

EVALUASI KEKUATAN BETON MUTU TINGGI DENGAN MENGGUNAKAN KOMBINASI FLY ASH DAN SILICA FUME SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN

Oleh: Robi Fernando¹, Lusman Sulaiman², Raditya³, Galih Adya Taurano⁴, Taufikul Hakim⁵

^{1,2,3,4}Staf Pengajar Prodi Teknik Konstruksi Bangunan Gedung, Politeknik Pekerjaan Umum.

⁵Laboran Material dan Struktur, Politeknik Pekerjaan Umum.

Jl. Prof. H. Soedarto, SH. Tembalang Semarang

E-mail: ¹roferwong@gmail.com

Abstrak

Beton mutu tinggi merupakan material penting dalam konstruksi modern karena kekuatannya yang unggul dan daya tahannya yang tinggi. Salah satu cara untuk meningkatkan performa beton adalah dengan menggunakan bahan substitusi seperti fly ash dan silica fume sebagai pengganti sebagian semen. Fly ash dan silica fume, yang merupakan produk sampingan industri, telah terbukti meningkatkan kekuatan tekan, daya tahan, dan sifat-sifat mekanis beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan beton mutu tinggi dengan kombinasi fly ash dan silica fume sebagai substitusi semen dalam persentase yang berbeda-beda dengan variasi 1 dengan Fly Ash 5% dan Sica fume 2%, variasi 2 dengan Fly Ash 15% dan Sica fume 6%, variasi 3 dengan Fly Ash 20% dan Sica fume 8%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan umur 28 hari menunjukkan variasi 3 mencapai kuat tekan tertinggi 67,93 MPa atau meningkat 60% dari rancangan awal (42 MPa), diikuti oleh Variasi 2 sebesar 63,03 MPa meningkat 40,1% dan Variasi 1 sebesar 45,85 MPa meningkat 8,6%. Hasil ini memberikan wawasan penting untuk pengembangan beton mutu tinggi yang lebih ramah lingkungan dan efisien dalam biaya konstruksi. Penelitian ini diakhiri dengan kesimpulan bahwa kombinasi fly ash dan silica fume merupakan pilihan yang optimal untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton, dengan saran untuk implementasi lebih luas dalam proyek infrastruktur.

Kata kunci: Beton Mutu Tinggi, Fly Ash, Silica Fume, Substitusi Semen.

Abstract

High-strength concrete is a critical material in modern construction due to its superior strength and durability. One method to enhance concrete performance is by using supplementary materials such as fly ash and silica fume as partial replacements for cement. Fly ash and silica fume, which are industrial by-products, have been proven to improve the compressive strength, durability, and mechanical properties of concrete. This study aims to evaluate the strength of high-strength concrete with a combination of fly ash and silica fume as cement substitutes in varying percentages: Variation 1 with 5% fly ash and 2% silica fume, Variation 2 with 15% fly ash and 6% silica fume, and Variation 3 with 20% fly ash and 8% silica fume. The results show that the 28-day compressive strength of Variation 3 achieved the highest strength at 67.93 MPa, representing a 60% increase from the initial design (42 MPa), followed by Variation 2 at 63.03 MPa (a 40.1% increase), and Variation 1 at 45.85 MPa (an 8.6% increase). These findings provide valuable insights for the development of more environmentally friendly and cost-efficient high-strength concrete. The study concludes that the combination of fly ash and silica fume is an optimal choice for improving concrete strength and durability, with recommendations for broader implementation in infrastructure projects.

Keywords: High-Strength Concrete, Fly Ash, Silica Fume, Cement Substitution.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan penduduk di suatu lokasi mengiringi kebutuhan penggunaan beton dan telah menjadi bahan yang paling banyak digunakan kedua setelah air dalam beberapa tahun terakhir (Sagar & Sivakumar, 2020). Beton konvensional memiliki beberapa

keterbatasan, termasuk kekuatan tekan yang moderat dan rentan terhadap serangan kimia, sehingga banyak upaya telah dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanis beton (Huang et al., 2021). Untuk mengatasi kekurangan tersebut, beton mutu tinggi (*High-Strength Concrete*) dikembangkan dengan menggunakan campuran material

tambahan untuk meningkatkan kualitas mekanis dan fisiknya, Namun, produksi beton dan bahan-bahannya memerlukan sejumlah besar energi, menghabiskan sumber daya alam, dan melepaskan CO₂ (Ahmad et al., 2021).

Dalam beberapa dekade terakhir, penggunaan bahan pengganti semen telah menjadi fokus dalam penelitian beton, karena pembuatan beton mengkonsumsi sejumlah besar sumber daya alam, terutama untuk persiapan bahan baku hingga pembakaran klinker Portland (Golewski, 2021). *Fly ash* dan *silica fume* adalah dua material yang paling umum digunakan sebagai substitusi semen yang dapat mengurangi dampak diatas dan menghasilkan beton dengan mutu yang lebih baik.

Fly ash adalah residu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap. Material ini telah digunakan secara luas dalam konstruksi beton karena kemampuannya untuk meningkatkan workabilitas, mengurangi panas hidrasi, dan meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang agresif. *Silica fume*, di sisi lain, merupakan hasil sampingan dari proses pembuatan silikon dan paduan ferosilikon. *Silica fume* memiliki ukuran partikel yang sangat halus, yang memungkinkannya untuk mengisi celah antara partikel semen, meningkatkan kepadatan dan mengurangi porositas pada struktur beton.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kekuatan beton mutu tinggi yang menggunakan kombinasi *fly ash* dan *silica fume* dengan merek *Sicafume* sebagai substitusi semen. Studi ini berfokus pada pengaruh variasi persentase *fly ash* dan *silica fume* terhadap kekuatan tekan dan sifat mekanis lainnya dari beton. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan beton yang lebih kuat, tahan lama, dan ramah lingkungan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Karakteristik Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi didefinisikan oleh ACI sebagai beton dengan kekuatan tekan melebihi 41 MPa (6000 psi), dimana kuat tekan merupakan sifat mekanis penting dari beton berkekuatan tinggi (Björklund et al., 2021). Beton Mutu tinggi memiliki kuat tarik yang rendah dan getas (Małek et al., 2020), sehingga Pengendalian sifat rapuh pada beton berkekuatan tinggi (HSC) merupakan aspek krusial dalam teknologi beton (Ahmad et al., 2020). Beton mutu tinggi banyak dikembangkan dengan menambahkan bahan tambahan seperti *silica fume* dan *fly ash* untuk meningkatkan sifat mekanis dan durabilitasnya (Xu et al., 2021).

Dari segi kekuatan (*strength*), beton mutu tinggi memiliki kekuatan tekan yang jauh lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, sering kali mencapai lebih dari 100 MPa dalam aplikasi tertentu. Kekuatan ini dicapai melalui penggunaan bahan tambahan seperti *silica fume*, yang meningkatkan densitas pasta semen dan mengurangi porositas beton.

Dari sisi Kemudahan pelaksanaan (*workability*), beton mutu tinggi sering kali menghadapi tantangan. Kerapatan tinggi yang dihasilkan dari penggunaan campuran bahan tambahan dapat mengurangi *workability*, sehingga membuat beton lebih sulit diolah dan ditempatkan.

Dari segi ketahanan (*durability*), beton mutu tinggi memiliki daya tahan yang jauh lebih baik terhadap berbagai kondisi lingkungan ekstrem, seperti serangan kimia, siklus pembekuan-pencairan, dan abrasi. Kerapatan yang lebih tinggi dan porositas yang lebih rendah membuat beton ini lebih tahan terhadap penetrasi air dan ion berbahaya seperti klorida, yang biasanya menyebabkan korosi pada tulangan baja. Selain itu, penggunaan bahan tambahan seperti *fly ash* tidak hanya meningkatkan kekuatan tetapi juga menambah ketahanan terhadap sulfat dan serangan kimia lainnya. Penggunaan beton berkekuatan tinggi dalam konstruksi menawarkan lebih banyak aplikasi dan meningkatkan performa

dibandingkan dengan beton berkekuatan Normal (Tawfik et al., 2022).

2.2. Persyaratan Bahan Penyusun Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi memiliki persyaratan material yang ketat untuk memastikan *strength*, *workability*, dan *durability* secara optimal. Berdasarkan standar nasional Indonesia (SNI) yang mengacu pada pedoman internasional, bahan utama seperti semen, pasir, dan agregat kasar (kerikil) harus memenuhi kriteria tertentu. SNI memberikan panduan tentang material yang digunakan dalam campuran beton berkekuatan tinggi untuk menghasilkan kinerja yang diharapkan dalam berbagai aplikasi konstruksi.

a. Agregat Halus

Pasir yang digunakan untuk beton mutu tinggi harus bersih, keras, dan bebas dari bahan organik atau kontaminan lainnya yang dapat mengganggu reaksi kimia dalam campuran beton. Menurut SNI, ukuran butir pasir yang disarankan berkisar antara 0,15 hingga 5 mm dengan modulus kehalusan antara 2,3 hingga 3,1. Modulus kehalusan ini menentukan *workability* dan kekuatan beton (Ullah et al., 2022). Selain itu, kadar lumpur dalam pasir tidak boleh lebih dari 5% berat untuk menghindari penurunan mutu beton, sehingga pasir harus melalui proses pencucian jika terdapat kontaminan atau lumpur yang berlebihan.

b. Agregat Kasar

Agregat kasar atau kerikil dalam beton mutu tinggi harus memiliki sifat fisik yang baik, seperti kekuatan dan daya tahan tinggi. Berdasarkan SNI 03-2834-2000, kerikil yang digunakan harus memiliki ukuran maksimum antara 10 hingga 20 mm untuk memastikan homogenitas campuran beton dan mencegah segregasi. Selain itu, kerikil harus bersih dan bebas dari bahan-bahan yang dapat mempengaruhi ikatan antara agregat dan pasta semen, seperti debu atau lumpur. Kekerasan agregat kasar diatur dengan persyaratan uji abrasi Los Angeles, di mana agregat tidak boleh mengalami kehilangan berat lebih dari 40% setelah uji.

c. Air

Air yang digunakan dalam campuran beton mutu tinggi harus memenuhi standar. Air harus bebas dari bahan-bahan berbahaya seperti asam, alkali, garam, minyak, atau bahan organik lainnya yang dapat mengganggu proses hidrasi semen (Fernando, Abda, et al., 2022).

d. Semen

Semen adalah bahan pengikat hidrolis yang akan bereaksi secara kimia jika dicampur dengan air (Fernando, Utama, et al., 2022). Semen yang biasa digunakan pada konstruksi pada umumnya adalah PC tipe 1. Pemilihan merek dan tipe semen kemungkinan merupakan faktor utama yang menentukan dalam memilih bahan untuk campuran beton berkekuatan tinggi (Ullah et al., 2022).

e. Fly Ash

Fly ash adalah hasil sampingan dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik (Sim et al., 2020). Perulakunya memiliki sifat pozzolan yang mengandung Al_2O_3 dan SiO_2 (Farooq et al., 2021). Ada dua tipe fly ash yang diakui dalam standar ASTM C618, yaitu Class F dan Class C.

- Class F pada umumnya digunakan dalam beton mutu tinggi. Tipe ini memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) yang rendah, biasanya kurang dari 10%, dan lebih efektif untuk meningkatkan durabilitas beton dalam lingkungan yang agresif seperti eksposur sulfat atau air laut. Fly ash ini juga memberikan sifat pozzolanik yang lebih baik dan meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia.
- Class C memiliki kandungan CaO yang lebih tinggi, biasanya lebih dari 20%, dan memiliki sifat pozzolanik dan semen lebih kuat. Namun, *fly ash* tipe ini lebih cocok untuk beton dengan kebutuhan khusus seperti stabilisasi tanah dan tidak selalu ideal untuk beton mutu tinggi yang membutuhkan kekuatan jangka panjang.

f. Bahan Tambah Aditif (*chemical admixture*)

Chemical admixture adalah bahan tambahan yang dimasukkan ke dalam campuran beton atau semen untuk mengubah sifat dasar beton dan meningkatkan kinerja material tersebut. Aditif ini digunakan untuk berbagai tujuan, seperti meningkatkan *workability*, mempercepat atau memperlambat waktu pengerasan, mengurangi penyusutan, meningkatkan kekuatan tekan, atau meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang keras misalnya, pembekuan-pencairan, serangan kimia. Aditif admixture juga sering disebut sebagai *chemical admixture* dalam industri konstruksi, beberapa admixture yang akan digunakan dalam beton mutu tinggi seperti :

- Superplasticizers (High-Range Water Reducers) adalah admixture yang sangat penting dalam beton mutu tinggi karena kemampuannya untuk mengurangi penggunaan air tanpa mengorbankan nilai dari *workability* beton (Althoey et al., 2022). Dengan mengurangi rasio air-semen, superplasticizer memungkinkan peningkatan kekuatan beton. Selain itu, admixture ini meningkatkan fluiditas campuran beton, yang sangat penting dalam aplikasi beton mutu tinggi, terutama di area dengan kepadatan tulangan yang tinggi.
- Retarders digunakan untuk memperlambat waktu setting beton, yang berguna dalam situasi cuaca panas atau ketika diperlukan waktu lebih lama untuk penempatan beton dalam proyek besar. Bahan ini mencegah pengikatan beton terlalu cepat, sehingga mengurangi risiko retak pada beton yang baru dicor.

2.3. Mekanisme Rancangan Campuran Beton Mutu Tinggi

Mekanisme perancangan beton mutu tinggi sesuai dengan SNI (Standar Nasional Indonesia) dan ACI (American Concrete Institute) memiliki beberapa tahapan penting yang harus diikuti untuk memastikan kekuatan, durabilitas, dan *workability* beton

sesuai dengan persyaratan proyek konstruksi yang menuntut kualitas tinggi. Penjelasan tentang mekanisme perancangan beton mutu tinggi berdasarkan kedua standar tersebut sebagai berikut:

a. Menentukan Kekuatan Tekan Desain

Langkah pertama dalam merancang beton mutu tinggi adalah menentukan kekuatan tekan beton (f'_c) yang diinginkan. Beton mutu tinggi biasanya memiliki kekuatan tekan lebih dari 41 MPa (6000 psi). Kekuatan tekan yang ditargetkan ditentukan berdasarkan kebutuhan struktural proyek, jenis beban yang akan diterima oleh beton, dan kondisi lingkungan. Desain kekuatan ini juga harus mempertimbangkan faktor keamanan dan kualitas material

b. Menentukan Rasio Air-Semen (Water-Cement Ratio)

Setelah kekuatan tekan ditetapkan, langkah berikutnya adalah menentukan rasio air-semen. Baik ACI maupun SNI menekankan pentingnya rasio air-semen rendah untuk mencapai beton mutu tinggi. Rasio air-semen yang rendah menghasilkan beton yang lebih padat, kuat, dan tahan terhadap serangan kimia dan kelembaban. Untuk beton mutu tinggi, rasio ini biasanya di bawah 0,40. Penetapan bahwa rasio air-semen harus cukup rendah untuk mencapai kekuatan yang ditargetkan tanpa mengurangi *workability*.

c. Menentukan Campuran Beton

Setelah memilih material yang sesuai, langkah berikutnya adalah menentukan proporsi campuran. SNI 03-6468-2000 memberikan panduan tentang metode desain campuran tinggi dengan semen portland dan dengan abu terbang dengan menentukan kuat tekan target (f'_{cr}) sesuai persamaan berikut:

$$f'_{cr} = \frac{f'_c + (9,66 \text{ MPa})}{0,9}$$

dengan :

f'_c = Kuat tekan beton mutu tinggi (MPa)

Pendekatan lain untuk mencapai f'_{cr} melibatkan:

- Penentuan jumlah semen yang cukup untuk mencapai kekuatan yang diinginkan.
 - Penggunaan agregat dengan ukuran dan distribusi yang tepat untuk meminimalkan rongga udara dan menghasilkan beton yang padat.
 - Menghitung jumlah air yang dibutuhkan untuk workability dan hidrasi yang tepat
- d. Pembuatan dan Perawatan Silinder Beton Mutu Tinggi (Curing)

Pembuatan Silinder beton dilakukan menggunakan mixer beton untuk memastikan campuran homogen. Pengujian beton segar perlu dilakukan untuk mengecek workability. Berdasarkan beberapa penelitian telah mempelajari tentang pengaruh berbagai parameter seperti durasi pencampuran, kecepatan, dan urutan penambahan bahan beton ke dalam mixer, dan terbukti bahwa faktor-faktor ini memiliki dampak signifikan terhadap material yang dihasilkan (Mostafa et al., 2020). Setelah bahan tercampur dengan baik, maka dilakukan pengujian slump untuk mengevaluasi kemampuan kemudahan pengerjaan beton (workability) (Siddika et al., 2021). Pengujian slump terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengujian Slump Beton

Langkah Selanjutnya campuran beton dimasukkan ke dalam cetakan silinder 150 mm x 300 mm yang telah disiapkan sesuai dengan standar SNI 03-4810-1998. Setiap cetakan diisi bertahap, dengan pemadatan di setiap lapisan menggunakan batang pemadat atau alat getar untuk menghindari terjadinya

rongga udara yang dapat mengurangi kekuatan beton.

SNI 03-2847-2013 dan ACI 308 menekankan pentingnya curing yang baik untuk mencapai kekuatan tekan maksimum. Curing menjaga kelembaban dalam beton selama proses hidrasi semen, yang sangat penting untuk beton mutu tinggi. Curing yang buruk dapat menyebabkan retak dini dan penurunan kekuatan. Proses Curing dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Curing Slinder Beton

- e. Pengujian Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton diartikan sebagai kemampuan beton untuk menahan beban per satuan luas hingga batas maksimum sebelum terjadi keruntuhan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mesin tekan, di mana beton akan menerima gaya tekan hingga mencapai batas kekuatannya. Beberapa faktor yang memengaruhi kekuatan tekan beton meliputi rasio air-semen, kepadatan beton, usia beton, jenis dan jumlah semen yang digunakan, serta sifat dari agregat yang dicampurkan. Proses uji tekan beton seperti pada Gambar 4.



Gambar 3. Proses Tes Tekan Beton

Beberapa aspek yang perlu dievaluasi setelah pengujian sampel meliputi:

- Kondisi fisik benda uji silinder, seperti adanya rongga besar atau cacat lain,
- Nilai dan variasi berat jenis beton,
- Pola keruntuhan yang terjadi pada benda uji.

Hasil pengujian kekuatan tekan beton menunjukkan bahwa terdapat hubungan logaritmis antara kekuatan tekan dan kecepatan penerapan gaya. Semakin cepat gaya diterapkan, semakin tinggi kekuatan tekan yang dihasilkan. Selain itu, keselarasan gaya tekan terhadap penampang benda uji, atau eksentrisitas gaya, memiliki pengaruh signifikan. Ketidaksejajaran atau eksentrisitas dalam arah gaya tekan dapat menyebabkan penurunan kekuatan tekan benda uji, sehingga penting untuk memastikan bahwa arah gaya tekan mesin tetap lurus selama pengujian.

Perhitungan kuat tekan beton mutu tinggi menggunakan persamaan :

$$f_c = \frac{P}{A}$$

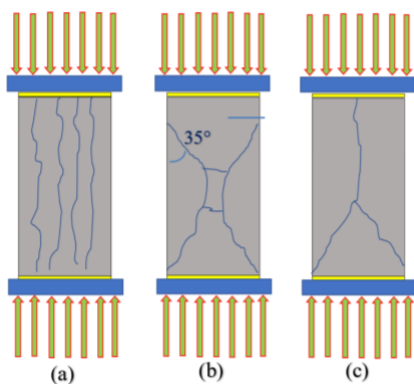
dengan :

f_c = Kuat tekan beton mutu tinggi (Mpa)

P = Beban tekan maksimum (N)

A = Luas alas silinder benda uji (mm²)

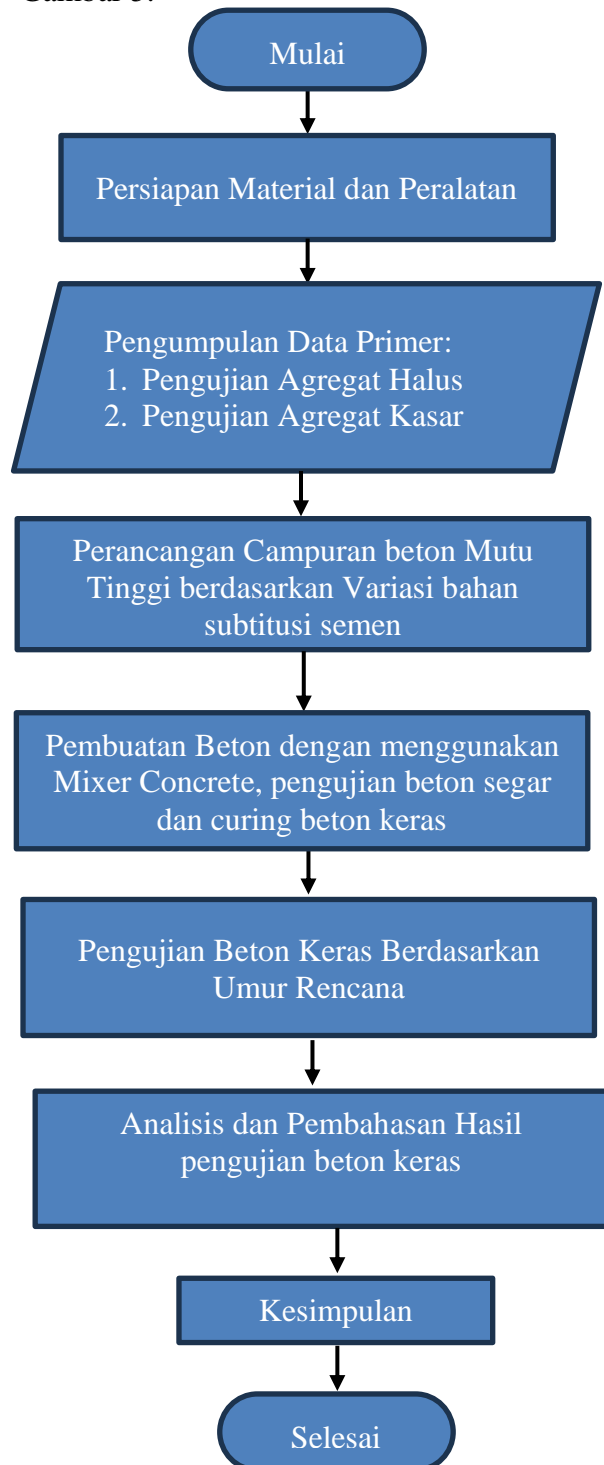
Slinder hasil pengujian tekan dapat dilakukan evaluasi terhadap bentuk keruntuhan silinder dan fraktur dari benda uji dengan bentuk pola seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. Hasil uji tekan beton (a) Belah, (b) Geser, (c) gabungan.

3. Metodologi Studi

Kajian tentang evaluasi kekuatan beton mutu tinggi dengan menggunakan kombinasi *fly ash* dan *silica fume* sebagai Substitusi Semen dimulai menyusun kerangka penelitian yang terintegrasi untuk mencapai target dan gap yang direncanakan. Diagram alir Kajian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir Pelaksanaan Studi

4. Pembahasan dan Hasil Penelitian

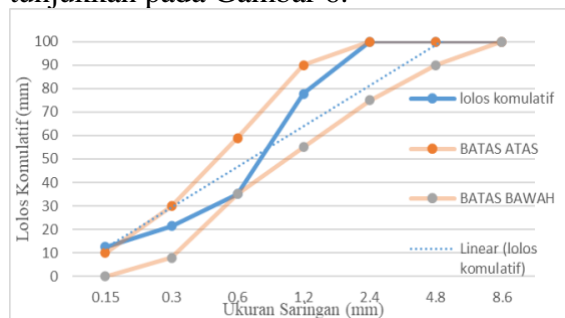
4.1. Hasil Pengujian Propertis Agregat

Agregat yang digunakan pada penelitian ini berasal dari wilayah Jawa tengah, sementara itu *fly ash* dan *silica fume* (dengan merek *Sicafume*) di kondisikan memiliki gradasi seperti gradasi semen. Pengujian agregat halus dan kasar dibutuhkan untuk melakukan perhitungan mix design terdiri dari beberapa item pengujian, hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat Halus dan Kasar

Pengujian Agregat	Jenis Agregat	Hasil Uji
Berat jenis	Agregat kasar	2,45
	Agregat halus	2,54
Penyerapan air (%)	Agregat kasar	4,00
	Agregat halus	5,00
Kadar Air (%)	Agregat kasar	3,02
	Agregat halus	5,4
Berat volume (Kg/liter)	Agregat kasar	1,372
	Agregat halus	1,42

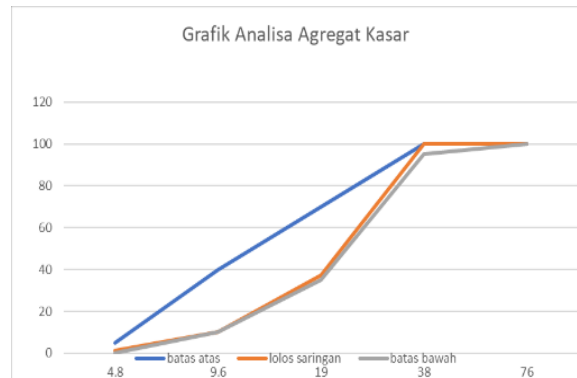
Berdasarkan hasil pengujian dapat dilihat bahwa batasan mutu agregat yang digunakan pada penelitian ini cukup baik, namun nilai penyerapan air agregat agak tinggi. Kapasitas penyerapan air mewakili volume rongga yang dapat ditembus air. Penyerapan air yang tinggi umumnya menunjukkan porositas yang tinggi (Ali et al., 2020). Secara gradasi untuk agregat halus sudah memenuhi persyaratan di tunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva Gradasi Agregat Halus

Seperti halnya agregat kasar juga memenuhi persyaratan yaitu hampir keseluruhan agregat yang digunakan berada

diantara batas atas dan batas bawah, seperti di tunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva Gradasi Agregat Kasar

4.2. Perancangan Campuran Beton

Pada Pengujian ini terdapat 3 jenis variasi penggunaan *fly ash* dan *sicafume* untuk bahan substitusi semen terhadap jumlah semen keseluruhan material Semen dengan persentase variasi 1 (*fly ash* 5% dan *sicafume* 2%), variasi 2 (*fly ash* 15% dan *sicafume* 6%), variasi 3 (*fly ash* 20% dan *sicafume* 8%), dengan secara rinci ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Semen, *Sicafume* dan *Fly Ash*

Item Material	Variasi 1 Fly Ash 5% & Sicafume 2%	Variasi 2 Fly Ash 15% & Sicafume 6%	Variasi 3 Fly Ash 20% & Sicafume 8%
Semen Portland	427,6	363,2	331
Fly Ash	22,9	68,9	91,9
Sicafume	9,2	27,6	36,8
Total	459,7	459,7	459,7

Rancangan mix design beton mutu tinggi mengacu pada SNI 03-2834-2000, hasil perancangan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Mix Desain Beton Mutu Tinggi

Item Material	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
Kuat tekan rencana (Mpa)	42	42	42
Semen (kg)	427,6	363,2	331
Pasir boyolali (kg)	603.57	603.57	603.57

Kerikil (kg)	935.98	935.98	935.98
Air (kg)	217.75	217.75	217.75
Fly Ash (kg)	22,9	68,9	91,9
Sicafume (kg)	9,2	27,6	36,8
Super plasticizer/ HRWR (kg)	0,46	0,46	0,46
Penyesuaian Mortar	ya	ya	ya

4.3. Hasil Pengujian Tes Slump dan Berat Isi Beton Mutu Tinggi Segar

Pada pengujian beton segar dilakukan pengujian Uji Slump yang direncanakan dibawah 5cm, kemudian dilanjutkan dengan pengujian berat isi dengan hasil seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji Slump dan Berai Isi Beton

Item Pengujian Beto Segar	Tinggi Slump	Variasi		
		1	2	3
Tes Slump	H1 (cm)	4	2.5	3
	H2 (cm)	3	2.5	3.5
	H3 (cm)	2.5	3	3.5
	rata-rata (cm)	3.17	2.67	3.33
Berat Isi (kg/m3)		2438	2461	2398

Hasil pengujian slump pada beton mutu tinggi menunjukkan bahwa nilai slump yang diharapkan telah tercapai dengan baik, sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Nilai slump yang ideal ini menandakan bahwa beton memiliki workability yang optimal untuk proses pengecoran, tanpa mengorbankan kekuatan dan kekentalannya. Selain itu, hasil pengukuran berat isi beton juga menunjukkan konsistensi yang baik, sesuai dengan target berat yang telah direncanakan, menandakan bahwa komposisi material campuran telah terdistribusi dengan merata. Berdasarkan kondisi tersebut maka kualitas beton secara keseluruhan dapat dipastikan memenuhi

persyaratan mutu yang diharapkan untuk ketahanan dan kekuatan struktural.

4.4. Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi

Pengujian kuat tekan beton mutu tinggi dilakukan sesuai umur yang sudah di tetapkan mulai dari 3,7,14,21,dan 28 hari, berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton mutu tinggi dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi

Hasil Pengujian		Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3
		(MPa)	(MPa)	(MPa)
Kuat tekan Slinder (hari)	3	8.93	33.60	25.27
	7	16.53	33.13	44.57
	14	22.10	54.12	56.62
	21	14.02	58.30	50.98
	28	45.85	63.03	67.93

Hasil tes tekan diatas terlihat semakin meingkat *fly ash* dan *sicafume* maka meingkat juga kuat tekannya, Peningkatan kuat tekan umumnya dikaitkan dengan reaksi sintering fly ash yang tidak bereaksi pada suhu tinggi, membentuk struktur mikro yang lebih padat (Zhao et al., 2021).



Gambar 8. Grafik hasil tes tekan beton

Berdasarkan pada hasil pengujian tekan beton mutu tinggi berdasarkan tiga variasi penggunaan *fly ash* dan *Sicafume*, maka secara keseluruhan ketiga jenis variasi menunjukkan kenaikan mutu beton yang signifikan mulai dari umur 3 hari sampai umur 28 hari dan memenuhi syarat batas beton mutu tinggi yaitu lebih dari 41 MPa.

Pada umur awal variasi 1 menunjukkan mutu terendah sebesar 8,93 Mpa yang diikuti dengan Variasi 3 dan 2 masing masing sebesar 25,27 MPa dan 33,60 MPa, kemudian diumur 7,14 dan 21 hari Variasi 2 menunjukkan peningkatan mutu secara linier sedangkan untuk variasi 1 dan 3 menunjukkan mutu yang tidak stabil, ketidak stabilan ini disebabkan oleh kondisi benda uji yang tidak sempurna dan kondisi pengujian.

Pada umur final 28 hari mutu beton terbaik diperoleh dari Variasi 3 dengan mutu 67,93 Mpa kemudian diikuti oleh variasi 2 dan 1 masing-masing 63,03 Mpa dan 45,85 Mpa, hal ini menunjukkan bahwa variasi campuran 3 dengan menggunakan *fly Ash* 20% dan *sicafume* 8% mampu meningkatkan mutu beton sebesar 60% dari rancangan awal yaitu 42 MPa, yang diikuti oleh variasi campuran 2 dan 1 masing-masing sebesar 40,1% dan 8,6%.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Semua variasi memenuhi syarat beton mutu tinggi menurut ACI 318-19 dan SNI 2847:2019 dengan kuat tekan di atas 41 MPa pada umur 28 hari. Peningkatan signifikan terjadi seiring waktu, sesuai karakteristik beton dengan bahan tambah pozolan.
- b. Kinerja mutu beton pada umur 3 hari, variasi 1 memiliki kuat tekan terendah dengan 8,93 MPa, sementara variasi 2 dan 3 lebih tinggi sebesar 25,27 MPa dan 33,60 MPa. Namun, performa awal ini tidak menentukan mutu akhir, yang meningkat pada umur lanjut.
- c. Stabilitas peningkatan mutu terjadi variasi 2 secara stabil dan linier, sedangkan variasi 1 dan 3 mengalami ketidakstabilan akibat kondisi benda uji yang tidak sempurna, menunjukkan pentingnya kontrol mutu.
- d. Mutu beton akhir yang diperoleh pada umur 28 hari, variasi 3 mencapai kuat

tekan tertinggi 67,93 MPa atau meningkat 60% dari rancangan awal (42 MPa) , diikuti oleh variasi 2 sebesar 63,03 MPa meningkat 40,1% dan variasi 1 sebesar 45,85 MPa meningkat 8,6%. Ini menunjukkan Peningkatan kadar substitusi *fly ash* dan *sicafume* dapat meningkatkan mutu beton dengan kadar maksimum yang ditetapkan oleh peraturan.

5.2 Saran

Untuk kemajuan kedepan kami usulkan saran sebagai berikut :

- a. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengidentifikasi proporsi optimal *fly Ash* dan *sicafume* yang dapat lebih meningkatkan mutu dan durabilitas beton. Variasi persentase yang lebih kecil atau lebih besar dari 20% Fly Ash dan 8% Sicafume dapat diuji untuk menentukan kombinasi terbaik yang menghasilkan performa maksimal.
- b. Mengingat ketidakstabilan mutu pada beberapa variasi disebabkan oleh kondisi benda uji yang kurang sempurna, penelitian selanjutnya dapat fokus pada dampak kondisi cuaca dan metode curing terhadap kekuatan dan stabilitas beton, khususnya dalam situasi ekstrem seperti panas berlebih atau kelembapan tinggi.
- c. Eksplorasi bahan tambah lain seperti slag atau nano-silica dapat dilakukan untuk melihat sinergi dengan *fly Ash* dan *sicafume*, serta pengaruhnya terhadap kekuatan tekan, ketahanan terhadap lingkungan agresif, dan sifat-sifat lainnya seperti kekedapan dan ketahanan aus.
- d. Penelitian lebih lanjut dapat mengevaluasi durabilitas beton dengan variasi campuran tersebut dalam jangka panjang, misalnya ketahanan terhadap korosi, penetrasi klorida, atau serangan sulfat, sesuai standar SNI 03-2847-2019 dan ACI 201.2R untuk beton tahan lingkungan agresif.
- e. Pengujian skala lapangan (in-situ) dapat dilakukan untuk menguji kinerja

campuran beton ini dalam proyek konstruksi nyata. Ini akan memberikan data yang lebih realistis mengenai penerapan dan kinerja beton dalam kondisi kerja sebenarnya, melengkapi hasil dari laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., Joyklad, P., & Zajdel, P. (2021). Application of advanced machine learning approaches to predict the compressive strength of concrete containing supplementary cementitious materials. *Materials*, *14*(19). <https://doi.org/10.3390/ma14195762>
- Ahmad, W., Farooq, S. H., Usman, M., Khan, M., Ahmad, A., Aslam, F., Alyousef, R., Abduljabbar, H. Al, & Sufian, M. (2020). Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete. *Materials*, *13*(5). <https://doi.org/10.3390/ma13051075>
- Ali, B., Kurda, R., Herki, B., Alyousef, R., Mustafa, R., Mohammed, A., Raza, A., Ahmed, H., & Ul-Haq, M. F. (2020). Effect of varying steel fiber content on strength and permeability characteristics of high strength concrete with micro silica. *Materials*, *13*(24), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13245739>
- Althoey, F., Hakeem, I. Y., Hosen, M. A., Qaidi, S., Isleem, H. F., Hadidi, H., Shahapurkar, K., Ahmad, J., & Ali, E. (2022). Behavior of Concrete Reinforced with Date Palm Fibers. *Materials*, *15*(22). <https://doi.org/10.3390/ma15227923>
- Björklund, H., Björklund, J., & Martens, W. (2021). *Learning algorithms*. 375–409. <https://doi.org/10.4171/automata-1/11>
- Farooq, F., Czarnecki, S., Niewiadomski, P., Aslam, F., Alabduljabbar, H., Ostrowski, K. A., Śliwa-Wieczorek, K., Nowobilski, T., & Malazdrewicz, S. (2021). A comparative study for the prediction of the compressive strength of self-compacting concrete modified with fly ash. *Materials*, *14*(17). <https://doi.org/10.3390/ma14174934>
- Fernando, R., Abda, J., & Taurano, G. A. (2022). Studi Perbandingan Mutu Beton Self Compacting Concrete Terhadap Variasi Penggunaan Air Payau Dengan Menggunakan High *Orbith: Majalah Ilmiah ...*, *18*(2), 82–90. <https://jurnal.polines.ac.id/index.php/orbith/article/view/3803%0Ahttps://jurnal.polines.ac.id/index.php/orbith/article/download/3803/108158>
- Fernando, R., Utama, A. B., & Friatmojo, E. K. (2022). Studi Perbandingan Mutu Beton Normal Berdasarkan Variasi Pengambilan Agregat Kasar Di Provinsi Jawa Tengah. *Orbith*, *18*(1), 28–36.
- Golewski, G. L. (2021). Green concrete based on quaternary binders with significant reduced of co2 emissions. *Energies*, *14*(15). <https://doi.org/10.3390/en14154558>
- Huang, H., Yuan, Y., Zhang, W., & Zhu, L. (2021). Property Assessment of High-Performance Concrete Containing Three Types of Fibers. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *15*(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00476-7>
- Małek, M., Jackowski, M., Łasica, W., & Kadela, M. (2020). Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on portland cement. *Materials*, *13*(8). <https://doi.org/10.3390/MA13081827>
- Mostafa, S. A., Faried, A. S., Farghali, A.

- A., El-Deeb, M. M., Tawfik, T. A., Majer, S., & Elrahman, M. A. (2020). Influence of nanoparticles from waste materials on mechanical properties, durability and microstructure of uhpc. *Materials*, *13*(20), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ma13204530>
- Sagar, B., & Sivakumar, M. V. N. (2020). An Experimental and Analytical Study on Alccofine Based High Strength Concrete. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, *33*(4), 530–538. <https://doi.org/10.5829/IJE.2020.33.04.A.03>
- Siddika, A., Amin, M. R., Rayhan, M. A., Islam, M. S., Mamun, M. A. Al, Alyousef, R., & Mugahed Amran, Y. H. (2021). Performance of sustainable green concrete incorporated with fly ash, rice husk ash, and stone dust. *Acta Polytechnica*, *61*(1), 279–291. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0279>
- Sim, J., Kang, Y., Kim, B. J., Park, Y. H., & Lee, Y. C. (2020). *Preparation_of_Fly_Ash_Epoxy_Composites_and_Its_Effects_on_Mechanical.Pdf*. 1–12.
- Tawfik, M., El-Said, A., Deifalla, A., & Awad, A. (2022). Mechanical Properties of Hybrid Steel-Polypropylene Fiber Reinforced High Strength Concrete Exposed to Various Temperatures. *Fibers*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/fib10060053>
- Ullah, R., Qiang, Y., Ahmad, J., Vatin, N. I., & El-shorbagy, M. A. (2022). *Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)*: 1–27.
- Xu, Y., Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Dudek, M., Aslam, F., & Joyklad, P. (2021). Computation of high-performance concrete compressive strength using standalone and ensembled machine learning techniques. *Materials*, *14*(22). <https://doi.org/10.3390/ma14227034>
- Zhao, J., Wang, K., Wang, S., Wang, Z., Yang, Z., Shumuye, E. D., & Gong, X. (2021). Effect of elevated temperature on mechanical properties of high-volume fly ash-based geopolymers concrete, mortar and paste cured at room temperature. *Polymers*, *13*(9). <https://doi.org/10.3390/polym13091473>