

Pengaruh campuran bahan *additive (bestmittel)* dan *fly ash* terhadap karakteristik beton mutu f'_c 25 MPa

Mohammad Ahroz Najaha^{1,*}, Anggit Mas Arifudin¹

¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Bestmittel
Concrete
Compressive strength
Fly ash
Modulus elasticity

Corresponding Author:

Mohammad Ahroz Najaha
21511153@students.uii.ac.id

Abstract

The development of the construction sector has driven the need for high-quality concrete that is efficient, economical, and environmentally friendly. One innovation being developed is the partial substitution of cement using fly ash, a byproduct of coal combustion from steam power plants. However, fly ash substitution in concrete work requires a longer setting time and results in lower early strength due to its slower reaction process. To address this, bestmittel is used as an accelerator admixture capable of accelerating concrete hardening at early ages (7-10 days). In this study, the concrete mix design was carried out based on the SNI 03-2834-2000 method with a design compressive strength of 25 MPa. Cement was partially substituted with 10% fly ash by weight of cement, and bestmittel admixture was added with four dosage variation of 0%, 0,2%, 0,4% and 0,6% of the total cement weight. The tests conducted included compressive strength and modulus of elasticity at the curing ages of 7, 14, and 28 days. The results showed that the substitution of 10% fly ash combined with variations of bestmittel increased the concrete quality as the testing age increased. The optimum value was achieved at a bestmittel dosage of 0,4%, with the highest compressive strength of 28,755 MPa at 28 days, exceeding the design compressive strength of 25 MPa, with an increase from 14 to 28 days of 24,54%. This is attributed to the dosage forming an equilibrium point between accelerated hydration and workability stability, resulting in a denser microstructure. Meanwhile, the 0,6% variation produced a lower compressive strength of 22,533 MPa due to the bestmittel addition exceeding the optimum dosage, causing a more fluid mixture, uncontrolled hydration, and uneven C-S-H formation.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Beton merupakan material konstruksi yang paling penting dan banyak digunakan pada struktur bangunan. Setiap tahun, lebih dari 4 Miliar Ton semen diproduksi, menyumbang sekitar 8 persen emisi CO₂ global (Chatam House, 2018), sehingga pengurangan penggunaan semen dalam campuran beton menjadi kebutuhan yang mendesak. Salah satu

upaya yang dapat dilakukan yaitu memanfaatkan limbah industri berupa abu terbang (*fly ash*) sebagai substitusi sebagian dari total semen. *Fly ash* merupakan sisa pembakaran batu bara yang dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang memiliki sifat pozzolan. Berdasarkan klasifikasi ASTM C61, *fly ash* tipe C yang digunakan dalam penelitian berasal dari pembakaran batu bara muda (sub-bituminus) dengan kandungan kalsium (CaO) yang

cukup tinggi, sehingga memiliki sifat pozzolan sekaligus sifat sementasi yang dapat mempercepat reaksi hidrasi. Sebagai bahan pengisi (filler) *fly ash* juga memiliki pozzolanik yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) untuk membentuk kalsium silika hidrat (C-S-H) yang berkontribusi pada kekuatan dan kepadatan beton (Ochto, 2019). Namun *fly ash* memiliki kelemahan yaitu memerlukan waktu pengerasan dan kekuatan awal yang tinggi karena prosesnya yang agak lambat (Fachry, 2022). Untuk mengatasi kelemahan pada *fly ash*, digunakan *bestmittel* yang berperan sebagai *accelerator* dengan menjadikan beton lebih cepat keras dalam usia muda dan mengurangi penggunaan air pada saat pengecoran. Dosis standar *bestmittel* adalah 0,2% hingga 0,6% dari berat semen (Simanullang, 2022). Mutu beton 25 MPa dipilih dalam penelitian ini karena termasuk kategori beton structural yang umum digunakan pada elemen bangunan seperti balok, kolom, dan pelat lantai. Pencapaian mutu tersebut hanya dengan campuran beton normal tanpa bahan tambah dan memerlukan penggunaan semen yang relatif tinggi. Oleh karena itu, substitusi sebagian semen dengan *fly ash* menjadi solusi yang relevan dalam pembuatan beton dengan mutu yang direncanakan, dengan *bestmittel* sebagai solusi atas lambatnya kekuatan awal akibat reaksi pozzolan *fly ash*. Penelitian yang dilakukan oleh Papendang et al. (2023) menunjukkan bahwa substitusi abu marmer 8% dan *fly ash* 10% mengalami kenaikan kuat tekan beton, namun penambahan abu marmer 12% dengan *fly ash* 10% menurunkan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Sementara itu, Rizki (2024) menemukan bahwa substitusi serbuk kaca sebanyak 5% sampai 25% dari berat pasir dan *fly ash* 15% dari berat semen justru menurunkan mutu beton dan tidak mampu mencapai kuat tekan rencana. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penentuan kadar *fly ash* yang tepat menjadi faktor kritis dalam optimasi kinerja beton; peningkatan kadarnya dapat meningkatkan kuat tekan, namun penggunaan yang berlebihan berdampak sebaliknya (Erviyanto et al., 2016). Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini

menetapkan kadar *fly ash* tipe C sebesar 10% dari berat semen dan variasi kadar *bestmittel* (0%; 0,2%; 0,4%; dan 0,6%) terhadap kuat tekan dan modulus elastisitas beton mutu f'c 25 MPa pada umur 7, 14, 28 hari.

Tinjauan Pustaka

Pengaruh penggunaan bestmittel dan fly ash

Ochto (2019) Meneliti tentang pengaruh penambahan 0,6% *bestmittel* dan 5% *fly ash* terhadap aplikasi dari beton silinder dengan kolom beton terkekang. Pada penelitian ini kuat tekan beton mencapai umur rencana pada saat umur 10 hari. Pengaruh pada kuat tekan beton dengan laju kenaikan mencapai 31,76% dengan hasil ini membuktikan bahwa *fly ash* sebagai bahan tambah sebagian semen mampu meningkatkan kuat tekan beton.

Pengaruh penambahan bestmittel

Fachry (2022) meneliti tentang pengetahuan peran pengaruh dan dosis *bestmittel* terhadap perkembangan kuat tekan beton *fly ash*. Pada penelitian ini kadar *fly ash* yang digunakan sebanyak 30% dari berat semen. Dosis *bestmittel* yang digunakan tiap variable mulai dari 0%; 0,2%; 0,4%; 0,6% dari berat semen. Pada hasil pengujian kuat tekan, penggunaan *bestmittel* sangat mempengaruhi untuk mempercepat hidrasi beton *fly ash* yang dimana pada waktu pengujian yang sama, beton dengan kadar *bestmittel* lebih besar memiliki kuat tekan yang lebih tinggi.

Pengaruh tekan beton dengan variasi bahan tambah

Simanullang (2022) menyatakan bahwa dosis *bestmittel* yang digunakan yaitu 0,2% - 0,6% x berat semen. Pada pengujian ini penggunaan *bestmittel* sangat membantu untuk pengecoran dengan waktu yang ketat yaitu beton mengeras pada usia 7-10 hari serta meningkatkan mutu beton 5% - 10%. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis perbedaan hasil kuat tekan beton normal dengan menggunakan bahan tambah *bestmittel* dan tidak menggunakan selama 7 dan 14 hari.

Penggunaan Abu Marmer dan Fly Ash

Papendang et al. (2023) meneliti tentang pengaruh kombinasi abu marmer dan *fly ash* terhadap kuat tekan, kuat tarik dan modulus elastisitas beton. Hasil pengujian kuat tekan dengan penambahan 0% abu marmer dengan 10% *fly ash* mengalami peningkatan sebesar 4,930% dari kuat tekan rencana, juga pada penambahan 8% abu marmer dengan 10% *fly ash* mengalami peningkatan sebesar 1,533%. Namun pada penambahan 12% abu marmer dengan 10% *fly ash* mengalami penurunan sebesar 9,035% dari nilai kuat tekan rencana 25 MPa.

Pengaruh substitusi serbuk kaca dan fly ash

Rizki (2024) meneliti tentang pengaruh substitusi serbuk kaca pada agregat halus dan *fly ash* pada semen terhadap kuat tekan beton, dan modulus elastisitas. Substitusi serbuk kaca sebanyak 5% - 25% dari berat pasir dan 15% *fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai mutu beton tertinggi terjadi pada beton normal dengan rata rata nilai 26,41 MPa. Pada variasi 15% *fly ash* tidak mengalami peningkatan mutu beton, melainkan mengalami penurunan mutu dari beton normal. Hal ini terjadi dikarenakan beton dengan campuran *fly ash* membutuhkan waktu *curing* yang lebih lama untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Landasan Teori

Penelitian ini berlandaskan pada standar SNI, ASTM, dan Peraturan Beton Bertulang sebagai acuan dalam setiap tahapan pengujian material maupun pelaksanaan pekerjaan, dengan rincian sebagai berikut.

1. Agregat Halus (SNI 8321 : 2016 dan ASCM C33 : 2006)
2. Agregat Kasar (SNI 8321 : 2016 dan ASCM C33 : 2006)
3. Air (SNI 03-6861.1 : 2002)
4. Kimia Pozzolan (SNI 2640 : 2014)
5. Perencanaan *Mix Design* (SNI 2934 : 2000)
6. Uji Slump (PBI 1971)
7. Kuat Tekan (SNI 1971 : 2011)
8. Modulus Elastisitas (ASTM C469-02 dan SNI 2847 : 2019)

9. Konversi Umur Beton (PBI 1971)

Metode Penelitian

Metode penelitian yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Penelitian ini dilakukan dengan mengganti 10% *fly ash* berat semen dan memodifikasi *bestmittel* ke dalam campuran semen. Adapun bahan yang digunakan pada penelitian sebagai berikut:

1. Agregat kasar yang digunakan berasal dari Gunung Merapi, D.I Yogyakarta.
2. Agregat halus yang digunakan berasal dari Kulon Progo, D.I Yogyakarta.
3. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement (PCC)* merk Tiga Roda.
4. *Fly ash* yang digunakan tipe C yang berasal dari Pabrik *Fly Ash* di daerah Ponorogo.
5. *Bestmittel* yang digunakan sebagai bahan tambah beton yaitu pada kadar 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, dari berat semen berasal dari toko bangunan di Kawasan Kabupaten Magelang.
6. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik FTSP UII.

Sampel pengujian

Pengujian dilakukan pada sampel beton dengan umur 7, 14, 28 hari untuk setiap variasi campuran. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Jumlah keseluruhan sebanyak 60 buah, dengan 4 buah pada tiap benda variasi. Kodefikasi pada seluruh sampel dapat dilihat pada Tabel 1. berikut.

Tabel 1. Kodefikasi Sampel Benda Uji

Kode Benda Uji	<i>Fly Ash</i> (%)	<i>Bestmittel</i> (%)	Umur (hari)	Jumlah Sampel (buah)
BN.7	0	0	7	4
BF0.7	10	0	7	4
BF0,2.7	10	0,2	7	4
BF0,4.7	10	0,4	7	4
BF0,6.7	10	0,6	7	4
BN.14	0	0	14	4
BF0.14	10	0	14	4
BF0,2.14	10	0,2	14	4

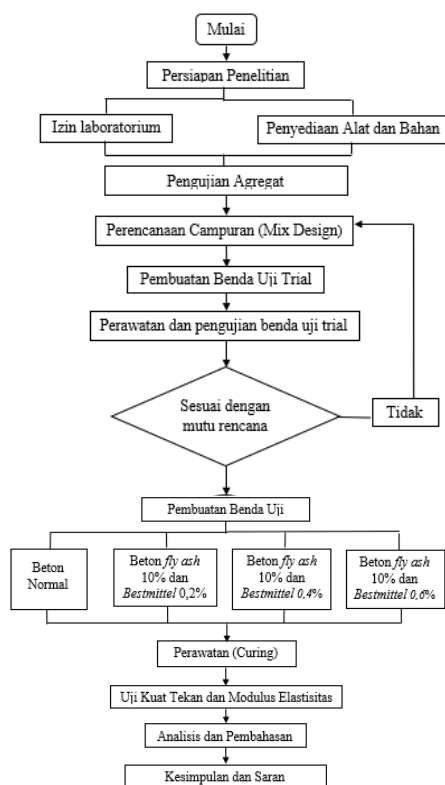
Lanjutan Tabel 1. Kodefikasi Sampel Benda Uji

Kode Benda Uji	Fly Ash (%)	Bestmitt el (%)	Umur (hari)	Jumlah Sampel (buah)
BF0,4.14	10	0,4	14	4
BF0,6.14	10	0,6	14	4
BN.28	0	0	28	4
BF0.28	10	0	28	4
BF0,2.28	10	0,2	28	4
BF0,4.28	10	0,4	28	4
BF0,6.28	10	0,6	28	4
Total		60		

Sementara itu, pengujian modulus elastisitas dilakukan pada satu sampel untuk uji setiap variasi, dengan jumlah keseluruhan sebanyak 15 sampel modulus elastisitas.

Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis dengan tahapan yang terstruktur, sebagaimana digambarkan dalam bagan alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Analisis dan Pembahasan

Hasil pengujian bahan penyusun beton dibahas untuk menilai kualitas material penyusun beton serta menganalisis hasil dari pengujian agregat, uji slump, kuat tekan, dan modulus elastisitas beton terhadap laju umur beton.

Hasil pemeriksaan agregat halus

1. Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air

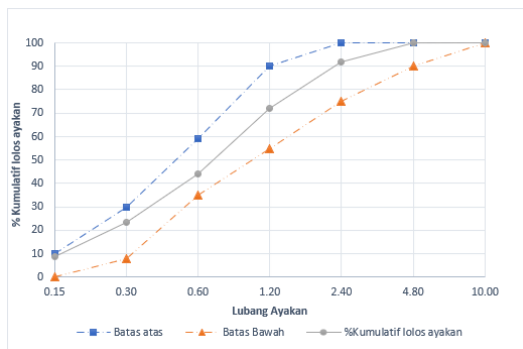
Hasil rata-rata dari berat jenis agregat dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD) berkisar antara 2,5 – 2,7 (Tjokrodimulyo, 2010). Agregat yang digunakan dalam penelitian sudah sesuai standar agregat normal, yaitu sebesar 2,59. Selain itu, serapan air pada agregat halus tersebut sebesar 4,38%.

2. Pengujian Analisa Saringan

Hasil nilai modulus butir masing sebesar 2,60 dan 2,46. Nilai tersebut telah memenuhi standar SNI 03-1750-1990 pada persyaratan modulus halus butir agregat halus, yaitu kisaran antara 1,5 – 3,8. Dan gradasi agregat halus yang didapatkan termasuk dalam daerah gradasi II. Penentuan Gradasi dapat dilihat pada Tabel 2. Serta grafik pada Gambar 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 1

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gr)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)	Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0	0	100
20,00	0	0	0	100
10,00	0	0	0	100
4,80	2	0,10	0,10	99,90
2,40	162	8,10	8,20	91,80
1,20	393	19,65	27,85	72,15
0,60	558	27,90	55,75	44,25
0,30	417	20,85	76,60	23,40
0,15	297	14,85	91,45	8,55
Sisa	171	8,55	100	0
Jumlah	2000	100	259,95	



Gambar 2. Grafik Gradasi Agregat Halus Sampel 1

3. Pengujian Berat Isi.

Didapatkan nilai rata-rata sebesar 1,52 pada berat volume gembur dan nilai rata-rata 1,747 pada berat volume padat.

4. Uji Lolos Saringan No. 200

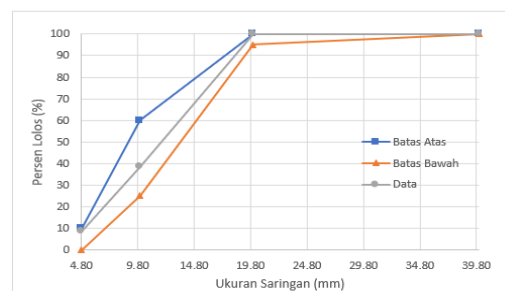
Nilai kadar lumpur pada sampel agregat halus yang didapatkan sebesar 1,8%. Nilai tersebut memenuhi ketentuan SNI S-04-1989-F yang menetapkan bahwa kandungan kadar lumpur dalam agregat halus tidak lebih dari 5%.

Hasil pemeriksaan agregat kasar

1. Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air
Diperoleh nilai berat jenis agregat kasar sebesar 2,84% yang sudah memenuhi persyaratan SNI 03-1970-2008 yaitu > 2,5% serta penyerapan air didapatkan sebesar 1,64%
2. Pengujian Analisa Saringan
Didapatkan masing-masing sampel nilai modulus halus butir 6,381 dan 6,668. Menurut acuan SNI S-04-1989-F nilai yang diperoleh telah memenuhi standar persyaratan untuk agregat kasar yaitu 5 – 8. Adapun proporsi butiran agregat kasar yang didapatkan termasuk dalam persen butir agregat lolos ayakan 20 mm. Penentuan gradasi agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3. Serta grafik pada Gambar 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 1

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gr)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)	Lolos Kumulatif (%)
10,00	3070	61,4	61,4	38,6
4,80	1501	30,02	91,42	8,58
2,40	248	4,96	96,38	3,62
1,20	42	0,84	97,22	2,78
0,60	0	0	97,22	2,78
0,30	0	0	97,22	2,78
0,15	0	0	97,22	2,78
Sisa	139	2,78	100	0
Jumlah	5000	100	638,08	



Gambar 3. Grafik Gradasi Agregat Kasar Sampel 1

3. Pengujian Berat Volume

Nilai rata-rata yang diperoleh pada hasil pengujian berat volume gembur sebesar 1,35 gr/cm³ dan berat volume padat sebesar 1,521 gr/cm³.

Hasil perencanaan campuran (mix design)

Perencanaan campuran beton mengacu pada SNI 03-2834-2000. Berdasarkan hasil pengujian, proporsi agregat halus terklasifikasi pada gradasi 2, sedangkan agregat kasar termasuk dalam klasifikasi butiran lolos ayakan 20 mm. Rekapitulasi hasil perhitungan perencanaan campuran (mix design) disajikan pada Tabel 4. dan Tabel 5. berikut.

Tabel 4. Proporsi Berat Campuran Bahan Penyusun Beton

Variasi	Semen (kg)	Air (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
BN	35,212	17,61	62,62	89,18
BF0	31,691	17,61	62,62	89,18
BF0,2	31,691	17,54	62,62	89,18
BF0,4	31,691	17,47	62,62	89,18
BF0,6	31,691	17,40	62,62	89,18

Tabel 5. Proporsi Berat *Fly Ash* dan *Bestmittel* Penyusun Beton

Variasi	<i>Fly Ash</i> 10% (kg)	<i>Bestmittel</i> (kg)
BN	0	0
BF0	3,521	0
BF0,2	3,521	0,07
BF0,4	3,521	0,141
BF0,6	3,521	0,211

Hasil uji trial

Pengujian trial ini dilakukan untuk mengetahui ketepatan pada campuran beton yang sudah direncanakan. Pada penelitian ini dilakukan dua sampel per variasi yang diuji pada tujuh hari. Hasil dari uji trial tersebut dikonversi ke umur 28 hari. Rekapitulasi hasil uji trial kuat tekan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Trial Umur 7 Hari

Variasi	Kuat Tekan Rerata (MPa)	Kuat Tekan Konversi (MPa)
BN	22,206	34,209
BF0	14,731	22,663
BF0,2	15,798	24,305
BF0,4	25,648	39,458
BF0,6	21,406	32,932

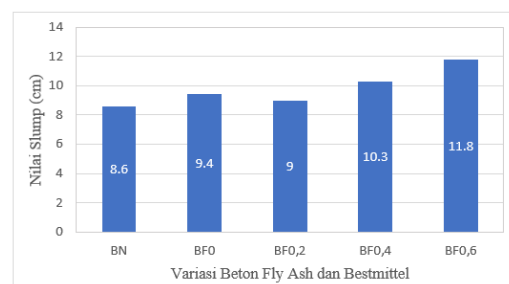
Hasil uji slump

Hasil *slump* digunakan untuk menjadi parameter dalam mengetahui tingkat *workability* beton segar. Semakin besar nilai *slump* yang didapatkan semakin mudah untuk dikerjakan. Nilai *slump* yang direncanakan berdasarkan pada SNI 1972:2008, dengan rentang antara 80 mm sampai 120 mm.

Berikut ini merupakan rekapitulasi hasil pengujian *slump* yang disajikan dalam Tabel 6. dan Gambar 4.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Uji *Slump*

Variasi	Rata-rata <i>Slump</i> (cm)	Keterangan Syarat
BN	8,6	Memenuhi
BF0	9,4	Memenuhi
BF0,2	9	Memenuhi
BF0,4	10,3	Memenuhi
BF0,6	11,8	Memenuhi



Gambar 4. Grafik Hubungan Nilai *Slump* dengan Variasi Beton

Analisis Kuat Tekan Beton

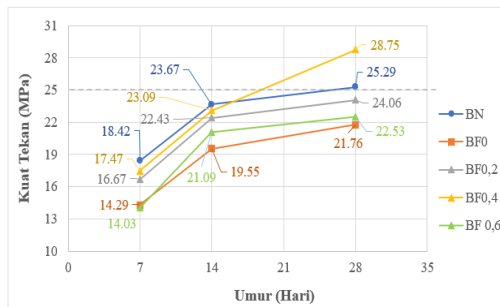
Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7, 14 dan 28 hari dengan jumlah uji 60 sampel silinder, yang terdiri dari 12 sampel per variasi. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin *Compression Test Machine* (CTM) hingga benda uji hancur dan mendapatkan nilai beban maksimum. Rekapitulasi Hasil Kuat Tekan pada umur 7,14, dan 28 Hari disajikan pada Tabel 7., dan grafik pada Gambar 5.

Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tekan

Variasi	Umur Beton (Hari)	Kuat Tekan (MPa)
BN 7	7	18,417
BF0 7		14,288
BF0,2 7		16,673
BF0,4 7		17,465
BF0,6 7		14,032
BN 14	14	23,669
BF0 14		19,551
BF0,2 14		22,427
BF0,4 14		23,089
BF0,6 14		21,089

Lanjutan Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tekan

Variasi	Umur Beton (Hari)	Kuat Tekan (MPa)
BN 28	28	25,286
BF0 28		21,758
BF0,2 28		24,058
BF0,4 28		28,755
BF0,6 28		22,533



Gambar 5. Grafik Hubungan Kuat Tekan dengan Umur Beton

Berdasarkan hasil pengujian, dapat diketahui bahwa pada umur yang sama dengan variasi kadar *bestmittel* yang semakin tinggi kekuatan beton *fly ash* cenderung mengalami peningkatan. Namun, peningkatan tersebut tidak berlaku pada kadar *bestmittel* 0,6%, dimana kuat tekan justru mengalami penurunan dibandingkan variasi lainnya. Hal ini disebabkan karena penambahan zat *bestmittel* yang melebihi dosis optimum sehingga membuat campuran beton menjadi semakin encer dan dapat menurunkan nilai kekuatan beton (Duan dan Wang 2023).

Pada beton normal dan beton *fly ash* dengan variasi kadar 0,4% *bestmittel* mendapatkan kuat tekan rata-rata masing-masing sebesar 25,29 dan 28,75 yang dimana telah memenuhi kuat tekan rencana 25 MPa pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa kadar *bestmittel* 0,4% pada 28 hari adalah kadar optimum dalam mempercepat hidrasi serta meningkatkan kerapatan mikrostruktur beton. Peningkatan kuat tekan pada variasi optimum berkaitan dengan berkurangnya porositas akibat pembentukan C-S-H tambahan serta efek pengisian partikel *fly ash* terhadap rongga antar agregat.

Fenomena menarik terlihat pada perbandingan variasi BF0 dan BF0,6 di rentang umur 7 sampai 14 hari. Pada umur 7 hari, kedua variasi menunjukkan nilai kuat tekan yang hampir sama yaitu BF0 sebesar 14,29 MPa dan BF0,6 sebesar 14,03 MPa. Hal ini disebabkan karena penambahan 0,6% yang melebihi dosis optimum pada umur awal menyebabkan hidrasi berlangsung terlalu cepat dan tidak terkontrol sehingga pembentukan C-S-H menjadi tidak merata. Namun pada umur 14 hari, BF0,6 mengalami peningkatan yang lebih besar dibandingkan BF0 yaitu masing-masing sebesar 22,43 MPa dan 19,55 MPa. Hal tersebut disebabkan pada umur 14 hari efek *water reducing bestmittel* mulai lebih dominan dan *pozzolanic reaction fly ash* mulai bereaksi, sehingga C-S-H yang terbentuk semakin meningkatkan kerapatan mikrostruktur pada beton.

Peningkatan maupun penurunan nilai kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor yang mempengaruhi diantaranya yaitu terdapat kurangnya ketelitian pada saat proses pencampuran di mesin mixer dan kurangnya pemadatan pada saat beton segar dimasukkan ke dalam bekisting untuk dicetak (Akbar, 2024). Selain itu, pengeringan yang kurang maksimal setelah proses curing dapat memengaruhi nilai kekuatan beton.

Hubungan kuat tekan dengan umur beton

Menurut PBI 1971, beton pada usia 7 hari umumnya telah mencapai 65% dari kuat tekan akhirnya, kemudian menjadi 79% pada usia 14 hari, dan mencapai 100% pada usia 28 hari. Penambahan *fly ash* dalam campuran beton membuat nilai konversi kuat tekan berbeda dengan ketentuan PBI 1971 dikarenakan beton *fly ash* memiliki proses hidrasi yang lebih lambat dibandingkan beton normal. Maka persentase perkembangan kuat tekan dilakukan dengan pembagian antara nilai kuat tekan dilakukan dengan pembagian antara nilai kuat tekan pada umur 7 dan 14 dengan nilai kuat tekan pada umur 28 hari. Rekapitulasi persentase kuat tekan beton dengan umur beton serta peningkatan pada

umur 7 dan 14 hari disajikan pada Tabel 8. dan Tabel 9. berikut

Tabel 8. Persentase Kuat Tekan Beton dengan Umur Beton

Kode Benda Uji	Persentase Kuat Tekan pada Umur Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
PBI	65	88	100
BN	72,83	93,61	100
BF0	65,67	89,86	100
BF0,2	69,30	93,22	100
BF0,4	60,74	80,30	100
BF0,6	62,28	93,59	100

Tabel 9. Persentase Peningkatan Kuat Tekan Beton pada Umur 7 dan 14 Hari

Kode Benda Uji	Persentase Kuat Tekan Beton (%)	
	7 ke 14 Hari	14 ke 28 Hari
BN	28,52	6,83
BF0	36,84	11,29
BF0,2	34,51	7,27
BF0,4	32,20	24,54
BF0,6	50,29	6,84

Berdasarkan Tabel 8. menjelaskan bahwa persentase pada semua variasi telah mencapai pada standar PBI 1971 kecuali pada variasi beton *fly ash* 0,4%. Pada beton dengan usia 7 hari persentase kuat tekan tertinggi berada pada beton *fly ash* dengan variasi 0,2% *bestmittel* dan persentase terendah berada pada variasi 0,4% *bestmittel*. Dan beton dengan usia 14 hari menunjukkan persentase kuat tekan tertinggi berada pada beton dengan variasi 0,6% *bestmittel*. Kemudian persentase peningkatan kuat tekan beton pada umur 7 dan 14 hari disajikan pada Tabel 9. Kenaikan kuat tekan pada umur 7 ke 14 hari lebih besar dibandingkan umur 14 ke 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan kuat tekan beton terjadi lebih cepat pada awal umur beton. Sebagaimana yang diketahui pada perkembangan beton normal, pada umur 7 hingga 14 hari memperoleh kenaikan sebesar 28,54% atau 5,62 MPa yang merupakan nilai tertinggi pada periode 14 ke 28 hari dibandingkan variasi lainnya. Perubahan naik turunnya nilai persentase juga dipengaruhi

karena adanya faktor pada saat proses pencampuran dan perawatan (*curing*).

Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas adalah proses untuk mengukur tingkat kekakuan atau elastisitas beton. Yaitu seberapa besar beton akan mengalami deformasi (regangan) ketika diberikan tegangan. Sedangkan modulus elastisitas merupakan kemiringan garis yang ditarik dari titik tegangan nol hingga mencapai 40% dari kuat tekan beton (f'_c). Nilai 40% ini menunjukkan batas elastis pada kurva tegangan regangan beton. Pada tahap ini, beton masih dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dilepaskan. Namun, jika beban terus ditingkatkan, beton akan masuk ke fase plastis hingga mencapai tekan maksimum yang biasanya terjadi pada regangan antara 0,002 hingga 0,003. Perhitungan modulus mengacu pada ASTM C469-02 (Pengujian), dan mengacu pada SNI 2847:2019 (Teoretis). Persamaan yang digunakan pada acuan ASTM C469-02 disajikan pada persamaan 1. berikut.

$$Ec = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (1)$$

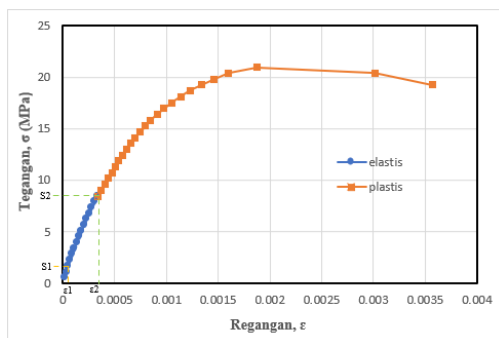
Kemudian untuk persamaan yang mengacu pada SNI 2847:2019 disajikan pada persamaan 2. Berikut.

$$Ec = 4700 \times \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

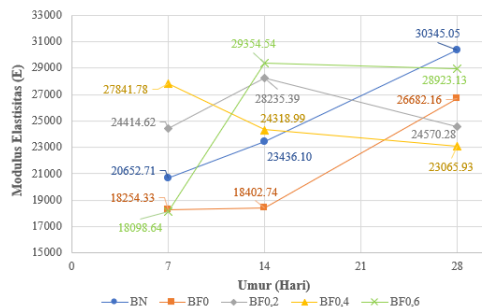
Jumlah sampel yang digunakan untuk pengujian modulus adalah satu sampel per variasi pada umur pengujian 7, 14, dan 28 hari. Pemilihan satu sampel per variasi didasarkan pada keterbatasan waktu dan alat pengujian yang tersedia di laboratorium. Adapun contoh grafik modulus elastisitas pada beton normal umur 14 hari sampel 2 dan rekapitulasi pengujian dan teoretis serta grafiknya disajikan pada Gambar 6; Tabel 10; Gambar 7; dan Gambar 8.

Pada campuran beton dengan kadar variasi *bestmittel* terjadi naik turun yang tidak signifikan disebabkan adanya reaksi pozzolanic dan terdapat faktor pengaruh distribusi pori karena kurangnya pemadatan

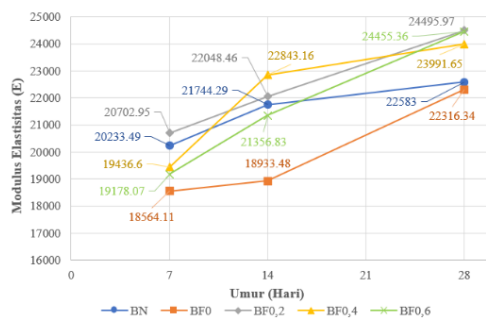
pada saat beton segar dimasukkan ke dalam bekisting yang akan dicetak. Sedangkan pada Gambar 8. di atas dapat dilihat bahwa substitusi *fly ash* dan penambahan *bestmittel* memengaruhi nilai modulus elastisitas beton yang dimana cenderung meningkat dan setara dengan kuat tekan beton. Menurut Neville & ACI (2011) perbedaan 20-40% antara rentang pengujian dan teoretis dilaporkan sebagai hasil yang wajar.



Gambar 6. Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan Beton



Gambar 7. Grafik Pengujian Modulus Elastisitas



Gambar 8. Grafik Teoretis Modulus Elastisitas

Tabel 10. Rekapitulasi Hasil Modulus Elastisitas Beton

Variasi	Umur Beton (Hari)	Modulus Elastisitas (MPa)		Perbedaan (%)
		Pengujian	Teoretis	
BN	7	20.652,49	20.233,49	2,07
BF0		18.254,33	18.564,11	1,67
BF0,2		24.414,62	20.702,95	6,38
BF0,4		27.841,78	19.436,6	11,37
BF0,6		25.892,19	19.178,07	35,01
BN	14	23.436,10	21.744,29	21,00
BF0		18.402,74	18.933,48	6,85
BF0,2		28.235,39	22.048,16	0,79
BF0,4		24.318,99	22.843,16	0,53
BF0,6		29.354,54	21.356,83	0,44
BN	28	30.345,24	21.744,29	34,37
BF0		26.682,08	18.933,48	19,56
BF0,2		24.496,22	22.048,16	0,30
BF0,4		23.992,42	22.843,16	3,86
BF0,6		24.455,18	21.356,83	18,27

Kesimpulan

1. Campuran beton dengan substitusi 10% *fly ash* dari berat semen dan penambahan 0%, 0,2% dan 0,4% *bestmittel* cenderung mengalami kenaikan pada kuat tekan pada setiap umur pengujian, yaitu 7, 14, dan 28 hari. Sementara itu, pada beton *fly ash* dengan penambahan 0,6% *bestmittel* juga mengalami kenaikan seiring bertambahnya umur, namun nilai kuat tekannya relatif lebih rendah dibandingkan beton *fly ash* dengan kadar *bestmittel* yang lebih kecil.
2. Nilai mutu beton tertinggi yang didapatkan terjadi pada variasi beton *fly ash* dengan kadar 0,4% *Bestmittel* pada umur 28 hari, yaitu sebesar 28,755 MPa, dan variasi tersebut sudah melampaui batas kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kadar 0,4% *bestmittel* menunjukkan kadar optimum dalam meningkatkan kekuatan beton dengan substitusi 10% *fly ash*.
3. Penggunaan kombinasi *fly ash* 10% dan *bestmittel* secara signifikan mempercepat laju peningkatan kuat tekan beton pada umur awal beton (7-14 hari) dibandingkan umur lanjut

(14-28 hari), dengan peningkatan tertinggi pada beton *fly ash* dengan kadar 0,6% *bestmittel* yaitu mencapai 50,29% atau 7,06 MPa. Walaupun terjadi penurunan pada periode umur 14-28 hari, beton *fly ash* dengan kadar variasi 0,4% *bestmittel* tercatat memiliki kenaikan tertinggi sebesar 24,54% atau 5,67 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *bestmittel* dalam mengoptimalkan kuat tekan beton lebih awal.

4. Nilai pengujian modulus elastisitas beton yang terjadi pada beberapa variasi beton *fly ash* dengan *bestmittel* tidak signifikan, yang disebabkan oleh lambatnya reaksi pozzolan *fly ash* serta pengaruh distribusi pori akibat kurangnya pemadatan. Sedangkan, pada nilai teoretis substitusi *fly ash* 10% dan penambahan *bestmittel* memengaruhi nilai modulus elastisitas beton yang cenderung meningkat dan searah dengan peningkatan kuat tekan beton. Adapun selisih nilai modulus elastisitas hasil pengujian dan teoretis masih berada dalam rentang wajar yaitu 20-40% (Neville & ACI, 2011).

Saran

1. Perlu dilakukan penelitian selanjutnya mengenai pengujian kuat tekan dengan variasi kadar *Bestmittel* dan *fly ash* lainnya supaya mendapatkan hasil yang detail dan kadar optimum yang lebih akurat.
2. Disarankan untuk melakukan pengujian tambahan seperti uji absorsi air untuk mengetahui hubungan antara kadar *bestmittel* dengan kerapatan porositas beton.
3. Dalam penelitian selanjutnya, perlu dilakukan pengendalian yang lebih ketat terhadap kondisi agregat (SSD), proses mixing, pemadatan, serta mengecek kondisi curing secara berkala terhadap seluruh sampel beton yang akan diuji.

Daftar Pustaka

American Society for Testing and Material. 2002. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio*

of Concrete in (Djau, 2025) Compression. ASTM C469-02. ASTM International. West Conshohocken. PA

Badan Standardisasi Nasional. 1990. *Metode Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. SNI 03-1968-1990. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1990. *Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. SNI 03-1970-2008. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1990. *Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. SNI 03-1969-1990. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1996. *Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam)*. SNI S-04-1989-F. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1998. *Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam* (Nasional, 2011) (Nasional, 2011) *Agregat*. SNI 03-4804-1998. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. SNI 03-2834-2000. BSN. Jakarta

Badan Standardisasi Nasional. 2008. *Cara Uji Slump Beton*. SNI 1972:2008. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. SNI 1974:2011. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional (2011). SNI 2493:2011 Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. SNI 2847:2019. BSN. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2016. *Spesifikasi Agregat Beton*. SNI 8321-2834-2016. BSN. Jakarta

Djau, R. A. (2025). Analisis kuat tekan beton dengan penambahan zat aditif. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 5(2), 1431–1448.

Duan, Y. (2023). Investigating the Impact of Fly Ash on the Strength and Subsequent Stages. *Investigating the Impact of Fly Ash on the Strength and Micro-Structure of Concrete during Steam Curing and Subsequent Stages*. *Materials* 2023, 1-16.

Ervianto, M. (2016). Kuat tekan beton mutu tinggi menggunakan bahan tambah abu terbang (*fly ash*) dan zat adiktif (*bestmittel*). *SINERGI*, 20(3), 199–206.

Fachry. 2020. *Pengaruh Penambahan Bestmittel terhadap kuat Tekan Beton Fly Ash*

Fadila Rizki. 2024. *Pengaruh substitusi serbuk kaca dan fly ash terhadap sifat mekanis beton*

- M. Joan Ochto. 2019. Pengaruh penggunaan Bestmittel dan fly ash pada kuat tekan beton dan aplikasinya untuk beton terkekang pada kolom
- Mulyono, T.. 2004. *Teknologi Beton*. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete Fifth Edition. *England: Pearson Education Limited*.
- Papendang et al. (2023). *Penggunaan Abu Marmer dan Fly Ash sebagai pengganti Sebagian semen pada beton normal*
- Peraturan Beton Bertulang Indonesia. (1971). *PBI 1971*.
- Simanullang (2022) *Pengaruh tekan beton dengan variasi bahan tambah Bestmittel*
- Tjokrodimulyo, K.. (2010) *Buku Ajar: Teknologi Beton*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.