



PETRA PRESS

INVESTIGASI POTENSI *FLY ASH* DARI PLTU BARU ATAU BELUM DIKENAL SEBAGAI MATERIAL PENGIKAT PADA BETON

Studi Kasus PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur

Antoni, Florentcia Hartono,
Steven Tanuwijaya, Kevin Wijaya,
dan Djwantoro Hardjito

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Surabaya

INVESTIGASI POTENSI *FLY ASH* DARI PLTU BARU ATAU BELUM DIKENAL SEBAGAI MATERIAL PENGIKAT PADA BETON

Studi Kasus PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur

Antoni, Florentcia Hartono,
Steven Tanuwijaya, Kevin Wijaya,
Djwantoro Hardjito

Program Studi Teknik Sipil
Universitas Kristen Petra
Surabaya

INVESTIGASI POTENSI *FLY ASH* DARI PLTU BARU ATAU BELUM DIKENAL SEBAGAI MATERIAL PENGIKAT PADA BETON

Studi Kasus PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur

Antoni, Florentcia Hartono,
Steven Tanuwijaya, Kevin Wijaya,
Djwantoro Hardjito

Program Studi Teknik Sipil
Universitas Kristen Petra
Surabaya



PETRA PRESS

Investigasi Potensi Fly Ash dari PLTU Baru atau Belum Dikenal Sebagai Material Pengikat pada Beton: Studi Kasus PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur

Surabaya, Bagian Penerbitan Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Kristen Petra, 2022

ISBN: 978-602-5446-97-9

Kutipan Pasal 44

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 100.000.000,- (seratus juta rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum dalam ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 50.000.000,- (lima puluh juta rupiah).

Cetakan Pertama, Februari 2022

Penulis:

Antoni, Florentcia Hartono, Steven Tanuwijaya, Kevin Wijaya, Djwantoro Hardjito.

Desain Cover: Aristarchus Pranayama

@Hak cipta ada pada penulis

Hak penerbit pada penerbit

Tidak boleh diproduksi sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun tanpa seijin tertulis dari pengarang dan/atau penerbit.

Penerbit:

PETRA PRESS

Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat

Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto No. 121-131, Surabaya 60236

Telp. 031-2983139, 2983147; Fax. 031-2983111

Kata Pengantar

Monografi ini berisikan hasil penelitian yang dilakukan untuk menginvestigasi secara komprehensif potensi limbah abu terbang atau *fly ash* yang berasal dari sebuah sumber yang tergolong baru atau belum dikenal. Sumber *fly ash* yang dimaksud adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur, yang menggunakan batu bara sebagai sumber energinya.

Ketersediaan limbah *fly ash* di Indonesia yang sangat melimpah kurang diimbangi dengan pemanfaatannya. Hingga tahun 2021, pemanfaatan limbah *fly ash* di Indonesia hanya berkisar pada 11% saja, sangat jauh berbeda dibanding banyak negara besar lainnya. Peraturan Pemerintah (PP) nomor 22 tahun 2021 telah mengeluarkan *fly ash* dari daftar limbah B3, membuka luas peluang pemanfaatan *fly ash* secara luas, khususnya di industri konstruksi. Pemanfaatan *fly ash* secara luas bermanfaat ganda, selain mendaur ulang limbah, juga sekaligus berpotensi mengurangi kebutuhan semen Portland.

Dengan motivasi tersebut, penelitian ini dilakukan. Agar hasil penelitian ini dapat didiseminasikan secara luas, penulis berinisiatif untuk menerbitkannya dalam bentuk monografi. Penerbitan monografi ini diharapkan akan memperkaya khazanah informasi tentang *fly ash* di Indonesia, selain menyajikan sebuah model investigasi potensi *fly ash* dari sebuah sumber baru.

Surabaya, Januari 2022

Tim Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
BAB 1. Potensi Fly Ash	1
1.1. Ketersediaan dan karakter <i>fly ash</i>	1
1.2. Pemanfaatan <i>fly ash</i> sebagai material konstruksi	6
BAB 2. Penyiapan Material	9
2.1. Material <i>fly ash</i> , semen dan pasir silika	9
2.2. Admixture dan bahan tambahan lainnya	11
BAB 3. Prosedur Pengujian	13
3.1. Pengujian karakteristik material dan benda uji	13
3.2. Pembuatan spesimen benda uji	14
BAB 4. Karakteristik Fly Ash	17
BAB 5. Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Bahan Pozzolan	21
BAB 6. Mortar Fly Ash Volume Tinggi (HVFA) dan Self-cementing	27
BAB 7. Mortar Bersistem Pengikat <i>Fly Ash</i> –Kalsium Hidroksida (Fa-Ca)	33
BAB 8. Pemanfaatan Fly Ash dalam Sistem Geopolimer	37
BAB 9. Kesimpulan dan Tantangan ke Depan	43
Daftar Pustaka	45
Biodata Penulis	51

Daftar Tabel

Tabel 2.1. Distribusi ukuran partikel pasir silika	11
Tabel 4.1. Komposisi kimia <i>fly ash</i> berdasarkan analisis XRF (% massa)	17
Tabel 4.2. Konsistensi normal, berat jenis (<i>specific gravity</i>), pH, dan kehalusan partikel <i>fly ash</i>	18
Tabel 5.1. Komposisi campuran mortar pozzolan, HVFA, dan <i>self-cementing</i>	22
Tabel 5.2. <i>Strength Activity Index</i> (SAI) mortar pozzolan dengan w/b 0,3, 0,35, dan 0,4	25
Tabel 6.1. <i>Strength Activity Index</i> (SAI) untuk mortar pozzolan, HVFA, dan mortar <i>self-cementing</i> pada w/b 0,3	31
Tabel 7.1. Proporsi campuran untuk mortar sistem Fa-Ca	33
Tabel 8.1. Proporsi campuran mortar geopolimer	37

Daftar Gambar

Gambar 1.1. <i>Trend</i> pemanfaatan <i>fly ash</i> di Indonesia (Ekaputri & Bari, 2020).....	2
Gambar 1.2. Pemanfaatan limbah <i>fly ash</i> di India, Amerika Serikat, Cina dan Indonesia antara 2002-2018 (Ekaputri & Bari, 2020)	3
Gambar 1.3. Hasil Pemindaian partikel <i>fly ash</i> dari <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM), (a) <i>Fly ash</i> PCC, (b) <i>Fly ash</i> CFBC	4
Gambar 2.1. PLTU Sudimoro Pacitan	9
Gambar 2.2. Dua sampel <i>fly ash</i> (A dan B) dari PLTU Sudimoro, Pacitan ..	10
Gambar 4.1. Distribusi ukuran partikel OPC dan tiga sampel <i>fly ash</i>	20
Gambar 5.1. Kebutuhan <i>superplasticizer</i> pada mortar pozzolan	23
Gambar 5.2. Waktu pengikatan awal mortar pozzolan	24
Gambar 5.3. Evolusi suhu pasta dengan variasi w/b	24
Gambar 5.4. Kekuatan tekan mortar pozzolan	25
Gambar 6.1. Kebutuhan <i>superplasticizer</i> dari mortar dengan <i>fly ash</i> menggantikan OPC	27
Gambar 6.2. Waktu <i>initial setting</i> campuran mortar dengan berbagai variasi kandungan <i>fly ash</i> menggantikan OPC	28
Gambar 6.3. Evolusi suhu pasta untuk berbagai rasio penggantian semen ...	30
Gambar 6.4. Kuat tekan mortar pada berbagai rasio penggantian seme	30
Gambar 7.1. Kebutuhan <i>superplasticizer</i> untuk mortar Fa-Ca	34
Gambar 7.2. Waktu pengikatan awal mortar Fa-Ca	35
Gambar 7.3. Evolusi suhu campuran pasta Fa-Ca	35
Gambar 7.4. Kuat tekan mortar Fa-Ca	36
Gambar 8.1. Waktu <i>initial setting</i> mortar geopolimer	38
Gambar 8.2. Evolusi suhu pasta geopolimer	39
Gambar 8.3. Kuat tekan mortar geopolimer	40
Gambar 8.4. Kuat tekan mortar yang dihasilkan sebagai fungsi dari massa jenisnya	40

BAB 1

Potensi *Fly Ash*

1.1 Ketersediaan dan karakter *fly ash*

Saat ini banyak Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang dioperasikan di Indonesia. Sumber bahan bakar untuk PLTU tersebut pada umumnya adalah minyak bumi 7%, gas bumi 29% dan batubara sebesar 50%. Di tahun 2018, pemakaian batubara sebesar 50% tersebut setara dengan 117 juta ton batu bara yang dikonsumsi oleh PLTU di Indonesia (National Energy Council, 2019).

Pembangkit listrik berbahan bakar batubara diperkirakan akan tetap menjadi pemasok utama listrik di Indonesia selama beberapa dekade mendatang (Cornot-Gandolphe, 2017). Kondisi geografis negara kepulauan dan ketersediaan batubara lokal yang melimpah menjadi alasan utama dibangunnya banyak pembangkit listrik tenaga batubara di seluruh negeri (Ordonez et al., 2021).

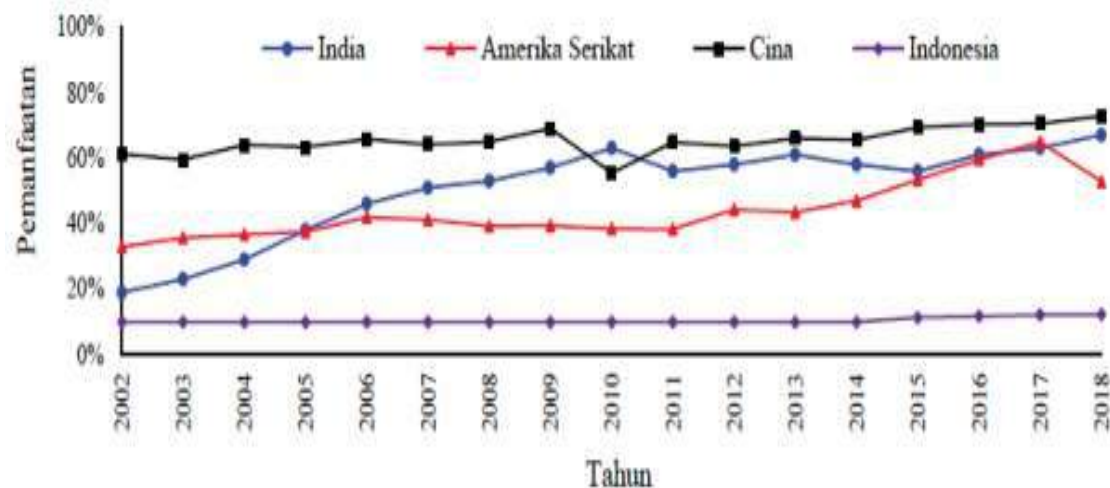
Banyak PLTU baru yang belum lama diresmikan, misalnya: PLTU Tanjung Awar-Awar di Tuban, PLTU Sudimoro di Pacitan, PLTU Jawa-7 di Banten, dan PLTU Jawa-8 di Cilacap. Saat ini, masih banyak lagi PLTU yang sedang dalam tahap konstruksi atau perencanaan. Meskipun Pemerintah Indonesia telah berketetapan untuk menghentikan pembangunan pembangkit listrik berbahan bakar batubara pada tahun 2025, pembangkit listrik-pembangkit listrik yang beroperasi saat ini akan menghasilkan energi listrik dan pada saat yang bersamaan juga menghasilkan limbah dalam bentuk *fly ash*, *bottom ash*, dan gas rumah kaca lainnya selama beberapa dekade mendatang (Edwards, 2019).



Gambar 1.1. *Trend pemanfaatan fly ash di Indonesia (Ekaputri & Bari, 2020)*

Dari proses pembakaran batubara, akan dihasilkan limbah dalam bentuk *fly ash* (abu terbang/abu layang) dan *bottom ash* (abu dasar/abu bawah) atau juga yang sering disingkat sebagai FABA (*fly ash and bottom ash*), yang merupakan limbah dalam bentuk padat yang masih perlu diolah untuk menghindari terjadinya pencemaran lingkungan secara masif. Kandungan abu dari batubara yang dibakar tersebut cukup bervariasi yaitu dari 5% hingga 30%, tergantung dari mutu batubara yang digunakan. Pada proses pembakaran PLTU yang terkontrol dengan baik, komposisi abu yang dihasilkan adalah sekitar 80-90% *fly ash* dan 10-20% *bottom ash*. Diperkirakan, jumlah limbah *fly ash* yang dihasilkan pada tahun 2021 di Indonesia adalah sekitar 8.7 juta-ton. Hingga saat ini, pemanfaatannya masih berkisar sekitar 1 juta-ton/tahun atau 11.5% saja, dengan mayoritas pemanfaatannya dilakukan di pulau Jawa. Gambar 1.1. menunjukkan tren produksi dan pemanfaatan *fly ash* di Indonesia dalam kurun waktu antara tahun 2012-2027 (Ekaputri & Bari, 2020).

Dibandingkan dengan banyak negara lain di dunia, pemanfaatan *fly ash* di Indonesia tergolong sangat rendah. Gambar 1.2. menunjukkan perkembangan pemanfaatan *fly ash* di negara-negara India, Amerika Serikat, Cina dan di Indonesia dalam kurun waktu antara tahun 2002 hingga tahun 2018.

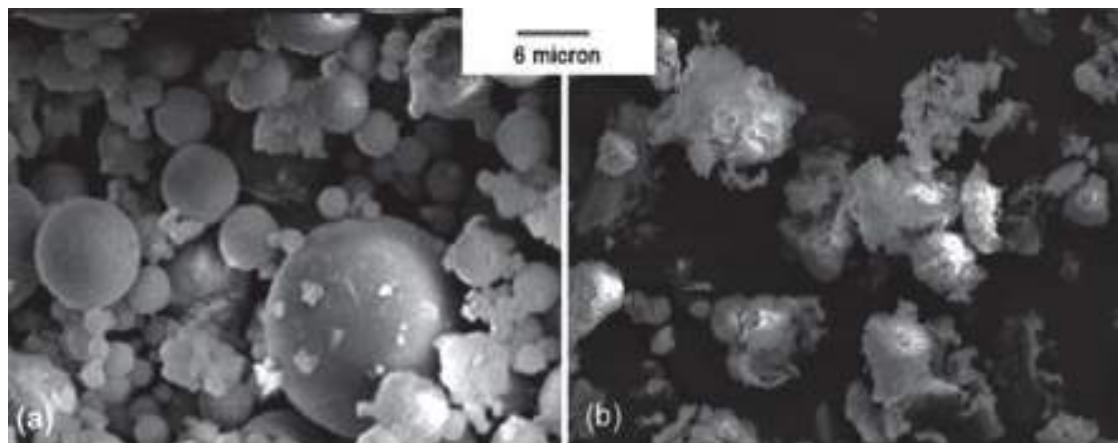


Gambar 1.2. Pemanfaatan limbah *fly ash* di India, Amerika Serikat, Cina dan Indonesia antara 2002-2018 (Ekaputri & Bari, 2020)

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah FABA hasil pembakaran batu bara di PLTU saat ini telah dikategorikan sebagai limbah non-B3, sehingga pengolahannya membuka potensi pemanfaatannya dalam industri lain. Ketersediaannya dalam volume yang sangat besar menjadikannya sebagai kandidat yang baik untuk dimanfaatkan dalam bidang konstruksi infrastruktur maupun bangunan.

Fly ash merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara dan telah terbukti bermanfaat sebagai pengganti sebagian semen pada beton (Fauzi et al., 2016). Penggantian semen Portland dalam beton, baik secara sebagian ataupun secara keseluruhan, akan mengurangi kebutuhan akan semen, yang merupakan salah satu penyumbang utama emisi gas CO₂, dan ikut memicu terjadinya perubahan iklim (Ali et al., 2011). Bentuk bulat dari partikel *fly ash* berdampak positif terhadap *workability* campuran beton, sedangkan reaksi *pozzolanic* yang terjadi antara *fly ash* dan kalsium hidroksida dalam beton meningkatkan kekuatan dan kepadatan beton (Ahmaruzzaman, 2010; Yao et al., 2015).

Fly ash dapat dikarakterisasi secara fisik dan kimia. Sifat fisik *fly ash* ditentukan oleh densitas, bentuk partikel, dan distribusinya, sedangkan sifat kimia *fly ash* ditentukan dari senyawa kimia, struktur kristal, dan reaktivitasnya. Sifat fisik dan kimia penting untuk diketahui, untuk menentukan kualitas *fly ash* (Feng & Clark, 2011).



Gambar 1.3. Hasil Pemindaian partikel *fly ash* dari *Scanning Electron Microscope* (SEM), (a) *Fly ash* PCC, (b) *Fly ash* CFBC

(Sumber: https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-fly-ash-particles-a-PCC-fly-ash-b-FBC-fly-ash_fig1_241103308)

Desain sebuah PLTU batubara mempengaruhi proses pembakaran yang menentukan kualitas *fly ash*. Pembangkit listrik dengan proses *pulverized coal combustion* (PCC) menghasilkan abu berbentuk bola-bola, sedangkan pembangkit listrik dengan sistem *circulation fluidized bed combustion* (CFBC) menghasilkan abu berbentuk tidak beraturan, yang membutuhkan kadar air yang lebih tinggi dalam campuran betonnya (Siddique & Jang, 2020; Wang & Song, 2016). Oleh karena itu, potensi pembangkit listrik sebagai sumber *fly ash* yang baik untuk digunakan pada beton dalam sistem pengikat perlu dipastikan. Gambar 1.3. menunjukkan hasil pemindaian partikel *fly ash* PCC dan *fly ash* CFBC dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Karena *fly ash* merupakan limbah dari proses pembakaran, maka kualitasnya juga bervariasi terhadap waktu, karena perbedaan sumber batubara, temperatur pembakaran batubara, dan variabel lainnya. Beberapa uji cepat untuk menentukan kualitas *fly ash* telah diusulkan (Antoni et al., 2015), yaitu pengujian-pengujian *loss-on-ignition* (LOI), pH, persen tertahan pada saringan #325 (45 m), dan konsistensi normal. Kandungan LOI yang tinggi mencerminkan tingginya kadar karbon yang tidak terbakar dalam *fly ash*, yang meningkatkan kebutuhan air dalam campuran dan mengganggu reaksi hidrasi dalam semen (Antoni, Widiyanto, et al., 2017; Chen et al., 2019). Dengan demikian, kadar LOI *fly ash* yang tinggi dapat mempengaruhi *workability* dan kuat tekan beton. pH mengindikasikan reaktivitas *fly ash* dan kandungan alkali, sejalan dengan kandungan kalsium oksida dalam *fly ash* (Antoni, Wijaya, et al., 2016). *Fly ash* dengan pH tinggi (> 11) dapat memiliki waktu pengikatan awal (*initial setting time*) yang lebih singkat, dengan kemungkinan terjadinya *flash setting* (pengikatan instan) campuran beton segar. Namun, kandungan kalsium oksida yang tinggi juga dapat meningkatkan kuat tekan dengan kemungkinan perilaku *self-cementing* dari *fly ash*. Sedangkan uji konsistensi normal menunjukkan kebutuhan air *fly ash* dibandingkan dengan campuran pasta semen. Konsistensi normal yang lebih rendah menandakan semakin sedikitnya kadar air yang diperlukan untuk mencapai suatu kondisi *workability* tertentu. *Fly ash*, khususnya yang dihasilkan dari sistem pembakaran PCC, memiliki bentuk butiran yang menyerupai bola-bola dengan permukaan yang halus. Pemakaian *fly ash* jenis ini meningkatkan *workability* campuran beton segar. Semakin tinggi kadar *fly ash* yang digunakan dalam campuran, semakin berkurang kadar air yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *workability* yang sama.

1.2 Pemanfaatan *fly ash* sebagai material konstruksi

Pemanfaatan *fly ash* sebagai pengganti semen dalam pembuatan beton dapat dilakukan pada beberapa sistem pengikat. Sistem yang paling umum adalah menggantikan pemakaian sebagian semen Portland dalam beton hingga 30%.

Rendahnya tingkat pemanfaatan *fly ash* saat ini, sebagian besar disebabkan oleh tingginya variasi *fly ash* yang diperoleh dari berbagai pembangkit listrik yang berbeda, maupun dari waktu pengambilan yang berbeda. Pada tingkat penggantian yang lebih rendah, ketidakpastian kualitas *fly ash* lebih dapat dikelola tanpa harus selalu melakukan pengujian karakteristik *fly ash* sebelum digunakan (Antoni, Widiyanto, et al., 2017). Pada rasio penggantian yang lebih tinggi, jaminan kualitas *fly ash* menjadi faktor penentu dalam menghasilkan beton yang baik.

High volume fly ash (HVFA) menggantikan lebih dari 50% semen Portland yang digunakan dalam beton dan tetap menghasilkan kekuatan jangka panjang yang serupa dengan beton kontrol (Antoni et al., 2019; Huang et al., 2013; Rivera et al., 2015). Pengurangan kebutuhan rasio air-material pengikat dan lebih rendahnya kenaikan suhu material ketika mengalami proses pengikatan merupakan keuntungan utama dari campuran ini bila diberikan jaminan kualitas *fly ash* yang digunakan (Bentz & Ferraris, 2010; Hoyos-Montilla et al., 2018; Rashad, 2015; Shaikh et al., 2014).

Pada rasio penggantian yang lebih tinggi, misal lebih dari 90%, peran semen Portland sebagai pengikat sangat berkurang untuk memberikan ikatan yang cukup pada beton. Dalam beberapa kasus, beton yang hanya menggunakan *fly ash* 100% sebagai material pengikat, dengan memanfaatkan sifat *self-cementing*, masih dapat menghasilkan beton dengan kekuatan yang wajar (Roskos et al., 2011), dan dapat diaplikasikan, misalnya, sebagai bahan dengan kekuatan rendah terkontrol (*controlled low strength material* atau CLSM) atau untuk keperluan stabilisasi tanah

(Do et al., 2019; Mackiewicz & Ferguson, 2005). Peran semen Portland dalam campuran ini adalah sebagai bahan tambahan untuk memberikan kekuatan awal dan meningkatkan suhu internal untuk mempercepat reaksi *fly ash* dalam beton. *Fly ash* dengan kandungan kalsium oksida yang sangat tinggi dapat memiliki sifat *self-cementing* yang menghasilkan beton dengan kekuatan normal pada rasio air-semen yang rendah (Cross et al., 2005).

Fly ash juga dapat menggantikan 100% semen Portland pada beton pada skenario sistem pengikat yang dimodifikasi. Berbagai struktur beton dari jaman Romawi berhasil diproduksi dengan mereaksikan tanah liat yang dikalsinasi dengan kalsium hidroksida, yang diperoleh dari tanah kapur. Struktur peninggalan jaman Romawi ini bertahan selama ribuan tahun (Gotti et al., 2008). Oleh karena itu, *fly ash* yang kaya dengan oksida SiO_2 , sebagaimana halnya dengan tanah liat, juga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dari sumber eksternal, untuk menghasilkan material pengikat beton yang kuat dan tahan lama (Biernacki et al., 2001; Hlaváček et al., 2018; Luxán et al., 1989). Meskipun laju reaksi campuran *fly ash* dan kalsium hidroksida cukup lambat, bahan pengikat yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alternatif bahan pengikat dalam pembuatan beton, utamanya ketika tersedia sumber kalsium hidroksida yang memadai atau di lokasi terpencil di mana semen Portland tidak mudah didapatkan.

Beton geopolimer diproduksi dengan mereaksikan sumber alumina-silikat dengan larutan alkali kuat untuk menghasilkan beton yang mengeras dengan menggunakan *fly ash* sebagai bahan dasarnya (Hardjito et al., 2004). Pemanfaatan *fly ash* rendah kalsium sebagai bahan dasar geopolimer dapat menghasilkan geopolimer yang berkualitas baik; namun, perlu suhu tinggi untuk memungkinkan pengembangan kekuatan terjadi. Di lain pihak, penggunaan *fly ash* berkalsium tinggi sebagai prekursor geopolimer dapat menyebabkan geopolimer mengeras secara alami pada

suhu kamar, namun acap kali terkendala dengan terjadinya *flash setting* (Antoni, Wijaya, Satria, et al., 2016; Antoni et al., 2020). Rasio cairan alkali (sodium silikat dan sodium hidroksida) yang disesuaikan dengan bahan prekursor adalah variabel utama dalam keberhasilan pembuatan geopolimer, selain kualitas *fly ash* itu sendiri (Antoni, Wijaya, & Hardjito, 2016b; Mustafa et al., 2011; Wattimena et al., 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi potensi *fly ash* yang diperoleh secara eksperimental, khususnya dari sumber pembangkit listrik baru dan belum dikenal luas, sebagai bahan pengikat di industri konstruksi. *Fly ash* yang diinvestigasi dalam penelitian ini diperoleh dari PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur. Pembangkit listrik Sudimoro di Pacitan ini mulai beroperasi pada tahun 2017, memanfaatkan sistem pembakaran batu bara *pulverized* dengan dua *boiler*. Batu bara yang digunakan berasal dari Kalimantan Timur. PLTU ini menghasilkan sekitar 18,7 ton *fly ash* dan 7,2 ton abu dasar setiap hari, seperti yang tercatat pada Juli 2020. *Fly ash* dan abu bawahnya belum banyak digunakan dalam industri konstruksi karena lokasi PLTU Pacitan yang terpencil dan masih terbatasnya penelitian tentang potensi *fly ash* dari PLTU ini.

Investigasi diawali dengan pengujian sifat-sifat atau karakteristik *fly ash* melalui berbagai uji material. Kemudian potensi *fly ash* ini sebagai pengganti semen Portland diselidiki dalam beberapa sistem pengikat campuran mortar, yaitu sebagai pozzolan, HVFA, material *self-cementing*, *fly ash*-kalsium hidroksida (Fa-Ca), dan geopolimer. Kajian terhadap penggunaan material *fly ash* yang sama dalam beberapa sistem pengikat yang berbeda dijadikan acuan dalam menilai potensi *fly ash* tersebut, sehingga dapat lebih dipromosikan kemungkinan pemanfaatannya.

-oo0oo-

BAB 2

Penyiapan Material

2.1 Material *fly ash*, semen dan pasir silika

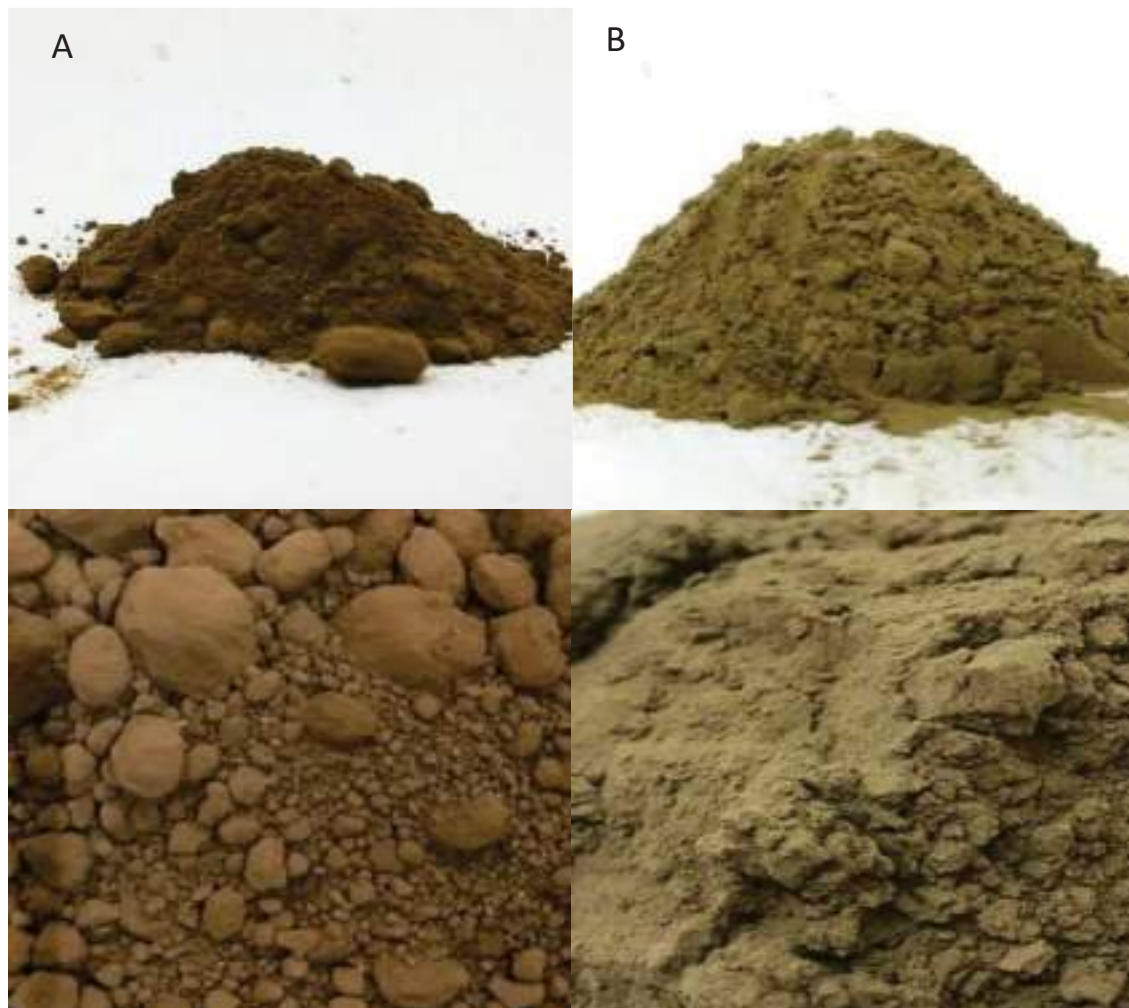
Dua sampel *fly ash* dikumpulkan dari pembangkit listrik pembakaran batu bara di Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur, Indonesia (Gambar 2.3). Sampel pertama diperoleh dari sebuah area penimbunan terbuka (*fly ash* A) dan yang lainnya diperoleh segar dari *boiler* (*fly ash* B). Sampel yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 2.3. PLTU Sudimoro Pacitan

(Sumber: <https://pacitankabmuseumjatim.wordpress.com/>)

Meski diambil dari pembangkit listrik yang sama, kedua sampel *fly ash* tersebut masing-masing menunjukkan kualitas fisik yang berbeda. *Fly ash* A berwarna lebih gelap dan menunjukkan banyaknya gumpalan-gumpalan kecil. Hal ini karena *fly ash* telah bereaksi dengan kelembaban dan air hujan. *Fly ash* B diperoleh langsung dari *boiler* dan masih berbentuk tepung halus. Oleh karena itu, pengumpulan awal *fly ash* sudah mempengaruhi kualitasnya. Untuk selanjutnya, penelitian ini hanya menggunakan *fly ash* B, karena *fly ash* A dianggap tidak sesuai dengan harapan.



Gambar 4.2. Dua sampel *fly ash* (A dan B) dari PLTU Sudimoro, Pacitan

Semen Portland biasa (*ordinary Portland cement* atau OPC) diperoleh dalam bentuk curah dari Pabrik Semen Dynamix, Tuban, Jawa Timur. Pasir silika yang diperoleh dari lokasi tambang di Tuban, Jawa Timur, digunakan sebagai agregat halus dalam pembuatan mortar. Untuk memastikan gradasi yang konsisten dari pasir yang digunakan, gradasi pasir dimodifikasi, sehingga memiliki modulus kehalusan (*fineness modulus* atau FM) 2,05, agar sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan dalam ASTM C778 (ASTM C778, 2014), seperti yang dirinci dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Distribusi ukuran partikel pasir silika

Ukuran saringan (mm)	Kumulatif Tertahan (massa, %)	Persyaratan ASTM C778 (massa, %)
1,18	0	0
0,6	8,8	0–4
0,425	46,6	25–35
0,3	54,4	70–80
0,15	95,5	96–100
Dasar	100	100
FM	2.05	1,91–2,19

2.2 Admixture dan bahan tambahan lainnya

Superplasticizer yang digunakan adalah Sika Viscocrete 1003 berbahan dasar *polycarboxylate* dan airnya telah didemineralisasi. Kalsium hidroksida diproduksi di laboratorium secara manual dengan memasukkan kalsium oksida segar ke dalam air, mencampurnya secara menyeluruh, dan mengendapkannya selama 24 jam. Kemudian, pasta kalsium hidroksida dikeringkan dalam *oven* dan digiling menjadi bubuk. Kalsium oksida diperoleh dari desa Puger, Jember, Jawa Timur. Serpihan sodium hidroksida dan larutan sodium silikat diperoleh dari toko bahan kimia lokal. Sodium hidroksida yang digunakan diperoleh dalam bentuk padat dengan

kemurnian 94%. Larutan sodium silikat yang digunakan tergolong ke dalam *grade* BE 52, dengan kadar air bebas 40% (diukur dengan mengeringkan larutan di dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam). Larutan sodium hidroksida (NaOH) dengan molaritas 8M dibuat dengan melarutkan 320g sodium hidroksida ke dalam air demineral untuk membuat 1000ml larutan. Larutan NaOH ini kemudian didinginkan hingga mencapai suhu kamar, sebelum digunakan.

-oo0oo-

BAB 3

Prosedur Pengujian

3.1 Pengujian karakteristik material dan benda uji

Fly ash yang diperoleh kemudian diuji karakteristiknya terlebih dahulu. Untuk *fly ash* yang berasal dari sumber yang baru atau belum dikenal, perlu dilakukan beberapa pengujian karakteristik, baik karakteristik fisik maupun kimiawi. Pengujian karakteristik kimiawi dapat dilakukan menggunakan metode *X-ray fluorescence* (XRF) dan *X-ray diffraction* (XRD) untuk menentukan komposisi kimia dari *fly ash*. Perlu dicatat, umumnya biaya yang harus dikeluarkan untuk melakukan kedua pengujian tersebut tergolong mahal dan memakan waktu. Indikator cepat untuk menentukan karakteristik atau kualitas *fly ash*, seperti berat jenis, pH, konsistensi normal, dan persentase yang tertahan dalam ayakan 45 m, dapat menjadi alat yang berguna dalam menentukan variasi karakteristik atau kualitas *fly ash* yang diperoleh (Antoni et al., 2015). pH *fly ash* ditentukan dengan menambahkan 20g *fly ash* ke dalam 80ml akuades, menurut ASTM D5239 (ASTM D5239, 2012). Konsistensi normal dari semen dan pasta *fly ash* di menggunakan alat Vicat menurut ASTM C187 (ASTM C187, 2016). Inspeksi visual terhadap penampakan *fly ash* dilakukan untuk melihat kemungkinan terjadinya variasi *fly ash* yang diperoleh. Jika terjadi perubahan warna atau penampakan yang signifikan, maka karakteristik *fly ash* tersebut perlu dievaluasi kembali.

Komposisi campuran mortar ditentukan berdasarkan uji konsistensi normal. *Fly ash* yang dihasilkan dari *boiler* tipe PCC biasanya memiliki kebutuhan air yang lebih rendah untuk mencapai kondisi *workability* yang

serupa, dibandingkan dengan OPC. Ketika konsistensi normal yang lebih tinggi didapati, ada kemungkinan *fly ash* tersebut memiliki bentuk partikel yang berbeda atau memiliki kandungan LOI yang tinggi. Rasio air-material pengikat mortar kemudian ditentukan serendah mungkin. Kekuatan tekan campuran mortar dari berbagai sistem pengikat dianggap sebanding ketika rasio air-pengikat serupa dan kemampuan untuk dapat dikerjakan (*workability*) terkontrol. *Superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* digunakan untuk meningkatkan kemampuan kerja campuran mortar dengan rasio air-material pengikat tertentu, dengan diameter aliran target yang sama yaitu 15 ± 1 cm dalam uji *flow table* mortar menurut ASTM C1437 (ASTM C1437, 2012). Perbandingan dosis *superplasticizer* terhadap total berat material pengikat yang digunakan dicatat sebagai kebutuhan *superplasticizer* dalam persen berat.

Waktu pengikatan awal campuran mortar diuji menggunakan *mortar penetrometer* menurut ASTM C403 (ASTM C403, 2016). Waktu untuk mencapai tahanan penetrasi 500psi atau 3,45MPa dicatat sebagai waktu pengikatan awal mortar. Evolusi suhu campuran semen *fly ash* juga dicatat hingga usia 48 jam pada campuran pasta, dengan menyiapkan campuran yang sama seperti mortar tetapi tanpa menggunakan pasir dan *superplasticizer*. Pasta disiapkan dalam gelas plastik 200ml dan disimpan dalam wadah *styrofoam* dengan sensor termokopel (*thermocouple*).

Pengujian kuat tekan benda uji mortar dilakukan pada benda uji kubus berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm³ menurut ASTM C109 (ASTM C109, 2013). Tiga ulangan dilakukan pada masing-masing benda uji, dengan umur pengujian 3, 7, 14, 28, dan 56 hari.

3.2 Pembuatan spesimen benda uji

Campuran mortar dibuat dengan menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen, baik sebagian maupun seluruhnya, pada beberapa sistem

pengikat yang berbeda. *Fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dengan kadar massa bervariasi antara 0–30% disebut “mortar pozzolan”. Mortar *high volume fly ash* (HVFA) dibuat menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen dengan kadar massa bervariasi antara 40–80%. *Fly ash* sebagai pengganti semen dengan kadar massa antara 90–100% disebut “mortar *self-cementing*”. Pada skenario penggantian semen 100% juga dapat dikembangkan dua sistem pengikat yang berbeda, yaitu mortar dengan sistem pengikat *fly ash*-kalsium hidroksida (Fa-Ca), dimana penggunaan kalsium hidroksida menggantikan sebagian *fly ash* hingga 40%, dan mortar geopolimer, dimana *fly ash* direaksikan dengan larutan alkali kuat yang terdiri dari kombinasi sodium hidroksida dan sodium silikat.

Superplasticizer ditambahkan ke dalam campuran mortar untuk mengontrol kemampuan kerja atau *workability* mortar segar untuk mencapai diameter aliran (*flow diameter*) target yang telah ditentukan. Namun, penambahan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate* tidak dilakukan untuk campuran mortar geopolimer, karena adanya potensi penurunan kuat tekan sejalan dengan peningkatan dosis *superplasticizer* yang digunakan.

Mortar segar kemudian dipadatkan ke dalam cetakan kubus untuk menghasilkan benda uji. Ada dua jenis proses perawatan (*curing*) yang dilakukan terhadap spesimen mortar, yaitu: perawatan dengan direndam di dalam air pada suhu ruang dan perawatan pada suhu tinggi di dalam *oven*. Spesimen mortar dengan kadar *fly ash* antara 0–80% dilepaskan dari cetakan satu hari setelah pengecoran, dan kemudian direndam dalam air hingga satu hari sebelum waktu pengujian. Spesimen mortar dengan sistem pengikat *self-cementing*, Fa-Ca, dan mortar geopolimer dirawat dalam *oven* pada suhu 60°C selama 24 jam dibungkus dalam plastik *shrink-wrap*. Setelah menjalani masa perawatan di dalam *oven*, spesimen mortar kemudian dibongkar, disimpan dalam kantong plastik tertutup, dan ditempatkan dalam kondisi suhu kamar sampai tiba waktu pengujian.

Perawatan pada suhu tinggi yang dilakukan terhadap spesimen mortar dengan sistem pengikat 100% *fly ash* ini dimaksudkan untuk mempercepat reaksi dari bahan pengikat *fly ash*.

-oo0oo-

BAB 4

Karakteristik *Fly Ash*

Analisis fluoresensi sinar-X (*X-ray fluorescence* atau XRF) digunakan untuk menentukan komposisi kimia *fly ash*. Hasil pengujian XRF *fly ash* PLTU Sudimoro, Pacitan, disajikan pada Tabel 4.1. Komposisi kimia *fly ash* yang diperoleh dari pembangkit PLTU Paiton di Jawa Timur, dan PLTU Suralaya, Banten, Jawa Barat, keduanya diperoleh untuk penelitian kami sebelumnya, ditambahkan untuk perbandingan (Antoni, Widiyanto, et al., 2017; Antoni, Wijaya, & Hardjito, 2016a). *Fly ash* dari kedua PLTU ini telah digunakan secara luas dalam berbagai penelitian lain dan sebagai bahan pozzolan pada industri beton. Menurut ASTM C618 (ASTM C618, 2019), kelas *fly ash* dapat ditentukan dari total kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dan dari besarnya kandungan CaO . *Fly ash* kelas F memiliki kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ dan kadar $\text{CaO} \leq 18\%$, sedangkan *fly ash* tipe C memiliki kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ dan $\text{CaO} > 18\%$.

Tabel 4.1. Komposisi kimia *fly ash* berdasarkan analisis XRF (% massa)

<i>Fly ash</i>	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO_2	P_2O_5	SO_3	LOI
FA Pacitan	45,78	17,22	11,92	13,83	5,87	1,43	1,22	0,75	0,22	0,17	0,83	0,41
FA Paiton	36,57	19,06	11,32	19,50	6,21	2,45	1,35	0,75	0,15	0,21	1,30	0,63
FA Suralaya	45,21	28,06	8,24	6,83	3,09	3,27	1,39	0,84	0,16	0,28	0,58	1,58

Total kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ untuk masing-masing *fly ash* dari PLTU Pacitan, Paiton dan Suralaya masing-masing adalah 74,92%, 66,95%, dan 81,51%. Di lain pihak, kandungan CaO nya,

masing-masing adalah 13,83%, 19,5% dan 6,83%. Hasil ini menunjukkan bahwa sampel *fly ash* dari PLTU Pacitan dan Suralaya dapat dikategorikan sebagai *fly ash* kelas F, atau *fly ash* dengan kadar kalsium rendah. Sebaliknya, *fly ash* dari PLTU Paiton tergolong *fly ash* kelas C, atau *fly ash* dengan kandungan kalsium yang tinggi.

Kandungan kalsium oksida dari *fly ash* Pacitan yang tergolong medium, menjadi salah satu perhatian utama, karena berpotensi menunjukkan sifat *self-cementing* atau potensi terjadinya *flash setting* dalam campuran geopolimer. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* Pacitan memiliki kandungan kalsium oksida yang berada di antara *fly ash* Paiton dan *fly ash* Suralaya.

Loss on ignition (LOI) dan kandungan SO_3 masing-masing harus kurang dari 6% dan 5%, sebagaimana dinyatakan dalam ASTM C618 (ASTM C618, 2019). Ketiga sampel *fly ash* memiliki kandungan LOI dan SO_3 yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan ketentuan yang ditetapkan dalam standar. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga pembangkit listrik tersebut memiliki proses pembakaran yang baik dan sampel *fly ash* yang diambil dari pembangkit listrik tersebut memiliki kualitas yang baik.

Tabel 4.2. Konsistensi normal, berat jenis (*specific gravity*), pH, dan kehalusan partikel *fly ash*

Material	Konsistensi Normal	<i>Specific gravity</i>	pH	% tertahan pada saringan 45 μm
OPC	0,33	2,89	11,2	2,6
FA Pacitan	0,18	2,61	10,3	7,5
FA Paiton	0,18	2,76	12,0	8,1
FA Suralaya	0,25	2,35	9,4	19,2

Hasil uji indikator cepat untuk *fly ash*, yaitu konsistensi normal, berat jenis (*specific gravity*), pH, dan kehalusan partikel yang diukur

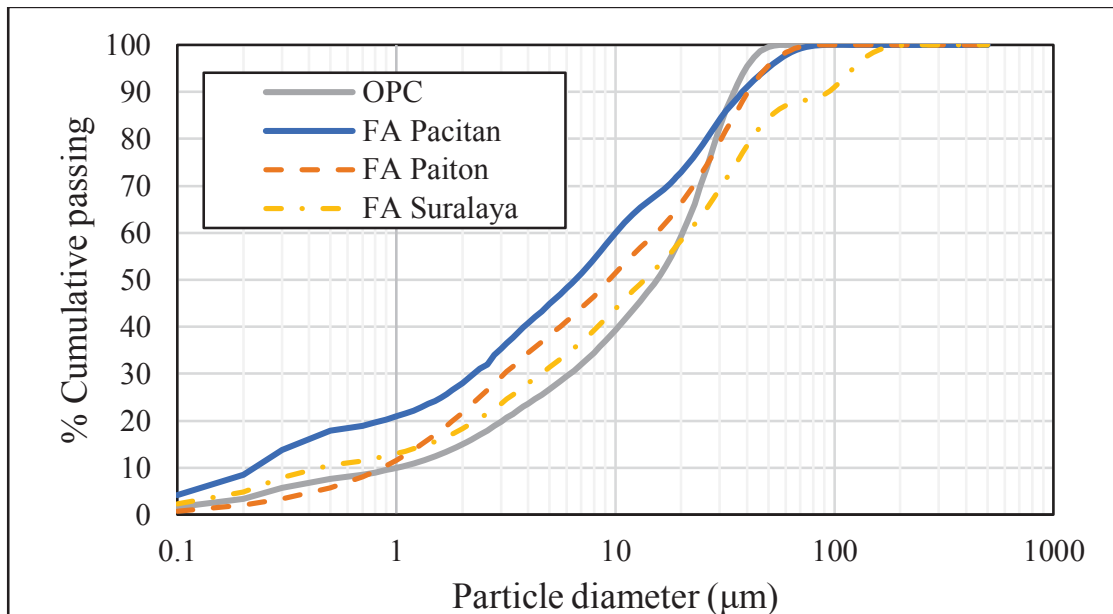
dengan persentase massa partikel yang tertahan pada saringan 45 μ m dilaporkan pada Tabel 4.2. Ditemukan bahwa konsistensi normal *fly ash* Pacitan memiliki nilai yang sama dengan *fly ash* Paiton, yaitu 0,18, sedangkan *fly ash* Suralaya memiliki harga konsistensi normal tertinggi 0,25.

Dibandingkan dengan OPC, penggunaan *fly ash* mengurangi kebutuhan air campuran saat digunakan sebagai pengganti semen. Rendahnya kebutuhan air pada *fly ash* Pacitan untuk mencapai konsistensi normal mengindikasikan bahwa partikel-partikel *fly ash* Pacitan berbentuk bulat karena proses pembakaran terhadap batubara yang dilakukan pada *boiler* PCC dan batu bara dihaluskan terlebih dahulu. Selain itu, kebutuhan air yang rendah juga disebabkan oleh LOI yang rendah.

pH menunjukkan kandungan alkali pada *fly ash*, karena sebagian besar ditentukan oleh kandungan kalsium oksida. Perubahan pH berkorelasi dengan perubahan kandungan kimia yang dapat mempengaruhi reaksi kimia dalam fase mortar. Jika pH *fly ash* lebih tinggi dari 11, maka *fly ash* dapat memiliki sifat *self-cementing*, dan akibatnya ada risiko terjadinya *flash setting* saat membuat beton geopolimer (Antoni, Satria, et al., 2017).

Hasil analisis ukuran partikel (*Particle Size Analysis* atau PSA) dari OPC dan *fly ash*, yang ditunjukkan dalam bentuk distribusi ukuran partikel ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hasil ini menunjukkan bahwa *fly ash* Pacitan memiliki ukuran partikel yang paling kecil dibandingkan dengan sampel OPC dan *fly ash* dari kedua PLTU lainnya. Hasilnya konsisten dengan persentase partikel yang tertahan pada ayakan 45 μ m. Hal ini menunjukkan bahwa analisis ayakan untuk mengukur persen tertahan ayakan 45 μ m dapat digunakan untuk menggantikan uji PSA untuk penjaminan kualitas yang cepat. Ketiga sampel *fly ash* lulus

standar ASTM C618 (ASTM C618, 2019), yang mensyaratkan kurang dari 34% yang tertahan di saringan atau ayakan 45 μ m.



Gambar 4.1. Distribusi ukuran partikel OPC dan tiga sampel *fly ash*

Dari pengujian yang dilakukan, *fly ash* Pacitan menunjukkan potensi yang sangat baik untuk digunakan sebagai bahan pozzolanik pengganti sebagian OPC dalam kadar rendah, atau lebih tinggi sebagai material *self-cementing*, sebagai pengikat dalam sistem *fly ash*-kalsium hidroksida (Fa-Ca), dan sebagai bahan dasar geopolimer. Potensi ini perlu dikonfirmasi dengan pengujian spesimen mortar.

-oo0oo-

BAB 5

Pemanfaatan *Fly Ash* Sebagai Bahan Pozzolan

Rasio air terhadap material pengikat (*binder* atau *cementitious materials*) campuran mortar perlu ditentukan serendah mungkin untuk menghasilkan campuran mortar segar yang kohesif. Untuk semua campuran mortar, rasio massa pasir terhadap material pengikat ditetapkan sebesar 2. Pasir yang digunakan adalah pasir silika yang sudah diatur gradasinya. Mortar pozzolan dibuat dengan rasio air terhadap material pengikat (w/b) bervariasi, yaitu sebesar 0,3; 0,35; dan 0,4, dengan rasio penggantian semen OPC antara 0–30%. Mortar HVFA dan mortar *self-cementing* menggunakan w/b=0,3. Proporsi campuran pozzolan, HVFA, dan mortar *self-cementing* dipaparkan pada Tabel 5.1.

Kebutuhan *superplasticizer* (SP) untuk setiap campuran mortar dengan rasio air terhadap material pengikat yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 5.1. Kebutuhan SP berkurang sejalan dengan penambahan air dan peningkatan rasio penggantian *fly ash* untuk mencapai target *workability* diameter aliran (*flow diameter*) 15 ± 1 cm pada pengujian *flow table* mortar. Pada w/b yang lebih tinggi, SP tidak diperlukan dalam campuran. Peningkatan kandungan *fly ash* juga meningkatkan *workability* campuran mortar.

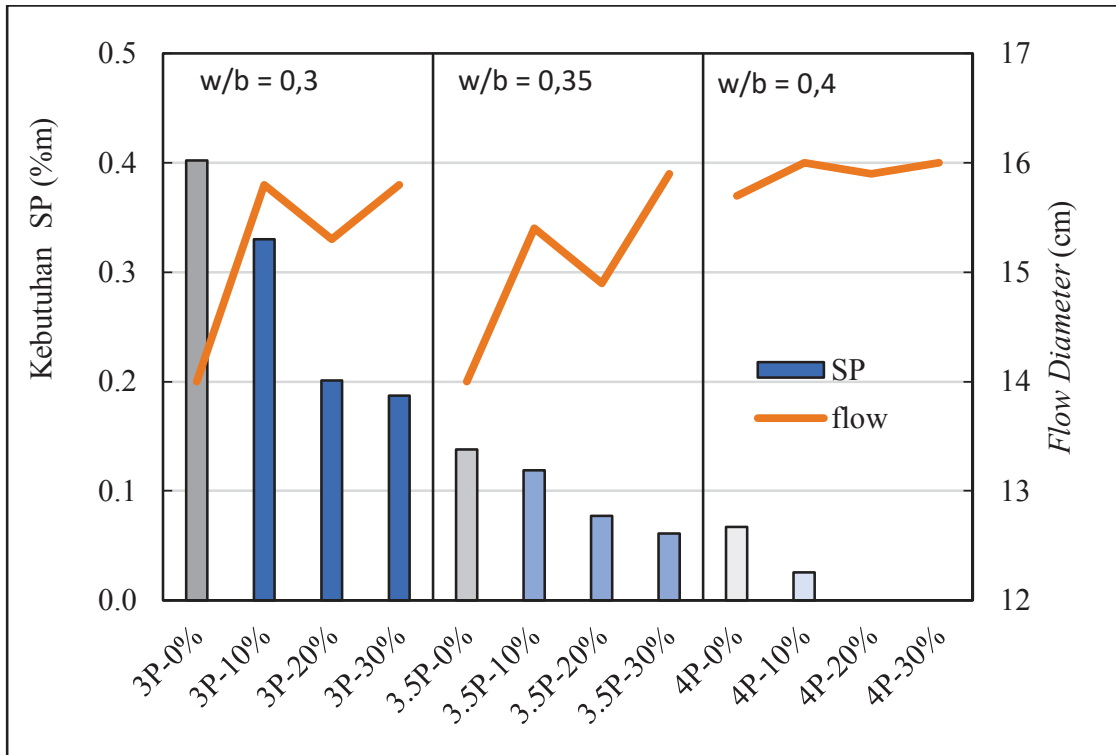
Waktu pengikatan awal campuran mortar ditunjukkan pada Gambar 5.2. Peningkatan waktu pengikatan awal sejalan dengan peningkatan kadar *fly ash* yang digunakan sudah merupakan kondisi yang telah dipahami pada beton pozzolan.

Tabel 5.1. Komposisi campuran mortar pozzolan, HVFA, dan *self-cementing*

Kode	w/b	OPC (g)	<i>Fly ash</i> (g)	Pasir (g)	Air (g)
3P-0%	0,30	1000	0	2000	300
3P-10%		900	100		
3P-20%		800	200		
3P-30%		700	300		
3.5P-0%	0.35	1000	0	2000	350
3.5P-10%		900	100		
3.5P-20%		800	200		
3.5P-30%		700	300		
4P-0%	0,40	1000	0	2000	400
4P-10%		900	100		
4P-20%		800	200		
4P-30%		700	300		
H-40%	0,3	600	400	2000	300
H-50%		500	500		
H-60%		400	600		
H-70%		300	700		
H-80%		200	800		
S-90%	0,3	100	900	2000	300
S-95%		50	950		
S-100%		0	1000		

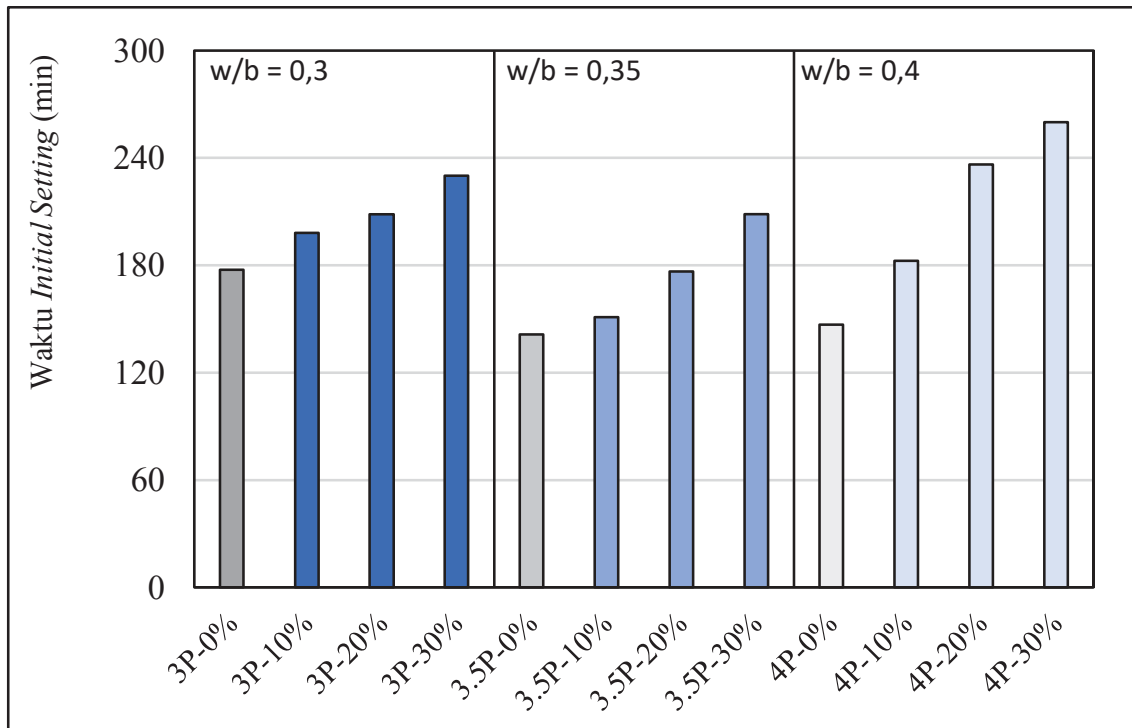
Campuran dengan w/b yang lebih rendah cenderung memiliki waktu pengikatan awal yang lebih singkat. Penggunaan SP untuk meningkatkan *workability* memperpanjang waktu pengikatan awal mortar. Secara keseluruhan, efek perlambatan waktu pengikatan awal *fly ash* dalam mortar pozzolan dapat diterima karena waktu awal terlama dalam campuran 4P-30% adalah sekitar 260 menit. Gambar 5.3 menunjukkan evolusi kenaikan suhu campuran pasta dari mortar pozzolan. Kenaikan suhu berkorelasi baik dengan waktu pengikatan awal campuran mortar.

Peningkatan w/b dalam campuran ternyata menurunkan suhu puncak campuran pasta, tetapi waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu puncak hampir tidak berbeda.

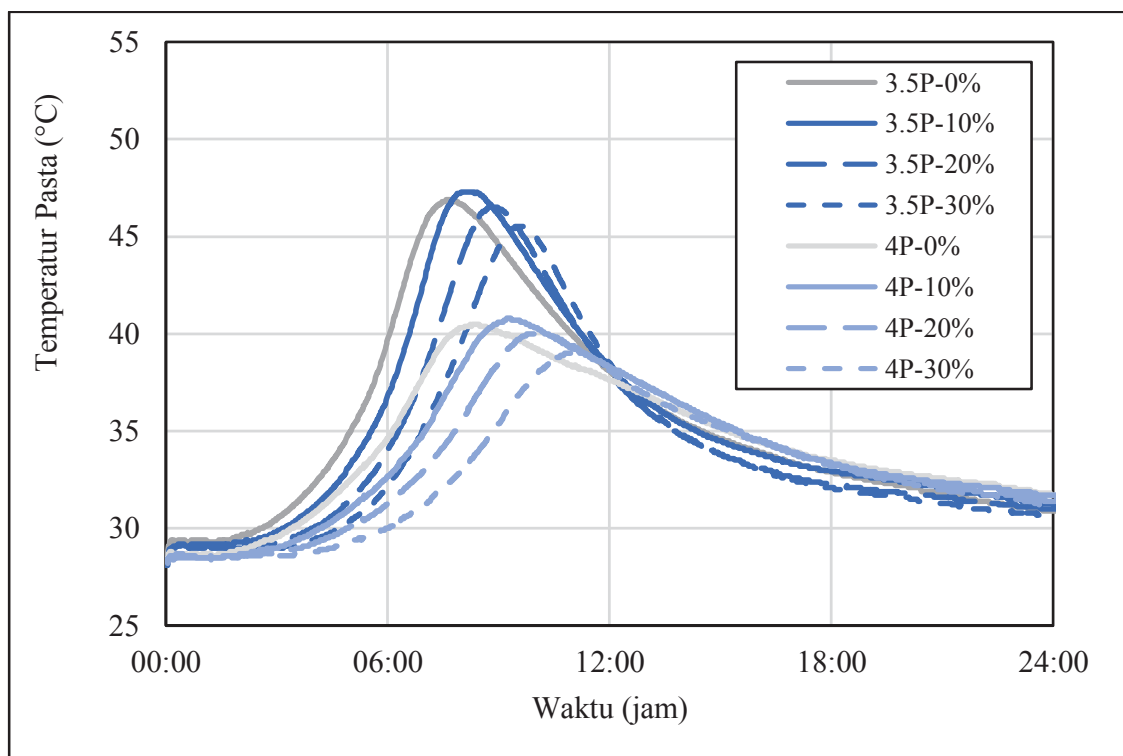


Gambar 5.1. Kebutuhan *superplasticizer* pada mortar pozzolan

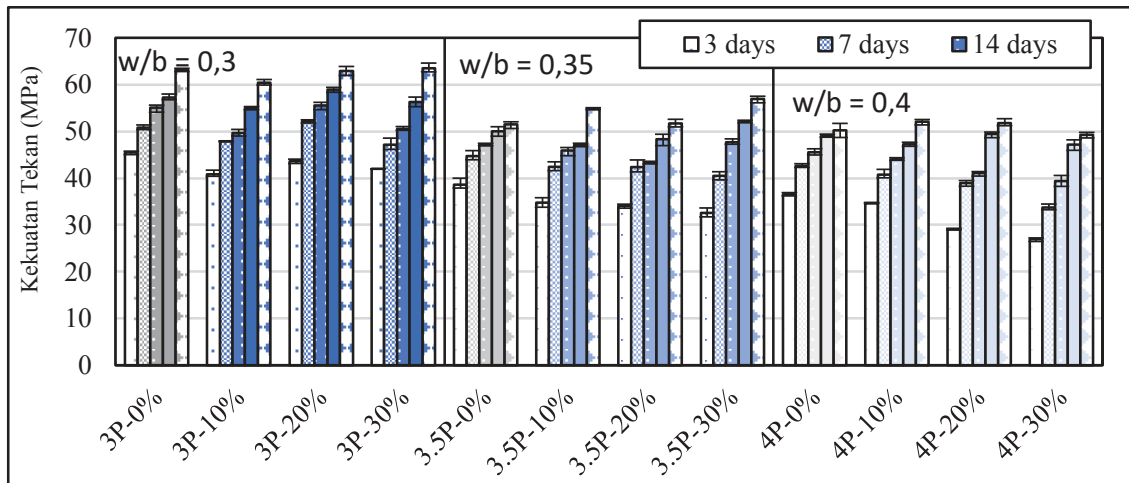
Kuat tekan mortar pozzolan pada berbagai umur ditunjukkan pada Gambar 5.4. Kekuatan mortar terutama dikendalikan oleh w/b campuran. Oleh karena itu, w/b harus ditargetkan serendah mungkin untuk tujuan memperoleh kuat tekan yang lebih baik. Mortar pozzolan berusia 3 hari menunjukkan penurunan kekuatan tekan sejalan dengan meningkatnya kadar *fly ash* yang digunakan. Hasil ini lebih terlihat pada mortar dengan w/b 0,4. Namun, dengan bertambahnya umur, mortar pozzolan mencapai kekuatan yang lebih tinggi, serupa dengan mortar kontrol, yaitu mortar yang tidak menggunakan *fly ash* sama sekali.



Gambar 5.2. Waktu pengikatan awal mortar pozzolan



Gambar 5.3. Evolusi suhu pasta dengan variasi w/b



Gambar 5.4. Kekuatan tekan mortar pozzolan

Tabel 5.2. *Strength Activity Index* (SAI) mortar pozzolan dengan w/b 0,3, 0,35, dan 0,4

Kode	<i>Strength Activity Index</i> (SAI) (%)				
	3hr	7hr	14hr	28hr	56hr
3P-0%	100	100	100	100	100
3P-10%	89,9	94,3	90,2	96,1	95,6
3P-20%	95,8	102,6	100,9	103,0	99,6
3P-30%	92,3	92,8	91,8	98,4	100,6
3.5P-0%	100	100	100	100	100
3.5P-10%	90,0	94,8	97,3	94,2	106,6
3.5P-20%	88,3	94,7	91,8	96,6	100,4
3.5P-30%	84,3	90,6	101,1	104,1	110,6
4P-0%	100	100	100	100	100
4P-10%	94,8	95,6	96,7	96,4	103,7
4P-20%	79,6	91,3	90,2	100,9	103,1
4P-30%	73,7	79,1	86,5	96,3	98,1

Indeks aktivitas kekuatan (*Strength Activity Index* atau SAI) dihitung sebagai persentase rasio kekuatan tekan antara mortar dengan *fly ash*, dibandingkan dengan mortar kontrol, pada usia pengujian yang sama. ASTM C618 menunjukkan bahwa *fly ash* dengan reaktivitas pozzolan

yang dapat diterima harus memiliki SAI lebih tinggi dari 75% untuk kuat tekan 7 dan 28 hari.

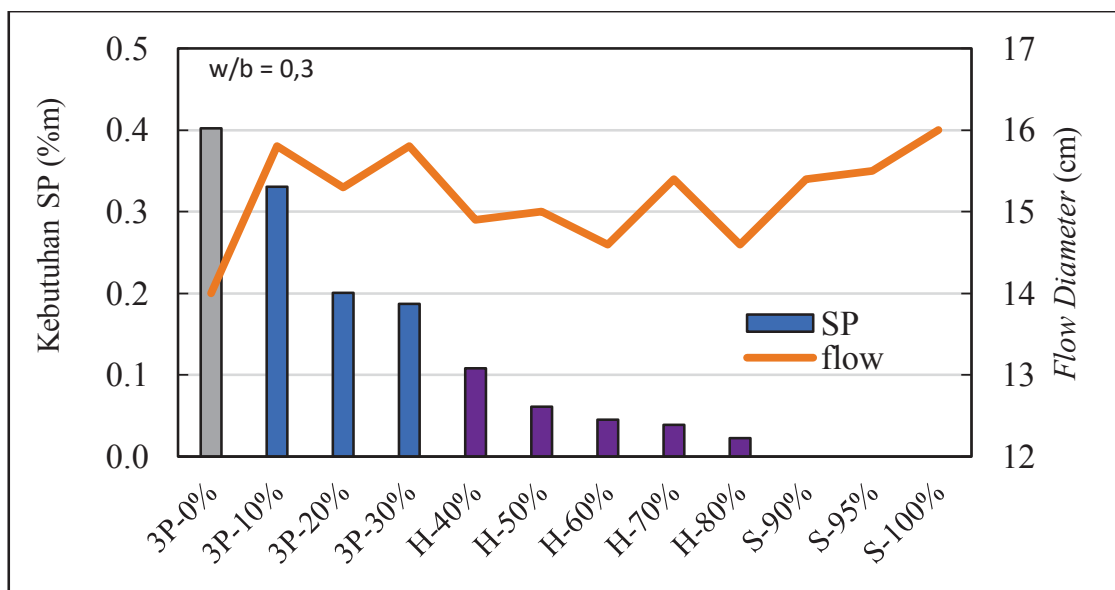
Tabel 5.2 menunjukkan SAI mortar pozzolan dengan berbagai w/b untuk rasio penggantian *fly ash* hingga 30%. Hanya pada mortar dengan kode 4P-30% pada usia 3 hari indeks SAI nya kurang dari 75%. Hasil SAI menunjukkan bahwa seluruh campuran dapat mencapai kuat tekan yang sama atau bahkan lebih tinggi dari mortar kontrol pada umur 7 dan 28 hari dan *fly ash* Pacitan memiliki reaktivitas pozzolan yang baik (ASTM C618, 2019).

-oo0oo-

BAB 6

Mortar *Fly Ash* Volume Tinggi (HVFA) dan *Self-cementing*

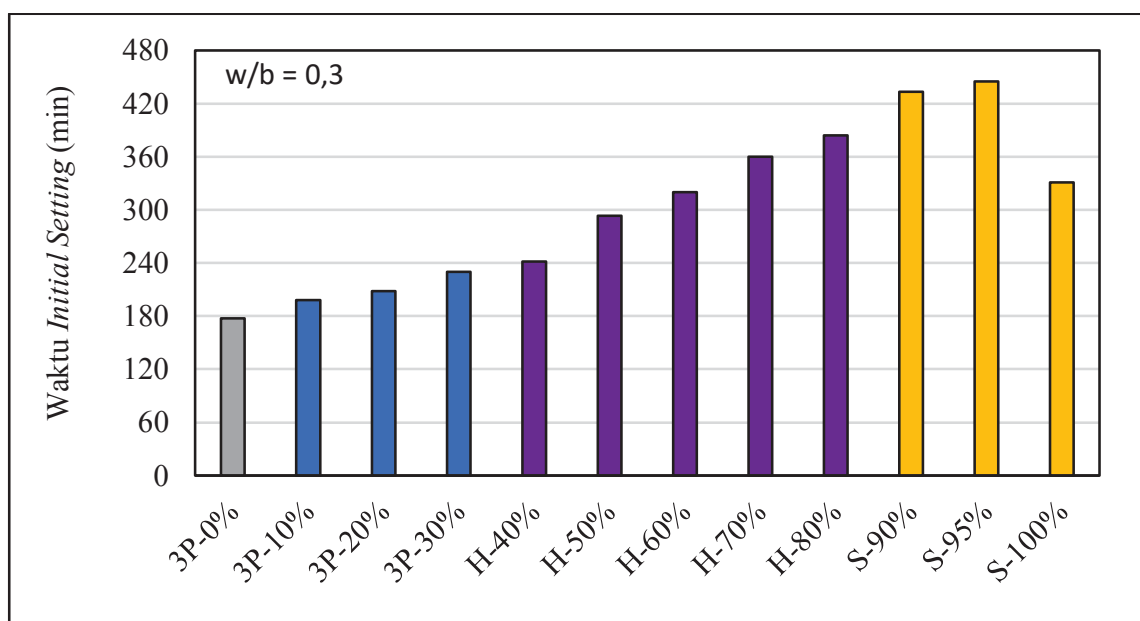
Kebutuhan *superplasticizer* (SP) untuk campuran mortar dengan w/b 0,3 untuk mortar dengan kadar penggunaan *fly ash* antara 0-100% ditunjukkan pada Gambar 6.1. Kandungan *fly ash* yang lebih tinggi dalam campuran meningkatkan kemampuan kerja atau *workability* mortar. Karenanya, kebutuhan SP menurun seiring dengan peningkatan kadar *fly ash* yang digunakan. Hal ini terutama karena partikel *fly ash* memiliki bentuk yang membulat dan ukuran yang lebih kecil dari semen. *Fly ash* dapat tersebar merata ke dalam campuran. Karena potensi zeta mereka (Termkhajornkit & Nawa, 2004), partikel *fly ash* bertindak sebagai dispersan dan mengurangi flokulasi partikel semen.



Gambar 6.1. Kebutuhan *superplasticizer* dari mortar dengan *fly ash* menggantikan OPC

Untuk campuran mortar HVFA, kebutuhan SP kurang dari 0,1%, yang merupakan dosis yang sangat rendah. SP tidak lagi diperlukan untuk mortar *self-cementing*. Diameter aliran (*flow diameter*) yang ditargetkan sebesar 15 ± 1 cm dapat dicapai tanpa memerlukan penambahan *super-plasticizer*.

Gambar 6.2. menunjukkan waktu pengikatan awal mortar-mortar pozzolan, HVFA, dan *self-cementing* pada w/b 0,3. Waktu pengikatan awal yang tertunda diduga karena reaksi *fly ash* yang lambat. Waktu pengikatan awal lebih dari 4 jam diamati terjadi pada mortar HVFA. Waktu pengikatan awal mortar *self-cementing* terjadi lebih dari 7 jam, dengan anomali ditemukan pada mortar 100% *fly ash*. Reaktivitas kalsium oksida dalam campuran tanpa OPC dapat berkontribusi pada waktu pengikatan yang lebih cepat ini. *Fly ash* dengan pH tinggi perlu diamati lebih hati-hati karena dapat dikaitkan dengan potensi terjadinya *flash setting*.



Gambar 6.2. Waktu *initial setting* campuran mortar dengan berbagai variasi kandungan *fly ash* menggantikan OPC

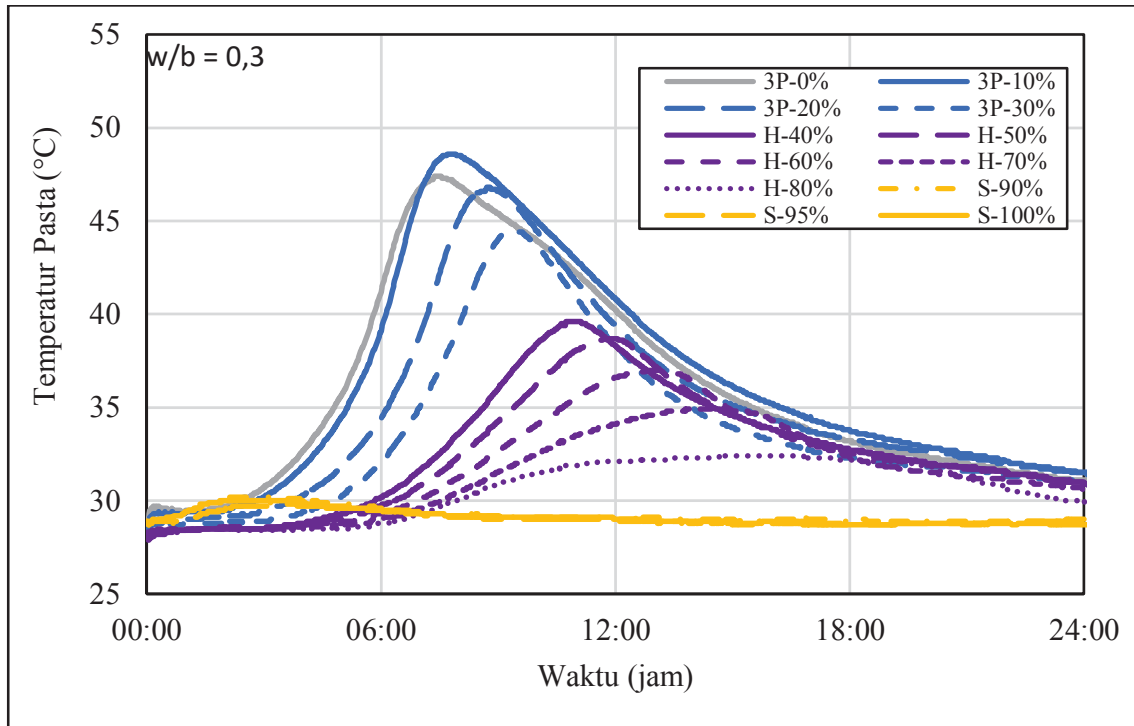
Evolusi suhu pasta dengan w/b 0,3 ditunjukkan pada Gambar 6.3. Semakin besar kadar *fly ash* yang digunakan di dalam campuran, semakin

lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu puncaknya dan semakin rendah kenaikan suhunya. Panas hidrasi dari semen adalah sumber utama reaksi termal. Pasta HVFA menunjukkan puncak yang lebih rendah dibandingkan dengan pasta pozzolan. Dengan kandungan *fly ash* yang lebih banyak dalam campuran, kurva menjadi makin datar. Pasta *self-cementing* hampir tidak menunjukkan peningkatan suhu dan hanya sedikit benjolan di awal. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk campuran dengan kadar *fly ash* > 90%, energi aktivasinya tidak cukup untuk meningkatkan reaktivitas campuran. Tanpa pemanasan, spesimen membutuhkan waktu terlalu lama untuk mengeras. Meskipun spesimen mortar meningkat kekuatannya pada usia lanjut, laju reaksi awal sangat lambat. Oleh karena itu, untuk mortar *self-cementing*, perawatan atau *curing* dilakukan pada suhu tinggi 60°C selama 24 jam.

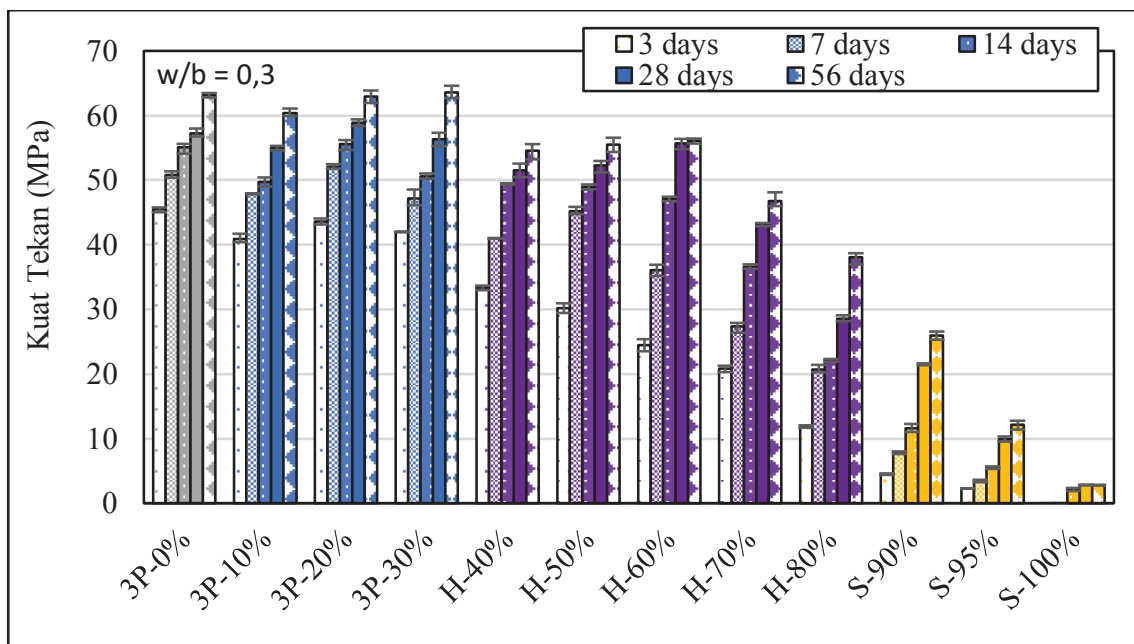
Gambar 6.4. menunjukkan kuat tekan mortar dengan kadar *fly ash* bervariasi antara 0-100% pada w/b 0,3. Kuat tekan awal mortar berkurang sejalan dengan meningkatnya kadar *fly ash* yang digunakan. Namun pengujian pada umur-umur selanjutnya mendapati kekuatannya masih meningkat dan dapat mencapai lebih dari 50 MPa untuk mortar HVFA, sedangkan mortar *self-cementing* dapat mencapai kuat tekan hingga 25 MPa dan 12 Mpa, masing-masing untuk mortar dengan kadar OPC 10% dan 5%. Mortar 100% *fly ash* terbukti memiliki sifat *self-cementing* yang rendah, tetapi masih dapat mengeras dan diuji, dengan kuat tekan 2,7 MPa pada hari ke 5.

Harga SAI mortar ditunjukkan pada Tabel 6.1. Pada rasio penggantian *fly ash* 50%, mortar HVFA masih dapat memenuhi persyaratan 75% untuk kekuatan tekan pada umur 7 dan 28 hari, sedangkan untuk kadar penggantian 60% dan 70% hanya dapat memenuhi ketentuan kekuatan pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa mortar HVFA masih merupakan campuran yang sangat menguntungkan karena *fly ash*

dapat mengurangi kandungan semen dan *superplasticizer* dalam campuran.



Gambar 6.3. Evolusi suhu pasta untuk berbagai rasio penggantian semen.



Gambar 6.4. Kuat tekan mortar pada berbagai rasio penggantian semen

Tabel 6.1. *Strength Activity Index* (SAI) untuk mortar pozzolan, HVFA, dan mortar *self-cementing* pada w/b 0,3

Kode	<i>Strength Activity Index (%)</i>				
	3hr	7hr	14hr	28hr	56hr
3P-0%	100	100	100	100	100
3P-10%	89,9	94,3	90,2	96,1	95,7
3P-20%	95,8	102,6	100,9	103,0	99,6
3P-30%	92,3	92,8	91,8	98,3	100,6
H-40%	73,3	80,7	89,7	90,0	86,4
H-50%	66,4	89,0	88,9	91,3	87,8
H-60%	53,8	71,0	85,5	97,3	88,8
H-70%	45,8	53,9	66,4	75,3	74,0
H-80%	26,1	40,7	40,2	49,9	60,3
S-90%	9,9	15,5	21,1	37,5	41,1
S-95%	5,0	6,9	9,9	17,3	19,2
S-100%	0,0	0,0	3,9	4,9	4,4

Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen dengan kadar > 70% menghasilkan kuat tekan mortar yang rendah dan tidak memenuhi ketentuan SAI. Namun, penggunaan campuran ini untuk aplikasi non-struktural dapat dipertimbangkan. Campuran untuk aplikasi non-struktural atau bahan pengisi dapat memanfaatkan *fly ash* dengan volume sangat tinggi, misalnya untuk material pengisi yang perlu di-bongkar kembali di kemudian hari dengan menggunakan konsep *Controlled Low Strength Material* (CLSM).

-oo0oo-

BAB 7

Mortar Bersistem Pengikat *Fly Ash*–Kalsium Hidroksida (Fa-Ca)

Pengikat dengan sistem *fly ash*–kalsium hidroksida (Fa-Ca) dibuat dengan mereaksikan bubuk *fly ash* dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam bentuk pasta atau dalam bentuk bubuk kering. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ digunakan dengan kadar 30%, 35%, dan 40% dari total kandungan material pengikat. Material selebihnya adalah *fly ash*.

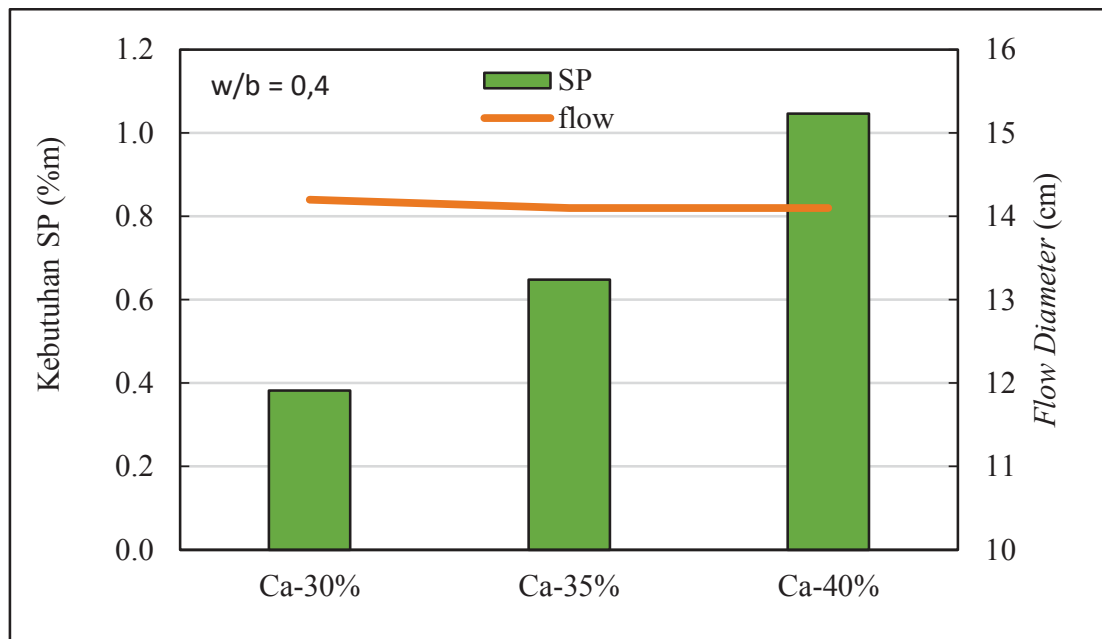
Pengikat Fa-Ca menggunakan w/b 0,4 karena kebutuhan air yang lebih tinggi dari bubuk kalsium hidroksida dalam campuran. Kalsium hidroksida menggantikan *fly ash* dalam campuran mortar, dengan kadar bervariasi 30%, 35%, dan 40%. Komposisi campuran untuk mortar Fa-Ca diuraikan pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1. Proporsi campuran untuk mortar sistem Fa-Ca

Kode	w/b	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (g)	<i>Fly Ash</i> (g)	Pasir (g)	Air (g)
Ca-30%	0.4	300	700	2000	400
Ca-35%		350	650		
Ca-40%		400	600		

Pengikat Fa-Ca dicampur pada w/b 0,4 karena kebutuhan air $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang lebih tinggi dalam campuran. Kebutuhan SP untuk campuran segar untuk mencapai target diameter aliran (*target flow*

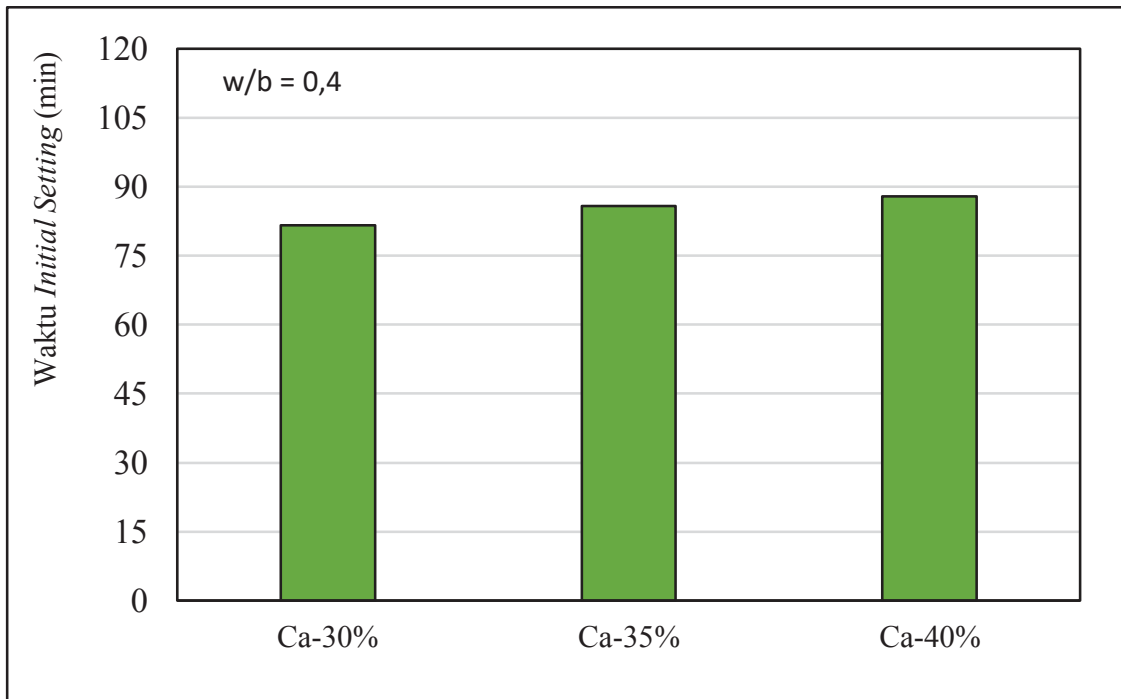
diameter) ditunjukkan pada Gambar 7.1. Meskipun w/b sudah lebih tinggi dibanding mortar pozzolan, kebutuhan SP secara signifikan lebih tinggi dari 0,4% hingga 1% dari kadar massa material pengikat. Kebutuhan SP meningkat sejalan dengan meningkatnya kandungan Ca(OH)_2 .



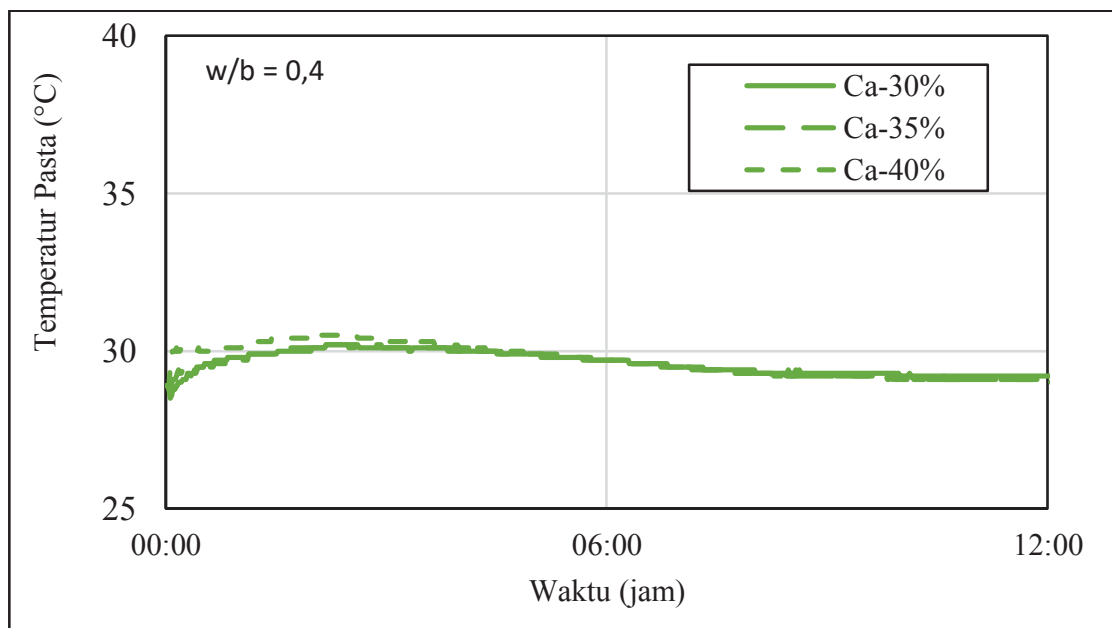
Gambar 7.1. Kebutuhan *superplasticizer* untuk mortar Fa-Ca

Gambar 7.2 menunjukkan bahwa waktu pengikatan awal campuran mortar Fa-Ca hampir konstan, terlepas dari variasi kandungan Ca(OH)_2 . Waktu pengikatan awal yang didapati berkisar 80 menit, menunjukkan waktu pengikatan yang lebih cepat dibandingkan dengan mortar *fly ash* yang telah dibahas sebelumnya. Namun, evolusi suhu pasta Fa-Ca seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.3, menunjukkan peningkatan suhu yang sangat rendah, menunjukkan energi aktivasi yang tidak mencukupi untuk mempercepat reaksi *fly ash* dan kalsium hidroksida.

Spesimen mortar Fa-Ca dimasukkan ke dalam rezim curing termal 60°C selama 24 jam di dalam oven. Tanpa perawatan termal atau pada suhu tinggi, kekuatan usia dini akan rendah dan spesimen tidak dapat dibongkar selama beberapa hari.



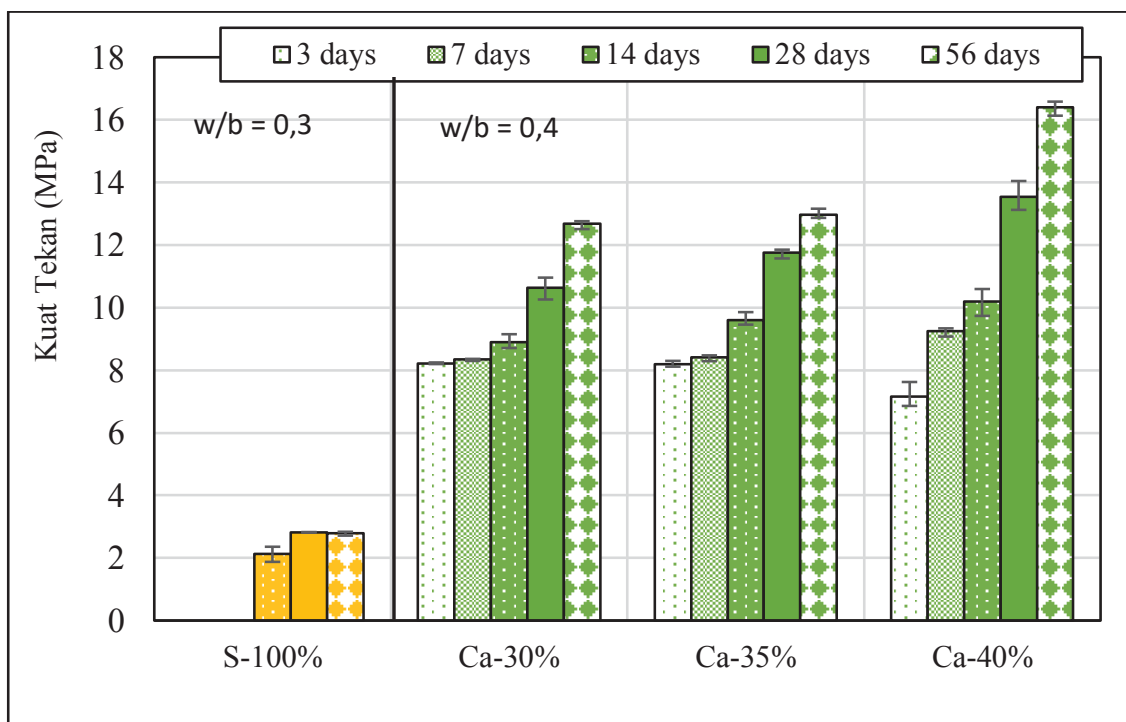
Gambar 7.2. Waktu pengikatan awal mortar Fa-Ca



Gambar 7.3. Evolusi suhu campuran pasta Fa-Ca

Peningkatan kuat tekan mortar Fa-Ca ditunjukkan pada Gambar 7.4. Data peningkatan kekuatan mortar *self-cementing* 100% juga disertakan untuk perbandingan. Penggunaan kalsium hidroksida pada mortar berpengaruh nyata terhadap kuat tekan dibandingkan dengan mortar *fly ash*

100%. Kuat tekan mortar Fa-Ca juga meningkat seiring dengan bertambahnya usia mortar. Pada umur 3 hari dengan kadar Ca-35% dan Ca-40%, mortar menunjukkan hasil kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan Ca-30%. Namun, ditemukan bahwa mortar dengan kadar Ca-35% dan 40% memiliki peningkatan kekuatan jangka panjang yang lebih tinggi, dengan Ca-40% mencapai 16,4 MPa pada umur 56 hari. Hasil ini mengindikasikan bahwa dengan kadar kalsium hidroksida yang lebih tinggi di dalam mortar, lebih banyak CSH yang terbentuk, yang menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Kadar penggantian Ca(OH)_2 antara 30–40% diperkirakan sebagai kadar optimum untuk pengikat Fa-Ca, karena terlalu banyak Ca(OH)_2 dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam campuran dan membutuhkan waktu lama untuk diubah menjadi kalsium karbonat.



Gambar 7.4. Kuat tekan mortar Fa-Ca

-oo0oo-

BAB 8

Pemanfaatan *Fly Ash* dalam Sistem Geopolimer

Geopolimer berbasis *fly ash* telah dipelajari secara ekstensif karena potensinya sebagai pengikat beton berkekuatan tinggi. Proporsi campuran yang digunakan didasarkan pada penelitian-penelitian kami sebelumnya. Larutan sodium hidroksida (NaOH) 8M ditemukan cukup untuk mengaktifkan *fly ash* secara efektif, dan rasio massa larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) terhadap larutan NaOH sekitar 2-3 menghasilkan mortar geopolimer yang stabil.

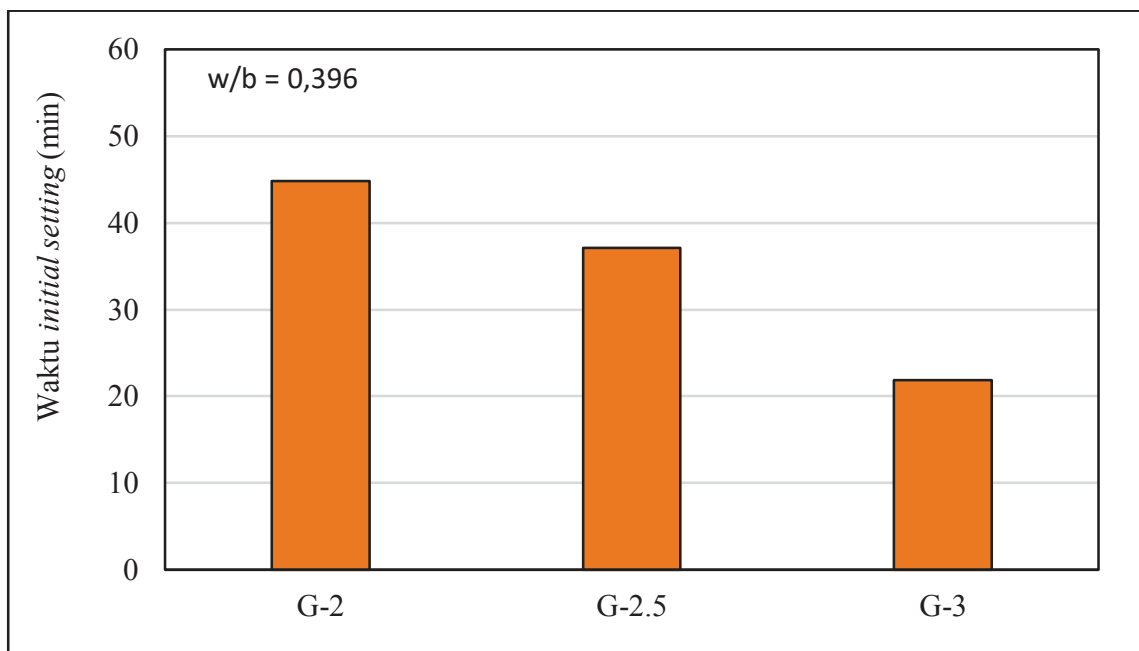
Mortar geopolimer dibuat dengan w/b sekitar 0,4 dengan memperimbangan kandungan air bebas dalam larutan sodium silikat dan larutan sodium hidroksida. Rasio massa larutan natrium silikat dan larutan natrium hidroksida 8M, selanjutnya disebut rasio alkali, ditetapkan bervariasi, sebesar 2, 2,5, dan 3. Tabel 8.1. menjabarkan proporsi campuran mortar geopolimer untuk 1000g *fly ash*.

Tabel 8.1. Proporsi campuran mortar geopolimer

Kode	Rasio Alkali	w/b	[8 M] NaOH (g)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3^*$ (g)	<i>Fly Ash</i> (g)	Pasir (g)	Air (g)
G-2	2		96	320	1000		172
G-2.5	2,5	0,396	96	400	1000	2000	140
G-3	3		96	480	1000		108

* Kadar air bebas dalam sodium silikat sebesar 40%

Gambar 8.1 menunjukkan waktu pengikatan awal mortar geopolimer yang dibuat pada penelitian ini. Rasio massa larutan Na_2SiO terhadap larutan NaOH yang lebih tinggi mengurangi waktu pengikatan awal mortar. Fungsi sodium hidroksida (NaOH) adalah untuk memecah unsur Al dan Si dalam *fly ash* untuk menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Rifaai et al., 2019). Sodium silikat dalam mortar berperan untuk mempercepat reaksi reaksi polimerisasi yang terjadi dan pengaruhnya dapat dilihat dari waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi pengikatan awal (Antoni, Wijaya, et al., 2016; Aupoil et al., 2019).

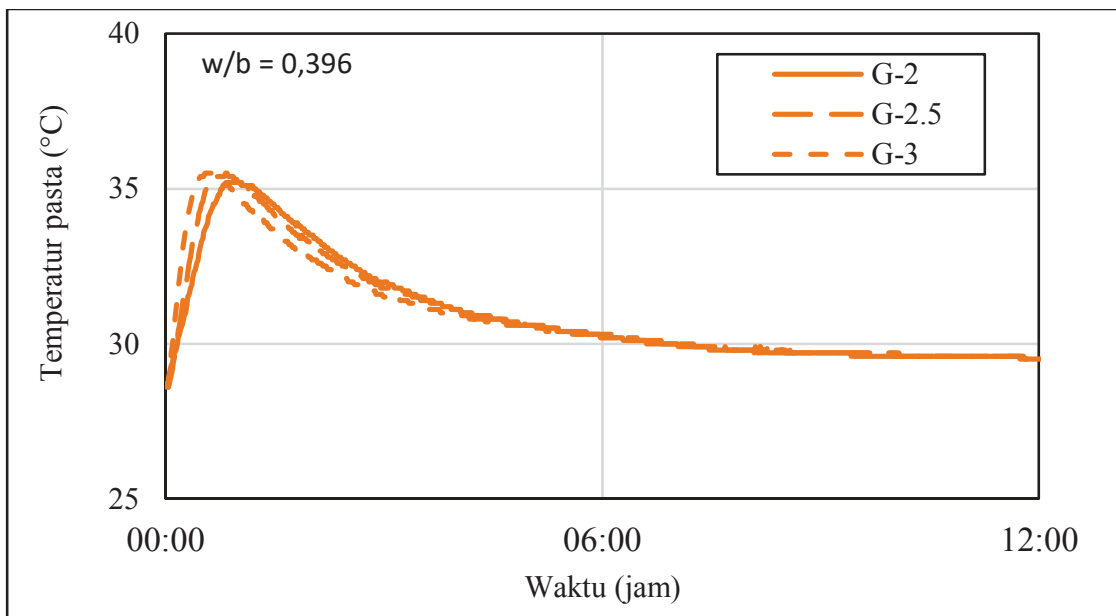


Gambar 8.1. Waktu *initial setting* mortar geopolimer.

Waktu pengikatan awal geopolimer juga sangat berkorelasi dengan kandungan kalsium oksida dalam *fly ash*. Ketika komposisi mortar geopolimer dapat diatur sendiri dengan bebas, tidak tergantung pada komposisi material dasar yang tersedia, kebutuhan akan perawatan termal sangat besar kemungkinannya dapat dihindari, namun perkembangan kekuatan geopolimer bisa lebih lambat.

Pengujian-pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah untuk menyelidiki potensi *fly ash* dari sebuah sumber baru atau belum dikenal luas. Penelitian-penelitian tentang pengaruh variasi *fly ash*, kondisi perawatan, dan komposisi campuran telah banyak dilakukan. Oleh karena itu, perawatan termal dalam suhu tinggi masih diterapkan pada semua spesimen geopolimer dalam penelitian ini.

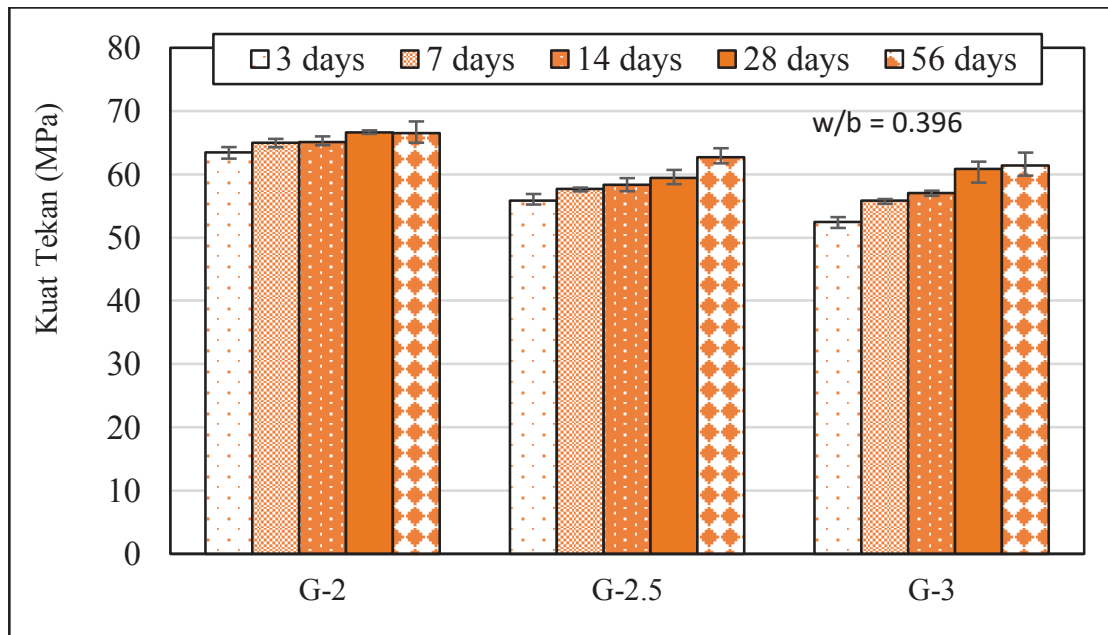
Gambar 8.2. menunjukkan evolusi kenaikan suhu pada campuran pasta geopolimer. Terjadi peningkatan suhu sekitar 7°C untuk ketiga campuran tersebut. Hal ini menunjukkan adanya energi aktivasi *fly ash* untuk mempercepat reaksi geopolimer. Waktu pengikatan awal dan kenaikan suhu campuran geopolimer saling terkait satu sama lain.



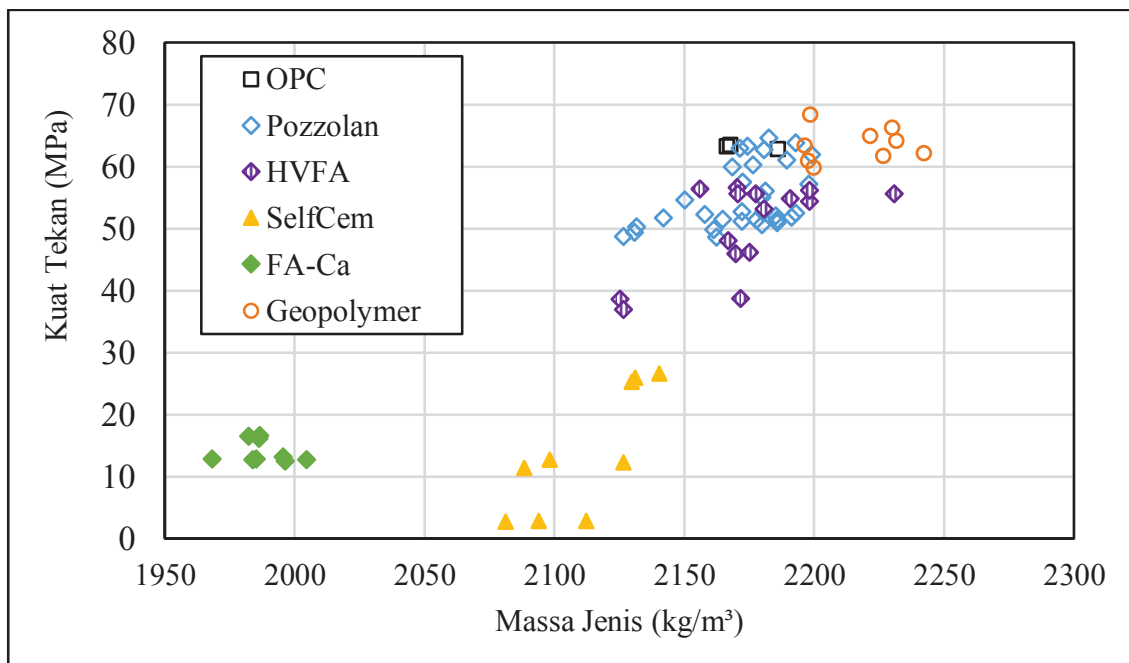
Gambar 8.2. Evolusi suhu pasta geopolimer.

Gambar 8.3. menunjukkan hasil kuat tekan mortar geopolimer. Semua spesimen mortar mencapai kuat tekan 3 hari yang relatif tinggi lebih dari 50 MPa. Ada peningkatan kuat tekan untuk usia lanjut, untuk semua komposisi campuran geopolimer, meskipun peningkatannya tidak tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan kekuatan potensial mortar geopolimer dapat dipercepat secara drastis dengan proses *thermal*

curing. Untuk *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini, berasal dari PLTU Pacitan, rasio massa larutan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH sebesar 2 tampaknya menghasilkan kekuatan tertinggi.



Gambar 8.3. Kuat tekan mortar geopolimer.



Korelasi antara massa jenis atau *bulk density* dan kuat tekan untuk semua mortar ditunjukkan pada Gambar 8.4. Terlihat bahwa sistem pengikat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap massa jenis benda uji mortar dan kuat tekannya. Mortar pozzolan dan HVFA ditemukan memiliki massa jenis yang sama sekitar 2150–2200 kg/m³, dengan massa jenis lebih tinggi pada campuran w/b yang lebih rendah. Mortar Fa-Ca memiliki massa jenis terendah, karena w/b yang lebih tinggi dan berat jenis kalsium hidroksida yang digunakan. Mortar geopolimer terbukti memiliki massa jenis yang relatif lebih tinggi karena sifat pengikat yang berbeda.

-oo0oo-

BAB 9

Kesimpulan dan Tantangan ke Depan

Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengikat pada beton perlu terus dipromosikan. Namun, variasi kualitas dan ketidakpastian sumber *fly ash* dapat menghambat penggunaannya yang lebih luas. Buku ini mendemonstrasikan sebuah model evaluasi untuk menentukan kualitas *fly ash* untuk digunakan sebagai bahan pengikat pada beton, khususnya akan sangat berguna untuk *fly ash* yang berasal dari sumber baru atau yang belum banyak dikenal.

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kualitas *fly ash* tergantung dari sumber pembangkit listrik dan sumber *fly ash*. Potensi *fly ash* untuk dapat digunakan sebagai bahan pengikat dalam sistem pozzolan, HVFA, Fa-Ca, dan geopolimer perlu dipastikan lebih dulu.
2. Variasi kualitas atau karakteristik *fly ash* pada setiap pengiriman merupakan salah satu masalah utama penggunaan *fly ash* dengan kadar yang tinggi. Uji indikator cepat, seperti inspeksi visual, konsistensi normal, pH, prosentase massa yang tertahan pada ayakan 45 m, dapat digunakan sebagai indikator sederhana untuk menentukan konsistensi kualitas *fly ash*.
3. Komposisi fisik dan kimia *fly ash* dari PLTU Pacitan memenuhi standar ASTM C618-2019. Sampel memenuhi syarat sebagai *fly ash*

kelas F dengan kandungan kalsium sedang dan ukuran partikel halus, LOI rendah, SO_3 rendah, dan kebutuhan air rendah. *Fly ash* ini dapat digunakan sebagai pengganti sebagian atau seluruh semen OPC dalam beton.

4. Kadar air, kadar penggantian *fly ash*, kadar kalsium hidroksida dalam pengikat Fa-Ca, dan rasio alkali dalam geopolimer mempengaruhi kuat tekan mortar yang dihasilkan. *Fly ash* juga memiliki reaksi yang lambat, namun masih berlangsung pada umur yang lanjut. Kuat tekan mortar atau beton yang dihasilkan masih meningkat pada umur yang lebih tua.
5. Reaktivitas *fly ash* Pacitan telah dievaluasi secara eksperimental pada beberapa sistem pengikat pada benda uji mortar. Investigasi perlu dilanjutkan pada benda uji beton. Secara keseluruhan, *fly ash* Pacitan dapat digunakan sebagai material pengikat dalam sistem pozzolan, HVFA, dan beton geopolimer dengan hasil yang baik.

-oo0oo-

Daftar Pustaka

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363.
- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261.
- Antoni, A., Purwanto, A. A. T., Suyanto, W. S. P. D., & Hardjito, D. (2020). Fresh and Hardened Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Matrix with High Dosage of Borax. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 44, 535–543. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00330-7>
- Antoni, A., Satria, J., Sugiarto, A., & Hardjito, D. (2017). Effect of variability of fly ash obtained from the same source on the characteristics of geopolymer. *MATEC Web Conferences*, 97(February), 9–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701026>
- Antoni, Gunawan, R., & Hardjito, D. (2015). Rapid indicators in detecting variation of fly ash for making HVFA concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 815, 153–157. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.815.153>
- Antoni, Wibawa, H. S., & Hardjito, D. (2019). Influence of Particle Size Distribution of High Calcium Fly Ash on HVFA Mortar Properties. *Civil Engineering Dimension*, 20(2), 51–56. <https://doi.org/10.9744/CED.20.2.51-56>
- Antoni, Widiyanto, A. K., Wiranegara, J. L., & Hardjito, D. (2017). Consistency of fly ash quality for making high volume fly ash concrete. *Jurnal Teknologi*, 79(7–2), 13–20. <https://doi.org/10.11113/jt.v79.11870>
- Antoni, Wijaya, S. W., & Hardjito, D. (2016a). Compressive strength of geopolymer based on the fly ash variation. *Materials Science Forum*,

841, 98–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.98>

- Antoni, Wijaya, S. W., & Hardjito, D. (2016b). Factors affecting the setting time of fly ash-based geopolymer. *Materials Science Forum*, 841, 90–97. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.90>
- Antoni, Wijaya, S. W., Satria, J., Sugiarto, A., & Hardjito, D. (2016). The use of borax in deterring flash setting of high calcium fly ash based geopolymer. *Materials Science Forum*, 857, 416–420. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.416>
- ASTM C109. (2013). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C187. (2016). *Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0187-16>
- ASTM C403. (2016). *Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0403_C0403M-16
- ASTM C618. (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0618>
- ASTM C778. (2014). *Standard specification for sand* (Vol. 14, pp. 1–3). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0778-13.2>
- ASTM C1437. (2012). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. In *Annual Book of ASTM Standards* (Issue C). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1437-07.2>
- ASTM D5239. (2012). *Standard practice for characterizing fly ash for use in soil stabilization* (Vol. 04). ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/D5239-04.2>
- Aupoil, J., Champenois, J.-B., de Lacaillerie, J.-B. d'Espinose, & Poulesquen, A. (2019). Interplay between silicate and hydroxide ions during geopolymerization. *Cement and Concrete Research*, 115, 426–432.
- Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.008>

- Biernacki, J. J., Williams, P. J., & Stutzman, P. E. (2001). Kinetics of reaction of calcium hydroxide and fly ash. *ACI Materials Journal*, 98(4), 340–349.
- 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.
- Cornot-Gandolphe, S. (2017). *Indonesia's electricity demand and the coal sector: export or meet domestic demand?*. The Oxford Institute for Energy Studies.
- Cross, D., Stephens, J., & Vollmer, J. (2005). Structural Applications of 100 Percent Fly Ash Concrete. *World of Coal Ash Conference*.
- Do, T. M., Kang, G.-O., & Kim, Y. (2019). Development of a new cementless binder for controlled low strength material (CLSM) using entirely by-products. *Construction and Building Materials*, 206, 576–589.
- Edwards, G. A. S. (2019). Coal and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(5), e607.
- Ekaputri, J. J., & Bari, M. S. al. (2020). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/mkts.v26i2.30762>
- Fauzi, A., Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., & Abdullah, M. M. A. B. (2016). Study of fly ash characterization as a cementitious material. *Procedia Engineering*, 148, 487–493.
- Feng, X., & Clark, B. (2011). Evaluation of the physical and chemical properties of fly ash products for use in Portland cement concrete. *World of Coal Ash (WOCA) Conference, 2011*, 1–8.
- Gotti, E., Oleson, J. P., Bottalico, L., Brandon, C., Cucitore, R., & Hohlfelder, R. L. (2008). A comparison of the chemical and engineering characteristics of ancient Roman hydraulic concrete with a modern reproduction of Vitruvian hydraulic concrete. *Archaeometry*, 50(4), 576–590.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). Factors influencing the compressive strength of fly ash-based

- geopolymer concrete. *Civil Engineering Dimension*, 6(2), 88–93. <https://doi.org/10.9744/ced.6.2.pp.88-93>
- Hlaváček, P., Šulc, R., Šmilauer, V., Rößler, C., & Snop, R. (2018). Ternary binder made of CFBC fly ash, conventional fly ash, and calcium hydroxide: Phase and strength evolution. *Cement and Concrete Composites*, 90, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.020>
- Hoyos-Montilla, A. A., Puertas, F., & Tobón, J. I. (2018). Microcalorimetric study of the effect of calcium hydroxide and temperature on the alkaline activation of coal fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2395–2410.
- Huang, C. H., Lin, S. K., Chang, C. S., & Chen, H. J. (2013). Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Construction and Building Materials*, 46, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016>
- Luxán, M. P. de, De Rojas, M. I. S., & Frías, M. (1989). Investigations on the fly ash-calcium hydroxide reactions. *Cement and Concrete Research*, 19(1), 69–80.
- Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of soil with self-cementing coal ashes. *World of Coal Ash (WOCA)*, 1–7.
- Mustafa, M., Bakri, A., Mohammed, H., Kamarudin, H., Niza, I. K., Zarina, Y., Bakri, M. Al, & Mohammed, H. (2011). Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(1), 1–4.
- National Energy Council. (2019). *Indonesia Energy Outlook 2019*. Secretariat General National Energy Council, Indonesia.
- Ordóñez, J. A., Jakob, M., Steckel, J. C., & Fünfgeld, A. (2021). Coal, power and coal-powered politics in Indonesia. *Environmental Science & Policy*, 123(April), 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.007>
- Rashad, A. M. (2015). A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2), 278–306. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2015.10.002>

- Rifaai, Y., Yahia, A., Mostafa, A., Aggoun, S., & Kadri, E.-H. (2019). Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. *Construction and Building Materials*, 223, 583–594.
- Rivera, F., Martínez, P., Castro, J., & López, M. (2015). Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 63, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001>
- Roskos, C., Cross, D., Berry, M., & Stephens, J. (2011). Identification and Verification of Self-Cementing Fly Ash Binders for “Green” Concrete. *2011 World of Coal Ash (WOCA) Conference*.
- Shaikh, F. U. A., Supit, S. W. M., & Sarker, P. K. (2014). A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes. *Materials and Design*, 60, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.025>
- Siddique, S., & Jang, J. G. (2020). Effect of CFBC ash as partial replacement of PCC ash in alkali-activated material. *Construction and Building Materials*, 244, 118383.
- Termkhajornkit, P., & Nawa, T. (2004). The fluidity of fly ash-cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1017–1024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.017>
- Wang, Z., & Song, Y. (2016). Adsorption properties of CFBC ash – cement pastes as compared with PCC fly ash – cement pastes. *International Journal of Coal Science & Technology*, 3(1), 62–67. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0103-8>
- Wattimena, O. K., Antoni, & Hardjito, D. (2017). A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer. *AIP Conference Proceedings*, 1887. <https://doi.org/10.1063/1.5003524>
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, 105–121.

Biodata Penulis

Prof. Antoni, S.T., M.Eng., Ph.D.

Dosen tetap di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra (UK Petra), Surabaya, sejak tahun 2005, meraih gelar profesor di tahun 2021. Gelar Sarjana diperoleh di UK Petra tahun 1998, M.Eng di Asian Institute of Technology, Thailand, pada tahun 2001 dan Ph.D. dari Universitas Hokkaido, Jepang pada tahun 2004. Minat penelitiannya meliputi beton kinerja tinggi, pemanfaatan bahan limbah dalam beton, daya tahan bahan beton dan perbaikan dan retrofit struktur beton.

Florentcia Hartono, S.T.

Alumnus Prodi Teknik Sipil UK Petra, Surabaya, lulus tahun 2021. Tugas akhirnya di bidang teknologi beton dilakukan di bawah bimbingan Prof. Antoni dan Prof. Djwantoro Hardjito. Saat ini Florentcia tengah menempuh studi lanjut S2 di Program Studi Magister Teknik Sipil, UK Petra.

Steven Tanuwijaya, S.T.

Alumnus Prodi Teknik Sipil UK Petra, Surabaya, lulus tahun 2021. Tugas akhirnya di bidang teknologi beton dilakukan di bawah bimbingan Prof. Antoni dan Prof. Djwantoro Hardjito.

Kevin Wijaya, S.T.

Alumnus Prodi Teknik Sipil UK Petra, Surabaya, lulus tahun 2021. Tugas akhirnya di bidang teknologi beton dilakukan di bawah bimbingan Prof. Antoni dan Prof. Djwantoro Hardjito. Saat ini Kevin tengah menempuh studi lanjut S2 di Program Studi Magister Teknik Sipil, UK Petra.

Prof. Ir. Djwantoro Hardjito, M.Eng., Ph.D.

Dosen tetap di Program Studi Teknik Sipil, UK Petra, Surabaya, sejak tahun 2010, meraih gelar profesor di tahun 2013. Gelar Sarjana diperoleh di UK Petra tahun 1985. Gelar Master diperoleh di Asian Institute of Technology (AIT), Thailand, dengan beasiswa Japan-ADB Scholarship Program, sedang gelar doktornya diperoleh dari Curtin University, Australia, dengan beasiswa Australian Development Scholarship (ADS). Minat risetnya di bidang pemanfaatan limbah sebagai material konstruksi, beton berkinerja tinggi dan beton geopolimer.

INVESTIGASI POTENSI *FLY ASH* DARI PLTU BARU ATAU BELUM DIKENAL SEBAGAI MATERIAL PENGIKAT PADA BETON

Studi Kasus PLTU Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur

Monografi ini berisikan hasil investigasi secara komprehensif potensi limbah abu terbang atau *fly ash* yang berasal dari sebuah sumber yang tergolong baru atau belum dikenal, untuk dimanfaatkan sebagai material pengikat. Dalam hal ini, sumber yang dimaksud adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Sudimoro, Pacitan, Jawa Timur. Secara umum, ketersediaan limbah *fly ash* di Indonesia yang sangat melimpah masih belum diimbangi dengan pemanfaatannya. Hingga tahun 2021, pemanfaatan limbah *fly ash* di Indonesia hanya berkisar pada 11% saja, sangat rendah dibanding banyak negara besar lainnya. Peraturan Pemerintah (PP) nomor 22 tahun 2021 telah mengeluarkan *fly ash* dari daftar limbah B3, membuka lebar peluang pemanfaatan *fly ash* secara luas, khususnya di industri konstruksi. Pemanfaatan *fly ash* secara luas bermanfaat ganda, selain mendaur ulang limbah, juga sekaligus berpotensi mengurangi kebutuhan semen Portland.



PETRA PRESS

Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM)
Universitas Kristen Petra

Jl. Siwalankerto No. 121-131, Surabaya 60236
Telp. 031-2983130, Fax. 031-2983111
<http://lppm.petra.ac.id>

ISBN 978-602-5446-97-9

