

Pengaruh Tingkat Penambahan Fly Ash terhadap Kinerja Mekanik Beton

Muhamad Syahrul*, Sumarman, Lutfi Marantica

Universitas Swadaya Gunung Jati, Cirebon, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

beton; fly ash; kuat tekan;
slump; workability

*Correspondence email:

muhamad.122130009@ugj.ac.id

Submitted: 16 April 2026

Revised: 05 Mei 2026

Accepted: 19 Juli 2026

Published: 01 Agustus 2026

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan beton berdampak pada tingginya penggunaan semen yang berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida. Pemanfaatan fly ash sebagai substitusi sebagian semen menjadi alternatif untuk menghasilkan beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi fly ash terhadap workability, kuat tekan beton, kadar optimum teknis, dan efisiensi biaya sederhana. Metode penelitian menggunakan eksperimen laboratorium dengan variasi fly ash 0%, 10%, dan 20% dari berat semen. Pengujian meliputi slump dan kuat tekan beton umur 14 hari dengan tiga benda uji silinder pada setiap variasi. Kuat tekan umur 28 hari dihitung sebagai estimasi berdasarkan faktor perkembangan kuat tekan 14 hari sebesar 0,73. Hasil menunjukkan nilai slump menurun dari 13,0 cm pada beton normal menjadi 11,0 cm pada fly ash 10% dan 10,5 cm pada fly ash 20%. Rata-rata kuat tekan 14 hari masing-masing sebesar 40,481 MPa, 40,953 MPa, dan 35,858 MPa, dengan estimasi kuat tekan 28 hari sebesar 55,454 MPa, 56,100 MPa, dan 49,120 MPa. Fly ash 10% menghasilkan kuat tekan tertinggi dengan peningkatan 1,17% dibanding beton normal. Analisis biaya menunjukkan efisiensi 3,60% pada fly ash 10% dan 7,20% pada fly ash 20%. Dengan demikian, fly ash 10% direkomendasikan sebagai kadar optimum teknis, sedangkan fly ash 20% lebih sesuai untuk efisiensi biaya dengan kehati-hatian pada aplikasi struktural.

ABSTRACT

Keywords:

concrete; fly ash; compressive
strength; slump; workability

The increasing demand for concrete in infrastructure development leads to higher cement consumption, while cement production is a significant source of carbon dioxide emissions. The use of fly ash as a partial cement replacement offers an alternative to produce more efficient and environmentally friendly concrete. This study aims to analyze the effect of fly ash substitution on workability and compressive strength, determine the optimum technical dosage, and evaluate simple cost efficiency. The research employed a laboratory experimental method with fly ash variations of 0%, 10%, and 20% by weight of cement. Tests were conducted on slump and 14-day compressive strength using three cylindrical specimens for each variation. The 28-day compressive strength was estimated based on a 0.73 strength development factor from the 14-day results. The results show that slump decreased from 13.0 cm in normal concrete to 11.0 cm at 10% fly ash and 10.5 cm at 20% fly ash. The average 14-day compressive strengths for 0%, 10%, and 20% variations were 40.481 MPa, 40.953 MPa, and 35.858 MPa, respectively, with estimated 28-day strengths of 55.454 MPa, 56.100 MPa, and 49.120 MPa. The 10% fly ash variation produced the highest compressive strength, increasing by 1.17% compared to normal concrete. Cost analysis indicates savings of 3.60% for 10% fly ash and 7.20% for 20% fly ash. Therefore, 10% fly ash is recommended as the optimum technical proportion, while 20% fly ash is more suitable for cost efficiency but should be applied cautiously in structural applications.

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kuat tekan tinggi, durabilitas yang baik, mudah dibentuk, dan relatif ekonomis (Hamdi et al., 2022). Peningkatan kebutuhan beton pada pembangunan gedung, jalan, jembatan, dan fasilitas infrastruktur lainnya berdampak langsung pada meningkatnya penggunaan semen sebagai bahan pengikat utama. Di sisi lain, produksi semen berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida sehingga diperlukan inovasi material beton yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Bahar & Wiranto, 2024; Tiorivaldi, 2025). Salah satu alternatif yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan fly ash sebagai bahan substitusi sebagian semen. Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang memiliki ukuran partikel halus dan mengandung senyawa pozzolanik, terutama silika dan alumina. Senyawa tersebut dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat tambahan yang berperan dalam meningkatkan kepadatan dan kuat tekan beton (Setiawati, 2018). Selain itu, ukuran partikel fly ash yang halus dapat berfungsi sebagai filler yang mengisi rongga mikro pada pasta semen (Apriwelni & Wirawan, 2020; Ibrahim et al., 2024).

Pemanfaatan fly ash telah banyak dikaji dalam berbagai jenis beton, baik beton mutu tinggi, high volume fly ash, maupun beton dengan kombinasi bahan tambah lainnya (Agung, 2024; Anggara et al., 2023; Roesdiana, 2015). Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan fly ash pada kadar tertentu dapat meningkatkan kuat tekan dan memperbaiki kinerja beton, tetapi kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan kuat tekan, terutama pada umur awal karena jumlah semen aktif berkurang dan reaksi pozzolanik fly ash berlangsung lebih lambat dibandingkan hidrasi semen (Olii et al., 2023; Solikin et al., 2025). Permasalahan yang masih perlu dikaji adalah kadar optimum fly ash tidak selalu berlaku secara umum. Perbedaan karakteristik fly ash, jenis semen, agregat, faktor air semen, metode pencampuran, dan curing dapat memengaruhi hasil kuat tekan beton. Oleh karena itu, pengujian berbasis material lokal tetap diperlukan untuk memperoleh data empiris yang sesuai dengan kondisi laboratorium dan kebutuhan praktis di lapangan.

Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi substitusi fly ash sebesar 0%, 10%, dan 20% terhadap workability dan kuat tekan beton. Variasi 0% digunakan sebagai beton normal atau kontrol, sedangkan variasi 10% dan 20% digunakan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi sebagian semen terhadap kinerja beton. Selain aspek teknis, penelitian ini juga meninjau aspek biaya secara sederhana untuk mengetahui potensi efisiensi penggunaan fly ash dalam produksi beton. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis kinerja mekanik (kuat tekan), workability, dan evaluasi ekonomi sederhana dalam satu kerangka evaluasi, yang masih jarang dilakukan secara simultan pada studi fly ash berbasis material lokal.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis pengaruh substitusi fly ash terhadap nilai slump beton; (2) menganalisis pengaruh substitusi fly ash terhadap kuat tekan beton; (3) menentukan kadar fly ash yang optimum secara teknis; dan (4) meninjau efisiensi biaya penggunaan fly ash sebagai substitusi sebagian semen.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimen laboratorium. Pendekatan kuantitatif digunakan karena data penelitian berbentuk angka hasil pengujian dan dianalisis melalui perhitungan terukur (Sarwono & Handayani, 2021). Pendekatan eksperimen laboratorium dipilih untuk mengukur secara langsung pengaruh variasi kadar fly ash terhadap workability dan kuat tekan beton dalam kondisi yang terkontrol.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kadar fly ash, yaitu 0%, 10%, dan 20% dari berat semen. Variabel terikat adalah nilai slump dan kuat tekan beton. Material yang digunakan terdiri atas semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan fly ash. Spesifikasi fly ash mengacu pada ketentuan umum material pozzolan untuk beton sebagaimana dijelaskan dalam ASTM C618-19 (ASTM International, 2019).

Tahapan penelitian meliputi persiapan material, pemeriksaan karakteristik material, perencanaan campuran beton, pembuatan benda uji, pengujian slump, perawatan benda uji, pengujian kuat tekan, pengolahan data, dan analisis hasil. Pengujian slump dilakukan berdasarkan prinsip pengujian slump beton segar (Badan Standardisasi Nasional, 2008), sedangkan pengujian kuat tekan beton silinder mengacu pada prinsip uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder (Badan Standardisasi Nasional, 2011).

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan luas bidang tekan $176,625 \text{ cm}^2$. Jumlah benda uji adalah sembilan sampel, terdiri atas tiga sampel untuk setiap variasi campuran. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 14 hari. Karena penelitian tidak melakukan pengujian langsung pada umur 28 hari, kuat tekan umur 28 hari disajikan sebagai nilai estimasi berdasarkan faktor perkembangan kuat tekan umur 14 hari terhadap umur 28 hari sebesar 0,73.

Rumus kuat tekan beton yang digunakan adalah $f'_c = P/A$, dengan f'_c sebagai kuat tekan beton, P sebagai beban maksimum, dan A sebagai luas bidang tekan. Beban dari CTM dalam satuan kN dikonversi menjadi kgf menggunakan faktor 101,97 kgf/kN. Nilai kuat tekan dalam kg/cm^2 kemudian dikonversi ke MPa menggunakan hubungan $1 \text{ MPa} = 10,197 \text{ kg/cm}^2$. Estimasi kuat tekan umur 28 hari dihitung menggunakan persamaan $f'_{c28} = f'_{c14}/0,73$. Oleh karena itu, hasil kuat tekan 28 hari dalam penelitian ini bersifat estimatif dan digunakan sebagai indikasi awal, bukan sebagai pengganti pengujian empiris.

HASIL

Karakteristik Umum Material

Hasil pemeriksaan material menunjukkan bahwa agregat halus dan agregat kasar yang digunakan layak untuk campuran beton karena memenuhi karakteristik umum sebagai bahan penyusun beton. Agregat berperan penting karena menempati sebagian besar volume beton sehingga kualitas agregat memengaruhi kepadatan, workability, dan kuat tekan beton (Hamdi et al., 2022). Fly ash digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen sekaligus material pozzolanik yang diharapkan dapat memperbaiki mikrostruktur beton melalui reaksi lanjutan dengan hasil hidrasi semen (Setiawati, 2018).

Secara umum, fly ash memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan semen dan ukuran partikel yang halus. Oleh karena itu, peningkatan kadar fly ash dapat memengaruhi berat jenis campuran, kebutuhan air, dan kemudahan

pengerjaan beton. Pengaruh tersebut perlu dikontrol melalui perencanaan campuran agar nilai slump dan kuat tekan tetap berada pada rentang yang diharapkan.

Hasil Uji Slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat workability beton pada setiap variasi campuran. Pengujian ini penting karena workability berhubungan dengan kemudahan pencampuran, pengangkutan, pengecoran, dan pemadatan beton segar (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan nilai slump seiring meningkatnya kadar fly ash.

Tabel 1. Hasil Uji Slump Beton

Variasi fly ash	Nilai slump (cm)	Keterangan
0%	13,0	Beton normal/kontrol
10%	11,0	Workability menurun
20%	10,5	Workability paling rendah

Berdasarkan Tabel 1, nilai slump beton normal sebesar 13,0 cm, kemudian menurun menjadi 11,0 cm pada variasi fly ash 10% dan 10,5 cm pada variasi fly ash 20%. Penurunan ini menunjukkan bahwa campuran beton cenderung menjadi lebih kaku ketika kadar fly ash meningkat. Pada campuran ini, peningkatan jumlah material halus tanpa penyesuaian kadar air menyebabkan kebutuhan air meningkat sehingga nilai slump menurun. Temuan ini sejalan dengan konsep bahwa perubahan komposisi material halus dapat memengaruhi kemudahan pengerjaan beton (Hamdi et al., 2022). Hasil perhitungan kuat tekan beton variasi fly ash 0% dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi Fly Ash 0%

Kode	Umur (hari)	Berat (g)	Luas (cm ²)	Beban (kN)	Beban (kgf)	f'c 14 hari (kg/cm ²)	f'c 14 hari (MPa)	Estimasi f'c 28 hari (kg/cm ²)	Estimasi f'c 28 hari (MPa)
S1	14	12.288	176,625	715	72.908,6	412,787	40,481	565,462	55,454
S2	14	12.400	176,625	750	76.477,5	432,994	42,463	593,142	58,168
S3	14	12.280	176,625	680	69.339,6	392,581	38,500	537,782	52,739
Rata-rata	-	-	-	715	72.908,6	412,787	40,481	565,462	55,454

Beton normal menghasilkan rata-rata kuat tekan umur 14 hari sebesar 40,481 MPa dan estimasi kuat tekan umur 28 hari sebesar 55,454 MPa. Nilai ini digunakan sebagai pembandingan untuk menilai pengaruh substitusi fly ash pada variasi 10% dan 20%. Perhitungan kuat tekan dilakukan berdasarkan prinsip pembagian beban maksimum terhadap luas bidang tekan benda uji silinder (Badan Standardisasi Nasional, 2011). Hasil Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi Fly Ash 10% disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi Fly Ash 10%

Kode	Umur (hari)	Berat (g)	Luas (cm ²)	Beban (kN)	Beban (kgf)	f'c 14 hari (kg/cm ²)	f'c 14 hari (MPa)	Estimasi f'c 28 hari (kg/cm ²)	Estimasi f'c 28 hari (MPa)
S1	14	12.130	176,625	700	71.379,0	404,127	39,632	553,599	54,290
S2	14	12.785	176,625	800	81.576,0	461,860	45,294	632,685	62,046
S3	14	12.577	176,625	670	68.319,9	386,808	37,933	529,873	51,964
Rata-rata	-	-	-	723,333	73.758,3	417,598	40,953	572,052	56,100

Variasi fly ash 10% menghasilkan rata-rata kuat tekan umur 14 hari sebesar 40,953 MPa dan estimasi kuat tekan umur 28 hari sebesar 56,100 MPa. Nilai estimasi 28 hari tersebut lebih tinggi dibandingkan beton normal sehingga menunjukkan adanya kontribusi positif fly ash pada kadar 10%. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan efek pozzolanik dan filler yang dilaporkan pada penelitian beton dengan fly ash sebelumnya (Apriweli & Wirawan, 2020; Setiawati, 2018). Hasil perhitungan kuat tekan beton variasi fly ash 20% dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Kuat Tekan Beton Variasi Fly Ash 20%

Kode	Umur (hari)	Berat (g)	Luas (cm ²)	Beban (kN)	Beban (kgf)	f'c 14 hari (kg/cm ²)	f'c 14 hari (MPa)	Estimasi f'c 28 hari (kg/cm ²)	Estimasi f'c 28 hari (MPa)
S1	14	12.415	176,625	600	61.182,0	346,395	33,970	474,514	46,535
S2	14	12.300	176,625	600	61.182,0	346,395	33,970	474,514	46,535
S3	14	12.290	176,625	700	71.379,0	404,127	39,632	553,599	54,290
Rata-rata	-	-	-	633,333	64.581,0	365,639	35,858	500,875	49,120

Variasi fly ash 20% menghasilkan rata-rata kuat tekan umur 14 hari sebesar 35,858 MPa dan estimasi kuat tekan umur 28 hari sebesar 49,120 MPa. Nilai ini lebih rendah dibandingkan beton normal dan variasi fly ash 10%, sehingga kadar 20% belum optimal untuk meningkatkan kuat tekan pada kondisi penelitian ini. Penurunan pada kadar lebih tinggi juga dilaporkan dalam kajian fly ash tertentu karena berkurangnya proporsi semen aktif dan lambatnya perkembangan reaksi pozzolanik pada umur awal (Anggara et al., 2023; Olii et al., 2023). Selanjutnya rekapitulasi kuat tekan beton umur 14 hari disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Kuat Tekan Beton Umur 14 Hari

Variasi fly ash	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)
0%	40,481	42,463	38,500	40,481
10%	39,632	45,294	37,933	40,953
20%	33,970	33,970	39,632	35,858

Tabel 5 menunjukkan bahwa rata-rata kuat tekan umur 14 hari tertinggi diperoleh pada variasi fly ash 10% sebesar 40,953 MPa, sedikit lebih tinggi dibandingkan beton normal sebesar 40,481 MPa. Sementara itu, variasi fly ash 20% mengalami penurunan menjadi 35,858 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa pada umur awal, kadar fly ash 10% masih mampu memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan beton, sedangkan kadar 20% mulai menunjukkan penurunan akibat berkurangnya semen aktif.

Tabel 6. Rekapitulasi Estimasi Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari

Variasi fly ash	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)
0%	55,454	58,168	52,739	55,454
10%	54,290	62,046	51,964	56,100
20%	46,535	46,535	54,290	49,120

Berdasarkan Tabel 6, nilai rata-rata estimasi kuat tekan umur 28 hari tertinggi terdapat pada variasi fly ash 10% sebesar 56,100 MPa. Beton normal menghasilkan rata-rata sebesar 55,454 MPa, sedangkan variasi fly ash 20% menghasilkan rata-rata sebesar 49,120 MPa. Dengan demikian, kadar fly ash 10% merupakan variasi terbaik secara teknis dalam batas variasi yang diuji.

Tabel 7. Perbandingan Rata-rata Kuat Tekan Beton

Variasi fly ash	Rata-rata f'_c 14 hari (MPa)	Estimasi rata-rata f'_c 28 hari (MPa)	Perubahan terhadap beton normal	Persentase perubahan
0%	40,481	55,454	-	-
10%	40,953	56,100	+0,646 MPa	+1,17%
20%	35,858	49,120	-6,334 MPa	-11,42%

Tabel 7 menunjukkan bahwa substitusi fly ash sebesar 10% meningkatkan estimasi kuat tekan umur 28 hari sebesar 0,646 MPa atau 1,17% dibandingkan beton normal. Peningkatan ini relatif kecil, tetapi menunjukkan bahwa kadar 10% masih berada pada proporsi yang sesuai antara jumlah semen aktif, reaksi pozzolanik, dan efek filler. Sebaliknya, variasi fly ash 20% menurunkan estimasi kuat tekan umur 28 hari sebesar 6,334 MPa atau 11,42% dibandingkan beton normal.

Mekanisme Pengaruh Fly Ash terhadap Kuat Tekan Beton

Peningkatan kuat tekan pada variasi fly ash 10% dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama, yaitu reaksi pozzolanik dan efek filler. Reaksi pozzolanik terjadi ketika silika dan alumina dalam fly ash bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, kemudian membentuk senyawa kalsium silikat hidrat tambahan (Setiawati, 2018). Senyawa ini berperan dalam meningkatkan kepadatan dan kekuatan beton. Selain itu, partikel fly ash yang halus dapat mengisi rongga mikro dalam pasta semen sehingga struktur internal beton menjadi lebih padat (Apriweli & Wirawan, 2020).

Pada kadar fly ash 20%, efek positif tersebut tidak lagi dominan. Penggantian semen dalam jumlah lebih besar menyebabkan jumlah semen aktif yang bereaksi pada umur awal berkurang. Karena reaksi pozzolanik fly ash membutuhkan waktu lebih lama, kuat tekan pada umur 14 hari dan estimasi umur 28 hari belum berkembang secara optimal. Hal ini menyebabkan kuat tekan beton dengan fly ash 20% lebih rendah dibandingkan beton normal dan beton dengan fly ash 10%.

Analisis Workability Beton

Hasil uji slump menunjukkan bahwa peningkatan kadar fly ash menyebabkan penurunan nilai slump. Beton normal memiliki slump sebesar 13,0 cm, sedangkan beton dengan fly ash 10% dan 20% masing-masing memiliki slump sebesar 11,0 cm dan 10,5 cm. Penurunan ini menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih kaku seiring bertambahnya kadar fly ash.

Kondisi tersebut dapat terjadi karena peningkatan material halus tidak diikuti dengan penyesuaian kadar air atau penggunaan bahan tambah kimia. Pada beton modern, penggunaan material tambahan dan bahan tambah kimia dapat memengaruhi performa beton segar dan beton keras (Agung, 2024). Oleh karena itu, dalam penerapan di lapangan, penggunaan fly ash perlu disertai perencanaan campuran yang cermat agar workability dan kuat tekan tetap seimbang.

Analisis Kadar Optimum Fly Ash

Berdasarkan hasil pengujian, kadar fly ash optimum dalam penelitian ini adalah 10%. Kadar tersebut menghasilkan estimasi kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 56,100 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton normal sebesar 55,454 MPa dan variasi fly ash 20% sebesar 49,120 MPa. Dengan demikian, fly ash 10% dapat direkomendasikan sebagai kadar terbaik secara teknis dalam batas variasi yang diuji.

Kadar 10% menunjukkan keseimbangan antara jumlah semen aktif, reaksi pozzolanik, dan efek filler. Pada kadar ini, fly ash mampu meningkatkan kepadatan beton tanpa mengurangi jumlah semen aktif secara berlebihan. Sebaliknya, kadar 20% menyebabkan penurunan kuat tekan karena jumlah semen aktif berkurang lebih besar dan reaksi pozzolanik belum berkembang maksimal pada umur pengujian. Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya bahwa penggunaan fly ash perlu dikendalikan pada kadar yang sesuai agar tidak menurunkan kinerja mekanik beton (Roesdiana, 2015; Solikin et al., 2025).

Analisis Ekonomi Penggunaan Fly Ash

Analisis ekonomi dilakukan untuk mengetahui potensi efisiensi biaya penggunaan fly ash sebagai substitusi sebagian semen. Perhitungan biaya dilakukan secara sederhana berdasarkan perbandingan biaya beton normal dengan beton yang menggunakan fly ash. Pada variasi 10%, efisiensi biaya dihitung secara proporsional terhadap pengurangan semen, sedangkan variasi 20% menggunakan data biaya yang tersedia dalam naskah.

Tabel 8. Perbandingan Biaya Beton per m³

Jenis beton	Total biaya (Rp/m ³)	Selisih terhadap beton normal	Efisiensi
Beton normal	1.110.900	-	-
Beton fly ash 10%	1.070.900	40.000	3,60%
Beton fly ash 20%	1.030.900	80.000	7,20%

Berdasarkan Tabel 8, penggunaan fly ash 10% dapat menurunkan biaya sebesar Rp40.000/m³ atau sekitar 3,60%, sedangkan penggunaan fly ash 20% dapat menurunkan biaya sebesar Rp80.000/m³ atau sekitar 7,20% dibandingkan beton normal. Namun, hasil teknis menunjukkan bahwa variasi 20% menghasilkan kuat tekan lebih rendah dibandingkan beton normal dan variasi 10%. Oleh karena itu, penggunaan fly ash 20% perlu dipertimbangkan secara hati-hati apabila beton ditujukan untuk kebutuhan struktural yang memerlukan kuat tekan tinggi.

Dengan demikian, terdapat perbedaan orientasi antara aspek teknis dan aspek biaya. Kadar fly ash 10% lebih unggul secara teknis karena menghasilkan kuat tekan tertinggi dan tetap memberikan efisiensi biaya, sedangkan kadar 20% memberikan efisiensi biaya lebih besar tetapi menurunkan kuat tekan. Untuk penerapan praktis, kadar fly ash 10% lebih direkomendasikan apabila tujuan utama adalah mempertahankan atau meningkatkan kinerja mekanik beton.

Implikasi dan Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fly ash dapat dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton, tetapi penggunaannya harus memperhatikan kadar optimum. Secara teknis, fly ash 10% mampu meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan beton normal. Secara lingkungan, penggunaan fly ash dapat membantu mengurangi limbah industri dan menekan penggunaan semen. Secara ekonomi, fly ash juga berpotensi mengurangi biaya produksi beton, meskipun efisiensi biaya harus tetap dibandingkan dengan capaian kuat tekan yang dihasilkan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, jumlah benda uji masih terbatas, yaitu tiga sampel untuk setiap variasi campuran. Kedua, pengujian kuat tekan umur 28 hari merupakan hasil estimasi dari kuat tekan umur 14 hari, sehingga pengujian langsung pada umur 28 hari tetap diperlukan untuk memperoleh hasil empiris yang lebih kuat. Ketiga, penelitian hanya menggunakan variasi fly ash 0%, 10%, dan 20%, sehingga belum dapat menggambarkan rentang optimum secara lebih rinci. Keempat, penelitian belum menguji sifat mekanik dan durabilitas lain, seperti kuat tarik belah, kuat lentur, modulus elastisitas, permeabilitas, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif. Interpretasi hasil 28 hari dilakukan secara hati-hati karena berbasis pendekatan empiris dari umur 14 hari.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan fly ash terbukti memengaruhi workability dan kuat tekan beton. Nilai slump mengalami penurunan dari 13,0 cm pada beton normal menjadi 11,0 cm pada variasi fly ash 10% dan 10,5 cm pada 20%, yang menunjukkan bahwa substitusi tanpa penyesuaian kadar air menyebabkan campuran lebih kaku. Dari aspek kuat tekan, variasi fly ash 10% menghasilkan estimasi kuat tekan umur 28 hari tertinggi sebesar 56,100 MPa, meningkat 0,646 MPa (1,17%) dibandingkan beton normal, yang mengindikasikan kontribusi reaksi pozzolanik dan efek filler dalam memperbaiki mikrostruktur beton. Sebaliknya, variasi 20% menurunkan kuat tekan menjadi 49,120 MPa atau turun 11,42% akibat berkurangnya semen aktif dan belum optimalnya reaksi pozzolanik.

Dari sisi ekonomi, penggunaan fly ash 10% memberikan efisiensi biaya sebesar Rp40.000/m³ (3,60%), sedangkan 20% mencapai Rp80.000/m³ (7,20%), namun perlu kehati-hatian pada aplikasi struktural karena penurunan kekuatan. Secara keseluruhan, kadar 10% direkomendasikan sebagai kondisi optimum secara teknis. Untuk pengembangan penelitian, disarankan dilakukan pengujian kuat tekan langsung pada umur 28, 56, dan 90 hari, penambahan jumlah benda uji serta variasi kadar fly ash yang lebih rinci, serta pengujian parameter mekanik dan durabilitas lainnya seperti kuat tarik belah, kuat lentur, modulus elastisitas, permeabilitas, dan ketahanan beton agar evaluasi kinerja menjadi lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, A. P. (2024). Pengaruh penambahan Sika Viscocrete 1003, silica fume, dan serbuk kaca pada self compacting concrete (SCC) mutu tinggi (Disertasi doktoral, Universitas Islam Indonesia).
- Anggara, F., Sujoto, V. S. H., Tangkas, I. W. C. W. H., Astuti, W., Sumardi, S., Putra, I. S. R., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Pengaruh penambahan fly ash PLTU Cirebon dan temperatur pengeringan terhadap kuat tekan material konstruksi beton high volume fly ash (HVFA). *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(2), 172–178.
- Apriwelni, S., & Wirawan, N. B. (2020). Kuat tekan beton mutu tinggi dengan memanfaatkan fly ash dan bubuk kaca sebagai bahan pengisi. *Jurnal Saintis*, 20(1), 61–68. [https://doi.org/10.25299/saintis2020.vol20\(01\).4846](https://doi.org/10.25299/saintis2020.vol20(01).4846)
- ASTM International. (2019). ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1972:2008: Cara uji slump beton. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 1974:2011: Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Badan Standardisasi Nasional.
- Bahar, F. F., & Wiranto, S. (2024). Inovasi material dalam beton berkelanjutan: Studi literatur tentang pemanfaatan fly ash dengan peningkatan kekuatan beton. *Jurnal Engineering*, 6(1), 1–6.
- Hamdi, F., Lapian, F. E. P., Tumpu, M., Mabui, D. S. S., Raidyarto, A., Sila, A. A., & Rangan, P. R. (2022). Teknologi beton. Tohar Media.
- Ibrahim, I., Fikri, J., Wiranata, D. Y., Amanah, T., Mahmuda, M., & Sumiati, S. (2024). Pemanfaatan Kombinasi Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Dalam Campuran Mortar Untuk Paving Block. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(1), 414-420.
- Olii, M. R., dkk. (2023). Beton hijau menggunakan fly ash sebagai substitusi parsial semen. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 11–20.
- Roesdiana, T. (2015). Pengaruh penambahan fly ash dan abu batu andesit sebagai bahan substitusi semen terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Konstruksi dan Infrastruktur*, 4(4).
- Sarwono, A. E., & Handayani, A. (2021). Metode kuantitatif. Unisri Press.
- Setiawati, M. (2018). Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2018*, 1–8.
- Solikin, M., Arwiyani, G., Izutholibin, A., Handayani, N. K., & Nurchasanah, Y. (2025). Analysis of the use of fly ash variations as a partial cement substitute for roller compacted concrete mixtures. *Engineering Proceedings*, 84(1), 1–11.
- Tiorivaldi. (2025). Pemanfaatan fly ash dalam beton SCC: Analisis emisi karbon dan kinerja mekanik. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 10(2), 123–132.