Terbit *online* pada laman web jurnal :

https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |

Optimasi Penggunaan Fly Ash sebagai Material Substitusi Semen terhadap Peningkatan Sifat Mekanik Beton

Ahmad Hamidi[a], Beny Setiawan[b], Febry Eko Purwanto[a], Sjelly Haniza[a]

[a]*Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Digantara No. 4 Pekanbaru, Indonesia*
[b]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pahlawan Tuanku Tambusai, Jl. Tuanku Tambusai No. 23 Bangkinang, Indonesia*

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:
Diterima Redaksi: 22 Juni 2026
Revisi Akhir: 26 Juni 2026
Diterbitkan *Online*: 27 Juni 2026

KATA KUNCI

Beton, Agregat, Flyash, Mekanik.

KORESPONDENSI

Telepon: -

E-mail: ahmadhamidi@sttp-yds.ac.id

ABSTRACT

Beton merupakan material konstruksi yang masih banyak digunakan karena memiliki ketersediaan bahan yang melimpah, mudah dikerjakan, dan mampu menahan beban tekan yang tinggi. Seiring perkembangan teknologi konstruksi, berbagai material limbah mulai dimanfaatkan sebagai bahan tambah beton untuk meningkatkan kinerja sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Salah satu limbah yang berpotensi dimanfaatkan adalah fly ash, yaitu residu hasil pembakaran batu bara pada PLTU. Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PLTU Tenayan Raya Kota Pekanbaru yang pemanfaatannya masih belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan fly ash terhadap kuat tekan beton mutu K-250. Variasi fly ash substitusi semen yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% dari berat semen dengan mengurangi jumlah semen dalam campuran. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder yang berjumlah 3 benda uji setiap variasi dengan pengujian pada umur 14 hari dan 28 hari. Secara total ada 30 benda uji. Sebelum digunakan, fly ash disaring hingga lolos ayakan No.100, sedangkan agregat diuji karakteristik fisiknya untuk menentukan komposisi campuran berdasarkan Job Mix Design (JMD). Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi pengurangan semen (0%–20%), terlihat bahwa peningkatan substitusi cenderung menurunkan kuat tekan beton, terutama pada kadar tinggi. Nilai kuat tekan tertinggi terjadi pada beton normal 0% (28 hari) yaitu sekitar 295,21 kg/cm². Pada substitusi rendah (5%–15%), penurunan kuat tekan masih relatif kecil dan cenderung masih berada pada kisaran yang cukup stabil, sehingga masih memungkinkan digunakan dalam batas tertentu. Namun pada substitusi 20% terjadi penurunan yang sangat signifikan, baik pada umur 14 hari maupun 28 hari, yang menunjukkan bahwa kadar tersebut sudah melewati batas optimum.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki ketersediaan bahan yang melimpah, mudah diaplikasikan, ekonomis, serta memiliki kemampuan menahan beban tekan yang tinggi. Material ini digunakan secara luas pada berbagai konstruksi, seperti gedung, jalan, jembatan, pelabuhan, bandar udara, hingga bangunan sumber daya air. Dalam perencanaan struktur, kebutuhan akan beton bermutu tinggi terus meningkat guna memenuhi persyaratan kekuatan, keawetan, dan umur layan yang optimal.

Kualitas beton umumnya ditentukan oleh kuat tekannya, yang dipengaruhi oleh karakteristik material penyusun, rasio air-semen, proses pencampuran, pemadatan, serta metode perawatan. Agregat berfungsi sebagai rangka utama pembentuk beton, sedangkan pasta semen berperan sebagai bahan pengikat yang menyatukan seluruh

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

komponen penyusun menjadi suatu massa yang padat dan kuat.

Perkembangan teknologi material beton telah mendorong berbagai penelitian untuk meningkatkan kinerja beton melalui pemanfaatan bahan tambah (admixture) maupun bahan substitusi yang berasal dari sumber daya alam dan limbah industri. Penggunaan bahan tambah dalam campuran beton tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik beton, tetapi juga untuk memperbaiki karakteristik beton segar dan beton keras sehingga mampu memenuhi tuntutan konstruksi modern yang mengedepankan aspek kekuatan, keawetan, efisiensi, dan keberlanjutan lingkungan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penambahan material pozzolan alami maupun mineral mampu meningkatkan kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas, serta memperbaiki kelecakan *(workability)* dan durabilitas beton [1][2]. Material berbasis mineral diketahui memiliki ukuran partikel yang relatif halus sehingga mampu mengisi rongga-rongga mikro di dalam matriks beton (filler effect), yang berdampak pada peningkatan kepadatan struktur beton. Selain itu, kandungan silika dan alumina reaktif yang terdapat pada material pozzolan dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil proses hidrasi semen membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan ketahanan beton [3]. Reaksi pozzolanik tersebut juga mampu menurunkan porositas dan permeabilitas beton sehingga meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air, serangan sulfat, klorida, serta berbagai faktor degradasi lingkungan lainnya. Di sisi lain, pemanfaatan limbah mineral sebagai bahan campuran beton memberikan manfaat yang signifikan dari aspek ekonomi dan lingkungan. Penggunaan limbah industri sebagai bahan substitusi sebagian semen dapat mengurangi konsumsi semen Portland yang proses produksinya menghasilkan emisi karbon (CO_2) dalam jumlah besar. Berbagai jenis limbah industri seperti fly ash, silica fume, slag, dan abu biomassa telah banyak diteliti sebagai bahan tambah maupun bahan substitusi semen dalam campuran beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan material tersebut pada kadar optimum mampu meningkatkan sifat mekanik beton, memperbaiki durabilitas, serta menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dibandingkan beton normal [4]. Dengan demikian, pemanfaatan beberapa jenis limbah sebagai bahan campuran beton berpotensi menggantikan sebagian material penyusun beton sekaligus meningkatkan kualitas beton baik dari aspek mekanik maupun keawetan. [5]. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah mineral sebagai material alternatif dalam campuran beton memiliki prospek yang sangat baik untuk menghasilkan beton berkinerja tinggi *(high performance concrete)* yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Flyash yang digunakan berasal hasil pembakaran batu bara di PLTU Tenayan Raya, Pekanbaru, saat ini menimbulkan masalah lingkungan bagi fasilitas dan masyarakat sekitar. Pemanfaatan flyash sebagai bahan pengganti dalam campuran beton diusulkan sebagai solusi praktis yang dapat mengurangi akumulasi limbah sekaligus memberikan nilai ekonomis melalui pengurangan kebutuhan semen dan potensi perbaikan sifat material. Dengan demikian, integrasi flyash ke dalam beton tidak hanya mendukung pengelolaan limbah dan efisiensi biaya konstruksi, tetapi juga mendukung praktik pembangunan berkelanjutan dam membuka peluang bagi penelitian ini untuk mengevaluasi kinerja mekanis, durabilitas, dan manfaat ekonominya dalam konteks lokal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Material Beton

Agregat merupakan material berbutir yang terdiri atas pasir, kerikil, batu pecah, maupun slag hasil samping industri besi, yang digunakan bersama bahan pengikat untuk membentuk beton. Secara umum, proporsi agregat dalam campuran beton berkisar antara 60–70% dari berat total campuran, sehingga keberadaannya sangat dominan dalam menentukan sifat dan kinerja beton.

Agregat

Agregat halus merupakan salah satu komponen utama dalam campuran beton yang berfungsi mengisi rongga di antara agregat kasar sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan stabil. Agregat halus umumnya berupa pasir alam yang diperoleh dari proses pelapukan batuan secara alami maupun hasil pemecahan batuan dengan ukuran butiran yang lolos saringan 4,75 mm. Keberadaan agregat halus dalam campuran beton sangat penting karena berpengaruh terhadap workability, kepadatan, kebutuhan pasta semen, serta sifat mekanik beton yang dihasilkan.

Berdasarkan sumber perolehannya, pasir dapat dibedakan menjadi pasir galian, pasir sungai, dan pasir laut. Pasir galian umumnya memiliki bentuk butiran yang tajam dan permukaan yang kasar sehingga mampu menghasilkan ikatan mekanis yang baik dengan pasta semen. Pasir sungai memiliki bentuk butiran yang lebih membulat akibat proses abrasi alami selama transportasi oleh aliran air, sedangkan pasir laut umumnya bertekstur lebih halus dan mengandung garam terlarut yang dapat memicu korosi pada tulangan apabila tidak melalui proses pencucian dan pengolahan yang memadai sebelum digunakan.

Karakteristik agregat halus, seperti gradasi butiran, bentuk partikel, tekstur permukaan, kadar lumpur, berat jenis, dan daya serap air, merupakan faktor yang sangat menentukan

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457

kualitas beton. Agregat halus dengan gradasi yang baik dan kandungan lumpur yang rendah mampu meningkatkan kepadatan beton, mengurangi rongga internal, serta menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata. Selain itu, pasir yang memiliki permukaan kasar dan bentuk butiran bersudut cenderung memberikan daya lekat yang lebih baik terhadap pasta semen sehingga dapat meningkatkan kuat tekan beton. Sebaliknya, pasir dengan bentuk butiran yang lebih bulat umumnya memberikan tingkat kelecakan (workability) yang lebih baik, namun dapat menurunkan ikatan antarpartikel dan kekuatan beton apabila tidak diimbangi dengan desain campuran yang tepat.

Oleh karena itu, pemilihan agregat halus yang memenuhi persyaratan teknis sesuai standar merupakan salah satu faktor penting dalam menghasilkan beton dengan kekuatan, durabilitas, dan kinerja yang optimal.

Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan material granular berupa kerikil alami atau batu pecah yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm dan umumnya berada pada rentang 5–40 mm. Dalam campuran beton, agregat kasar berfungsi sebagai kerangka utama (skeleton) yang berperan dalam menahan beban, mengurangi perubahan volume akibat penyusutan, serta meningkatkan stabilitas dan kekuatan beton. Karena proporsinya mencapai sekitar 60–70% dari volume total beton, karakteristik agregat kasar sangat menentukan kinerja beton baik pada kondisi segar maupun setelah mengeras.

Berdasarkan massa jenisnya, agregat kasar dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok, yaitu agregat ringan dengan massa jenis kurang dari 2,0 yang umumnya digunakan untuk menghasilkan beton ringan, agregat normal dengan massa jenis antara 2,5–2,7 yang paling banyak digunakan pada konstruksi umum, serta agregat berat dengan massa jenis lebih dari 2,8 yang diaplikasikan pada struktur khusus seperti pelindung radiasi dan konstruksi industri tertentu. Perbedaan massa jenis tersebut berpengaruh terhadap berat sendiri beton, kapasitas menahan beban, serta tujuan penggunaan struktur yang direncanakan.

Selain massa jenis, kualitas agregat kasar juga dipengaruhi oleh gradasi butiran, bentuk partikel, tekstur permukaan, kekuatan, ketahanan terhadap abrasi, daya serap air, dan kebersihan material. Agregat kasar yang memiliki bentuk bersudut dan permukaan kasar cenderung menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan pasta semen sehingga dapat meningkatkan kuat tekan beton. Sebaliknya, agregat dengan bentuk bulat umumnya memberikan workability yang lebih baik, namun memiliki daya lekat yang relatif lebih rendah. Oleh karena itu, pemilihan agregat kasar yang memenuhi persyaratan standar merupakan faktor penting dalam menghasilkan beton dengan kekuatan, durabilitas, dan kinerja struktural yang optimal.

Menurut SK SNI T-15-1991-03, agregat kasar yang baik untuk campuran beton harus memenuhi beberapa persyaratan teknis, antara lain:

1. Memiliki ketahanan mekanis yang tinggi terhadap abrasi, yang dibuktikan melalui pengujian Los Angeles dengan batas nilai keausan maksimum sebesar 40% untuk penggunaan pada beton struktural..
2. Bersih dari kotoran, agregat tidak boleh mengandung lumpur, debu, bahan organik, maupun zat berbahaya lainnya dalam jumlah yang melebihi batas yang diizinkan.
3. Memiliki gradasi yang baik dan menerus, sehingga mampu menghasilkan beton yang padat, tidak mudah mengalami segregasi, serta memiliki workability yang memadai.
4. Tidak mengandung zat reaktif terhadap alkali semen, karena reaksi alkali–agregat dapat menyebabkan ekspansi dan kerusakan beton dalam jangka panjang.
5. Memiliki daya serap air yang rendah, agar tidak mengganggu keseimbangan air dalam campuran beton.
6. Bentuk butiran relatif bersudut dan kasar, terutama untuk batu pecah, karena mampu meningkatkan daya lekat antara agregat dan pasta semen sehingga berdampak positif terhadap kuat tekan beton.

Pemenuhan persyaratan tersebut sangat penting untuk menjamin bahwa agregat kasar yang digunakan mampu menghasilkan beton dengan kekuatan, stabilitas volumetrik, serta durabilitas yang sesuai dengan standar perencanaan struktur.

Semen

Semen merupakan material pengikat hidraulis yang memiliki sifat reaktif secara kimia ketika bercampur dengan air melalui proses hidrasi, sehingga membentuk pasta semen yang berfungsi mengikat dan menyatukan butiran agregat dalam campuran beton. Secara umum, material ini berperan sebagai komponen utama dalam pembentukan kekuatan dan kekompakan struktur beton keras., jenis-jenis semen yang digunakan dalam konstruksi meliputi:

1. *Ordinary Portland Cement (OPC)* Merupakan jenis semen yang paling umum digunakan, terdiri atas lima tipe (Type I–V) sesuai ASTM, dengan perbedaan pada ketahanan sulfat dan panas hidrasi. OPC Type I paling banyak dipakai untuk konstruksi umum.

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457

2. *Portland Composite Cement (PCC)*
   Semen ini merupakan campuran klinker dengan bahan tambahan mineral seperti fly ash, slag, atau pozzolan. PCC memiliki panas hidrasi lebih rendah dan menghasilkan beton yang lebih kedap sehingga meningkatkan durabilitas.
3. *Portland Pozzolan Cement (PPC)*
   Mengandung material pozzolan alami maupun buatan sebagai substitusi sebagian klinker. PPC memberikan perkembangan kuat tekan yang lebih lambat namun berkelanjutan, serta lebih tahan terhadap serangan kimia dan lingkungan agresif.
4. *Semen Portland Slag (PSC)*
   Mengandung campuran klinker dan slag (blast furnace slag). PSC memiliki panas hidrasi rendah serta ketahanan tinggi terhadap sulfat dan klorida, sehingga cocok untuk konstruksi bawah tanah dan lingkungan laut.
5. *White Portland Cement (WPC)*
   Diproduksi dari bahan baku dengan kadar oksida besi rendah sehingga menghasilkan warna putih. Umumnya digunakan untuk pekerjaan arsitektural atau dekoratif.
6. Semen Hidraulis Khusus *(Special Hydraulic Cement)*
   Termasuk semen kedap air, semen cepat mengeras, semen tahan sulfat, dan semen tahan panas, yang digunakan untuk kondisi konstruksi tertentu seperti lingkungan agresif, pengecoran cepat, atau suhu tinggi.

Keberagaman jenis semen tersebut memungkinkan pemilihan material yang sesuai dengan kebutuhan struktural dan kondisi lingkungan, sehingga dapat memberikan performa optimal terhadap kekuatan dan keawetan beton.

Air

Air merupakan salah satu komponen esensial dalam campuran beton yang berperan sebagai medium berlangsungnya reaksi hidrasi semen serta sebagai agen pelumas yang meningkatkan kemudahan pengerjaan (workability) adukan beton. Akan tetapi, penggunaan air secara berlebihan dapat menyebabkan peningkatan rasio air-semen (water–cement ratio), yang selanjutnya berkontribusi terhadap bertambahnya porositas beton dan penurunan nilai kuat tekan yang dihasilkan.

Secara umum, air yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi standar kualitas tertentu, yaitu air yang layak konsumsi (potable water) atau air yang telah melalui proses pengolahan sehingga bebas dari kandungan zat yang dapat mengganggu proses hidrasi semen, seperti bahan organik, minyak, asam, garam, serta senyawa berbahaya lainnya [6] [7].

2.2. Flyash

Fly ash merupakan material residu hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berbentuk partikel halus menyerupai abu terbang. Secara kimia, fly ash didominasi oleh senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO) yang memiliki sifat pozzolan, yaitu kemampuan untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen sehingga membentuk tambahan kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi terhadap peningkatan kepadatan dan kekuatan beton.

Pemanfaatan fly ash sebagai substitusi sebagian semen menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik mekanik beton, khususnya kuat tekan dan kuat lentur. Substitusi fly ash sebesar 5% terbukti mampu meningkatkan kuat tekan hingga 31,23 MPa serta kuat lentur sebesar 4,03 MPa. Namun demikian, pada kadar substitusi 10–20% terjadi kecenderungan penurunan nilai kuat tekan maupun kuat lentur beton. Berdasarkan hasil analisis regresi, kadar optimum penggunaan fly ash berada pada 1,835%, yang menghasilkan kuat tekan maksimum sebesar 30,75 MPa dan kuat lentur maksimum sebesar 3,89 MPa.[8] **.** Penggunaan *flyash* sebagai bahan tambah pada beton berpori terbukti memengaruhi kuat tekan dan porositas beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *flyash* sebesar 10% dengan faktor air semen (FAS) 0,3 memberikan kondisi paling optimum, dengan kuat tekan sebesar 5,47 MPa dan porositas sebesar 7,75 m^3/s. Peningkatan kadar *flyash* di atas 10% serta kenaikan nilai FAS cenderung menurunkan kuat tekan dan porositas beton berpori [8]**.**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa material yang dikaji memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kinerja beton, khususnya pada parameter kuat tekan serta karakteristik fisik lainnya. Variasi komposisi campuran terbukti secara langsung memengaruhi kualitas beton yang dihasilkan, sehingga diperlukan penentuan proporsi material yang tepat guna memperoleh performa optimum sesuai dengan kebutuhan struktural[9]**.** Berdasarkan kajian *systematic literature review*, penggunaan kombinasi fly ash, silika, dan slag terbukti efektif dalam meningkatkan kuat tekan awal beton pada umur 1–7 hari. Fly ash bersifat ramah lingkungan, namun memiliki reaktivitas awal yang relatif rendah sehingga memerlukan aktivator untuk mengoptimalkan kinerjanya. Silika berperan dalam mempercepat proses hidrasi serta memperkuat pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H), sedangkan slag berkontribusi melalui pembentukan gel kalsium alumino silikat hidrat (C-A-S-H) yang meningkatkan densitas mikrostruktur beton. Kombinasi optimal dari ketiga material tersebut mampu menghasilkan kuat tekan lebih dari 20 MPa pada umur 1 hari dan melampaui 40 MPa pada umur 7 hari tanpa perlakuan panas tambahan. Hasil ini menunjukkan potensi yang sangat besar untuk diaplikasikan pada beton pracetak serta konstruksi cepat yang berorientasi pada keberlanjutan. [10]**.**

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457

2.3. Kekuatan Tekan Beton

Kekuatan tekan beton (f'c) diukur dalam satuan MPa dan diperoleh melalui pengujian spesimen silinder (diameter 150 mm, tinggi 300 mm) sesuai standar ASTM C39-86 dan SNI 03-1974-1990. Nilai kekuatan tekan dihitung dengan rumus:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad \text{.....(1)}$$

Dengan:

f'c = kekuatan tekan (kg/cm^2)
P = beban maksimum (kg)
A = luas penampang (cm^2)

Benda uji dinyatakan memenuhi persyaratan mutu kekuatan tekan beton apabila nilai kekuatan tekan yang dihasilkan lebih besar dari nilai rencana. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan beton terdiri dari empat hal, yaitu kualitas masing-masing material, metode pembuatan (desain campuran dan pengecoran), metode perawatan (*curing*), serta kondisi saat pengujian.

3. METODOLOGI

Mutu beton yang direncanakan adalah sebesar f'c 20,75 MPa dengan penggunaan agregat kasar berupa batu pecah yang memiliki nilai abrasi sebesar 19,96%. Variasi substitusi fly ash terhadap semen yang digunakan meliputi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Setiap variasi\ campuran diuji menggunakan tiga benda uji, dengan pengujian dilakukan pada umur 14 hari dan 28 hari, sehingga total keseluruhan benda uji silinder yang digunakan adalah 30 spesimen. Sebelum pengujian kuat tekan, seluruh benda uji terlebih dahulu dilakukan proses perawatan awal dengan pengeringan selama 24 jam.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengujian properties disusun JMD dengan komposisi sebagai berikut :

Semen	=	233,33 kg
Air	=	221,60 kg
Batu split	=	1.051,66 kg
Pasir	=	812,08 kg

Berikut hasil pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 14 hari :

Tabel. 1 Hasil Uji Tekan Umur 14 hari

A (cm)	Berat (gram)	Dial	Kuat tekan aktual		Rata-rata
			Fc'	K-	
a	b	c	d	e	f
Variasi 0 %					
176,71	12.480	415	20,67	248,99	
176,71	12.640	415	20,67	248,99	
176,71	12.600	379	18,86	227,90	241,79
Variasi 5%					
176,71	12.680	421	23,82	287,05	
176,71	12.500	372	21,06	253,63	251,81
176,71	12.440	315	17,83	214,76	
Variasi 10%					
176,71	12.360	394	19,62	236,39	
176,71	12.420	311	15,49	186,59	215,39
176,71	12.560	372	18,25	223,19	
a	b	c	d	e	f
Variasi 15%					
176,71	12.400	352	17,53	211,19	
176,71	12.400	379	18,87	227,39	218,59
176,71	12.340	362	18,03	217,19	
Variasi 20%					
176,71	12.300	227	11,30	136,19	
176,71	12.180	219	10,91	131,39	130,99
176,71	12.200	209	10,41	125,39	

Berdasarkan Tabel 1. variasi substitusi semen dengan fly ash memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan nilai kuat tekan beton, baik pada umur 14 hari maupun 28 hari. Secara umum, seluruh campuran menunjukkan peningkatan kuat tekan dari umur 14 hari ke 28 hari, yang menandakan bahwa proses hidrasi dan pembentukan produk C-S-H masih terus berlangsung seiring bertambahnya umur beton.

Pada campuran kontrol (0% fly ash), diperoleh kuat tekan rata-rata sebesar 241,79 kg/cm² pada umur 14 hari dan meningkat menjadi 295,21 kg/cm² pada umur 28 hari. Nilai ini merupakan yang tertinggi dan telah melampaui mutu rencana K-250, sehingga menunjukkan performa optimum tanpa substitusi semen.

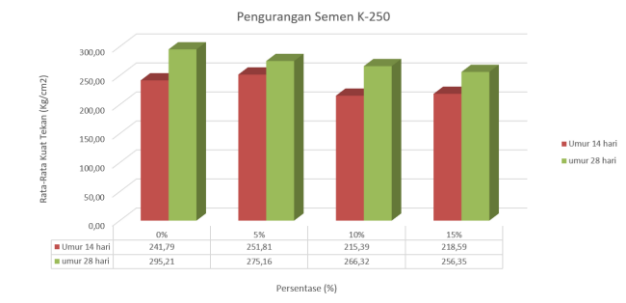
Tabel. 2 Hasil Uji Tekan Umur 28 hari

A (cm)	Berat (gram)	Dial	Kuat tekan aktual		Rata-rata
			Fc'	K-	
a	b	c	d	e	f
Variasi 0 %					
176,71	12.440	430	24,33	293,17	
176,71	12.700	404	22,86	275,44	295,21
176,71	12.520	465	26,31	317,03	
Variasi 5%					

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457

176,71	12.480	402	22,89	275,85	275,16
176,71	12.760	406	23,12	278,59	
176,71	12.360	395	22,49	271,04	
Variasi 10%					
176,71	12.360	411	22,96	276,25	266,32
176,71	12.380	395	22,07	265,88	
176,71	12.500	381	21,28	256,45	
Variasi 15%					
176,71	12.350	365	20,65	248,85	256,35
176,71	12.450	345	19,52	235,22	
176,71	12.320	418	23,65	284,99	
Variasi 20%					
176,71	12.220	220	12,45	149,99	160,22
176,71	12.380	235	13,29	160,22	
176,71	12.450	250	14,14	170,45	

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan hasil kuat tekan optimal sudah mencapai diatas 100% kecuali variasi 20% dengan nilai tertinggi 275,16 kg/cm^2. Secara keseluruhan variasi 0%-15% sudah mencapai target kuat tekan beton. Trend hasil kuat tekan seperti ditunjukkan pada grafik berikut



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Umur 14 dan 28 hari

Berdasarkan Gambar 2, dengan variasi substitusi semen 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, terlihat adanya pengaruh yang cukup signifikan terhadap perkembangan kuat tekan beton pada umur 14 hari dan 28 hari. Secara umum, seluruh variasi menunjukkan peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari dibandingkan umur 14 hari, yang mengindikasikan bahwa proses hidrasi semen dan kontribusi reaksi lanjutan material pengganti semen masih berlangsung secara progresif hingga umur perawatan lebih lanjut. Pada beton kontrol (0%), diperoleh kuat tekan sebesar 241,79 kg/cm² pada umur 14 hari dan meningkat menjadi 295,21 kg/cm² pada umur 28 hari. Nilai ini merupakan capaian tertinggi pada seluruh variasi umur 28 hari, sehingga dapat disimpulkan bahwa tanpa substitusi semen, beton K-250 menunjukkan performa optimum dari sisi kekuatan tekan. Pada variasi 5%, terjadi peningkatan kuat tekan awal menjadi 251,81 kg/cm² pada umur 14 hari, yang bahkan lebih tinggi dibandingkan beton kontrol. Hal ini mengindikasikan adanya kontribusi awal dari efek filler atau percepatan pembentukan struktur mikro beton. Namun pada umur 28 hari, kuat tekan menurun menjadi 275,16 kg/cm², meskipun masih relatif tinggi dibandingkan variasi substitusi yang lebih besar.

Pada variasi 10%, kuat tekan mengalami penurunan pada umur 14 hari menjadi 215,39 kg/cm², namun meningkat pada umur 28 hari menjadi 266,32 kg/cm². Kondisi ini menunjukkan bahwa pada persentase substitusi ini, perkembangan kekuatan lebih banyak bergantung pada reaksi jangka panjang, seperti reaksi pozzolan, dibandingkan hidrasi awal semen.

Selanjutnya pada variasi 15%, kuat tekan umur 14 hari sebesar 218,59 kg/cm² dan meningkat menjadi 256,35 kg/cm² pada umur 28 hari. Meskipun masih terjadi peningkatan seiring waktu, nilai ini menunjukkan tren penurunan yang lebih konsisten dibandingkan variasi 0% dan 5%, yang mengindikasikan bahwa proporsi pengurangan semen mulai memberikan dampak yang lebih nyata terhadap kapasitas pembentukan matriks beton.

Pada variasi tertinggi yaitu 20%, terjadi penurunan kuat tekan yang sangat signifikan, yakni hanya 130,99 kg/cm² pada umur 14 hari dan meningkat menjadi 160,22 kg/cm² pada umur 28 hari. Nilai ini menunjukkan bahwa substitusi semen pada tingkat ini sudah melewati batas optimal, sehingga ketersediaan produk hidrasi utama tidak lagi mencukupi untuk membentuk struktur beton yang padat dan kuat.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa peningkatan persentase pengurangan semen cenderung menurunkan kuat tekan beton, baik pada umur awal maupun umur 28 hari. Substitusi hingga 5% masih memberikan kinerja yang relatif baik, bahkan meningkatkan kuat tekan awal, namun penurunan mulai lebih jelas terlihat pada 10% hingga 15%, dan menjadi sangat signifikan pada 20%. Dengan demikian, batas optimal substitusi semen pada penelitian ini berada pada kisaran rendah (sekitar 5–10%), sedangkan di atas itu terjadi degradasi kuat tekan yang cukup tajam akibat berkurangnya kontribusi semen dalam pembentukan matriks C-S-H yang dominan dalam kekuatan beton.

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Secara umum, kuat tekan beton pada umur 28 hari selalu lebih tinggi dibandingkan umur 14 hari pada semua variasi, menunjukkan bahwa proses hidrasi semen masih berlangsung optimal seiring bertambahnya umur beton. Terhadap variasi pengurangan semen (0%–20%), terlihat bahwa peningkatan substitusi cenderung menurunkan kuat tekan beton, terutama pada kadar tinggi. Nilai kuat tekan tertinggi terjadi pada beton normal 0% (28 hari) yaitu sekitar 295,21 kg/cm².

Pada substitusi rendah (5%–15%), penurunan kuat tekan masih relatif kecil dan cenderung masih berada pada kisaran yang cukup stabil, sehingga masih memungkinkan digunakan dalam batas tertentu. Namun pada substitusi 20% terjadi penurunan yang sangat signifikan, baik pada umur 14 hari maupun 28 hari, yang menunjukkan bahwa kadar tersebut sudah melewati batas optimum.

Berdasarkan dari hasil pengujian tekan dengan subtitusi pengurangan semen variasi yang optimal adalah pada variasi 5% dengan nilai kuat tekan 251,81 kg/cm² pada umur 14 hari dan 275,16 kg/cm² pada umur 28 hari.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggantian semen masih dapat diterapkan secara terbatas (hingga sekitar 10–15%) tanpa penurunan kuat tekan yang terlalu drastis, tetapi penggunaan 20% tidak direkomendasikan karena menurunkan performa beton secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. R. Gallegos-Villela et al.. "Effect of Natural Additives on Concrete Machanical Properties". *Cogent Eng.*, Vol. 08, No. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2020.1870790.

[2] J. Setina, A. Gabrene, and I. Juhnevica. "Effect of Pozzolanic Additives on Structure and Chemical Curability of Concrete". *Procedia Eng.*, Vol. 57, pp. 1005-1012, 2013.

[3] D. Nagrockien ė et al., "Properties of concrete modified with mineral additives". *Constr. Build. Mater*, Vol. 135, pp. 37–42, 2017.

[4] D. Tavakoli et al., "Use of Waste Materials in Concrete: A Review". *Pertanika J. Sci. Technol*, Vol. 26, No. 2, pp. 499–522, 2018.

[5] N. K. Vasoya and H. R. Varia, "Utilization of Various Waste Materials in Concrete: A Literature Review". *Int. J. Eng. Res.*, Vol. 4, No. 4, pp. 1122–1126, 2015.

[6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7974:2013 Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis*, 2013.

[7] S. A. Chini and W. J. Mbwambo, "Environmentally friendly solutions for the disposal of concrete wash water from ready mixed concrete operations". *Beijing Int. Conference*, pp. 21–24, 2000.

[8] A. A. Bara, "Systematic Literature Review: Peranan Fly ash, Silika, dan Slag Sebagai Bahan Tambahan dalam Meningkatkan Kekuatan Tekan Dini Beton," *J. Kridatama Sains dan Teknol.*, vol. 7, no. 01, pp. 563–571, 2025, doi: 10.53863/kst.v7i01.1729.

[9] B. Catur Marina and D. Ahmad Pujiyanto, "Pengaruh Fly Ash Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton Berpori," *J. Saintis*, vol. 20, no. 02, pp. 110–118, 2020, doi: 10.25299/saintis.2020.vol20(02).5622.

[10] R. Fernando, L. Sulaiman, R. Raditya, G. A. Taurano, and T. Hakim, "Evaluasi Kekuatan Beton Mutu Tinggi Dengan Menggunakan Kombinasi Fly Ash Dan Silica Fume Sebagai Subtitusi Semen," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa dan Sos.*, vol. 20, no. 3, pp. 245–255, 2025, doi: 10.32497/orbith.v20i3.6257.

https://doi.org/10.35583/js.v14i1.457