

Beton Hijau Menggunakan *Fly ash* sebagai Substitusi Parsial Semen

Muhammad Ramdhan Ollii^{*1}, Azhar A. Wahab², Ilyas Ichsan³,
Rahman Abdul Djau⁴, Sartan Nento⁵

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo
Jl. A.A. Wahab, No. 247, Limboto, Gorontalo

Submitted : 25, Agustus, 2022;

Accepted: 16, Februari, 2023

Abstrak

Perkembangan infrastruktur berbanding lurus dengan tingkat kebutuhan akan semen sebagai bahan utama dalam konstruksi bangunan. Industri semen menghasilkan 8-10% dari total emisi CO₂ dunia. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan alternatif atau penggantian sebagian material beton hijau sehingga meminimalkan dampak lingkungan dari pembuatan beton dan meningkatkan kekuatan beton, salah satunya adalah *fly ash*. *Fly ash* dapat digunakan bersama dengan semen portland dalam beton yang berkontribusi terhadap sifat-sifat beton melalui aktivitas hidrolik atau pozzolan, atau keduanya. Hasil pengujian kuat tekan karakteristik beton dengan substitusi parsial semen dengan variasi *fly ash* (9%, 9.5%, 10%, dan 10.5%) pada umur 28 hari adalah masing-masing 36.70 Mpa, 35.11 Mpa, 33.37 Mpa, dan 30.38 Mpa. Kuat tekan beton meningkat sebesar 5% pada variasi *fly ash* sebesar 9% dan 9.5% dan menurun sebesar 13% pada variasi *fly ash* sebesar 10% dan 10.5%. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar persentase penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen maka semakin menurun kuat tekannya. Jumlah optimum *fly ash* bervariasi sangat bergantung pada komposisi dan proporsi semua bahan dalam campuran beton (terutama *fly ash*), kondisi selama penempatan (terutama suhu), praktik konstruksi (misalnya, *finishing* dan *curing*) dan kondisi paparan. Dengan demikian, kadar *fly ash* yang optimal akan bervariasi berdasarkan kasus per kasus.

Kata Kunci: Semen, *Fly Ash*, Beton Hijau, Kuat tekan

Abstract

The development of infrastructure is directly proportional to the level of demand for cement as the main material in building construction. The cement industry produces 8-10% of the world's total CO₂ emissions. This study aims to find an alternative or partial replacement of green concrete materials so as to minimize the environmental impact of making concrete and increase the strength of concrete, one of which is fly ash. Fly ash can be used in conjunction with portland cement in concrete which contributes to the properties of the concrete through hydraulic or pozzolanic activity, or both. The results of the compressive strength test of the characteristics of concrete with partial substitution of cement with variations of fly ash (9%, 9.5%, 10%, and 10.5%) at the age of 28 days were 36.70 Mpa, 35.11 Mpa, 33.37 Mpa, and 30.38 Mpa, respectively. The compressive strength of concrete

*Corresponding author email: kakaramdhanolii@gmail.com

increased by 5% in the fly ash variation of 9% and 9.5% and decreased by 13% in the fly ash variation of 10% and 10.5%. From these results it can be concluded that the greater the percentage of use of fly ash as a partial cement substitution, the lower the compressive strength. The optimum amount of fly ash varies greatly depending on the composition and proportion of all ingredients in the concrete mix (especially fly ash), conditions during placement (especially temperature), construction practices (eg, finishing and curing) and exposure conditions. Thus, the optimal fly ash content will vary on a case-by-case basis.

Keywords: *Cement; Fly ash; Green concrete; Compressive strength*

A. PENDAHULUAN

Industri semen terus memberikan dampak besar bagi perkembangan industri dan ekonomi (Ali et al., 2015; Naqi & Jang, 2019). Namun, industri semen masih menghadapi masalah sosial, yang terkait dengan peningkatan jumlah limbah dan masalah pengolahan. Selain itu, kerusakan lingkungan yang muncul sebagai akibat dari penipisan sumber daya dan polusi global yang disebabkan oleh gas rumah kaca yang dihasilkan dari produksi semen (Kim et al., 2018). Produksi semen yang sangat bergantung pada ketersediaan sumber daya alam akan berbanding lurus dengan kerusakan lingkungan di masa mendatang, terutama karena emisi gas dan partikel debu akibat proses produksi semen (Gao et al., 2016). Proses produksi semen membutuhkan energi yang cukup besar dan menyebabkan emisi sekitar 60% dari total CO₂ selama proses pengapuran batu kapur (CaCO₃), dan 40% bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil sebagai energi dalam produksi semen (Andrew, 2017; Brunke & Blesl, 2014; John, 2020). Produksi semen menyumbang lebih dari 8% emisi CO₂ secara global. Satu ton produksi semen melepaskan sekitar satu ton CO₂ ke atmosfer (Andrew, 2017).

Seiring dengan permintaan beton yang semakin tinggi, berbagai upaya dilakukan untuk menciptakan beton hijau yang meminimalisir penggunaan semen (Kumar, 2021; Olii et al., 2021). Salah satu bahan tambah atau pengganti parsial semen adalah *fly ash* (abu terbang). *Fly ash*

diproduksi oleh pembangkit listrik dan pembangkit uap berbahan bakar batubara. Potensi penggunaan *fly ash* sebagai material substitusi parsial sebagian semen dalam beton telah diketahui hampir sejak awal abad terakhir, meskipun baru pada pertengahan 1900-an pemanfaatan *fly ash* dalam beton dimulai oleh Universitas California, Berkeley. Dalam 50 tahun terakhir, penggunaan *fly ash* dalam beton tumbuh secara signifikan dengan hampir 15 juta ton digunakan dalam beton, produk beton, dan *grouting* di AS pada tahun 2005 (Thomas, 2007). Penggunaan *fly ash* pada beton portland semen (PCC) memiliki banyak manfaat dan meningkatkan kinerja beton dalam keadaan segar maupun mengeras, baik kekuatan dan daya tahan beton (Tudjono et al., 2014). Penggunaan *fly ash* juga hemat biaya karena dapat mengurangi penggunaan semen portland (Golewski, 2017).

Beberapa tahun terakhir, untuk memenuhi kebutuhan listrik di seluruh wilayah Indonesia, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebagai penyuplai listrik utama membutuhkan ±97 juta-ton batu bara sebagai bahan bakar. Residu dari hasil pembakar batu bara adalah *fly ash* sedangkan tingkat pemanfaatan *fly ash* di Indonesia hanya berkisar di antara 10-12%, dimana 73% diolah di Pulau Jawa dan 27% di luar Pulau Jawa. Jika *fly ash* tidak dimanfaatkan secara maksimal, maka pada tahun 2027 akan terdeposit *fly ash* sebesar 10,4 juta-ton/tahun (Ekaputri et al., 2020).

Di Indonesia, pemanfaatan *fly ash* masih kurang maksimal dibandingkan negara-negara lain, dimana hanya tiga PLTU nasional yang mengantongi izin pemanfaatan *fly ash* dan *bottom-ash* (FABA), yaitu PLTU Suralaya, Labuan dan Indramayu (Ekaputri et al., 2020). Salah satu penyebabnya adalah FABA masih dikategorikan limbah B3 kategori dua berdasarkan PP RI Nomor 101 tahun 2014 dan baru pada tahun 2021, pengelolaan FABA yang bersumber dari pembakaran di PLTU sebagai limbah nonB3 yang telah diatur dalam PP Nomor 22 Tahun 2021. Beberapa peneliti telah memanfaatkan *fly ash* dalam pembuatan beton hijau.

PLTU Sulbagut-1 dengan kapasitas 2×50 megawatt (MW) terletak di Desa Tanjung Karang, Kecamatan Tomilito, Kabupaten Gorontalo Utara, Provinsi Gorontalo. Batu bara yang digunakan pada PLTU ini mencapai 600.000 – 650.000 ton/tahun. Setelah dibakar, 1 ton batubara dapat menghasilkan 250~300 kg *fly ash* (Jin et al., 2021). *Fly ash* yang dihasilkan selama dua tahun terakhir sejak PLTU beroperasi belum dimanfaatkan secara maksimal. Tujuan penelitian ini adalah memanfaatkan *fly ash* pada PLTU Sulbagut-1 sebagai substitusi parsial semen untuk meningkatkan kinerja dari beton, mereduksi limbah *fly ash* yang terdeposit di areal PLTU dan mengurangi penggunaan semen untuk beton hijau.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Beton hijau didefinisikan sebagai beton yang menggunakan bahan limbah sebagai setidaknya salah satu komponennya, atau proses produksinya tidak menyebabkan kerusakan lingkungan (Suhendro, 2014). Beton hijau diharapkan dapat memenuhi kewajiban lingkungan, yaitu (Glavind & Munch-Petersen, 2000) (1) reduksi emisi CO₂ sebesar 21% berdasarkan Protokol Kyoto Tahun 1997;

(2) mengurangi penggunaan residu anorganik dari industri sekitar 20% dari industri selain industri beton; (3) mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dengan meningkatkan penggunaan bahan bakar yang berasal dari limbah di industri semen. (4) kapasitas daur ulang beton hijau tidak boleh kurang dari jenis beton yang ada; (5) Produksi beton hijau tidak boleh mengurangi penerapan daur ulang air yang dibuang; dan (6) produksi dan penggunaan beton hijau tidak boleh merusak lingkungan kerja.

Fly ash merupakan serbuk abu yang sangat halus dan hasil dari proses sisa pembakaran bubuk batubara yang berbentuk partikel halus amorf. *Fly ash* merupakan gabungan dari senyawa silika, alumina, dan karbon yang tidak terbakar, serta macam-macam oksida logam yang bersifat *pozzolanic* (Krithika & Kumar, 2020).

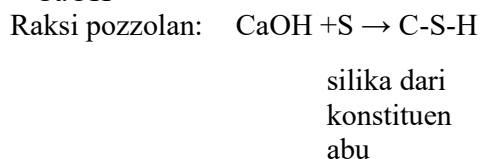
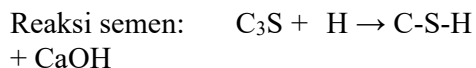
Manfaat *fly ash* untuk beton segar (Vairagade et al., 2015), sebagai berikut:

1. meningkatkan kemampuan kerja beton (*workability*). Partikel *fly ash* berbentuk *spherical* bertindak sebagai bantalan bola mini dalam campuran beton, sehingga memberikan efek pelumas. Efek yang sama ini juga meningkatkan kemampuan pemompaan beton dengan mengurangi efek gesekan selama proses pemompaan.
2. menurunkan kebutuhan air. Penggantian semen dengan *fly ash* mengurangi kebutuhan air untuk nilai *slump* tertentu. Ketika *fly ash* digunakan sekitar 20% dari total semen, kebutuhan air berkurang sekitar 10%. Kandungan *fly ash* yang lebih tinggi akan menghasilkan reduksi air yang lebih tinggi. Penurunan kebutuhan air hanya sedikit atau tidak berpengaruh pada susut/retak pengeringan. Beberapa *fly ash* diketahui dapat mengurangi susut pengeringan dalam situasi tertentu.

3. mengurangi panas hidrasi. Mengganti semen dengan sejumlah *fly ash* yang sama dapat mengurangi panas hidrasi beton. Pengurangan panas hidrasi ini tidak mengorbankan perolehan kekuatan atau daya tahan jangka panjang. Pengurangan panas hidrasi mengurangi masalah kenaikan panas dalam penempatan beton dalam jumlah yang banyak.

Manfaat *fly ash* untuk beton keras (Vairagade et al., 2015), sebagai berikut:

1. salah satu manfaat utama *fly ash* adalah reaksinya dengan kapur dan alkali yang tersedia dalam beton, menghasilkan senyawa semen tambahan. Persamaan berikut menggambarkan reaksi pozzolan *fly ash* dengan kapur untuk menghasilkan tambahan pengikat *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H):
(hidrasi)



2. peningkatan *ultimate strength*. Pengikat tambahan yang dihasilkan oleh reaksi *fly ash* dengan kapur yang tersedia di dalam beton akan menyebabkan beton dengan *fly ash* akan mendapatkan kekuatan dari waktu ke waktu secara terus-menerus. Campuran yang dirancang untuk menghasilkan kekuatan ekuivalen pada usia dini (kurang dari 90 hari) pada akhirnya akan melebihi kekuatan campuran beton semen.

3. penurunan kadar air dikombinasikan dengan produksi senyawa semen tambahan mengurangi inter-konektivitas pori beton, sehingga menurunkan permeabilitas. Pengurangan permeabilitas menghasilkan peningkatan daya tahan

dan ketahanan jangka panjang terhadap berbagai bentuk kerusakan

4. Peningkatan daya tahan. Penurunan kadar kapur bebas dan peningkatan senyawa semen yang dihasilkan, dikombinasikan dengan penurunan permeabilitas meningkatkan daya tahan beton. Ini memberikan beberapa manfaat:

a) meningkatkan ketahanan terhadap ASR (*Alkali Silica Reaction*). *Fly ash* bereaksi dengan alkali yang tersedia di beton sehingga meminimalisir bereaksi dengan mineral silika tertentu yang terkandung dalam agregat.

b) peningkatan ketahanan terhadap serangan sulfat. *Fly ash* menginduksi tiga fenomena yang meningkatkan ketahanan sulfat, yaitu: *fly ash* mengkonsumsi kapur bebas sehingga tidak tersedia untuk bereaksi dengan sulfat; permeabilitas yang berkurang mencegah penetrasi sulfat ke dalam beton; dan penggantian semen mengurangi jumlah aluminat reaktif yang tersedia.

c) peningkatan ketahanan terhadap korosi. Pengurangan permeabilitas meningkatkan ketahanan terhadap korosi.

C. METODE PENELITIAN

Metode eksperimental dilakukan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Persiapan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen. *Fly ash* yang digunakan yang lolos di saringan No.100 dan tertahan di saringan No.200. Pengujian karakteristik *fly ash* sebagai berikut:

a. Pengujian analisis saringan *fly ash* berdasarkan SNI 1968.

b. Pengujian berat volume *fly ash* berdasarkan SNI 1973.

- c. Pengujian berat jenis dan penyerapan air *fly ash* berdasarkan SNI 1970.
2. Pengujian karakteristik agregat kasar yang bersumber dari Desa Pancuran Kecamatan Suwawa Tengah Kabupaten Bone Bolango dan agregat halus yang bersumber dari Sungai Bone Provinsi Gorontalo sebagai berikut:
 - a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar berdasarkan SNI 1969.
 - b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus berdasarkan SNI 1970.
 - c. Pengujian analisis saringan agregat halus dan kasar berdasarkan SNI 1968.
 - d. Pengujian berat volume berdasarkan SNI 1973.
3. Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa formula berdasarkan SNI 7656.
4. Cara pengujian *slump* berdasarkan SNI 1972.
5. Metode pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium berdasarkan SNI 2493. Pembuatan benda uji beton silinder menggunakan lima variasi *fly ash* terhadap berat semen, yaitu 9.0%; 9.5%; 10.0%; dan 10.5%.
6. Pengujian kuat tekan beton dengan benda uji silinder berdasarkan SNI 1974. Benda uji silinder yang digunakan untuk masing-masing variasi berjumlah lima sampel, dimana pengujian kuat tekan dilakukan pada hari ke 28 hari dan dihitung dengan persamaan berikut:

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana f_c' adalah kuat tekan (Mpa), P adalah beban maksimum yang

ditunjukkan oleh mesin uji (N), dan A adalah luas permukaan benda uji (mm²)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik material dari pembentuk beton akan mempengaruhi mutu beton. Material tersebut harus diuji terlebih dahulu dengan metode pengujian SNI untuk memperoleh material yang sesuai spesifikasi material. Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian material agregat halus, agregat kasar, semen dan *fly ash* yang akan digunakan pada *Job Mix Design* (JMD) beton untuk mutu rencana beton 35 Mpa. Beton yang direncanakan adalah beton tanpa tambahan udara karena penelitian ini berasumsi beton ini digunakan untuk struktur tidak terkena pemaparan tingkat berat.

JMD pada penelitian ini menggunakan SNI 7656 tahun 2012 (Tabel 2). *Slump* atau kekentalan beton ditentukan 75 – 100 mm, dimana nilai ini akan berpengaruh terhadap kemampuan kerja beton (*workability*). Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan agregat kasar berdasarkan SNI 1968 tahun 1990 diperoleh ukuran agregat maksimum batu pecah yang tertahan pada saringan ukuran 1", yaitu 25.4 mm. Oleh karena itu, kandungan udara dan jumlah air pencampur berdasarkan kedua nilai di atas masing-masing sebesar 1.5%, dan 192.62 kg/m³. Rasio air semen beton dengan mutu 35 Mpa sebesar 0.47 sehingga diperoleh kebutuhan semen sebesar 410 kg/m³. Volume agregat kasar per satuan volume beton berdasarkan modulus kehalusan agregat halus sebesar 2.37 adalah 0.71 sehingga diperoleh banyaknya agregat kasar sebesar 1,186 kg/m³. Perkiraan awal berat beton dengan ukuran nominal maksimum agregat 25.4 mm adalah 2390 kg/m³. Sehingga berat agregat halus

diperoleh sebesar $2390 \text{ kg/m}^3 - (192.6 \cdot 2 + 410 + 1,186) \text{ kg/m}^3 = 601 \text{ kg/m}^3$. Berat material per m^3 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik Material Beton

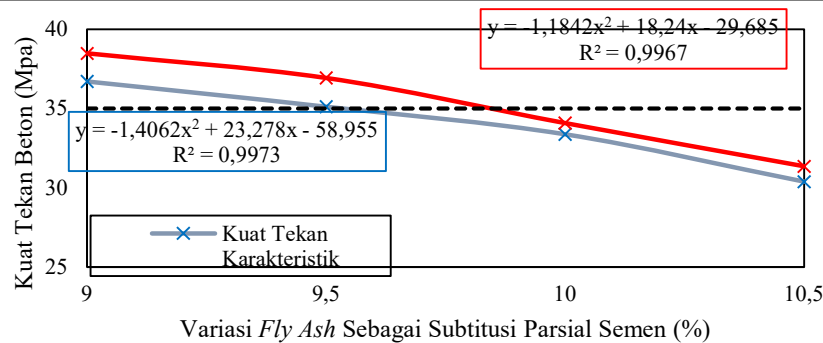
	Agregat Kasar	Agregat Halus	Fly Ash	Semen
Kadar Air (%)	0.23	5.6	11.50	-
Penyerapan (%)	1.00	3.90	-	-
Berat Volume (kg/m^3)	1661	1742	1168	1185
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.96	2.34	-	-
Modulus Kehalusan	7.84	2.37	-	-
Berat Jenis	-	-	2.85	3.15

Tabel 2. Karakteristik Komposisi Beton Normal

Karakteristik	Hasil	Sat.
Slump	75 - 100	mm
Kuat tekan rencana ($f'c$)	35	Mpa
Besar butir agregat maksimum	25.4	mm
Perkiraan kebutuhan air pencampur	192.62	kg/m^3
Rasio air-semen untuk beton	0.47	-
Kadar semen	410	kg/m^3
Volume agregat kasar per satuan volume beton	0.71	m^3
Agregat kasar	1186	kg/m^3
Perkiraan awal berat beton segar	2390	kg/m^3
Agregat halus	601	kg/m^3

Tabel 3. Perbandingan komposisi material pembentuk beton terhadap berat untuk lima silinder

Komposisi Material	Variasi Fly Ash (%)			
	9	9.5	10	10.5
Air (kg)	5.58	5.58	5.58	5.58
Semen (kg)	10.87	10.81	10.75	10.69
Agregat halus (kg)	34.66	34.66	34.66	34.66
Agregat kasar (kg)	18.49	18.49	18.49	18.49
Fly Ash (kg)	1.07	1.13	1.19	1.25



Gambar 1. Kuat Tekan Beton dengan Variasi Fly Ash sebagai Substitusi Parsial Semen

Berdasarkan berat material per m³ pada Tabel 2 dapat dihitung berat material untuk masing-masing variasi *fly ash* untuk lima (5) benda uji silinder pada Tabel 3. Total benda uji yang dibuat sebanyak 20 silinder. Silinder yang digunakan berukuran tinggi 300 mm dan diameter 150 mm dan diuji pada umur 28 hari. Variasi *fly ash* yang digunakan sebesar 9%-10.5% dengan interval 0.5% setiap variasi terhadap berat semen.

Benda uji yang dibuat dan dirawat selama kurang lebih 27 hari melalui proses perendaman di bak air. Selanjutnya pada hari ke-28 dilakukan uji kuat tekan beton menggunakan *Compression Testing Machine* 2,000 KN. Gambar 1 menunjukkan bahwa *fly ash* sebesar 9.0% dan 9.5% dapat memaksimalkan kuat tekan karakteristik beton masing-masing mencapai 36.70 Mpa dan 35.11 Mpa, atau kuat tekan rata-rata masing-masing mencapai 38.48 Mpa 36.93 Mpa terhadap mutu beton rencana 35 Mpa. Kuat tekan dapat meningkat mencapai 5% untuk kuat tekan karakteristik dan 10% untuk kuat tekan rata-rata. Penambahan *fly ash* $\geq 10\%$ semakin mereduksi kuat tekan beton mencapai 13% untuk kuat tekan karakteristik dan 10% untuk kuat tekan rata-rata.

Penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian, yaitu substitusi *fly ash* dalam jumlah banyak maka akan mereduksi kuat tekan beton. Chandio et al. (2020) menemukan bahwa pengantian *fly ash* sebesar 5% dan 50% agregat daur ulang menurunkan kuat tekan beton sebesar 11%. Pangestuti et al. (2018) berpendapat kuat tekan beton yang menggunakan *fly ash* selalu lebih rendah dari beton normal (penurunan 6-22%). Anandan & Manoharan (2015) menemukan beton mengalami peningkatan kuat tekan maksimum hingga 12% apabila kehalusan partikel *fly ash* semakin tinggi. Peningkatan sifat pozzolan berbanding lurus dengan tingkat kehalusan *fly ash*. Kusdiyono et al. (2017) menemukan bahwa substitusi *fly ash* dan *bottom ash*

sebesar 10%-17% dapat meningkatkan kuat tekan rata-ratanya dan akan menurun pada penambahan 20%. Zachar et al., (2011) menggunakan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen untuk beton *precast* dan *prestressed*. Pratiwi et al., (2020) memanfaatkan *fly ash* mencapai 80% sebagai komposisi beton *High Volume Fly Ash* (HVFA) Wattimena et al. (2017) menemukan campuran *fly ash* dan alkali aktivator dijadikan sebagai beton geopolimer (beton tanpa semen).

Secara historis, *fly ash* telah digunakan dalam beton pada tingkat mulai dari 15%-25% terhadap berat semen. Jumlah aktual yang digunakan sangat bervariasi tergantung pada aplikasi, sifat *fly ash*, batas spesifikasi, dan lokasi geografis dan iklim. Tingkat yang lebih tinggi (30%-50%) telah digunakan dalam struktur masif (misalnya, pondasi dan bendungan). Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa substitusi parsial *fly ash* sebesar 40%-60% kadar dapat digunakan untuk struktur bangunan. Selain itu, sifat mekanik dan daya tahan beton menjadi lebih baik (Thomas, 2007).

Peningkatan penggunaan jumlah *fly ash* pada beton bukan tanpa kekurangan. Pada beton mutu tinggi, waktu *setting* akan menjadi lebih panjang dan pengembangan kekuatan menjadi lambat, yang mengarah pada kekuatan usia dini (beton segar) yang rendah sehingga memperlambat waktu pekerjaan konstruksi (Zeggar et al., 2019). Untuk kondisi tertentu, penggunaan *fly ash* yang optimal yang dapat digunakan dalam campuran beton yang akan memaksimalkan manfaat teknis, lingkungan, dan ekonomi dari penggunaan *fly ash* tanpa berdampak signifikan pada waktu kerja pekerjaan konstruksi atau mengganggu kinerja jangka panjang. dari produk beton. Jumlah *fly ash* yang optimal akan menjadi fungsi dari berbagai parameter dan harus ditentukan berdasarkan kasus per kasus (Thomas, 2007).

KESIMPULAN

Hasil pengujian kuat tekan karakteristik beton menggunakan *fly ash* sebagai substitusi parsial terhadap berat semen sebesar 9%, 9.5%, 10% dan 10.5% pada umur 28 hari adalah 36.70 Mpa, 35.11 Mpa mengalami peningkatan dari kuat tekan rencana (35 Mpa) sebesar 4.9% dan 0.3%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa persentase penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen berbanding terbalik dengan kuat tekannya. Beton dengan penggunaan *fly ash* <9.5% menghasilkan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan dengan kandungan *fly ash* >10%. *Fly ash* yang berlebihan menyebabkan tidak semua limbah *fly ash* bereaksi dengan air dan semen dalam campuran beton sehingga menyebabkan kekuatan ikat campuran beton menurun dan kekuatan beton menurun. Sebagai material hasil sampingan, karakteristik dan sifat *fly ash* tidak dapat dikontrol, oleh karena itu perlu dilakukan pengujian material sebelum dimanfaatkan sebagai material beton. Tetapi pengujian material yang komprehensif bisa mahal dan belum tentu bisa dilakukan di semua kondisi. Indikator cepat yang dikembangkan dengan baik akan memberikan peluang dan lebih disukai untuk digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Gorontalo atas bantuan dana penelitian dan asisten Laboratorium Terpadu Universitas Gorontalo atas pendampingan dalam pengujian laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, N., Jaffar, A., Anwer, M., Alwi, S. K. K., Anjum, M. N., Ali, N., Raja, M. R., Hussain, A., & Ming, X. (2015). The Greenhouse Gas Emissions Produced by Cement Production and Its Impact on Environment A Review of Global

Cement Processing. *International Journal of Research*, 2(2), 488–500. <http://edupediapublications.org/journals/index.php/ijr/article/view/1455>

Anandan, S., & Manoharan, S. V. (2015). Strength properties of processed fly ash concrete. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 47(3), 320–334.

<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.3.7>

Andrew, R. M. (2017). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, August, 1–52.

Brunke, J. C., & Blesl, M. (2014). Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. *Journal of Cleaner Production*, 82, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.074>

Chandio, S. A., Memon, B. A., Oad, M., Chandio, F. A., & Memon, M. U. (2020). Effect of Fly Ash on the Compressive Strength of Green Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(3), 5728–5731.

<https://doi.org/10.48084/etasr.3499>

Ekaputri, J. J., Shahib, M., & Bari, A. (2020). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162.

Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., & Chen, F. (2016). Analysis of material flow and consumption in cement production process. *Journal of Cleaner Production*, 112(August), 553–565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.054>

Glavind, M., & Munch-Petersen, C. (2000). ‘Green’ concrete in Denmark. *Our Concrete Environment*, 1(1), 19–25. <https://doi.org/10.1680/stco.2000.1.1.19>

- Golewski, G. L. (2017). Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.065>
- Jin, S., Zhao, Z., Jiang, S., Sun, J., Pan, H., & Jiang, L. (2021). Comparison and summary of relevant standards for comprehensive utilization of fly ash at home and abroad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 621(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/621/1/012006>
- John, J. P. (2020). Parametric Studies of Cement Production Processes. *Journal of Energy*, 2020, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2020/4289043>
- Kim, J., Tae, S., & Kim, R. (2018). Theoretical study on the production of environment-friendly recycled cement using inorganic construction wastes as secondary materials in South Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su10124449>
- Krithika, J., & Kumar, G. B. R. (2020). Influence of fly ash on concrete - A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 906–911. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.425>
- Kumar, N. (2021). A Review of Study on Green Concrete. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(VII), 1525–1529. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36623>
- Kusdiyono, Supriyadi, & Wahyono, H. L. (2017). Pengaruh Penambahan Fly Ash dan Bottom Ash pada Pembuatan Beton Mutu F'c 20 Mpa dalam Upaya Pemanfaatan Limbah Industri. *Wahana Teknik Sipil*, 22(1), 40–49.
- Naqi, A., & Jang, J. G. (2019). Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review. *Sustainability*, 11(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su11020537>
- Olii, M. R., Poe, I. E., Ichsan, I., & Olii, A. (2021). Limbah Kaca Sebagai Penganti Sebagian Agregat Halus Untuk Beton Ramah Lingkungan. *Teras Jurnal*, 11(1), 113–124. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.407>
- Pangestuti, E. K., Handayani, S., Purnomo, M., Silitonga, D. C., & Fathoni, M. H. (2018). The Use of Fly Ash as Additive Material to High Strength Concrete. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*, 20(2), 65–70. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v20i2.16274>
- Pratiwi, W. D., Triwulan, Ekaputri, J. J., & Fansuri, H. (2020). Combination of precipitated-calcium carbonate substitution and dilute-alkali fly ash treatment in a very high-volume fly ash cement paste. *Construction and Building Materials*, 234, 117273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117273>
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, 95, 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>
- Thomas, M. D. A. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *Portland Cement Association*, 24.
- Tudjono, S., Purwanto, & Apsari, K. T. (2014). Study the effect of adding nano fly ash and nano lime to compressive strength of mortar. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.202>
- Vairagade, V. S., Parbat, D. K., & Dhale, S. A. (2015). Fly Ash as Sustainable Material for Green Concrete - A State of Art. *International Journal of Research in Engineering, Science and*

Technology (IJRESTs), 1(2), 17–24.
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(September). <https://doi.org/10.1063/1.5003524>
Zachar, J., Ph, D., & Asce, M. (2011). Sustainable and Economical Precast and Prestressed Concrete Using Fly Ash as a Cement Replacement. *Journal Of Material s In Civil Engineering*, 23(June), 789–792.

Zeggar, M. L., Azline, N., & Safiee, N. A. (2019). Fly ash as supplementary material in concrete: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012025>



© 2023 Siklus Jurnal Teknik Sipil
All rights reserved. This is an open
access article distributed under the
terms of the CC BY Licens
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)