



ARTIKEL PENELITIAN

Pengaruh penambahan *fly ash* PLTU Cirebon dan temperatur pengeringan terhadap kuat tekan material konstruksi beton *high volume fly ash (HFVA)*

Ferian Anggara^{1,2,*}, Vincent Sutresno Hadi Sujoto^{2,3}, I Wayan Christ Widhi Herman Tangkas³, Widi Astuti⁴, Slamet Sumardi⁴, Ilham Satria Raditya Putra⁵, Agik Dwika Putra⁵, Himawan Tri Bayu Murti Petrus^{2,3}

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55283, Indonesia

²Unconventional Geo-resources Research Center, Fakultas Teknik, UGM, Jl. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, Indonesia

³Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Jl Grafika No. 2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55283, Indonesia

⁴BRIN Lampung, Jl. Ir. Sutami, Serdang, Kec. Tj. Bintang, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung, 35361, Indonesia

⁵PT.Cirebon Electric Power, Jl. Raya Cirebon – Tegal Km. 8.5, Kanci Kulon, Astanajapura, Cirebon, 45181, Indonesia

Disubmit 19 September 2022; direvisi 09 November 2022; diterima 10 November 2022



OBJECTIVES The use of coal as an energy source in developing countries such as Indonesia is still the main choice. The results of coal combustion in Steam Power Plants (PLTU) in the form of fly ash and bottom ash (FABA) will continue to increase as coal consumption increases as energy increases. The cement industry can produce 2.9 billion tons of CO₂ into the atmosphere, this will have a direct impact on the increase in earth's temperature and global warming. Substitution of cement material with fly ash is an environmentally friendly option in minimizing CO₂ gas. **METHODS** The manufacture of concrete begins by mixing fly ash and cement at various ratios (1:1; 1:3; 1:4) with water. Slowly add water while stirring to form a paste. Concrete paste that has been printed on a concrete cube measuring 5x5x5 cm³. The HVFA paste mold was left for 1 day, then dried (cured) at various temperatures (30, 40 and 60 °C). **RESULTS** The results of the analysis of the chemical components showed that fly ash from PLTU Cirebon is classified as class C fly ash with CaO content of more than 10% and SiO₂ of less than 46% and the highest compressive strength of HVFA that can be produced by HVFA concrete. is at the ratio of cement and fly ash composition 1:3 with a drying tem-

perature of 40 °C. **CONCLUSIONS** Fly ash material is able to turn on cement by 75% of the requirement for HVFA concrete with a concrete strength of 12,557 MPa at 40°C drying conditions. The optimization results show that the drying temperature is the most influential variable on the compressive strength of the resulting concrete.

KEYWORDS cement; compressive strength; curing; fly ash; HVFA

TUJUAN Penggunaan batubara sebagai sumber energi di negara berkembang seperti Indonesia masih menjadi pilihan utama. Hasil samping pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) akan terus meningkat seiring konsumsi batubara sebagai energi meningkat. Industri semen dapat menghasilkan 2,9 miliar ton CO₂ ke atmosfer hal ini akan berdampak langsung terhadap kenaikan temperatur bumi dan pemanasan global. Substitusi material semen dengan *fly ash* menjadi sebuah pilihan yang ramah lingkungan dalam meminimalisir gas CO₂. **METODE** Pembuatan beton dimulai dengan mencampurkan *fly ash* dan semen pada berbagai rasio (1:1; 1:3; 1:4) dengan air. Air dituang secara bertahap sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga membentuk pasta. Pasta beton yang telah terbentuk dicetak pada cetakan kubus ukuran 5x5x5 cm³. Cetakan pasta HVFA dibiarkan selama 1 hari, kemudian dikeringkan (*curing*) pada temperatur yang divariasikan (30, 40 dan 60 °C). **HASIL** Hasil Analisa oksida komponen kimia menunjukkan bahwa *fly ash* dari PLTU Cirebon tergolong kategori *fly ash* kelas C dengan kadar CaO lebih dari 10% dan SiO₂ kurang dari 46% dan Kekuatan beton (*compressive strength*) HVFA yang paling besar yang dapat dihasilkan beton HVFA adalah pada rasio komposisi semen dan *fly ash* 1:3 dengan temperatur pengeringan 40 °C. **KESIMPULAN** material *fly ash* mampu menggantikan semen sebesar 75% dari kebutuhan beton HVFA dengan kekuatan beton mencapai 12,557 MPa pada kondisi pengeringan 40°C. Hasil optimasi menun-

*Korespondensi: ferian@ugm.ac.id

jukan variable yang paling berpengaruh terhadap kuat tekan beton yang dihasilkan adalah temperatur pengeringan.

KATA KUNCI *fly ash*; HVFA; kuat tekan; pengeringan; semen

1. PENDAHULUAN

Penelitian terkait energi terbarukan telah banyak dilakukan tetapi penggunaan batu bara masih menjadi primadona sebagai sumber energi di Indonesia (Hartono dkk. 2017; Petrus dkk. 2016; Qurrahman dkk. 2021; Sujoto dkk. 2022; Zhang dkk. 2015). Batubara utamanya digunakan sebagai bahan bakar untuk mengasilkan uap di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Batubara tetap akan menjadi sumber energi di negara berkembang seperti Indonesia karena infrastruktur yang sudah mapan, rantai pasok yang kuat dan biaya operasi yang ekonomis (Petrus dkk. 2022). Hasil samping pembakaran batu bara berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) akan terus meningkat seiring dengan peningkatan kapasitas energi listrik nasional menjadi 35.000 MW hingga tahun 2030 (ESDM 2015). Pembangunan PLTU akan terus diakselerasi hingga 2025 dengan komposisi bauran energi untuk pembangkit listrik dari batu bara direncanakan mencapai 56,97% dari total pembangkit listrik yang akan dibangun. Pemanfaatan batu bara akan terus meningkat dan sektor pembangkitan listrik menjadi konsumen utama dari batubara yang diproduksi (Anindhita dkk. 2015).

Menurut Direktur Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), jumlah *fly ash* batubara yang dihasilkan oleh PLTU mencapai 8.31 juta ton di tahun 2019. *Fly ash* batubara mengandung silika, alumina, dan beberapa logam seperti besi, titanium, magnesium, mangan, nikel, krom, merkuri, arsenic, dan tembaga. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, *fly ash* dan *Bottom ash* batubara PLTU tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3. Sehingga pemanfaatan FABA PLTU akan semakin berkembang dan dapat meningkatkan nilai tambah dari aktivitas yang dilakukan di PLTU. *Fly ash batubara* dapat dimanfaatkan sebagai material konstruksi atau pengambilan Logam Tanah Jarang (LTJ) (Besari dkk. 2022; Manurung dkk. 2020; Prihutami dkk. 2021; Rivera dkk. 2015). Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai beton *High Volume Fly Ash* (HVFA), bata ringan, batako, *paving block* dan keramik. *Fly ash* sering digunakan sebagai filler dan material pozzolan maupun sebagai bahan substitusi semen (15-35% dari berat semen) (Lianasari dan Aji 2017). Semen Portland menjadi material utama dalam pembangunan infrastruktur. Semen Portland diprediksikan hanya akan dapat memenuhi 67.42% dari total kebutuhan pada tahun 2030. Bahan bersifat semen atau bahan pozzolan menjadi opsi untuk mereduksi kebutuhan semen portland 20-30% dari kebutuhan normal, namun tetap saja hal itu hanya mampu mengubah ke angka pemenuhan 83.29% kebutuhan (Petrus dkk. 2021). Bahan pozzolan memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi sehingga dapat bereaksi dengan sisa hidrasi semen portland yaitu CaO untuk menghasilkan gel C-S-H sekunder sebagai bahan pengikat tambahan. Komposisi kimia semen Portland adalah CaO, SiO₂ dan Al₂O₃ (Tabel 1) yang saing berikatan menyusun 4 komponen mineral utama semen yaitu, *Tricalcium silicate* (3CaO.SiO₂), *Dicalcium silicate* (2CaO.SiO₂), *Tricalcium*

TABEL 1. Komposisi kimia semen portland (Herbudiman dan Taufik Akbar 2015)

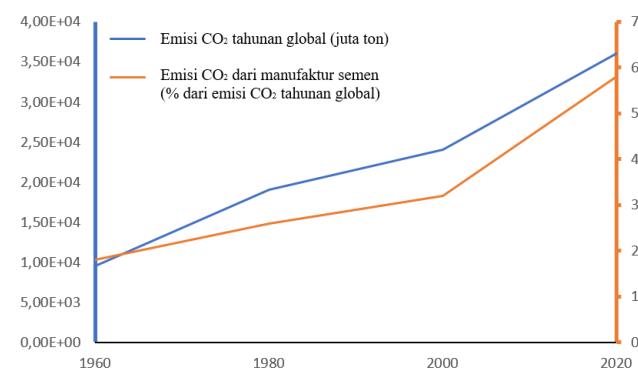
Komposisi kimia	% berat
SiO ₂	20,2
Al ₂ O ₃	4,9
Fe ₂ O ₃	2,8
CaO	63,9
MgO	2,0
SO ₃	2,4
Loss on ignition (LOI)	2,4

aluminate (3CaO.Al₂O₃), dan *Tetracalcium aluminoferrite* (12 CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) (Shaikh dan Supit 2015).

Dalam produksinya, semen portland menyebabkan pemanasan global yang disebabkan oleh karbon dioksida yang dihasilkan dari pemanasan CaCO₃ dengan jumlah mencapai 2.9 miliar ton dan akan terus meningkat apabila tidak ada alternatif lain yang lebih ramah lingkungan dalam pembuatan beton (Adelizar dkk. 2020). Berikut Pada Gambar 1. ditampilkan peningkatan jumlah CO₂ total dan CO₂ yang dihasilkan dari proses pembuatan semen Portland, semakin meningkatnya produksi semen tiap tahunnya akan meningkatkan emsisi CO₂ global tiap tahun dan akan berkontribusi langsung terhadap pemanasan global.

Persoalan peningkatan CO₂ secara global selalu dibahas di tingkat dunia mulai dari konvensi Kyoto hingga COP-22 dalam rangka merangkul kesepakatan Paris membatasi kenaikan temperatur global di bawah 2 °C, sehingga perlu adanya material pengganti semen yang lebih baik dalam upaya meminimalisir terbentuknya CO₂ (Rida dan Alaoui 2022). Secara prinsip penggunaan produk samping industry seperti *fly ash* batubara dan *slag sand* dapat menjadi substitusi material pengganti semen karena memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi (Mocharla dkk. 2022).

Fly ash memiliki beberapa keunggulan sebagai material pengganti semen. Keunggulan material konstruksi HVFA yang menggunakan *fly ash* antara lain *durabilitas*, *workability*, serta kuat tekan pada umur yang lebih baik dari beton normal (Lianasari dan Aji 2017). Tabel 2 menampilkan beton HVFA telah dimanfaatkan pada beberapa bangunan di dunia sejak lama (Herbudiman dan Taufik Akbar 2015). Beton *High volume fly ash* (HVFA) terbuat dari *fly ash* dengan kadar tinggi lebih dari 50% dari massa material yang digunakan pada beton (Yoshitake dkk. 2013).



GAMBAR 1. Hubungan antara emisi karbondioksida terhadap produksi semen portland sepanjang tahun (Addassi dan Danmarks Tekniske Universitet. DTU Byg 2018).

TABEL 2. Bangunan memakai high volume fly ash concrete (Herbudiman dan Taufik Akbar 2015).

Nama Bangunan	Jumlah Fly Ash (Kg/m ³)	Jumlah Semen (Kg/m ³)	Mutu Beton (MPa)	Kadar Fly Ash (%)
Concrete blok untuk satelit komunikasi di Ottawa, Kanada (1987)	193	151	46 (91 hari)	56
Landasan parker di kompleks hotel dan perkantoran, Haliux, Canada (1988)	220	180	50 (120 hari)	55
Tempat kerja pekerja seni, Vancouver, Canada (2001)	195	195	41 (28 hari)	50
Peningkatan struktur tahan gempa Barker Hall University of California Berkeley, USA (2001)	197	160	38 (28 hari)	55
Pekerjaan jalan beton, Punjab, India (2002)	225	225	41 (28 hari)	50

Semen secara umum dikategorikan menjadi dua yaitu; (1) semen tinggi kalsium dan (2) semen rendah kalsium (Pacheco-Torgal dkk. 2015). Pada semen tinggi kalsium unsur utama penyusun semen adalah material yang kaya silikon dan kalsium seperti *silica slag* ($\text{SiO}_2 + \text{CaO} > 70\%$) dan *fly ash* tipe C ($\text{CaO} > 10\%$), produk reaksi utama dari semen tinggi kalsium adalah C-A-S-H (*Calcium silicate hydrate*) gel sedangkan hasil samping berupa *portlandite*, *ettringite*, dan *calcium sulfomonoaluminate* (Adelizar dkk. 2020; Petrus dkk. 2020; Prihutami dkk. 2022). Sedangkan untuk semen rendah kalsium akan menghasilkan produk reaksi N-A-S-H (*Alkalline aluminosilicate hydrate*) gel dengan hasil samping *hydroxysodalite*, *zeolite P*, *Na-Chabazite*, *zeolite Y*, dan *faujasite*. Hasil samping masing-masing reaksi dapat terjadi akibat komposisi awal material penyusun, tipe dan konsentrasi aktivator, kondisi temperatur dan pH pengeringan (Pacheco-Torgal dkk. 2015).

Penelitian tentang beton HVFA menunjukkan hasil bahwa *fly ash* mampu mensubstitusi penggunaan semen hingga 80% kebutuhan semen untuk menghasilkan beton dengan kekuatan yang sama dengan 100% penggunaan semen total. Sampai saat ini penelitian mengenai substitusi semen menggunakan *fly ash* masih terus dilakukan dan fokus penelitian pada mekanikal struktur beton, komposisi kimia, dan mekanisme hidrasi (Mocharla dkk. 2022; Pu dkk. 2022; Shaikh dan Supit 2015; Shen dkk. 2022; Sindhunata dkk. 2006). Pada penelitian ini akan dilihat korelasi antara komposisi semen dan *fly ash* batubara PLTU Cirebon serta temperatur pengeringan terhadap kuat tekan (*compressive strength*) yang dihasilkan beton HVFA.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Persiapan bahan baku dan karakterisasi bahan baku

Pada penelitian ini digunakan *Fly ash* dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Cirebon. Tahap awal yang dilakukan adalah pengeringan *fly ash*. Kemudian *fly ash* yang sudah kering diayak dengan *sieve* -200 mesh untuk memberikan *fly ash* dengan ukuran yang lebih seragam. Sampel *fly ash* dengan ukuran lolos 200 mesh diambil kemudian dilakukan karakterisasi dengan menggunakan analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komponen oksida sampel dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur kristalin sampel. Sedangkan semen yang digunakan merupakan semen berjenis *Portland* yang juga melalui proses yang sama dengan *fly ash* untuk memberikan ukuran lebih homogen dengan *fly ash*.

2.2 Pembuatan beton HVFA

Pembuatan beton dimulai dengan mencampurkan *fly ash* dan semen pada berbagai variasi rasio semen; *fly ash* (1:1; 1:3; 1:4) dengan air sebanyak 50 ml. Air dituang secara perlahan yang dilakukan bersamaan dengan diaduk hingga membentuk pasta. Pasta beton yang telah terbentuk dicetak pada cetakan kubus ukuran 5x5x5 cm³. Cetakan pasta HVFA ditingkatkan selama 1 hari, kemudian dikeringkan (*curing*) pada temperatur yang divariasikan (30, 40 dan 60 °C).

2.3 Uji tekan sampel beton

Pengukuran uji tekan beton dilakukan setelah melalui proses *curing* selama kurang lebih 28 hari. Pengukuran diawali dengan pengukuran dimensi dan berat beton. Setelah dilakukan pengujian maka akan dilakukan uji tekan dengan menggunakan *Universal Testing Machine Avery-Denison*.

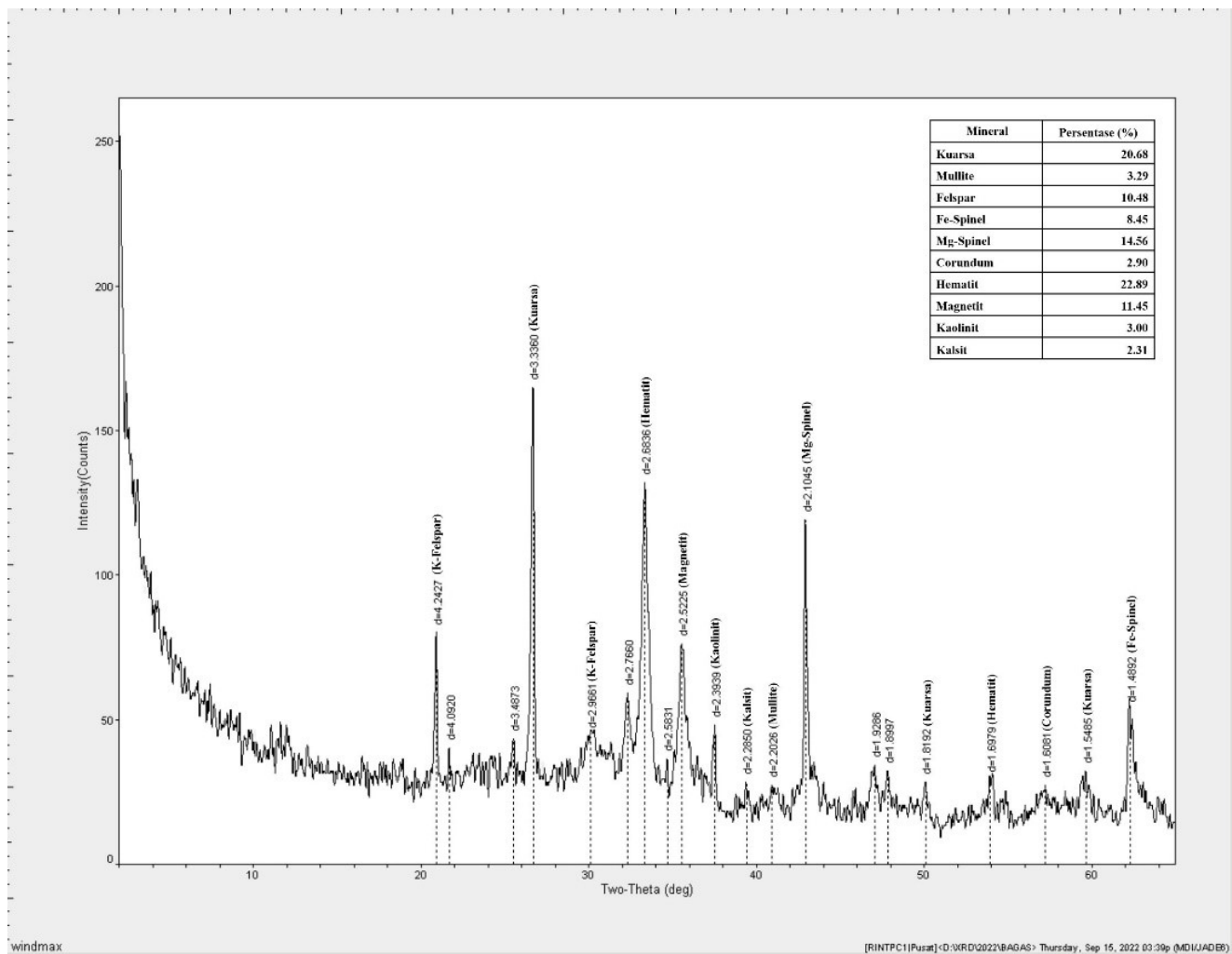
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi *fly ash* PLTU Cirebon

Untuk mengetahui karakter dari *fly ash* yang digunakan, maka dilakukan beberapa analisa seperti analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) yang ditampilkan pada Gambar 2 dan hasil analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang ditampilkan pada Tabel 3. Berdasarkan kedua jenis analisa dapat terlihat bahwa komponen utama penyusun *fly ash* adalah SiO_2 , CaO dan Fe_2O_3 . *Fly ash* dari PLTU Cirebon dapat dikategorikan ke dalam kategori *fly ash* kelas C dengan kadar CaO lebih dari 10% dan SiO_2 kurang dari 46% (Hemalatha & Ramaswamy, 2017). Kadar kalsium yang tinggi dalam *fly ash* dapat menghasilkan reaksi yang cepat sehingga mampu memberikan kekuatan yang baik di usia awal beton (Hemalatha dan Ramaswamy 2017).

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal serta kandungan mineral dari *fly ash*. Hasil XRD menunjukkan adanya puncak difraksi pada beberapa sudut 2θ : 20,60 °; 26,5 °; 35,5 °; 50,5 °; dan 65 ° dengan intensitas relatif tinggi dibanding dengan sudut-sudut yang lain. Puncak difraksi hasil XRD menunjukkan kemiripan dengan puncak data base pada analisis Match, yaitu pada sudut 2θ : 20,74 °; 26,41 °; 49,67 ° dan 59,55 °. Puncak difraksi menunjukkan adanya kandungan utama *fly ash* murni berupa mineral berlinite (AlO_4P). Berdasarkan data hasil penghalusan menunjukkan bahwa berlinite (AlO_4P) memiliki struktur kristal heksagonal dengan parameter kisi $a=b=4,94140 \text{ \AA}$ dan $c=10,94700 \text{ \AA}$.

Pengaruh kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 di dalam adonan beton akan sangat mempengaruhi nilai *compressive strength* yang dihasilkan dari beton HVFA sehingga perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam *fly ash* batubara menjadi faktor yang sa-



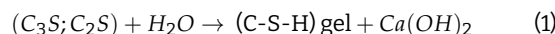
GAMBAR 2. Hasil analisa XRD fly ash PLTU Cirebon.

ngat penting di dalam pembuatan beton HVFA. Berdasarkan data XRF yang diperoleh diketahui bahwa perbandingan SiO₂/Al₂O₃ dalam fly ash batubara PLTU Cirebon adalah 2,498 dan hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh *Silva dkk. (2007)*. Pada penelitian tersebut ditunjukkan bahwa perbandingan SiO₂/Al₂O₃ yang akan memberikan nilai *compressive strength* terbesar berada pada rentang 2,4-3,8 (*Silva dkk. 2007*). *Fernández-Jiménez dkk. (2006)* juga melakukan penelitian terkait HVFA yang menunjukkan bahwa kandungan alumina sebanyak 20% dalam fly ash akan meningkatkan kekuatan tekan pada beton karena berperan pada awal pembentukan Al-O-Si pada gel (*Fernández-Jiménez dkk. 2006*).

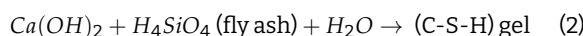
3.2 Kuat tekan beton HVFA

Pembuatan beton HVFA dipengaruhi oleh reaksi hidrasi semen. Hidrasi semen merupakan proses di mana air ditambahkan ke bubuk semen untuk membuat gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) (Reaksi Kimia (1)). Sebagai hasil dari reaksi hidrasi semen, gugus hidroksil tertentu, yaitu kalsium hidrok-

sida, dibebaskan (*Yun dkk. 2021*).



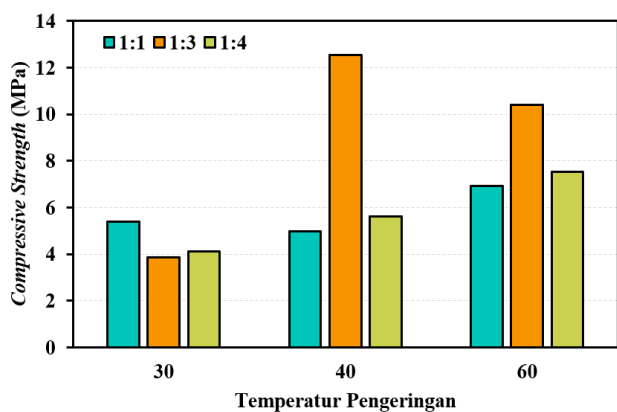
Kalsium hidroksida diproduksi selama proses hidrasi semen karena adanya air, yang dapat berfungsi sebagai aktivator untuk reaksi pozzolan dari fly ash. Reaksi pozzolan dari fly ash menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang mengontrol karakteristik semen dari beton (Reaksi Kimia (2)) (*Yun dkk. 2021*).



Salah satu karakteristik yang terpengaruh adalah kekuatan tekan dari beton HVFA. Setelah melakukan uji tekan, maka diperoleh nilai kuat tekan dari beton HVFA pada berbagai variasi temperaur pengeringan dan rasio semen:fly ash seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai kuat tekan (*Compressive strength*) tertinggi beton HVFA dihasilkan pada kon-

TABEL 3. Hasil analisa XRF sampel fly ash PLTU Cirebon.

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
1,02%	10,21%	9,42%	23,54%	0,09%	2,22%	0,004%	1,04%	27,30%	25,7%



GAMBAR 3. Compressive strength beton HVFA dengan berbagai variasi rasio semen:fly ash.

disi rasio komposisi semen dan fly ash sebesar 1:3 dengan temperatur pengeringan 40 °C. Artinya pada kondisi rasio 1:3 material fly ash telah mampu menggantikan 75% kebutuhan semen Portland dengan memberikan kekuatan beton yang paling tinggi. Selain itu juga terjadi fenomena p-enurunan kuat tekan beton pada rasio semen:fly ash = 1:4. Fenomena tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Silva dkk. (2007) terkait kandungan alumina yang berlebih juga dapat mempercepat kondensasi alumannate dan silikat serta terbentuknya kristal (lebih banyak zeolite dibandingkan gel) yang berakibat menurunkan kekuatan beton HVFA (Silva dkk. 2007).

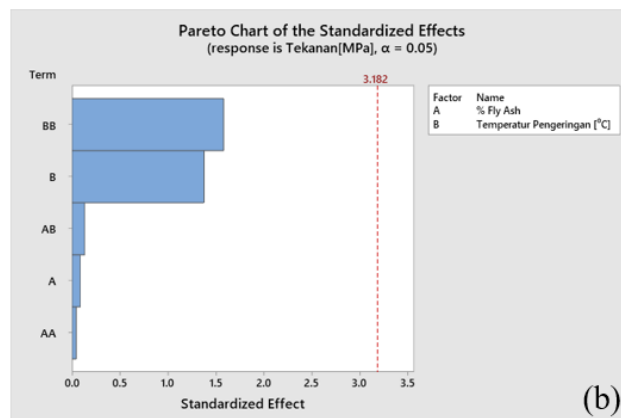
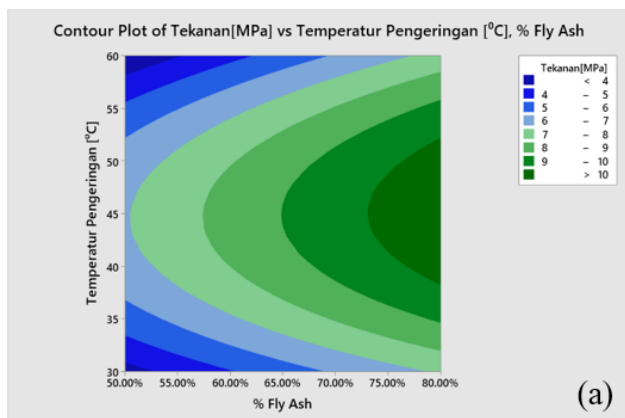
Selain itu faktor lain yang memegang peranan penting di dalam peningkatan kekuatan tekan beton HVFA adalah temperatur pengeringan karena berdampak pada reaksi hidrasi semen dan fly ash. Gambar 3 menunjukkan bahwa kondisi pengeringan beton HVFA pada temperatur 40 °C memberikan kuat tekan paling tinggi yaitu mencapai lebih dari 12 MPa. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Narmuluk dan Nawa (2011) yang melaporkan bahwa pada temperatur kurang dari 35 °C pada tingkatan substitusi semen tertentu mempercepat hidrasi semen diakibatkan efek "pengenceran (dilution)". Namun pada temperatur pengeringan yang lebih tinggi dari 50 °C, tingkatan substitusi semen dengan fly ash reaksi hidrasi terhambat akibat terjadi persaingan antara material pozzolan (fly ash) dengan semen dalam mengkonsumsi air untuk menghasilkan produk beton (Narmuluk dan

Nawa 2011). Upaya pencampuran semen dengan material pozzolan seperti fly ash dapat memberikan efek positif terhadap derajat hidrasi dari semen (Lawrence dkk. 2003). Secara umum tingkat hidrasi semen meningkat seiring peningkatan rasio air terhadap semen (w/c) dan penambahan fly ash dapat memberikan peningkatan rasio air terhadap semen (w/c) yang lebih baik. Sehingga penambahan fly ash pada tingkatan efektif dalam semen akan menambah kekuatan dari produk beton yang dihasilkan.

Berdasarkan SNI 03-0691-1996, beton HVFA pada kondisi optimum yang memiliki kualitas setara dengan paving block mutu C dimana nilai kuat tekannya dapat mencapai lebih dari 12 MPa atau setara dengan baku mutu paving block K153 hingga K184. Jika hasil uji kuat tekan beton pada kondisi optimum dibandingkan dengan penelitian lain yang sudah dilakukan, maka dapat dilihat bahwa kuat tekan dari HVFA yang diperoleh selama penelitian dapat dikatakan tinggi karena pada penelitian yang dilakukan oleh Rida dan Alaoui (2022) dapat mencapai kuat tekan 39 MPa (Rida dan Alaoui 2022). Sedangkan pada penelitian ini tanpa ada nya penambahan pasir kuat tekan beton yang dihasilkan sudah mencapai lebih dari 12 MPa. Sehingga diperkirakan dengan penambahan pasir pada adonan sampel penelitian ini dapat melebihi penelitian yang dilakukan oleh Rida dan Alaoui (2022).

3.3 Optimasi kuat tekan beton HVFA

Analisa Optimasi kuat tekan (compressive strength) dilakukan untuk menentukan titik optimal kuat tekan yang dihasilkan akibat penambahan fly ash dan temperatur pengeringan. Metode Responses Surface Methodology (RSM) adalah metode yang umum digunakan dalam untuk mengoptimalkan kondisi operasi dari variabel faktor (independent variable) dan respon (dependent variable) kemudian menghubungkannya dalam bentuk model matematika (Breig dan Luti 2021). Pada penelitian ini digunakan software minitab untuk membantu menentukan titik optimal kuat tekan beton HVFA yang dihasilkan terhadap rasio semen dan fly ash serta temperatur pengeringan beton. Pada penelitian ini, rasio semen dan fly ash serta waktu pengeringan berperan sebagai variabel faktor. Sedangkan kuat tekan (compressive strength) berperan sebagai variabel response seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4a dan 4b. pada Gambar 4a terlihat respons kontur beton HVFA yang memberikan kuat tekan terbesar berada di sekitar area penambahan >75% fly



GAMBAR 4. Kontur plot RSM (a), parreto chart (b).

ash dengan waktu pengeringan antara 35-50 °C. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh rasio semen:fly ash dan temperatur pengeringan beton yang cukup signifikan terhadap kuat tekan beton yang dihasilkan.

Pernyataan di atas diperkuat dengan adanya diagram pareto pada Gambar 4(b). Gambar 4(b) menunjukkan bahwa kedua variabel faktor memiliki pengaruh di dalam reaksi pembuatan beton HVFA. Akan tetapi jika dilihat dari panjang diagram batang pada Gambar 4(b), maka dapat terlihat jelas bahwa temperatur pengeringan memberikan dampak yang lebih signifikan dibandingkan rasio semen: fly ash. Pengaruh variabel faktor dengan respon pada penelitian ini dapat dirumuskan ke dalam sebuah persamaan yang menghubungkan parameter rasio semen:fly ash dan temperatur pengeringan terhadap kuat tekan beton HVFA seperti ditunjukkan pada persamaan 3. Sebagai catatan bahwa persamaan (3) lebih efektif untuk campuran dengan perbandingan rasio semen:fly ash 1:2 hingga 1:4 dengan temperatur pengeringan hingga mencapai 60 °C.

$$CS = -32,1 + 19A + 1,366B - 8AA - 0,01577BB + 0,076AB \quad (3)$$

Keterangan:

1. CS = Compressive strength (MPa)
2. A = Penambahan Fly ash (%)
3. B = Temperatur Pengeringan (°C)

4. KESIMPULAN

Penelitian terkait pembuatan beton HVFA telah berhasil dilakukan dengan membuat campuran beton dengan basis semen dan fly ash batubara dari PLTU Cirebon. Hasil analisa komponen kimia menunjukkan bahwa fly ash dari PLTU Cirebon tergolong kategori fly ash kelas C dengan kadar CaO lebih dari 10% dan SiO₂ kurang dari 46%. Selain itu, Material fly ash yang digunakan mampu menggantikan semen hingga mencapai 75% dari kebutuhan total pembuatan campuran beton HVFA dengan kekuatan beton mencapai lebih dari 12 MPa pada kondisi temperaur pengeringan terbaik yaitu 40 °C. Hasil optimasi dengan menggunakan pendekatan statistik menunjukkan variabel temperatur pengeringan memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap kuat tekan beton HVFA yang dilakukan. Akan tetapi, pengaruh penambahan fly ash di dalam campuran beton juga memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap pembuatan beton.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan Universitas Gadjah Mada dan kerjasama Divisi Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung dan PT. Cirebon Electric Power.

DAFTAR PUSTAKA

- Addassi M, Danmarks Tekniske Universitet DTU Byg. 2018. Transport in concrete with new CO₂-reduced cements: reactive transport model for durability estimations: Ph.D. thesis. [[Doctoral thesis]]: doi:10.13140/RG.2.2.29764.48006.
- Adelizar AS, Olvianas M, Adythia DM, Syafiyurrahman MF, Pratama IG, Astuti W, Petrus HT. 2020. Fly Ash and Bottom Ash Utilization as Geopolymer: Correlation on Compressive Strength and Degree of Polymerization Observed using FTIR. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 742(1):1. doi:10.1088/1757-899X/742/1/012042.
- Anindhita F, Pengkajian B, Teknologi P, Sugiyono A, Boedoyo MS. 2015. Evaluation of Renewable Energy Policies in Indonesia View project Energy System Optimization View project. Available: www.bppt.go.id. www.bppt.go.id.
- Besari DAA, Anggara F, Rosita W, Petrus HT. 2022. Characterization and mode of occurrence of rare earth elements and yttrium in fly and bottom ash from coal-fired power plants in Java, Indonesia. International Journal of Coal Science and Technology. 9(1):1. doi:10.1007/s40789-022-00476-2.
- Breig SJM, Luti KJK. 2021. Response surface methodology: A review on its applications and challenges in microbial cultures. Materials Today: Proceedings. 42:2277-2284. doi:10.1016/j.matpr.2020.12.316.
- ESDM. 2015. Kementerian ESDM RI - Media Center - Arsip Berita - Peluncuran Program Pembangunan Pembangkit 35.000 MW.
- Fernández-Jiménez A, Palomo A, Sobrados I, Sanz J. 2006. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous and Mesoporous Materials. 91(1-3):111-119. doi:10.1016/j.micromeso.2005.11.015.
- Hartono M, Astrayudha MA, Petrus HTBM, Budhijanto W, Sulisty H. 2017. Lithium recovery of spent lithium-ion battery using bioleaching from local sources microorganism. Rasayan Journal of Chemistry. doi:10.7324/RJC.2017.1031767.
- Hemalatha T, Ramaswamy A. 2017. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. Journal of Cleaner Production. 147:546-559. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.114.
- Herbudiman B, Taufik Akbar D. 2015. Kajian Korelasi Rasio Air-Powder dan Kadar Abu Terbang Terhadap Kinerja Beton HVFA. Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil. 9(9):7-8.
- Lawrence P, Cyr M, Ringot E. 2003. Mineral admixtures in mortars: Effect of inert materials on short-term hydration. Cement and Concrete Research. 33(12):1939-1947. doi:10.1016/S0008-8846(03)00183-2.
- Lianasari E, Aji C. 2017. Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kinerja Beton HVFA.
- Manurung H, Rosita W, Bendiyasa IM, Prasetya A, Anggara F, Astuti W, Djuanda DR, Petrus HTBM. 2020. Recovery of Rare Earth Elements and Yttrium from non-Magnetic Coal Fly Ash using Acetic Acid Solution. Metal Indonesia. 42(1):35. doi:10.32423/jmi.2020.v42.35-42. http://jurnalmetal.or.id/jmi/article/view/187.
- Mocharla IR, Selvam R, Govindaraj V, Muthu M. 2022. Performance and life-cycle assessment of high-volume fly ash concrete mixes containing steel slag sand. Construction and Building Materials. 341. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127814.
- Narmluk M, Nawa T. 2011. Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. Cement and Concrete Research. 41(6):579-589. doi:10.1016/j.cemconres.2011.02.005.

- Pacheco-Torgal F, Labricha JA, Leonelli C, Palomo A, Chindapasirt P. 2015. Handbook of Alkali-activated Cement, Mortars and Concretes. volume 1 edition. Woodhead Publishing.
- Petrus HTBM, Fairuz FI, Sa'dan N, Olvianas M, Astuti W, Jenie SN, Setiawan FA, Anggara F, Ekaputri JJ, Bendiyasa IM. 2021. Green geopolymer cement with dry activator from geothermal sludge and sodium hydroxide. *Journal of Cleaner Production*. 293. doi:[10.1016/j.jclepro.2021.126143](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126143).
- Petrus HTBM, Olvianas M, Shafiyurrahman MF, Pratama IGA-AN, Jenie SNA, Astuti W, Nurpratama MI, Ekaputri JJ, Anggara F. 2022. Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study. doi:[10.3390/gels8040233](https://doi.org/10.3390/gels8040233).
- Petrus HTBM, Olvianas M, Suprapta W, Setiawan FA, Prasetya A, Sutijan, Anggara F. 2020. Cenospheres characterization from Indonesian coal-fired power plant fly ash and their potential utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8(5):104116. doi:[10.1016/j.jece.2020.104116](https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104116).
- Petrus HTBM, Rhamdani AR, Putera ADP, Warmada IW, Yuliansyad AT, Perdana I. 2016. Kinetics study of carbon raiser on the reduction of nickel laterite from Pomalaa, Southeast Sulawesi. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 162(1):012019. doi:[10.1088/1757-899X/162/1/012019](https://doi.org/10.1088/1757-899X/162/1/012019).
- Prihutami P, Prasetya A, Sediawan WB, Petrus HTBM, Anggara F. 2021. Study on Rare Earth Elements Leaching from Magnetic Coal Fly Ash by Citric Acid. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 7(3):1241-1253. doi:[10.1007/s40831-021-00414-7](https://doi.org/10.1007/s40831-021-00414-7).
- Prihutami P, Sediawan WB, Prasetya A, Petrus HTBM. 2022. A product diffusion model for the extraction of cerium and yttrium from magnetic coal fly ash using citric acid solution. *International Journal of Technology*. 13(4):921. doi:[10.14716/ijtech.v13i4.4826](https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i4.4826).
- Pu S, Zhu Z, Song W, Huo W, Zhang C. 2022. A eco-friendly acid fly ash geopolymer with a higher strength. *Construction and Building Materials*. 335. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2022.127450](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127450).
- Qurrahman AH, Wilopo W, Susanto SP, Petrus HTBM. 2021. Energy and exergy analysis of Dieng geothermal power plant. *International Journal of Technology*. 12(1):175. doi:[10.14716/ijtech.v12i1.4218](https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i1.4218).
- Rida L, Alaoui AH. 2022. Effect of high volume fly ash and curing temperature on delayed ettringite formation. *Materials Today: Proceedings*. 58:1285-1293. doi:[10.1016/j.matpr.2022.02.110](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.110).
- 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. doi:[10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.08.001).
- Shaikh FU, Supit SW. 2015. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*. 82:192-205. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068).
- Shen W, Zhang Z, Li J, Li Z, Wang Z, Cao L, Rong G, Wu M, Zhao D, Zhao Z. 2022. Experimental investigation on the high-volume fly ash ecological self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*. 1051:105163. doi:[10.1016/j.jobe.2022.105163](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105163).
- Silva PD, Sagoé-Crenstil K, Sirivivatnanon V. 2007. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*. 37(4):512-518. doi:[10.1016/j.cemconres.2007.01.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003).
- Sindhunata, Van Deventer JS, Lukey GC, Xu H. 2006. Effect of curing temperature and silicate concentration on fly-ash-based geopolymerization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 45(10):3559-3568. doi:[10.1021/ie051251p](https://doi.org/10.1021/ie051251p).
- Sujoto VSH, Sutijan, Astuti W, Sumardi S, Louis ISY, Petrus HTBM. 2022. Effect of operating conditions on lithium recovery from synthetic geothermal brine using electro dialysis method. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 8(1):274-287. doi:[10.1007/s40831-021-00488-3](https://doi.org/10.1007/s40831-021-00488-3).
- Yoshitake I, Komure H, Nassif AY, Fukumoto S. 2013. Tensile properties of high volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate. *Construction and Building Materials*. 49:101-109. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020).
- Yun CM, Ngu C, Liing K. 2021. Compressive Strength of High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete as a Function of Lime Water and Curing Time. *Research Square*:1-21.
- Zhang K, Johnson L, Vara Prasad P, Pei Z, Wang D. 2015. Big bluestem as a bioenergy crop: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52:740-756. doi:[10.1016/j.rser.2015.07.144](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.144).