



***Fly Ash* Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (*Additive*) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen**

Roni Adi Wijaya¹, Septi Wijayanti², *Yayuk Astuti¹

¹Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

²PT. Solusi Bangun Indonesia Cilacap Plant, Cilacap

^{*)}yayuk.astuti@live.undip.ac.id

Received: 11 Juli 2020 Revised: 19 Maret 2021 Accepted: 26 Maret 2021

Abstract

A series of tests were carried out to determine the effect of the addition of coal combustion fly ash as an additional mineral (additive) on improving the quality and compressive strength of cement according to the Indonesian National Standard (SNI 15-2049-2004). Research methods include sample preparation, manufacture of cement with 0%, 5%, 8%, 12%, and 15% fly ash variations, chemical and physical properties of cement. The parameters measured were the level of chemical composition (%) using X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ARL 9800 OASIS, free lime content (%) by volumetry, insoluble residue level (%) by gravimetry, compressive strength (kg / cm²), and smoothness cement (cm²/g). The results showed that the addition of fly ash increased the SiO₂ content of cement, thereby increasing C₃S and C₂S compounds which are compressive strength components of a cement. Besides, the addition of fly ash is directly proportional to IR levels, compressive strength, smoothness, and inversely proportional to free lime levels. So the addition of fly ash can improve the quality of cement by increasing chemical components, increasing compressive strength, and reducing cracking or expansion of cement.

Keywords: Fly ash waste, pozzolan, cement quality

Abstrak

Serangkaian pengujian dilakukan untuk menentukan pengaruh penambahan fly ash limbah pembakaran batubara sebagai zat mineral tambahan (additive) untuk perbaikan kualitas dan kuat tekan semen sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI 15-2049-2004). Metode penelitian meliputi preparasi sampel, pembuatan semen dengan variasi fly ash 0%, 5%, 8%, 12%, dan 15%, uji sifat kimia dan fisika semen. Parameter yang diukur yaitu kadar komposisi kimia (%) menggunakan X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ARL 9800 OASIS, kadar frelime (%) secara volumetri, kadar Insoluble Residue (%) secara gravimetri, kuat tekan (kg/cm²), dan kehalusan semen (cm²/g). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fly ash meningkatkan kandungan SiO₂ semen, sehingga memperbanyak senyawa C₃S dan C₂S yang merupakan komponen kuat tekan semen. Selain itu, penambahan fly ash berbanding lurus dengan kadar IR, kuat tekan, kehalusan, dan berbanding terbalik dengan kadar frelime. Sehingga penambahan fly ash dapat memperbaiki kualitas semen dengan menaikkan komponen kimia, menaikkan kuat tekan, dan mengurangi keretakan atau ekspansi semen.

Kata kunci: Limbah fly ash, pozzolan, kualitas semen

Pendahuluan

Fly ash merupakan material limbah padat hasil Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dari pembakaran batubara (Van der Merwe *et al.*, 2014). Pembakaran batubara menghasilkan sekitar 5% polutan padat berupa abu, yakni *bottom ash* sejumlah 10-20% dan 80-90% *fly ash* (Edy, 2007).

Pada tahun 2019 produksi batubara sebesar 610 juta ton, berarti limbah yang dihasilkan sekitar 5%, mencapai 8,31 juta ton dengan 1,662 juta ton *bottom ash* dan 6,648 juta ton *fly ash* (BAPPENAS, 2019). Limbah batubara tergolong dalam limbah B3 yang dapat menyebabkan penyakit *silicosis* (pembengkakan paru-paru) (BAPEDAL, 1999). Oleh karena itu, diperlukan solusi pemanfaatan

limbah *bottom ash* dan *fly ash*. *Fly ash* memiliki kandungan senyawa kimia $\text{SiO}_2 = 58,75\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25,82\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,30\%$, $\text{CaO} = 4,66\%$, alkali = $1,36\%$, $\text{MgO} = 3,30\%$ dan bahan lainnya = $0,81\%$. Dengan tingginya kandungan silika dan oksida-oksida tersebut, *fly ash* memiliki sifat *pozzolan* yang dapat dimanfaatkan dalam pembuatan semen (Blissett *et al.*, 2012).

Dalam pembuatan semen diperlukan material tambahan (*additive*) sebagai pengkoreksi dan memperbaiki kualitas semen yang dihasilkan agar sesuai dengan standar yang ditentukan dalam SNI 15-2049-2004. Zat *additive* yang digunakan yaitu *gypsum* dan *pozzolan*. *Pozzolan* merupakan material yang mengandung unsur silika dan aluminat reaktif. Dalam keadaan halus (lolos saringan 0,21 mm) jika ditambahkan pada campuran semen akan bersifat seperti semen melalui proses hidraulik atau aktifitas pozzolanik atau keduanya (ACI, 2001).

Material *pozzolan* sebelumnya yang digunakan yaitu *slag* vulkanik dari abu gunung berapi dan pasir silika. *Pozzolan* alam ini mengandung *crystal silica* yaitu mineral yang sedikit atau bahkan tidak dapat bereaksi dengan kalsium dalam semen dan hanya mengandung sedikit *amorphous silica glass* sedangkan kandungan *amorphous silica glass* pada pozzolan buatan lebih besar (ACI, 2001). Kandungan *amorf fly ash* memiliki korelasi meningkatkan kekuatan *pozzolan* (Moon *et al.*, 2016). Pemanfaatan *pozzolan* buatan dari *fly ash* ini juga akan mengurangi penggunaan pasir silika dan abu vulkanik dari alam, sehingga lebih ramah lingkungan dengan mengolah limbah menjadi suatu yang bermanfaat pada industri semen.

Industri semen berperan vital mendorong percepatan pembangunan. Seiring dengan bertambahnya populasi manusia dan majunya teknologi infrastruktur, kebutuhan dasar semen turut meningkat. Tercatat menurut data Asosiasi Semen Indonesia (ASI) tahun 2018, penjualan semen mencapai 75,2 juta ton, naik 8,6% dari tahun sebelumnya. Dengan rincian sebanyak 69,51 juta ton domestik naik 4,9% dari 66,35 juta ton dan ekspor 5,7 juta ton, naik 97% dari 2,9 juta ton. Ketersediaan semen menentukan pembangunan sarana perumahan, jalan, gedung dan infrastruktur. Sehingga kualitas semen yang dihasilkan menjadi salah satu kunci memajukan pertumbuhan ekonomi dan aksesibilitas antar daerah. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pemanfaatan *fly ash* limbah pembakaran batubara sebagai zat *additive* terhadap perbaikan kualitas dan kuat tekan semen. Penelitian sebelumnya mengenai *fly ash* telah banyak dilakukan, diantaranya oleh Joice & Lintong (2017) dalam substitusi material pozzolan terhadap semen pada kinerja campuran semen yang

membandingkan *pozzolan* alam dan buatan terhadap *curing time* dan kuat tekan beton. Elmrabet *et al.*, 2019 membahas mengenai pengaruh *fly ash* terhadap parameter LOI, SO_3 , *setting time* dan kuat tekan semen. Sedangkan pada penelitian ini akan membahas tentang pengaruh variasi penambahan *fly ash* terhadap karakteristik komposisi kimia, *Insoluble Residue* (IR), *free lime*, kehalusan dan kuat tekan semen.

Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan *fly ash* terhadap karakteristik semen yang dihasilkan dengan analisis komposisi kimia, IR (untuk membatasi mineral pengotor tidak larut dalam asam dan basa yang dapat menyebabkan penyusutan pada semen), *free lime* (untuk mengontrol kadar CaO bebas yang dapat menyebabkan keretakan pada semen), kehalusan dan kuat tekan semen sehingga diperoleh kualitas yang memenuhi standar SNI 15-2049-2004. Hasil penelitian ini, diharapkan memberikan alternatif pemecahan masalah dalam pengolahan limbah abu batubara serta memberikan data informasi terkait pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap kualitas semen yang dihasilkan.

Metode

Alat dan bahan

Alat-alat yang digunakan meliputi desikator, neraca analitik merk *sartorius - entris124-1s*, *furnace merk D-550 neytech*, *herzog grinding merk HSM 100 H/HSM 100P*, *herzog pellet press merk HTP 40/HTP 60*, kuas, *vacum cleaner*, spatula, spidol, kaca arloji, kertas *X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ARL 9800 OASIS*. Selain itu gelas kimia 250 ml, buret, kertas saring no. 41, cawan platina mikro, mesin pengaduk standar ASTM C 305, mangkok pengaduk kapasitas 2500 cc, meja leleh standar ASTM C-230 dengan cincin leleh baja 55 HRB, cetakan kubus sisi 5 cm dari baja 55 HRB kedap air, gelas ukur 500 ml ketelitian 2 ml, *stopwatch*, alat pematat, sendok perata, mistar baja panjang 20 cm ketelitian 1 mm, lemari lembab dengan derajat kelembaban 90%, mesin tekan dari baja 60 HRB, ayakan 45 μm (no. 325) ASTM C 430. Bahan yang digunakan meliputi: *fly ash* limbah PT. PLTU Sumber Segara Primadaya Cilacap, *gypsum*, semen klinker (hasil dari klinker/semen setengah jadi), *herzog pill/pill HPMA (hidroksi propil meta trilamid)*, sampel semen *Mill General Use* (MGU/semen jadi terdiri atas campuran klinker, *gypsum*, *fly ash*), akuades, propanol *p.a Merck*, $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ *p.a Merck*, *metyl red p.a Merck*, *fenolfalein p.a Merck*, *NaOH p.a Merck*, $\text{NH}_4(\text{NO}_3)$ *p.a Merck*, *HCl p.a Merck* pekat, BaCl_2 *p.a Merck*, *glyserin p.a Merck*, etanol *p.a Merck* dan pasir kuarsa teknis ASTM no. C 190.

Eksperimen

Untuk mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap kualitas dan kuat tekan semen dilakukan variasi kadar *fly ash* pada sampel uji analisis sebagaimana tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variasi komposisi sampel

Komponen	Variasi sampel (kg)				
	0%	5%	8%	12%	15%
<i>Fly ash</i>	0,00	0,20	0,32	0,48	0,60
<i>Gypsum</i>	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
<i>Klinker</i>	3,88	3,68	3,56	3,40	3,38
Total	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Analisis komposisi kimia dengan XRF

Analisis komposisi kimia dilakukan pada *klinker*, *gypsum*, *fly ash* dan semen MGU menggunakan XRF. Analisis komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui kandungan material pada semen. Kandungan material berpengaruh pada kualitas karakter semen yang dihasilkan (Cho *et al.*, 2019). Adapun tahapan analisis meliputi preparasi sampel (*grinding* dan *pressing*) dan analisis pada XRF ARL 9800 OASIS.

Grinding

Proses *grinding* material dilakukan sebanyak dua kali. *Grinding* pertama dilakukan untuk masing-masing material dan tanpa menggunakan *herzog pill*, dan *grinding* kedua dilakukan ketika semua material sudah dilakukan *mixing* dan menggunakan *herzog pill* sebanyak tiga buah. Untuk lamanya waktu *grinding* divariasikan, *grinding* pertama selama 180 detik, sementara *grinding* kedua 60 detik. 10 gram sampel semen MGU terdiri atas klinker, *gypsum*, *fly ash*, dan 3 *herzog pill* / hidroksi propil meta trilamid (HPMA) dimasukkan ke dalam *disk mill* pada mesin *herzog grinding merk* HSM 100 H / HSM 100 P 60 detik.

Pressing

Sampel hasil *grinding* dimasukkan ke dalam *ring steel* pada mesin *herzog pellet press merk* HTP 40/HTP 60 selama 45 detik pada tekanan 30 MPa. Kemudian dibersihkan bagian belakang sampel menggunakan *vacum cleaner*, agar tidak ada kotoran yang mengganggu pada saat pengamatan. Selanjutnya, dianalisis dengan XRF ARL 9800 OASIS.

Analisis IR

Sebanyak satu gram sampel semen MGU ditambah 25 ml aquades dan 5 ml HCl pekat. Kemudian dilakukan pengenceran sampai 50 ml dan

dipanaskan dengan pemanas selama 10 menit. Setelah itu, dilakukan penyaringan I dengan kertas saring no. 41, dilanjutkan pembilasan dengan aquades panas sebanyak 14 kali. Setelah kering, kertas saring berisi endapan ditambah NaOH 1% sebanyak 100 ml dan dipanaskan selama 20 menit. Kemudian ditambahkan tiga tetes *metyl red* sebagai indikator dan HCl berlebih sampai larutan menjadi merah muda. Larutan tersebut kemudian dilakukan penyaringan II dengan kertas saring no. 41, dan dibilas dengan $\text{NH}_4(\text{NO}_3)$ 2% sebanyak 14 kali sampai warna merah muda hilang. Selanjutnya kertas saring I dan II digabung, dikeringkan dan dimasukkan dalam cawan platina yang telah ditimbang masa awalnya. Setelah itu, dimasukkan dalam *furnace* pada suhu $950 \pm 50^\circ\text{C}$ selama 15 menit. Kemudian didinginkan dalam desikator dan ditimbang dihitung dengan Persamaan 1.

$$\%IR = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

dimana W_2 merupakan massa akhir dan W_1 merupakan massa awal.

Analisis CaO bebas (*free lime*)

Diawali dengan preparasi larutan *propanol glycerol* dimana sebanyak 133,4 gram BaCl_2 dilarutkan dengan penambahan gliserol sampai volume satu liter. Kemudian ditambah dengan tiga liter propanol, dan 133 ml indikator PP 1%. Selanjutnya ditambah dengan NaOH 1% sampai warna menjadi merah muda dan homogen. Kemudian, dilakukan analisis sebanyak satu gram sampel semen ditambah dengan 50 mL larutan *propanol glycerol*. Kemudian dipanaskan selama 15 menit. Setelah itu, dititrasi dengan $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 0,2 N sampai tidak berwarna dan dilakukan perhitungan dengan Persamaan 2.

$$\%CaO = E \times V \times 100 \quad (2)$$

dimana E merupakan faktor $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ dan V merupakan volume penitar

Analisis kuat tekan

Preparasi *mortar* sampel

Sebanyak 500 gram sampel ditambahkan 242 ml air suling kemudian diaduk selama 30 detik, dengan kecepatan 140 ± 5 putaran per menit. Lalu, tambahkan pasir kuarsa 1.375 gram dan diaduk kembali selama 60 detik dengan kecepatan 285 ± 10 putaran per menit.

Pengukuran kadar air

Mortar dicetak dengan cincin di atas meja leleh dalam dua lapis seperti pada Gambar 1, setiap lapis dipadatkan 20 kali dengan alat pematik. Kemudian, meja leleh digetarkan sebanyak 25 kali selama

15 detik, dengan tinggi jatuh 1/2 in (12,7 mm). Selanjutnya diameter mortar diukur minimal pada empat tempat yang berlainan seperti pada Gambar 2, dan hitung diameter rata-rata (d_r) nya. Ulangi perlakuan sampai diperoleh diameter rata-rata d_r sama dengan 1,00 - 1,15 kali diameter semula d_s .



Gambar 1. Meja leleh standar ASTM C-230 dengan cincin leleh baja 55 HRB



Gambar 2. Pengukuran diameter dengan di atas meja leleh ASTM C-230

Pencetakan mortar

Mortar diaduk kembali dengan kecepatan 285 ± 10 putaran per menit selama 15 detik. Kemudian dimasukkan ke dalam cetakan kubus dan simpan kubus-kubus uji dalam lemari lembab selama 24 jam. Selanjutnya, cetakan dibuka dan kubus-kubus benda uji direndam dalam air bersih sampai pada waktu pengujian kuat tekan masing-masing sampel 3, 7, dan 28 hari.

Pengujian kuat tekan

Benda uji ditimbang dan dihitung berat isinya dengan Persamaan 3.

$$\gamma_m = \frac{B_m}{V} \quad (3)$$

Dimana γ_m merupakan berat isi mortar, kg/ml, B_m merupakan berat benda uji, kg dan V merupakan volume (sisi 50 mm, $V = 125$ ml). Kemudian, benda uji dimasukkan pada mesin penekan sampai benda uji pecah dan dicatat sebagai gaya tekan maksimum. Dihitung dengan Persamaan 4.

$$\sigma_m = \frac{P_{maks}}{A} \quad (4)$$

dimana σ_m merupakan kekuatan tekan mortar, MPA. P_{maks} merupakan gaya tekan maksimum, N dan A merupakan luas penampang (sisi 50 mm, $A = 2.500$ mm²).

Analisis kehalusan

Sampel diayak menggunakan saringan nomor 100 yang diletakan di atas saringan nomor 200. Kemudian digoyangkan selama tiga sampai empat

menit. Sisi bagian bawah saringan dibersihkan dan disaring lagi selama satu menit. Kecepatan gerakan kira – kira 50 kali per menit, setiap 25 gerakan, memutar saringan kira – kira 60°. Perlakuan ini dilakukan di atas kertas putih. Selanjutnya, material tertahan pada saringan nomor 100 dan nomor 200 dihitung dan dinyatakan dalam persentase terhadap berat benda uji semula.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh *fly ash* terhadap kualitas semen dapat dilihat dari komposisi kimia, IR, *free lime*, kuat tekan dan kehalusan produk semen yang dihasilkan.

Komposisi kimia semen sebelum dan setelah penambahan *fly ash*

Dari analisis komposisi kimia *raw material* pembuatan semen yaitu *klinker*, *gypsum*, dan *fly ash* dengan XRF diperoleh data seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Data analisis komposisi kimia *klinker*, *gypsum* dan *fly ash*

Sampel	Parameter (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
<i>Klinker</i>	21,6	5,41	3,18	66,09	1,42	0,40	1,33
<i>Gypsum</i>	14,01	2,69	1,29	34,68	0,75	0,14	43,24
<i>Fly ash</i>	58,75	25,82	5,30	4,66	3,30	1,36	0,81

Reaksi *fly ash* dengan semen sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia *fly ash* (Bumrongjaroen, 2007). Tabel 2 menunjukkan *fly ash* memiliki kandungan silika (SiO₂) sebesar 58,75%. Penambahan *fly ash* berfungsi untuk meningkatkan kandungan SiO₂ dari produk semen yang dihasilkan. SiO₂ akan bereaksi saling mengikat dengan kalsium oksida (CaO) pada pembuatan pasta semen (mortar) membentuk senyawa C₂S (*dikalsium silikat*) dan C₃S (*trikalsium silikat*) yang memiliki fungsi kuat tekan utama pada semen. Sehingga, adanya SiO₂ berpengaruh terhadap kualitas semen yang dihasilkan (Blissett *et al.*, 2012).

Reaksi pembentukan C₂S suhu 800 – 1200°C adalah $2 \text{ CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO.SiO}_2$, berfungsi memberi kekuatan selama satu hari, dan melepas panas selama proses hidrasi sebesar 250 joule/gram.

Reaksi pembentukan C₃S suhu 1200–1400°C: $2 \text{ CaO} + \text{CaO.SiO}_2 \rightarrow 3\text{CaO.SiO}_2$, berfungsi mempercepat pengerasan semen, mempengaruhi pengikatan kekuatan awal, sebelum 28 hari, dan menimbulkan panas hidrasi 500 joule/gram.

Setelah dilakukan pencampuran diperoleh hasil analisis komposisi kimia semen yang dihasilkan dengan XRF. Tabel 3 menunjukkan bahwa semakin banyak penambahan *fly ash* pada pembuatan semen,

maka kandungan SiO₂ dari semen semakin besar. Pada sampel tanpa penambahan *fly ash* (0%) kandungan SiO₂ 21,20% dan bertambah seiring besarnya % *fly ash* sampai pada penambahan 15% *fly ash* sebesar 25,95%. Kandungan SiO₂ di dalam semen akan sangat mempengaruhi kekuatan tekan mortar karena SiO₂ mempunyai sifat *pozzolan*, yaitu bahan yang mengandung senyawa silika atau senyawa alumina, yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen, akan tetapi dalam bentuknya yang halus dan adanya air, maka senyawa tersebut akan bereaksi dengan kalsium hidroksida pada suhu kamar membentuk senyawa seperti semen (Otsuka *et al.*, 2009).

Tabel 3. Komposisi kimia semen MGU setelah penambahan *fly ash*

Parameter	Penambahan <i>fly ash</i> dalam semen (%)				
(%)	0	5	8	12	15
SiO ₂	21,20	22,81	23,84	24,45	25,95
Al ₂ O ₃	6,40	6,30	6,22	6,12	6,08
Fe ₂ O ₃	3,06	3,09	3,08	2,97	2,87
CaO	64,66	64,18	63,80	63,35	63,14
MgO	1,17	1,13	1,10	1,03	1,03
SO ₃	1,93	1,91	1,95	2,01	2,00

Pengujian kadar *free lime*

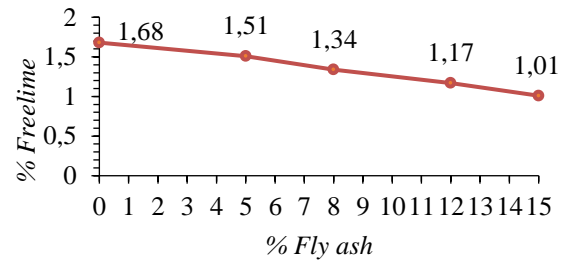
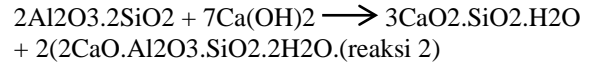
Hasil pengujian kadar kapur bebas (*free lime*) dalam semen, penambahan *fly ash* mempengaruhi kadar *free lime*. Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa *free lime* semakin menurun dengan bertambahnya persentase penambahan *fly ash* di dalam semen. Penambahan *fly ash* 5% didapat kadar *free lime* sebesar 1,51% lalu terjadi penurunan pada penambahan *fly ash* 8%, 12% dan 15%. Penurunan kadar *free lime* terjadi karena keberadaan silika dan alumina yang berasal dari *fly ash* yang bereaksi saling mengikat dengan kalsium oksida sehingga dapat mengurangi keberadaan *free lime*. Keberadaan kapur bebas pada saat proses hidrasi semen akan membentuk kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) sebagaimana reaksi $\text{CaO}_{\text{bebas}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$. Ca(OH)₂ dari hidrasi kapur bebas ini sangat merugikan karena dapat menurunkan kuat tekan mortar semen, karena akan menyebabkan penyusutan dan keretakan pada semen. Penyusutan terjadi karena pada saat semen mulai mengeras akan terjadi proses penguapan dari senyawa hidroksida dan uap air. Apabila pada semen terdapat Ca(OH)₂ maka senyawa hidroksida ini akan mengembang dan menguap meninggalkan rongga pada semen sehingga terjadi penyusutan semen bahkan menimbulkan keretakan.

Dengan adanya SiO₂ *fly ash*, menyebabkan reaksi saling mengikat dengan CaO membentuk C₃S (reaksi 1), sehingga keberadaan Ca(OH)₂ semakin

sedikit karena CaO bebas berkurang (Wang, 2018). Selain itu, adanya C₃S meningkatkan kuat tekan mortar (Antiohos & Tsimas, 2005).



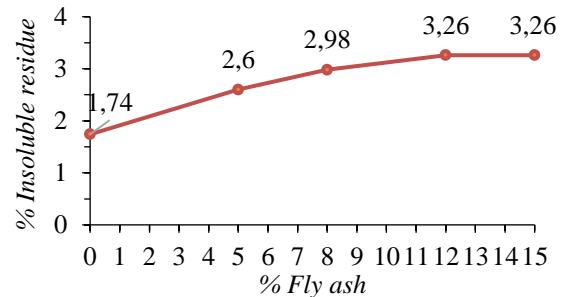
Kandungan alumina silika dari *fly ash* juga dapat langsung bereaksi dengan Ca(OH)₂ membentuk senyawa C₃S (reaksi 2) sehingga mengurangi pengembangan volume Ca(OH)₂, akibatnya keretakan semen dapat dikurangi (Antiohos & Tsimas, 2005).



Gambar 3. Pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kadar *free lime*

Pengujian kadar IR

Hasil pengujian diperoleh bahwa penambahan *fly ash* berbanding lurus dengan kadar IR semen sebagaimana pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kadar IR

Gambar 4 menunjukkan IR yang semakin besar dengan semakin besarnya penambahan *fly ash* dalam semen. Pada keadaan murni tanpa *fly ash*, kadar IR sebesar 1,74% kemudian terjadi peningkatan sebesar 2,6% setelah penambahan 5% *fly ash* sampai dengan 3,26% setelah penambahan 15% *fly ash*. Berdasarkan Gambar 4, penambahan *fly ash* yang memenuhi standar dalam SNI 15-2049-2004 yaitu maksimum IR 3% adalah formula campuran semen dan *fly ash* 8% dengan IR sebesar 2,98%.

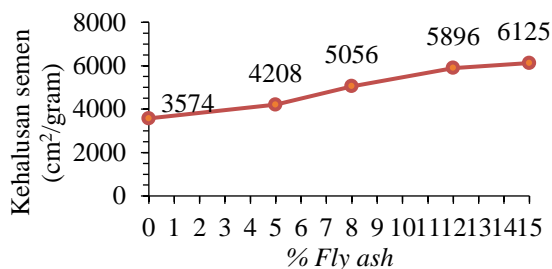
Kadar IR ini harus dibatasi karena tingginya IR mengindikasikan tercampurnya bahan semen dengan bahan pengotor yang tidak dapat dibatasi oleh

persyaratan fisika berupa fragmen mineral yang larut dalam asam dan basa berupa mineral asam silicat seperti *ortho silicat* dan *meta silicat* (Kiattikomol *et al.*, 2000). Selain itu, IR juga berpengaruh pada proses *autoclave* karena pada suhu dan tekanan tinggi, IR semen menguap, sehingga menyebabkan kadar semen berkurang hingga mengalami penyusutan.

Pengujian kehalusan semen

Kehalusan semen adalah salah satu syarat mutu fisika semen karena akan menentukan luas permukaan pertikel-partikel semen saat hidrasi. Hasil analisis diperoleh data pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap kehalusan semen seperti pada Gambar 5.

Penambahan *fly ash* akan menyebabkan semakin besar pula kehalusan semen, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. Semakin halus semen maka kekuatan, panas hidrasi, dan kebutuhan air persatuan luas akan semakin rendah, serta reaksi hidrasi akan makin cepat (Jongpradist *et al.*, 2010).



Gambar 5. Pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kehalusan semen

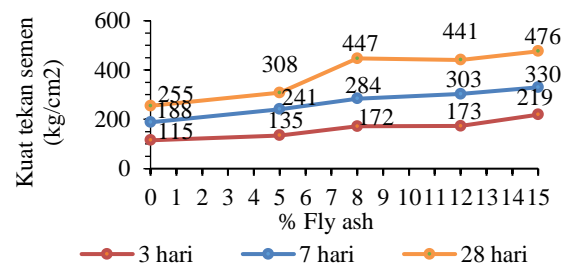
Penambahan material *pozzolan* yang dihaluskan (lolos saringan no. 325) dalam campuran semen akan memberikan penyempurnaan pengerasan dari pasta semen yang terbentuk, dan karakteristik mekanik yaitu ketahanan terhadap pergerakan/goncangan dari luar juga meningkat (Jongpradist *et al.*, 2010). Hal ini disebabkan karena semakin halus material *pozzolan* yang ditambahkan pada campuran semen, pori-pori pada permukaan akan semakin rapat sehingga *specific surface area* *pozzolan* semakin besar. Hal ini akan mengakibatkan semakin besar luas permukaan ikatan partikel dalam campuran. Semakin banyak partikel yang berikatan maka akan meningkatkan kinerjanya (Myronyuk *et al.*, 2018).

Untuk memproduksi campuran beton yang tahan terhadap gesekan dan benturan seperti campuran yang diaplikasikan pada lapis permukaan perkerasan jalan, dibutuhkan material agregat dengan permukaan yang keras dan memiliki pori-pori yang rapat atau porositas yang rendah. Porositas yang

rendah akan mengakibatkan penggunaan air yang sedikit dan campuran menjadi padat, sehingga perbandingan air dan semen (w/c) dalam campuran menjadi kecil. Di samping itu, untuk menghasilkan beton berkekuatan tinggi, pengurangan *micro cracking* serta zona transisi yaitu *interface* antara pasta semen dan agregat dalam campuran perlu dilakukan. Hal ini dapat diperoleh dengan menggunakan *superplasticizer* atau dengan menambahkan material *pozzolan* pada campuran beton (Shannag, 2000). Sejalan dengan yang dinyatakan oleh Cheng *et al.*, 2008 bahwa jika w/c menurun, porositas menurun dan mengakibatkan peningkatan *unconfined compressive strength* dari campuran.

Pengujian kuat tekan semen

Kuat tekan adalah kemampuan menahan dan memikul suatu beban tekan. Kekuatan yang diukur adalah kekuatan tekan *mortar* terhadap beban yang diberikan. Hasil analisis diperoleh data pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap kehalusan semen seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kuat tekan semen

Dalam Gambar 6 ditunjukkan bahwa penambahan *fly ash* meningkatkan kuat tekan *mortar*. Hal ini terjadi pada setiap sampel yaitu *mortar* umur 3, 7 dan 28 hari. Kuat tekan meningkat seiring dengan semakin banyaknya penambahan *fly ash*. Hal ini disebabkan karena senyawa SiO₂ dari *fly ash* bereaksi saling mengikat dengan CaO pada semen membentuk senyawa C₂S dan C₃S.

Reaksi pembentukan C₂S adalah $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$ dan reaksi pembentukan C₃S adalah $2CaO + CaO \cdot SiO_2 \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$

Pada saat semen dicampur dengan air maka akan terjadi reaksi hidrasi (pengikatan terhadap molekul H₂O) (Zhang *et al.*, 2019). Senyawa C₃S dan C₂S pada semen akan bereaksi dengan air membentuk *Calcium silicate hydrate* (C₃S₂H₃ atau C-S-H) yang merupakan senyawa komponen utama yang membentuk kuat tekan pada semen ketika sudah mengering. Akan tetapi, reaksi tersebut pada kondisi tidak ideal (tidak semua CaO berikatan dengan SiO₂

atau terdapat CaO bebas) akan menghasilkan kalsium hidroksida atau kapur mati $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Senyawa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada saat proses pengerasan semen akan mengembang dan menguap sehingga akan menimbulkan rongga dan penyusutan bahkan keretakan pada semen.

Reaksi dari proses hidrasi semen dengan air sebagai berikut :

C_3S bereaksi dengan air (hidrasi),
 $2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{CH}$ atau dengan rumus lengkap $2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$

C_2S bereaksi dengan air,
 $2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{CH}$ atau dengan rumus lengkapnya $2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$

Penambahan *fly ash* dengan kandungan alumina silika ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) pada semen akan mengubah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atau kapur mati (CH) yang bersifat melemahkan kuat tekan menjadi $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ yaitu senyawa yang dapat memperkuat ikatan antar partikel dalam campuran semen (Ogawa *et al.*, 2010). Sedangkan reaksi pozzolan dari alumina silika *fly ash* C-S-H dan C-A-H terbentuk di matriks semen, membuat strukturnya lebih padat; karenanya, kekuatan tekan mortar meningkat (Fraay *et al.*, 1989). Reaksi alumina silika dan kalsium hidroksida adalah $7 \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow 3 \text{CaO}_2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2 (2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$

Penambahan *fly ash* paling maksimum yaitu sebanyak 15% sebab dengan penambahan *fly ash* tersebut di dapat kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari yaitu 476 kg/cm^2 sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan *fly ash* pada proses pembuatan semen dapat meningkatkan kuat tekan mortar dimana semakin tinggi penambahan *fly ash* ke dalam semen maka semakin tinggi kuat tekan mortar.

Kesimpulan

Penambahan *fly ash* menambah komponen oksida-oksida semen SiO_2 , sehingga memperbanyak jumlah senyawa C_3S dan C_2S yang merupakan komponen kuat tekan semen. Penambahan *fly ash* berbanding lurus dengan nilai kadar IR, kuat tekan, kehalusan, dan berbanding terbalik dengan nilai *freelime*, sehingga penambahan *fly ash* memperbaiki kualitas semen dengan menaikkan komponen senyawa kimia, menaikkan kuat tekan, serta mengurangi keretakan atau ekspansi semen.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih atas terselesainya penelitian ini atas dukungan

peralatan, bahan, diskusi kepada Laboratorium Kimia PT. Solusi Bangun Indonesia, Cilacap dan Departemen Kimia Universitas Diponegoro, Semarang.

Daftar Pustaka

American Concrete Institute (ACI) 232.1R-00. (2001). *Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete Reported by ACI Committee 232 ACI 211.1*. Diakses 16 September 2020 dari <https://buildwellsource.org/materials/manufactured-urban-pozzolans/54-use-of-raw-or-processed-natural-pozzolans-in-concrete-american-concrete-institute-2001/file>.

Antiohos, S., & Tsimas, S. (2005). Investigating the role of reactive silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems. *Cem. Concr. Compos.*, 27, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.004>.

Asosiasi Semen Indonesia. (2018). *Kompas: Dua Tahun Terakhir Indonesia Kelebihan Pasokan Semen*. Diakses 20 April 2020, dari <https://ekonomi.kompas.com/read/2018/04/05/114859526/dua-tahun-terakhir-indonesia-kelebihan-pasokan-semen>

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 109. (2016). *Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standard Section 4*. United States of America: ASTM International.

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 230. (2009). *Standard Specification for Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Annual Books of ASTM Standards*. United States of America: ASTM International.

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 305. (2002). *Standard Practise For Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars Of Plastic Consistency*. United States of America: ASTM International.

American Society for Testing and Materials (ASTM) C 430. (2016). *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by The 45 μm (no 325) sieve, Annual Book of ASTM Standard Section 4*. United States of America: ASTM International.

Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. (1999). *Peraturan pemerintah nomor 18 tahun 1999 tentang pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun*. Jakarta: Sekretariat Bapedal. <http://www.bphn.go.id/data/documents/99pp018.pdf>

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2019). *Laporan Akhir Kajian Ketercapaian Target DMO Batubara Sebesar 60% Produksi Nasional pada*

Tahun 2019. Diakses 20 April 2020, dari https://www.bappenas.go.id/files/5415/0898/5954/Laporan_Akhir_Kajian_DMO_Batubara_Final.pdf

Badan Standarisasi Nasional. (2004). *SNI 15-2049-2004 tentang semen portland*. Jakarta: BSN. <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/6793>.

Blissett, R.S., & Rowson, N.A. (2012). A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Elsevier*, 97, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>.

Bumrongjaroen, W., Muller, I., Schweitzer, J., Livingston, R.A., (2007). *Application of Glass Corrosion Tests to the Reactivity of Fly Ash*. In World of Coal Ash (WOCA). Northern Kentucky USA.

Cheng, A.S., Yen, T., Liu, Y.W., & Sheen, Y.N. (2008). *Relation Between Porosity and Compressive Strength of Slag Concrete*. In Proceedings of Structures Congress. ASCE, Vancouver, British Columbia, Canada. www.ascelibrary.org

Cho, Y.K., Jung, S.H., & Choi, Y.C. (2019). Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 204, 255-264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.208>.

Edy, B. (2007). *Fly Ash - Bottom Ash dan Pemanfaatannya*. Dari <http://b3.menlh.go.id/3r/artikel.php>.

Elmrabet, R., El Harfi, A., & El Youbi, M.S. (2019). *Study of Properties of Fly Ash Cements*. Peer-Review Under Responsibility of The Scientific Committee of The International Conference on Materials and Environmental Science. ICMES 2018. Proceedings 13 (2019) 850-856. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.048>

Fraay, A.L.A., Bijen, J.M., & De Haan, Y.M., (1989). The role of fly ash in concrete. *A Critical Examination, Cem. Concr. Res.*, 19, 235-246. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90088-4).

Joice, E.W., & Lintong, E. (2017). Substitusi material pozolan terhadap semen pada kinerja campuran semen. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 24(3), 237-246. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.3.7>.

Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwai, S., & Chucheepsakul, S., (2010). Influence of fly ash on unconfined compressive strength of cement-admixed clay at high water content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 1-4958. <https://ascelibrary.org>.

[org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282010%2922%3A1%2849%29](https://doi.org/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282010%2922%3A1%2849%29).

Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Tangpagasit, J. (2000). Effect of insoluble residue on properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 30(8), 1209-1214. [https://doi.org/10.1016/S00088846\(00\)00315-x](https://doi.org/10.1016/S00088846(00)00315-x).

Moon, G.D., Oh, S., & Choi, Y.C., (2016). Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. *Constr. Build. Mater.*, 124, 1072-1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.148>.

Myronyuk, I., Tatarchuk, H., Vasylyeva, I., Yaremiy, I., & Mykytyn. (2018). Effect of surface-modified fly ash on compressive strength of cement mortar. *Phys. Chem. Solid State*, 19, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.016>

Ogawa, Y.K., Uji, K., & Ueno, A. (2010). Evaluation of fly ash as cementitious material for strength. *Cem. Sci. Concr. Tech.*, 64, 131-138. <https://doi.org/10.14250/cement.64.131>.

Otsuka T., Mori, S., Ishikawa, M., & Sakai, E. (2009). Relation between mineral compositions of fly ash and its pozzolanic reaction. *Cem. Sci. Concr. Tech.*, 63 16-21. Dari <https://doi.org/10.14250/cement.63.16>.

Shannag, M.J. (2000). High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cem. Concr. Compos.*, 22, 399-4. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8).

Van der Merwe, E.M., Mathebula, C.L., & Prinsloo, L.C. (2014). Characterization of the surface and physical properties of South African coal fly ash modified by sodium lauryl sulphate (SLS) for applications in PVC composites. *Powder Technology*, 266, 70-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.008>.

Wang, X., (2018). Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash limestone ternary blended concrete. *Constr. Build. Mater.*, 166, 130-140. Dari <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.058>.

Zhang, J., Dong, B., Hong, S., *et al.*, (2019). Investigating the influence of fly ash on the hydration behavior of cement using an electrochemical method. *Construction and Building Materials*, 222, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.046>.