuai peraturan tersebut, *fly ash* masih dimungkinkan digunakan sebagai bahan untuk membuat produk infrastruktur sipil jika memiliki kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) minimal 50% dan *loss on ignition* (LOI) kurang dari 10%.

Berdasarkan hasil penelitian hubungan antara morfologi, LOI, ukuran partikel dan keamorfian pada *fly ash* kelas F ASTM C 618-19, diperoleh beberapa kesimpulan yang kemudian dijadikan referensi untuk penyuluhan ini. Pertama, semakin tinggi nilai LOI, maka kuat tekan pasta campuran semen-*fly ash* semakin rendah. Selain itu secara mikroskopis, *fly ash* dengan LOI yang tinggi menampakkan morfologi partikel yang tidak beraturan dalam jumlah yang besar (sebanding atau lebih banyak dengan bentuk bulat) dan memiliki keamorfian yang kecil. Ke-dua, pada LOI yang hampir sama, ukuran partikel yang lebih kecil memiliki keamorfian yang lebih besar dan menghasilkan kuat tekan pasta semen-*fly ash* yang lebih tinggi. Namun demikian, *fly ash* dengan ukuran lebih kecil dengan LOI yang lebih besar (dan keamorfian yang lebih rendah, menghasilkan kuat tekan pasta semen-*fly ash* yang lebih rendah. Jadi bisa dikatakan bahwa LOI dan ukuran partikel merupakan dua hal yang sama-sama terkait dengan keamorfian *fly ash* yang pada ujungnya mempengaruhi kekuatan pasta yang dihasilkan (Pratiwi, 2019). Selain itu, LOI *fly ash* memiliki keterkaitan dengan *water requirement*. LOI yang tinggi berkorelasi dengan *water requirement* yang tinggi juga (Suraneni et al., 2021). Pengujian keamorfian dilakukan dengan teknik *X-Ray Diffraction* (XRD), dan ini hanya tersedia di laboratorium tertentu. Pengujian LOI memerlukan *furnace* yang mampu memanaskan 1000°C. Pengujian tinggi *water requirement* merupakan teknik sederhana dan praktis dilakukan di lapangan.

Selama ini, jumlah *fly ash* harian yang dihasilkan sekitar 6-ton dan langsung diangkut oleh pengolah sampah dari PT. X. Jika divalusi, harga *fly ash* berkisar antara Rp 130.000, sampai Rp 140.000 per ton (Sicca & Putsanra, 2018). Mengingat jumlah *fly ash* yang cukup banyak, maka PT. X memiliki peluang untuk memanfaatkan sendiri *fly ash* sebagai bahan substitusi semen untuk membuat produk berbahan beton, misalnya paving, *box culvert*, atau yang lain. Oleh karena itu, dilakukan penyuluhan metode mudah dan praktis karakterisasi *fly ash* sebagai bahan substitusi semen yang dimaksudkan untuk menjajaki kemungkinan pemanfaatan *fly ash* oleh perusahaan. Tujuan dari kegiatan ini adalah memberikan gambaran terkait karakter *fly ash* yang dihasilkan oleh mitra dan diseminasi teknik pengujian *water requirement* pemanfaatan *fly ash* sebagai material substitusi semen. Manfaat yang diharapkan adalah mitra dapat mengidentifikasi dan memilah *fly ash*, sehingga *fly ash* yang layak sebagai bahan substitusi semen bisa dimanfaatkan sebagai bahan untuk memproduksi paving atau sejenisnya untuk keperluan perusahaan.

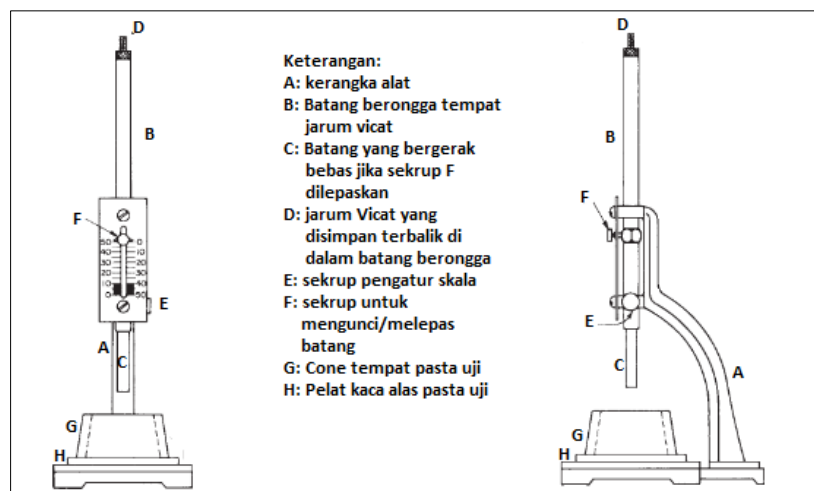
METODE PELAKSANAAN

Sasaran mitra dari kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini yaitu PT. X, yang merupakan salah satu industri asam amino di Pasuruan yang menggunakan batu bara untuk proses dan kelistrikan Perusahaan. Kegiatan ini menjadi salah satu pengembangan hasil penelitian pengabdian terkait *fly ash* batu bara. Metode kegiatan pengabdian Masyarakat ini terdiri dari identifikasi permasalahan mitra, pengujian *fly ash* dan penyuluhan pada mitra dalam bentuk grup diskusi dengan durasi pelaksanaan kegiatan selama tiga bulan.

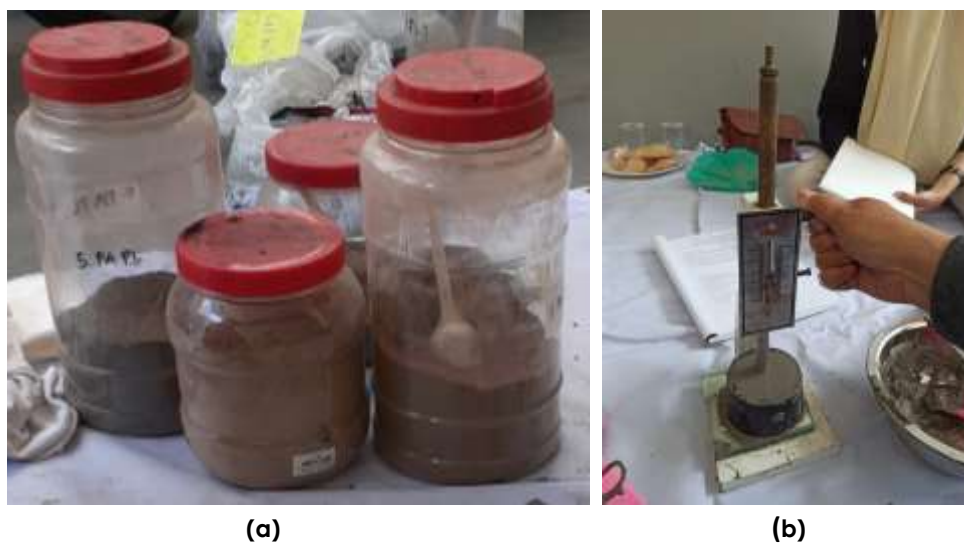
Kegiatan identifikasi masalah dilakukan untuk menggali informasi tentang jumlah batubara yang dibakar, jumlah *fly ash* yang dihasilkan dan penanganan *fly ash* yang telah dilakukan. Tahapan selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap *fly ash* mitra yang kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian dari

anggota pengabdian ini. Pengujian dilakukan di laboratorium pengolahan limbah di instansi tim pengabdian pada bulan Juni 2022. Tahapan berikutnya adalah penyusunan rencana paparan diskusi tentang penanganan *fly ash* atau modifikasi yang diperlukan. Selanjutnya dari hasil diskusi tersebut dibuat rekomendasi dan rencana tindak lanjut.

Secara teoritis, menurut ASTM C 618, diperlukan berbagai pengujian, yaitu komposisi kimia (dilakukan dengan teknik XRF, uji LOI, uji kehalusan (% *fly ash* tertahan ayakan 45 μ m), kadar air, kadar SO₃, *strength activity index*, dan *water requirement*. Namun demikian, pengujian tersebut cukup memakan waktu jika dilakukan semuanya. Pengabdian sudah memiliki banyak sampel *fly ash* dari berbagai sumber yang semuanya telah diuji berdasarkan kriteria ASTM. Untuk menyiapkan paparan, data-data dari hasil penelitian yang sudah dihasilkan disempurnakan dengan pengujian *water requirement*. *Water requirement* adalah perbandingan antara air yang dibutuhkan semen atau campurannya untuk membentuk konsistensi normal, namun pengabdian melakukan pendekatan dengan mengukur konsistensi normal *fly ash* tanpa campuran semen. Konsistensi normal diuji berdasarkan ASTM C187 (ASTM International, 2023) menggunakan alat Vicat, yang skemanya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Alat Vicat (ASTM International, 2023)

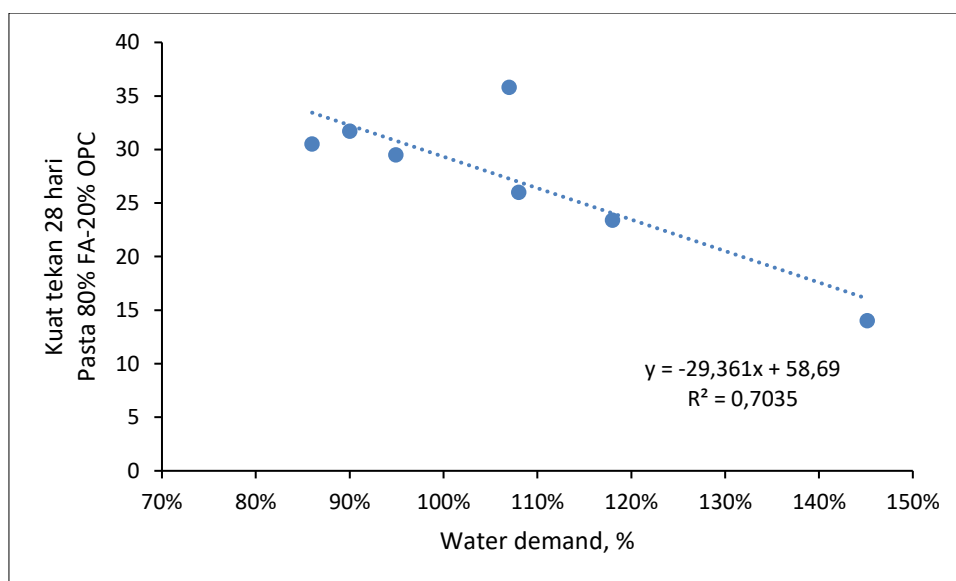


Gambar 2. Sampel *fly ash* dari berbagai sumber (a) dan Pengujian *water requirement* dengan alat Vicat (b)

Gambar 2 menyajikan sampel dari *fly ash* dan gambaran pengujian yang dilakukan. Sebanyak sekitar 650-gram sampel *fly ash* ditambah dengan sejumlah air dan diaduk dengan *mixer*, hingga menjadi pasta. Pasta dibentuk menjadi bola yang dilempar dari tangan satu ke tangan yang lain yang berjarak sekitar 15 cm sebanyak enam kali. Bola kemudian ditekan masuk ke dalam *conical ring* melalui sisi yang besar. Sisa yang keluar dari *conical ring* diratakan dengan *trowel* dan diletakkan di atas pelat alas. Ujung batang *plunger* diatur hingga ujungnya berimpit dengan permukaan pasta serta posisinya dikunci menggunakan baut E. Pada posisi yang demikian, indikator diatur sehingga menunjukkan angka nol atau angka tertentu sebagai pembacaan awal. Semua langkah tersebut harus dilakukan dengan cepat, tidak lebih dari 30 detik sejak selesai pengadukan. Kemudian batang dilepas dengan segera. Kedalaman penetrasi batang Vicat dibaca setelah 30 detik dari pelepasan. Konsistensi normal ditandai dengan penetrasi batang Vicat sedalam $10 \pm \text{mm}$. Terhadap sampel *fly ash* tersebut, tim pengabdian juga melakukan pengujian kuat tekan pasta campuran 80% *fly ash*–20% *Ordinary Portland Cement* (OPC). Campuran dipilih dengan kadar *fly ash* yang sangat tinggi agar sifat kekuatan yang dihasilkan lebih didominasi oleh peran *fly ash*. Hasil pengujian *fly ash* dari berbagai sumber kemudian dijadikan bahan diskusi dengan pihak mitra di lokasi mitra yang dilaksanakan pada bulan Agustus 2022.

HASIL PEMBAHASAN

Berdasarkan identifikasi, didapatkan informasi, *fly ash* yang dihasilkan oleh mitra sebanyak 6 ton per hari. *Fly ash* yang dihasilkan kemudian diangkut oleh jasa pengelola limbah, jadi belum dimanfaatkan sendiri. Untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen, maka perlu dilakukan pengujian sesuai ASTM C618. Untuk evaluasi awal, mitra bisa melakukan uji *water requirement* secara mandiri menggunakan alat Vicat. Sebagai bahan diskusi, pengabdian memaparkan hasil uji coba pengukuran *water demand* dan kuat tekan pasta. Pasta dibuat dengan *water to cement ratio* yang sama. Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian hubungan antara *water requirement* dengan kuat tekan. Menurut ASTM C 618-19 (ASTM International, 2019) *water requirement* yang dipersyaratkan maksimal 105%. Namun, berdasarkan hasil pengujian, *fly ash* yang dihasilkan oleh mitra melebihi persyaratan tersebut. Hasil pengujian selanjutnya disampaikan kepada mitra melalui penyuluhan.



Gambar 3. Hubungan antara *water requirement* dengan kuat tekan pasta 80% *fly ash* – 20% OPC.

Pada Gambar 4, ditunjukkan lokasi mitra yang memfasilitasi kegiatan penyuluhan. Kegiatan penyuluhan dihadiri oleh beberapa SDM mitra yang terlibat dalam kegiatan proses industri yang menghasilkan limbah *fly ash*. Dalam diskusi disampaikan kepada mitra bahwa pengujian *water requirement* bisa menjadi alternatif

evaluasi awal kelayakan *fly ash* untuk substitusi semen. *Water requirement maksimal* yang masih direkomendasikan adalah 120%, dibandingkan dengan pasta semen OPC tanpa campuran *fly ash*. *Water requirement* yang tinggi berkorelasi dengan kadar karbon tidak terbakar yang tinggi (Thomas, 2013). Apabila dalam pengujian *water requirement* yang tinggi, maka diindikasikan juga bahwa pembakaran yang terjadi kurang sempurna.



Gambar 4. Kegiatan penyuluhan di Perusahaan mitra, PT. X Pasuruan

Pada aktivitas penyuluhan, disampaikan terkait kelebihan dan kekurangan pemanfaatan *fly ash* sebagai material substitusi semen. Beton *fly ash* volume tinggi adalah beton yang ekonomis, tahan lama dan ramah lingkungan. Namun, beton ini menggunakan sejumlah besar abu lalat untuk menggantikan semen. Sehingga, perlu ditambahkan banyak air dengan beberapa percobaan untuk mendapatkan komposisi yang pas ketika proses pembuatan. Beton *fly ash* bervolume tinggi juga memiliki waktu penetapan yang lama, jadi perhatian harus diberikan pada waktu pemurnian beton (Chen et al., 2019). Tim pengabdian kepada masyarakat ini juga menyampaikan presentasi tentang beberapa cara untuk mengoptimalkan pembakaran batu bara yaitu dengan meningkatkan temperatur pembakaran, meningkatkan *mixing rate* udara/bahan bakar, menggunakan rasio udara berlebih dan meningkatkan waktu tinggal partikel batu bara. Batu bara akan lebih mudah terbakar dengan sempurna bila mempunyai ukuran partikel semakin kecil. Cara ini tentunya bukan hal yang mudah untuk direalisasikan karena menyangkut modifikasi desain alat pembakar dan perlengkapannya, sehingga memerlukan kajian yang lebih spesifik, dan hal tersebut di luar dari cakupan pengabdian kepada masyarakat yang dilakukan.

Pada kegiatan penyuluhan ini, disampaikan rekomendasi terkait rencana pengolahan produk *fly ash* dari mitra. Poin-poin yang disampaikan kepada mitra terkait *fly ash* yang diproduksi adalah sebagai berikut:

- a. *Fly ash* memiliki kualitas yang baik sebagai pengganti semen jika memiliki *water demand* relatif rendah, kehalusan tinggi, memiliki fasa amorf yang tinggi, memiliki LOI relatif rendah dan memiliki bentuk bulat;
- b. Uji *water requirement* bisa digunakan untuk pendekatan karakterisasi kualitas *fly ash* secara mudah dan cepat;
- c. Jika hasil pengujian *water requirement* ditemukan relative tinggi maka bisa menjadi indikasi awal bahwa pembakaran yang terjadi perlu diptimalkan.

Paparan dari tim pengabdian mendapat respon positif dari pihak mitra. Mitra memberikan tanggapan dari paparan terkait hasil karakterisasi *fly ash* dan rekomendasi yang diberikan. Mitra akan melakukan tindak lanjut dengan menyampaikan rekomendasi dari kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini melalui koordinasi internal dalam rangka perencanaan strategi pemanfaatan *fly ash* sesuai rekomendasi yang diberikan oleh tim.

KESIMPULAN

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini memberikan kontribusi dalam bentuk penyebarluasan gagasan terkait pemanfaatan *fly ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara oleh mitra sebagai material pengganti semen. Pengujian *water requirement* menjadi pilihan pengujian yang mudah dan murah dilakukan oleh mitra untuk mengarakterisasi *fly ash* mereka. Pengujian *water requirement* dapat dijadikan indikasi awal kelayakan *fly ash* sebagai bahan substitusi semen. *Water requirement* di bawah 120% menunjukkan *fly ash* layak digunakan langsung sebagai substitusi semen. Teknik pengujian ini juga bisa dijadikan indikasi awal tentang kesempurnaan pembakaran batu bara. Rekomendasi yang diberikan mendapat respon positif dari mitra.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan dukungan atas terselenggaranya program ini dengan dana DIPA PPNS tahun 2022.

PUSTAKA

- Adelizar, A. S., Olvianas, M., Adythia, D. M., Syafiyurrahman, M. F., Pratama, I. G. A. A. N., Astuti, W., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Fly Ash and Bottom Ash Utilization as Geopolymer: Correlation on Compressive Strength and Degree of Polymerization Observed using FTIR. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 742(1), 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/742/1/012042>
- Arinaldo, D., & Adiatma, J. C. (2019). *Dinamika Batu Bara Indonesia: Menuju Transisi Energi yang Adil*. <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/04/SPM-bahasa-lowres.pdf>
- ASTM International. (2019). ASTM C 618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. In *Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.01, Cement; Lime; Gypsum: Vol. 4.01* (Issue C, pp. 3–6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/C0618>
- ASTM International. (2023). ASTM C187-16: Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste. In <https://www.astm.org/c0187-16.html>. ASTM International.
- Aydin, E., & Arel, H. Ş. (2018). Data for the physical and mechanical properties of high volume fly ash cement paste composites. *Data in Brief*, 16, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.11.047>
- Ayuningtyas, U., Susila, I. M. A. D., Sihombing, A. L. S., Sasongko, N. A., Anggraeni, P., Nugroho, T. P. A., & Darmayanti, N. T. E. (2022). Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash sebagai Material Konstruksi Ramah Lingkungan dalam rangka mendukung Kriteria Bangunan Hijau. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat 2022*, 51–56.
- Chen, H.-J., Shih, N.-H., Wu, C.-H., & Lin, S.-K. (2019). Effects of the Loss on Ignition of Fly Ash on the Properties of High-Volume Fly Ash Concrete. *Sustainability*, 11(9), 2704. <https://doi.org/10.3390/su11092704>
- Hemalatha, T., Mapa, M., George, N., & Sasmal, S. (2016). Physico-chemical and mechanical characterization of high volume fly ash incorporated and engineered cement system towards developing greener cement. *Journal of Cleaner Production*, 125, 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.118>
- Huang, W., Kazemi-Kamyab, H., Sun, W., & Scrivener, K. (2017). Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC). *Cement and Concrete Composites*, 77, 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.009>

- Jayaranjan, M. L. D., van Hullebusch, E. D., & Annachhatre, A. P. (2014). Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13(4), 467–486. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9336-4>
- Lianasari, A. E., & Aji, C. P. (2017, October 26). Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kinerja Beton HVFA. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 11*.
- Matos, P. R. de, Foiato, M., & Prudêncio, L. R. (2019). Ecological, fresh state and long-term mechanical properties of high-volume fly ash high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.074>
- Naik, T. R. (2002). Greener Concrete using Recycled Materials. *Concrete International*, 45–49.
- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Shafiyurrahman, M. F., Pratama, I. G. A. A. N., Jenie, S. N. A., Astuti, W., Nurpratama, M. I., Ekaputri, J. J., & Anggara, F. (2022). Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. *Gels*, 8(4), 233. <https://doi.org/10.3390/gels8040233>
- Pratiwi, W. D. (2019). Hubungan Morfologi, Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA) Cement. *Seminar MASTER*, 93–98.
- Rizaty, M. A., & Bayu, D. (2023, February 3). *Produksi Batu Bara Indonesia Mencapai 687 Juta Ton pada 2022*. DataIndonesia.id: Energi & SDA. <https://dataindonesia.id/sektor-ril/detail/produksi-batu-bara-indonesia-mencapai-687-juta-ton-pada-2022>
- Shaikh, F. U. A., & Supit, S. W. M. (2015). Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*, 82, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068>
- Sicca, S. P., & Putsanra, D. V. (2018, March 15). *Semen Indonesia Akan Manfaatkan Limbah Batu Bara PLTU*. Tirto.id - Sosial Budaya. <https://tirto.id/semen-indonesia-akan-manfaatkan-limbah-batu-bara-pltu-cGdR>
- Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 fly ash specification: Comparison with other specifications, shortcomings, and solutions. *ACI Materials Journal*, 118(1), 157–167. <https://doi.org/10.14359/51725994>
- Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57811170/IS548-libre.pdf?1542708839=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DOptimizing_the_Use_of_Fly_Ash_in_Concret.pdf&Expires=1697248923&Signature=HpTXlixQnm6zvYMJEew8lNnTpEV5eHuh3aLlLQyzswbNQQXZcd-3eFh5LH0MLW4U8b63T9coGRxJYfajGHLxO-7Roqwr59fEDXkCFuzr3QIKNTUusy6CJNQ866xwHqtVii-ex30B5iZnjCKp9V2ydgx-Hwkl1tGnTCiLFN-VxmwsD6lvFE8-L4gfzF9LOM8B8mAmlNnQrpM9OoOTDy1i9XiwJGVingUlcZdW7DWZD9j5fA0V4uTooFPj9~ThlodmqfTCN4Cc7r3FVsLTPMj4hBYNRAPGLI89pUer3Z2wJKzGvCsHhoiqoruPae~tM9zZFv9qX2eF58Qh~0AcJbB2-DKg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Thomas, M. (2013). Supplementary cementing materials in concrete. In *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. <https://doi.org/10.1201/b14493>
- Triwulan, & Utama, W. (2008). *Penetrasi Ion Chlorida Pada Beton Yang Memakai Campuran Pozolanik Material Di Lingkungan Agresif Dengan Percepatan Arus Berbagai Potensial*.

Format Sitasi: Pratiwi, W.D., Santoso, M.Y., Purwanti, E.P. & Setiawan, A. Penyuluhan Metode Mudah dan Praktis Karakterisasi Fly Ash Sebagai Bahan Substitusi Semen. *Reswara. J. Pengabdian Kpd. Masy.* 5(1): 93-101. DOI: <https://doi.org/10.46576/rjpkm.v5i1.3681>



Reswara: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat oleh Universitas Dharmawangsa Artikel ini bersifat open access yang didistribusikan di bawah syarat dan ketentuan dengan Lisensi Internasional Creative Commons Attribution NonCommercial ShareAlike 4.0 ([CC-BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/))