

PERBANDINGAN BETON MUTU TINGGI DENGAN PENGAPLIKASIAN HIGH VOLUME FLY ASH TIPE C DAN TIPE F

Daniel Jhon Raven Marpaung¹, Anggi Rahmad Zulfikar²

¹Mahasiswa D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

²Dosen D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

Email : daniel.20037@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Studi ini bertujuan untuk menganalisis perbedaan karakteristik beton berkualitas tinggi yang memanfaatkan High Volume Fly Ash (HVFA) dari jenis C dan jenis F. Beton HVFA menggantikan sebagian besar semen dengan fly ash, yang dapat meningkatkan sifat mekanis dan durabilitas beton. Dalam studi ini, dilakukan pengujian kekuatan tekan terhadap campuran beton yang menggunakan proporsi fly ash sebesar 50% dan 60%. Sampel yang diterapkan dalam penelitian ini adalah silinder beton berukuran 15x30 cm dengan penambahan Superplasticizer Dynamon sebagai admixture. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio substitusi optimum fly ash tipe C terhadap semen adalah 60%, dengan kekuatan tekan rata-rata 40,3 MPa untuk tiga benda uji pada usia 14 hari. Sebaliknya, rasio optimum untuk fly ash tipe F adalah 50%, menunjukkan hasil kekuatan tekan rata-rata sebesar 35,2 MPa. Penggunaan fly ash di atas 50% menghasilkan kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan sampel yang digunakan sebagai kontrol, yang memiliki kekuatan tekan rata-rata 42,7 MPa. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan fly ash volume tinggi tipe C menunjukkan mutu yang lebih baik dibandingkan tipe F, dengan rasio substitusi optimum sebesar 60%.

Kata Kunci: beton mutu tinggi, fly ash volume tinggi, kuat tekan beton

Abstract

This study aims to analyze the differences in the characteristics of high-quality concrete utilizing High Volume Fly Ash (HVFA) from type C and type F. HVFA concrete replaces a significant portion of cement with fly ash, which can enhance the mechanical properties and durability of the concrete. In this study, compressive strength tests were conducted on concrete mixtures using fly ash proportions of 50% and 60%. The samples used in this research were concrete cylinders measuring 15x30 cm, with the addition of Superplasticizer Dynamon as an admixture. The results indicate that the optimum substitution ratio of type C fly ash for cement is 60%, with an average compressive strength of 40.3 MPa for three test specimens at 14 days of age. In contrast, the optimum ratio for type F fly ash is 50%, yielding an average compressive strength of 35.2 MPa. The use of fly ash above 50% resulted in lower compressive strength compared to the control samples, which had an average compressive strength of 42.7 MPa. From these results, it can be concluded that the use of high-volume type C fly ash demonstrates better quality compared to type F, with an optimum substitution ratio of 60%.

Keywords: high performance concrete, high volume fly ash, compressive strength of concrete

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Indonesia, yang merupakan negara dengan populasi terbesar keempat di dunia dan wilayah yang luas, mengalami pertumbuhan pesat dalam pembangunan infrastruktur. Proyek besar seperti jalan tol, jembatan, bandara, dan pelabuhan menjadi fokus pemerintah untuk meningkatkan konektivitas dan mendukung pertumbuhan ekonomi. Berdasarkan informasi dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), pembangunan infrastruktur menjadi salah satu prioritas dalam Rencana Strategis 2020-2024 Untuk mempercepat

perkembangan ekonomi dan meningkatkan taraf hidup masyarakat.

Beton adalah bahan konstruksi utama yang digunakan dalam berbagai proyek infrastruktur di Indonesia. Kebutuhan akan beton sangat tinggi karena sifatnya yang kuat, tahan lama, dan serbaguna. Selain digunakan untuk struktur besar seperti jembatan dan gedung pencakar langit, beton juga penting dalam pembangunan perumahan, jalan raya, dan fasilitas umum lainnya. Berdasarkan laporan dari Badan Pusat Statistik (BPS), sektor konstruksi menyumbang sekitar 10% terhadap total

ViTeks/ April 2025 Volume 3 No. 1

Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia, yang menunjukkan pentingnya sektor ini bagi perekonomian nasional.

Inovasi dalam teknologi beton sangat penting untuk mengatasi tantangan dalam pembangunan infrastruktur. Penggunaan aditif, serat, dan material alternatif dalam campuran beton dapat meningkatkan performa, efisiensi, dan keberlanjutan material tersebut. Menurut penelitian Setiawan (2021), pengembangan teknologi beton ramah lingkungan dapat membantu Indonesia mencapai target pembangunan berkelanjutan dan mengurangi jejak karbon dalam industri konstruksi.

Namun, produksi beton mutu tinggi sering menghadapi tantangan terkait dampak lingkungan, terutama terkait penggunaan semen Portland sebagai komponen utama dalam campuran beton memerlukan proses produksi yang berenergi tinggi dan menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar, sehingga berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Untuk mengatasi masalah ini, industri konstruksi mulai mengadopsi bahan tambahan yang lebih ramah lingkungan, seperti fly ash (abu terbang).

Fly ash adalah limbah hasil sampingan dari proses pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap dan telah terbukti efektif sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Pemanfaatan fly ash dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik beton, serta mengurangi kebutuhan akan semen portland, yang pada gilirannya dapat mengurangi jejak karbon beton. Dalam konteks ini, High-Volume Fly Ash (HVFA) muncul sebagai solusi inovatif, di mana fly ash digunakan dalam proporsi tinggi. Pendekatan ini tidak hanya memperbaiki kualitas beton, tetapi juga memberikan keuntungan lingkungan yang lebih signifikan.

Fly ash dibagi menjadi dua tipe utama: Tipe C dan Tipe F, yang masing-masing memiliki karakteristik dan efek berbeda terhadap beton. Fly ash Tipe C, yang berasal dari pembakaran lignit atau batu bara sub-bituminus, memiliki sifat aktif dan dapat berfungsi sebagai pengganti semen serta memberikan reaksi hidrolisis tambahan. Sementara itu, fly ash Tipe F, yang berasal dari pembakaran batu bara bituminus atau antrasit, lebih inert tetapi memberikan efek pengisian yang bermanfaat dan dapat meningkatkan keawetan beton.

Meskipun banyak studi telah dilakukan mengenai penggunaan fly ash dalam beton, penelitian tentang

pengaplikasian High-Volume Fly Ash (HVFA) dengan fokus pada perbandingan antara Tipe C dan Tipe F masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan pengetahuan tersebut dengan mengevaluasi pengaruh kedua tipe fly ash terhadap kualitas beton mutu tinggi. Dengan menekankan pemanfaatan HVFA dalam campuran beton, penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi yang berarti terhadap pengembangan teknologi beton yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh data yang jelas mengenai perbedaan performa beton mutu tinggi yang menggunakan High-Volume Fly Ash (HVFA) Tipe C dan Tipe F, serta dampak lingkungan dari penerapan teknologi ini. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan bagi industri konstruksi untuk mengadopsi solusi yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan kualitas dan performa beton.

Rumusan Masalah

Meninjau dari latar belakang diatas, beberapa permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan HVFA Tipe C dengan beberapa variasi kadar terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan HVFA Tipe F dengan beberapa variasi kadar terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi?
3. Bagaimana perbandingan antara pengaruh HVFA Tipe C dan Tipe F terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi?

Tujuan Penelitian

Meninjau dari rumusan masalah diatas, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menentukan pengaruh HVFA tipe C dengan beberapa variasi kadar terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi.
2. Menentukan pengaruh HVFA tipe F dengan beberapa variasi kadar terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi.
3. Membandingkan pengaruh HVFA tipe C dan tipe F terhadap kekuatan tekan beton mutu tinggi.

Manfaat Penelitian

Meninjau dari rumusan masalah diatas, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk:

1. Memberikan informasi yang berguna bagi industri konstruksi mengenai penggunaan HVFA tipe C dan tipe F dalam beton mutu tinggi.

2. Membantu dalam pemilihan bahan tambahan yang tepat untuk mencapai kinerja beton yang optimal.
3. Berkontribusi pada upaya pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri.

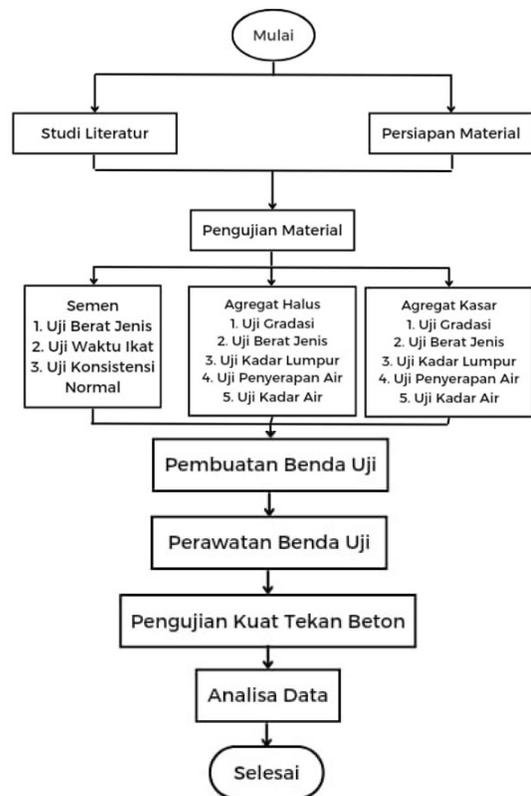
Batasan Masalah

Untuk memastikan fokus dan kelayakan penelitian, batasan-batasan berikut ditetapkan dalam penelitian ini:

1. Jenis beton ini adalah beton yang memiliki kekuatan tekan minimum 45 MPa pada usia 28 hari, dan pada usia 14 hari mencapai 80-90% dari kekuatan tekan beton pada usia 28 hari, sesuai dengan standar mutu tinggi.
2. Dalam penelitian ini, jenis fly ash yang digunakan terbatas pada dua tipe utama, yaitu Tipe C dan Tipe F.
3. Tipe fly ash yang akan dicampurkan dalam proporsi tinggi, yaitu 50% dan 60% dari total massa semen, untuk menilai dampak dari masing-masing tipe terhadap performa beton.
4. Penelitian hanya akan melibatkan uji kekuatan tekan.
5. Sampel beton yang diuji berbentuk silinder dengan dimensi 15x30 cm.
6. Semua pengujian akan dilakukan dalam kondisi laboratorium standar dengan suhu dan kelembapan yang dikendalikan.
7. Semua bahan baku beton, termasuk semen, agregat, dan fly ash, akan diperoleh dari sumber yang sama atau yang telah disertifikasi untuk memastikan konsistensi kualitas.
8. Penelitian ini akan membandingkan performa antara beton mutu tinggi yang menggunakan HVFA Tipe C dan HVFA Tipe F.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton. Dibawah ini yakni diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

1. Tahap 1 (Persiapan)

Tahap awal penelitian ini mencakup persiapan yang meliputi kajian literatur serta pengadaan alat dan bahan yang diperlukan, termasuk fly ash, semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan admixture.
2. Tahap 2 (Uji Material dan Mix Design)
 - a. Semen, meliputi: uji berat jenis, uji waktu ikat, dan uji konsistensi normal.
 - b. Agregat halus dan kasar mencakup: pengujian gradasi, pengujian berat jenis, pengujian kadar lumpur, pengujian penyerapan lumpur, dan pengujian kadar air.
 - c. Pengujian XRF untuk bahan fly ash.
 - d. Penelitian ini mengeksplorasi variasi komposisi beton mutu tinggi dengan menggantikan semen menggunakan fly ash sesuai standar ASTM C192. Variabel bebas yang digunakan adalah rasio substitusi fly

- ash terhadap semen sebesar 50% dan 60%. Sementara itu, variabel terikat yang diukur adalah kuat tekan beton dengan mutu mencapai $f_c' 45$ MPa. Variabel kontrol yang digunakan adalah beton mutu tinggi tanpa substitusi fly ash terhadap semen.
3. Tahap 3 (Pembuatan Sampel Beton)
 - a. Campurkan semua bahan kering (agregat, semen, dan *fly ash*) ke dalam *mixer* hingga merata.
 - b. Tambahkan air secara bertahap sambil terus mengaduk untuk mencapai konsistensi yang diinginkan.
 - c. Tambahkan *superplasticizer* sesuai kebutuhan untuk meningkatkan fluiditas campuran.
 - d. Tuangkan campuran beton ke dalam cetakan silinder dengan dimensi dalam 15x30 cm yang telah dilumasi oleh oli.
 - e. Pastikan untuk tidak menuangkan beton terlalu tinggi sekaligus. Penuangan bertahap lebih baik untuk menghindari pembentukan rongga.
 - f. Gunakan alat seperti sekop, pengaduk, atau alat khusus (seperti vibrator) untuk meratakan dan memadatkan beton.
 - g. Lakukan gerakan dari atas ke bawah dan dari sisi ke tengah untuk memastikan semua bagian cetakan terisi dengan baik. Lakukan sebanyak 25 kali per layer. Layer penuangan beton adalah 3 layer.
 - h. Setelah beton terisi, ratakan permukaan dengan alat finishing seperti trowel atau papan kayu untuk mendapatkan permukaan yang halus.
 4. Tahap 4 (Perawatan Sampel Beton)

Curing atau perawatan beton bertujuan untuk mencegah beton kehilangan air terlalu cepat. Hal yang dilakukan dalam perawatan beton yaitu dengan direndam dalam air selama 14 hari sesuai dengan umur pengujian benda uji. Sampel beton setelah di cetak dibiarkan di dalam cetakan selama 1 hari, curing dilakukan segera setelah pembukaan molding.
 5. Tahap 5 (Pengujian Sampel Beton)

Prosedur pengujian kekuatan tekan akan dijelaskan sebagai berikut :

 - a. Benda uji berumur 14 hari diukur dimensi menggunakan meteran. Benda uji ditimbang untuk mengetahui beratnya menggunakan timbangan.
 - b. Catat hasil pengukuran panjang, tinggi, lebar dan berat sebagai data yang digunakan di perhitungan
 - c. Siapkan mesin kuat tekan dan tempatkan benda uji pada mesin kuat tekan.
 - d. Beban diterapkan secara bertahap hingga sampel beton pecah. Kecepatan penerapan beban harus konstan, biasanya sekitar 0,2 MPa per detik.
 - e. Catat beban maksimum yang diterima oleh sampel uji sebelum mengalami kerusakan.
 - f. Hitung kuat tekan beton.
 6. Tahap 6 (Pengolahan Data)

Tahap keenam dalam penelitian ini adalah pengolahan data, yang melibatkan analisis hasil pengujian dan perbandingannya dengan data teoritis. Data yang diperoleh disajikan dalam format tabel dan grafik, kemudian dijelaskan secara informatif dalam bentuk kalimat.
 7. Tahap 7 (Prototype)

Prototype pada penelitian ini adalah modul pembuatan beton mutu tinggi menggunakan substitusi fly ash tipe c dan tipe f terhadap semen dengan kadar 50% dan 60% yang jelas sehingga dapat difungsikan sebagai media pembelajaran.

KAJIAN PUSTAKA

Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi merupakan beton dengan kekuatan tekan melebihi 41,4 MPa pada usia 28 hari, sesuai dengan SNI 03-6468-2013.

Beton ini dirancang untuk konstruksi yang memerlukan kekuatan struktural dan durabilitas tinggi. Karakteristik utama beton mutu tinggi meliputi kekuatan tekan yang melebihi 41,4 MPa, rasio air-semen yang rendah (biasanya di bawah 0,35), serta penggunaan admixtures seperti superplasticizers dan silica fume yang meningkatkan workability, kekuatan, dan ketahanan. Beton ini lebih tahan terhadap siklus pembekuan-pencairan, penetrasi ion klorida, dan serangan kimia, sehingga cocok untuk digunakan di lingkungan agresif. Meskipun lebih mahal dan memerlukan teknik khusus, keunggulannya dalam kekuatan dan durabilitas menjadikannya pilihan unggul untuk proyek konstruksi yang kompleks dan berisiko tinggi.

High Volume Fly Ash

High-Volume Fly Ash (HVFA) adalah bahan tambahan yang digunakan dalam campuran beton untuk menggantikan sebagian besar semen portland

dengan *fly ash*, produk sampingan dari pembakaran batubara, yang semakin populer karena manfaat lingkungan dan ekonomisnya. Penggunaan HVFA dapat mengurangi jejak karbon dari produksi beton hingga 70% dan menghemat energi hingga 60%, sehingga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Meskipun beton HVFA mungkin memiliki kekuatan awal yang lebih rendah, penelitian menunjukkan bahwa kekuatan akhir dapat meningkat seiring waktu berkat reaksi pozzolanik, dengan proporsi optimal *fly ash* berkisar antara 30% hingga 50%. Selain itu, HVFA menawarkan workability yang lebih baik, ketahanan terhadap suhu tinggi, serta kemampuan yang lebih unggul dalam menghadapi serangan kimia dan penetrasi ion klorida, membuatnya cocok untuk aplikasi di lingkungan ekstrem. Dengan memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*, HVFA tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga menciptakan solusi inovatif untuk tantangan dalam industri konstruksi modern.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material

1. Semen

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Dynamix OPC Tipe I. Hasil pengujian terhadap sifat fisik semen menunjukkan bahwa nilai konsistensi normal yang diperoleh adalah sebesar 28,4%. Nilai ini mencerminkan kebutuhan air yang diperlukan untuk mencapai tingkat kelecakan standar pada adukan semen. Selain itu, berat jenis semen yang diuji mencapai 2,92, meskipun sedikit di bawah kisaran standar berat jenis semen Portland, yaitu antara 3,10 hingga 3,15. Meskipun demikian, hasil ini menunjukkan bahwa semen yang digunakan memiliki karakteristik fisik yang baik dan memenuhi sebagian besar kriteria standar untuk digunakan pada komposisi campuran beton.

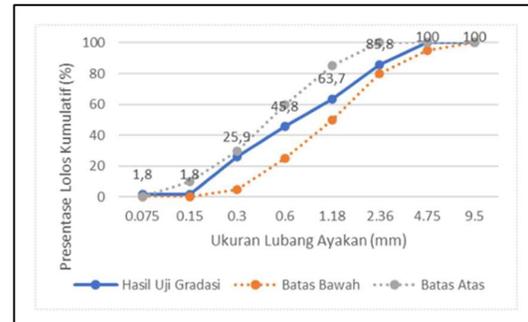
2. Agregat Halus

Penggunaan agregat halus pada penelitian ini adalah jenis pasir Lumajang, yang memiliki karakteristik fisik berwarna hitam. Pengujian terhadap pasir ini dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton untuk memastikan kualitas dan kesesuaiannya dalam campuran beton.

Tabel 1. Hasil Uji Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Satuan
1	Berat Jenis	2,77	gr/cm ³
2	Berat Isi	1,65	gr/cm ³
3	Kadar Lumpur	0,008	%

4	Penyerapan Air	1,01	%
---	----------------	------	---



Gambar 2. Grafik Hasil Uji Gradasi Agregat Halus

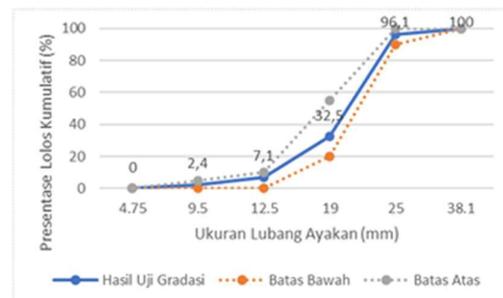
Pasir yang digunakan tergolong dalam kategori zona II dengan karakteristik yang sedang. Sesuai standar ASTM C33-86, pasir ini memiliki gradasi yang baik dan memenuhi batas yang ditentukan. Modulus kehalusan yang diperoleh adalah 2,77, sesuai dengan SNI 04-1989-F. Hasil ini mengindikasikan bahwa pasir tersebut memenuhi kriteria untuk aplikasi dalam campuran beton, sehingga dapat diandalkan untuk mendukung kualitas dan kekuatan struktur.

3. Agregat Kasar

Penggunaan agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis batu pecah Jeladri. Pengujian terhadap pasir ini dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton untuk memastikan kualitas dan kesesuaiannya dalam campuran beton.

Tabel 2. Hasil Uji Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Satuan
1	Berat Jenis	2,72	gr/cm ³
2	Berat Isi	1,54	gr/cm ³
3	Kadar Lumpur	1	%
4	Penyerapan Air	1,07	%



Gambar 3. Grafik Hasil Uji Gradasi Agregat Kasar

4. Fly Ash

Fly Ash (Abu Terbang) pada penelitian ini menggunakan Tipe C dan Tipe F. Pengujian fly ash dilakukan di Laboratorium Institut Sepuluh November Surabaya oleh PT. Solusi Bangun Beton.

Tabel 3. Hasil Uji *XRF Fly Ash*

Parameter	Unit	Test Result	Test Method
SiO_2	% wt	38.67	ASTM D4326 - 21
Al_2O_3		16.78	
Fe_2O_3		13.28	
CaO		15.94	
MgO		7.93	
Na_2O		2.74	
K_2O		1.20	
TiO_2		0.73	
MnO_2		0.13	
Cr_2O_3		0.01	
P_2O_5		0.27	
SO_3		1.64	
LOI		0.22	

Fly Ash tersebut mengandung silika dan alumina dalam jumlah besar, yang dapat berpotensi untuk diaplikasikan dalam bahan campuran semen. Informasi ini hanya berdasarkan hasil uji XRF Fly Ash. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk menentukan kualitas Fly Ash secara keseluruhan. Pemilihan metode pengujian dan interpretasi hasil analisis harus dilakukan oleh ahli di bidangnya.

Mix Design Benda Uji

Berdasarkan hasil trial and error terhadap tiga alternatif desain campuran beton mutu tinggi tanpa substitusi abu terbang pada semen dan dua lainnya menggunakan substitusi abu terbang desain campuran ketiga dipilih sebagai komposisi untuk beton mutu tinggi. Hal ini disebabkan karena desain tersebut memenuhi regulasi standar uji beton segar pada campuran beton.

Tabel 4. *Mix Design per 1 m³*

Jumlah Bahan Per m ³	Variasi Kadar (%)		
	0	50	60
Semen (kg)	522	261	208,8
Fly Ash (kg)	-	261	313
Agregat Halus (kg)	655	655	655
Agregat Kasar 5-12 (kg)	318	318	318
Agregat Kasar 10-20 (kg)	742	742	742

Air (kg)	193	193	193
Superplasticizer (Dynamon) (L)	3132	3132	3132

Hasil Pengujian Slump Beton Segar

Kelecekan beton segar diuji melalui pengujian slump, metode standar untuk menilai konsistensi adukan beton. Uji slump menghasilkan nilai yang menunjukkan tingkat kelecekan (workability) beton segar, yang mempengaruhi kemudahan pengerjaan dan proses pengecoran. Pengadukan bahan dilakukan dengan molen dalam empat tahap pencampuran guna memastikan distribusi material yang merata.

Tabel 5. Hasil Uji *Slump Test*

No.	Benda Uji	Slump Test (cm)
1	FA-0	14
2	C-50	14
3	F-50	13
4	F-60	14
5	C-60	14

Hasil slump test untuk beton segar menurut SNI biasanya berkisar antara 8 cm hingga 12 cm. Namun, nilai slump yang ideal dapat bervariasi tergantung pada jenis pekerjaan dan spesifikasi yang diinginkan. Toleransi nilai slump pada beton segar umumnya sekitar ± 2 cm. Maka dari itu, hasil slump test yang dilakukan memenuhi standar SNI dengan batas toleransi yang diijinkan.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

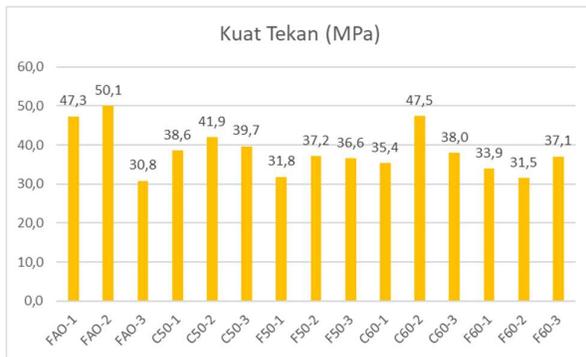
Pengujian kekuatan tekan pada beton mutu tinggi dilakukan saat beton berusia 14 hari. Proses pengujian dan analisis kekuatan tekan mengikuti standar ASTM C39/C39M – 03. Mutu beton yang direncanakan yaitu FC' 45 MPa.

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

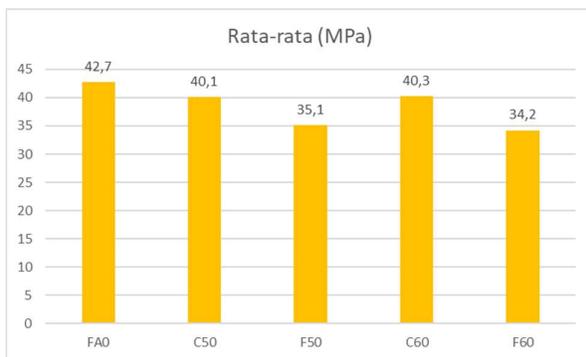
No.	Benda Uji	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	FA0-1	13,78	836	47,3	42,7
2	FA0-2	13,78	884,7	50,1	
3	FA0-3	13,76	544,5	30,8	
4	C50-1	13,38	681,6	38,6	40,1
5	C50-2	13,28	740,7	41,9	
6	C50-3	13,36	700,7	39,7	
7	F50-1	13,34	562,2	31,8	35,2
8	F50-2	13,08	656,7	37,2	
9	F50-3	13,42	646,2	36,6	
10	C60-1	13,3	625,2	35,4	40,3
11	C60-2	13,64	838,1	47,5	
12	C60-3	13,34	671,7	38	

13	F60-1	13,16	599,2	33,9
14	F60-2	13,12	557,2	31,5
15	F60-3	13,24	654,7	37,1

beton. Untuk mencapai kuat tekan yang konsisten, perlu dilakukan pengendalian kualitas bahan baku dan proses pembuatan beton secara ketat.



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton



Gambar 5. Grafik Rata-rata Kuat Tekan beton

Hasil pengujian kekuatan tekan beton menunjukkan bahwa beton tipe FA0 (fly ash 0%) memiliki kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan beton tipe C50, C60, dan F50. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan fly ash dalam campuran beton dapat mengurangi kekuatan tekan beton. Beton dengan tipe F50 (mengandung 50% fly ash) cenderung memiliki kuat tekan lebih rendah dibandingkan beton tipe C50 dan C60. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase fly ash dalam campuran, semakin rendah nilai kuat tekan beton. Selain itu, terdapat variasi kuat tekan pada sampel beton dengan jenis yang sama, yang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kualitas bahan baku, proporsi campuran, serta perbedaan dalam proses curing. Contohnya, pada beton jenis C50, kuat tekan sampel C50-2 (36,6 MPa) lebih tinggi dibandingkan dengan sampel C50-1 (28,9 MPa) dan C50-3 (42,8 MPa). Secara umum, kuat tekan beton meningkat seiring dengan meningkatnya beban maksimum yang ditanggung. Hal ini menunjukkan bahwa beton dengan beban maksimum yang lebih tinggi memiliki kemampuan menahan tekanan yang lebih kuat. Data hasil uji menunjukkan pentingnya standarisasi dalam proses produksi

SIMPULAN

Hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa beton yang menggunakan HVFA tipe C mengalami peningkatan kekuatan tekan yang lebih baik dibandingkan dengan beton yang menggunakan HVFA tipe F. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemilihan jenis fly ash yang tepat sangat penting dalam merancang campuran beton yang optimal. Dengan memilih HVFA tipe C, para insinyur dan perancang struktur dapat memastikan bahwa beton yang dihasilkan tidak hanya memenuhi standar kekuatan yang diperlukan, tetapi juga memiliki performa yang lebih baik dalam jangka panjang.

Selain itu, penggunaan HVFA juga berkontribusi pada pengurangan permeabilitas beton. Permeabilitas yang rendah merupakan faktor kunci dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti serangan sulfat dan korosi akibat ion klorida. Ketahanan terhadap serangan kimia ini sangat penting, terutama untuk struktur yang terpapar lingkungan agresif, seperti jembatan, pelabuhan, dan bangunan di daerah pesisir. Dengan demikian, penggunaan HVFA tidak hanya memberikan keuntungan dari segi mekanik, tetapi juga dari segi durabilitas, yang sangat penting untuk memastikan umur panjang struktur beton. Hal ini menjadi semakin relevan mengingat tantangan yang dihadapi oleh industri konstruksi saat ini, termasuk kebutuhan untuk membangun infrastruktur yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.

REFERENSI

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). (2020). Rencana Strategis Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2020-2024. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Badan Pusat Statistik (BPS). (Tahun Terbaru). Laporan Tahunan Industri Konstruksi. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Setiawan, B. (2021). Pengembangan Teknologi Beton Ramah Lingkungan untuk Pembangunan Berkelanjutan di Indonesia. *Jurnal Teknologi Beton*, 15(2), 123-135.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. 5th Edition. Pearson Education.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. 2nd Edition. Prentice Hall.

- Telford, D. (2007). *Prestressed Concrete*. Thomas Telford Publishing.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2013). SNI 03-2847-2013: Spesifikasi Beton Struktural. Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2004). SNI 15-2049-2004: Semen Portland. Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2002). SNI 03-2461-2002: Spesifikasi Agregat untuk Beton. Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2002). SNI 03-6827-2002: Spesifikasi Air untuk Campuran Beton. Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (1991). SNI 03-2490-1991: Spesifikasi Admixtures untuk Beton. Badan Standardisasi Nasional.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (Tahun Terbaru). *Laporan Tahunan atau Studi tentang Fly ash dan Pengelolaannya*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2002). SNI 03-6414-2002: Spesifikasi Fly ash untuk Beton. Badan Standardisasi Nasional.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete* (4th ed.). Longman.
- Abrams, D. A. (1918). The Water-Cement Ratio and Its Effect on Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 14(1), 127-134.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2000). *Properties of Concrete* (4th ed.). Longman.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2000). SNI 03-2834-2000: Spesifikasi Air untuk Beton. Badan Standardisasi Nasional.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33/C33M-18: Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.