



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 |



Kajian Penggunaan Flyash Terhadap Sifat Mekanik Beton

Ahmad Hamidi^a, Sjelly Haniza^b, Daly Riandi^c

^{a,b,c}Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Digantara No. 4 Pekanbaru, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 10 Desember 2025

Revisi Akhir: 26 Desember 2025

Diterbitkan Online: 30 Desember 2025

KATA KUNCI

Beton, Bangunan, Flyash, Kuat tekan.

KORESPONDENSI

Telepon: "+62812-7642-8987"

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

ABSTRACT

Penggunaan beton sebagai material bangunan saat ini masih menjadi salah satu pilihan yang dominan karena ketersediaan yang banyak dari batching plane. Seiring dengan berjalannya waktu beton mulai dikombinasikan dengan material lain untuk meningkatkan mutu dan tak terkecuali dengan menggunakan material waste seperti flyash yang merupakan sisa pembakaran dari batu bara. Flyash yang digunakan berasal dari PLTU Tenayan Raya Kota Pekanbaru yang belum dimanfaatkan secara maksimal sehingga belum memiliki nilai ekonomis. Penggunaan flyash pada campuran beton diharapkan mampu meningkatkan mutu pada beton sehingga bisa mengurangi keberadaan limbah. Pengujian dilakukan dengan variasi penggunaan flyash sebesar 0%, 10%, 20%, 30% dan 40% dari berat semen dan tanpa pengurangan semen. Flyash yang digunakan dilakukan pengujian saringan lolos No.100 terlebih dahulu, begitu juga dengan agregat dilakukan pengujian properties untuk mendapatkan komposisi setiap material dalam bentuk *Job Mix Desain* (JMD). Mutu beton yang digunakan direncanakan adalah K-150. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan didapatkan hasil tertinggi variasi penggunaan flyash optimal adalah 10% dengan nilai kekuatan tekan pada usia 28 hari sebesar 170,10 Kg/cm². Dengan demikian penggunaan flyash pada campuran beton dapat meningkatkan sifat mekanik berupa kuat tekan beton sehingga flyash bisa bernilai ekonomis.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling dominan digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki keunggulan dari aspek ketersediaan bahan, kemudahan pelaksanaan, daya tahan, serta kemampuan memikul beban tekan yang tinggi dibandingkan dengan material konstruksi lainnya seperti kayu dan baja. Oleh karena itu, beton diaplikasikan secara luas pada berbagai jenis konstruksi, meliputi bangunan gedung, perkerasan jalan, bandar udara, pelabuhan, sistem pengelolaan sumber daya air, terowongan, hingga struktur lepas pantai. Dalam konteks rekayasa struktur, kebutuhan akan beton dengan mutu dan kuat tekan tinggi menjadi suatu keharusan agar struktur mampu memenuhi persyaratan kekuatan, keawetan (*durability*), dan efisiensi biaya sepanjang umur layan bangunan.

Kuat tekan beton merupakan parameter utama yang merepresentasikan kualitas beton dan sangat dipengaruhi

oleh karakteristik material penyusunnya, yaitu agregat dan pasta semen. Agregat berperan sebagai rangka utama (*skeleton*) yang mempengaruhi kepadatan serta transfer tegangan dalam beton, sedangkan pasta semen berfungsi sebagai bahan pengikat yang menentukan kuat lekat antarpartikel. Di samping itu, kinerja beton juga dipengaruhi oleh faktor rasio air-semen (*water cement ratio*), proses pencampuran, cara pemadatan, serta metode perawatan (*curing*) yang diterapkan.

Seiring dengan berkembangnya teknologi material beton, penggunaan bahan tambahan (*admixture*) menjadi salah satu inovasi penting dalam meningkatkan performa beton, baik pada kondisi segar maupun setelah mengeras. Secara teknis, admixture didefinisikan sebagai bahan selain air, semen, dan agregat yang ditambahkan ke dalam campuran beton sebelum, selama, atau setelah proses pencampuran dalam jumlah tertentu untuk memodifikasi sifat beton, seperti meningkatkan *workability*, mempercepat atau memperlambat waktu ikat, meningkatkan kuat tekan, serta memperbaiki durabilitas terhadap lingkungan agresif. Penggunaan admixture yang tepat diharapkan mampu

menghasilkan beton berkinerja tinggi (*high performance concrete*) yang memenuhi tuntutan konstruksi modern.

Penggunaan aditif alami tertentu dalam campuran beton terbukti mampu meningkatkan sifat mekanik beton, khususnya kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas, serta memperbaiki kualitas beton dari aspek kelecakan (*workability*), keawetan (*durability*), dan kerapatan mikrostruktur [1]. Pemanfaatan aditif alami tertentu dalam campuran beton diketahui dapat meningkatkan kinerja mekanik beton, khususnya pada parameter kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas. Selain itu, keberadaan aditif alami juga berkontribusi dalam meningkatkan mutu beton dari segi kelecakan (*workability*), ketahanan (*durability*), serta kepadatan struktur mikro beton [2]. Selain itu, penggunaan aditif berbasis mineral dalam campuran beton berperan dalam meningkatkan mutu beton serta menurunkan tingkat penyerapan air, yang berdampak pada peningkatan keawetan dan ketahanan beton terhadap degradasi lingkungan [3]. Pemanfaatan limbah mineral sebagai bahan campuran dalam beton dapat mengurangi kebutuhan penggunaan semen, sehingga limbah tersebut tidak hanya berkontribusi terhadap efisiensi material, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomisnya sebagai bahan konstruksi alternatif. [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].

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.

2.1.1. Pasir

Pasir alam merupakan agregat halus yang berasal dari proses pelapukan batuan secara alami maupun hasil penghancuran batuan dengan ukuran butiran maksimum sekitar 4,7 mm. Berdasarkan sumber asalnya, pasir dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu pasir galian, pasir sungai, dan pasir laut. Pasir galian memiliki butiran yang relatif tajam, berpori, serta umumnya bebas dari kandungan garam. Pasir sungai memiliki bentuk butiran yang lebih membulat akibat proses abrasi alami oleh aliran air. Sementara itu, pasir laut cenderung berbutir halus, berbentuk bulat, dan mengandung kadar garam yang relatif

tinggi, sehingga penggunaannya dalam beton memerlukan perlakuan khusus.

Jenis pasir yang digunakan sebagai agregat halus sangat mempengaruhi kuat tekan dan kinerja beton secara keseluruhan. Pasir dengan butiran tajam dan permukaan kasar, seperti pasir galian, umumnya menghasilkan ikatan mekanis yang lebih baik antara agregat dan pasta semen, sehingga dapat meningkatkan kuat tekan beton. Sebaliknya, pasir dengan bentuk butiran yang lebih bulat seperti pasir sungai cenderung menghasilkan beton dengan *workability* yang lebih baik, namun daya lekat antarpartikel relatif lebih rendah dibandingkan pasir galian.

2.1.2. Kerikil

Agregat kasar merupakan butiran batuan berupa kerikil atau batu pecah yang memiliki ukuran nominal antara 5–40 mm dan berfungsi sebagai rangka utama dalam struktur beton. Berdasarkan nilai massa jenisnya, agregat kasar diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu agregat ringan dengan massa jenis kurang dari 2,0, agregat normal dengan massa jenis antara 2,5–2,7, serta agregat berat dengan massa jenis lebih dari 2,8. Perbedaan massa jenis ini berpengaruh terhadap berat sendiri beton, kuat tekan, serta aplikasi struktural yang direncanakan.

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

1. Kuat dan tahan terhadap keausan, yang ditunjukkan dengan nilai keausan (uji Los Angeles) maksimum sebesar 40% untuk 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.

2.1.3. Semen

Semen merupakan bahan pengikat yang bersifat aktif secara kimia setelah bereaksi dengan air melalui proses hidrasi, dan berfungsi membentuk pasta semen yang merekatkan butiran agregat dalam campuran beton. Secara umum, 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.
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.

2.1.4. Air

Air merupakan komponen penting dalam campuran beton yang berfungsi sebagai media terjadinya reaksi hidrasi semen serta sebagai pelumas yang memudahkan proses pencampuran dan pengerjaan (*workability*) adukan beton. Namun demikian, penggunaan air dalam jumlah berlebihan akan meningkatkan rasio air-semen (*water cement ratio*) yang berdampak pada meningkatnya porositas dan menurunnya kuat tekan beton.

Secara umum, air yang digunakan untuk campuran beton harus memenuhi persyaratan kualitas, yaitu air yang layak minum (*potable water*) atau air yang telah melalui proses pengolahan tertentu sehingga tidak mengandung zat-zat yang dapat mengganggu proses hidrasi semen, seperti bahan organik, minyak, asam, garam, dan zat berbahaya lainnya [6]. Air juga harus memenuhi ketentuan SNI 03-2847-2002, seperti tidak mengandung lumpur >2g/l, garam berbahaya >15g/l, klorida >0,5g/l, dan sulfat >1g/l [6], [7].

2.2. Flyash

Fly ash merupakan material sisa hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berbentuk partikel halus menyerupai abu. Secara kimia, fly ash mengandung senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO) yang bersifat pozzolan, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan.

Penggunaan *flyash* sebagai pengganti sebagian semen terbukti berpengaruh terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton struktural. Substitusi *flyash* sebesar 5% menghasilkan peningkatan kuat tekan menjadi 31,23 MPa dan kuat lentur sebesar 4,03 MPa. Namun, pada variasi 10–20% terjadi penurunan kuat tekan dan kuat lentur beton. Berdasarkan analisis regresi, kadar *flyash* optimum sebesar 1,835% menghasilkan kuat tekan maksimum 30,75 MPa dan kuat lentur maksimum 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 m³/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 diteliti memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja beton, terutama pada aspek kuat tekan dan karakteristik fisik lainnya. Variasi komposisi campuran terbukti memengaruhi kualitas beton secara langsung, sehingga diperlukan proporsi material yang tepat untuk memperoleh hasil yang optimum sesuai kebutuhan struktural [9]. Hasil kajian *systematic literature review* menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi *flyash*, silika, dan Slag terbukti mampu meningkatkan kekuatan tekan dini beton secara signifikan pada umur 1–7 hari. Fly ash bersifat ramah lingkungan namun memerlukan aktivator untuk meningkatkan reaktivitas awal, silika berfungsi mempercepat hidrasi dan memperkuat pembentukan gel C-S-H, sedangkan Slag

berkontribusi melalui pembentukan gel C-A-S-H yang meningkatkan kepadatan mikrostruktur. Kombinasi optimal ketiga bahan tersebut mampu menghasilkan kuat tekan lebih dari 20 MPa pada umur 1 hari dan di atas 40 MPa pada umur 7 hari tanpa perlakuan panas, sehingga sangat potensial untuk aplikasi beton pracetak dan konstruksi cepat berkelanjutan [10].

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:

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(1)$$

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 f'_c 12,5 MPa dengan agregat kasar berupa batu pecah (nilai abrasi 19,96). Variasi flyash yang digunakan adalah 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% dari berat semen. Setiap Variasi diuji dengan 3 spesimen, dan diuji pada umur 7 hari, 14 hari dan 28 hari dengan jumlah total 45 benda uji silinder. Beton dikeringkan selama 24 jam sebelum dilakukan sebelum diuji kekuatan tekannya.

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

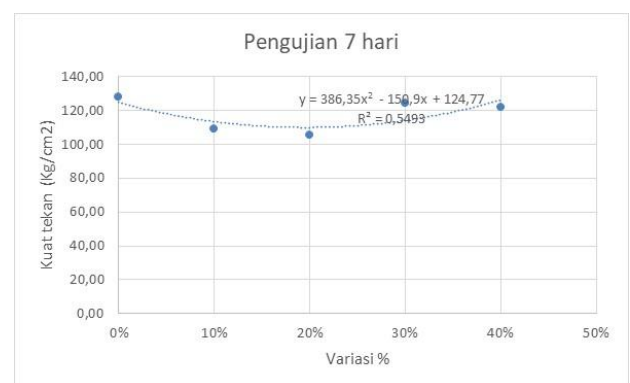
Berikut hasil pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari :

Tabel. 1 Hasil Uji Tekan Umur 7 hari

A (cm)	Berat (gram)	Dial	Kuat tekan aktual		Rata-rata
			F_c'	K-	
a	b	c	d	e	f

Variasi 0 %					
176,71	12.600	193	10,92	131,59	127,72
176,71	12.600	199	11,26	135,68	
176,71	12.480	170	9,62	115,90	
Variasi 10%					
176,71	12.540	179	10,13	122,04	109,09
176,71	12.500	141	7,98	96,13	
176,71	12.740	160	9,05	109,09	
a	b	c	d	e	f
Variasi 20%					
176,71	12.450	160	9,05	109,09	105,68
176,71	12.480	155	8,77	105,68	
176,71	12.340	150	8,49	102,27	
Variasi 30%					
176,71	12.460	168	9,51	114,54	124,54
176,71	12.480	196	11,09	133,63	
176,71	12.340	184	10,49	125,45	
Variasi 40%					
176,71	12.380	176	9,96	119,99	121,81
176,71	12.420	182	10,30	124,09	
176,71	12.580	178	10,07	121,36	

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan hasil kuat tekan maksimal sudah mencapai diatas 70% dengan nilai tertinggi 127,72 kg/cm^2 . Trend hasil kuat tekan seperti ditunjukkan pada grafik berikut



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan Benda Uji Umur 7 hari

Berdasarkan dari grafik tersebut dapat dilihat kuat tekan tertinggi pada umur 7 hari pada variasi 0% dengan nilai 127,72 kg/cm^2 , sedangkan dengan penambahan flyash variasi yang optimal adalah variasi 30% dengan hasil kuat tekan 124,54 kg/cm^2 dan nilai terendah pada variasi 20% dengan nilai kuat tekan 105,68 kg/cm^2 . Secara umum hasil

kuat tekan pada umur 7 hari telah mencapai target diatas 70% dari target kuat tekan rencana.

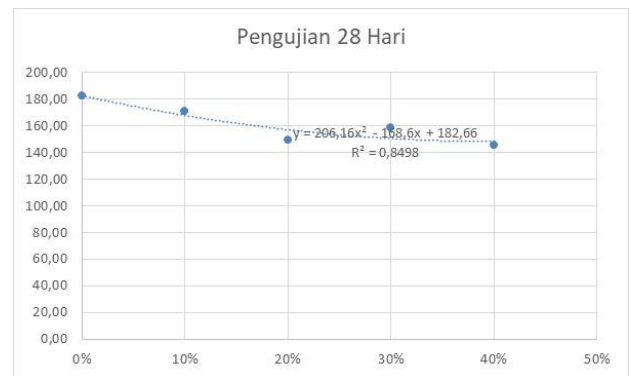
Pembuatan benda uji dilakukan dengan mengontrol banyaknya penggunaan air pada adukan beton. Pada benda uji yang menggunakan tambahan *flyash* memiliki nilai slump cukup rendah mencapai 6 cm sehingga perlu ditambahkan air agar dapat mencapai nilai slump yang direncanakan.

Berdasarkan hasil uji tekan beton pada umur 28 hari seperti ditunjukkan pada Tabel. 1 berikut :

Tabel. 1 Hasil Uji Tekan Umur 28 hari

A (cm)	Berat (gram)	Dial	Kuat tekan aktual		Rata- rata (Kg/cm ²)
			Fc' (Mpa)	K- (Kg/cm ²)	
a	b	c	d	e	f
Variasi 0 %					
176,71	12.460	278	15,73	189,54	182,49
176,71	12.580	264	14,94	179,99	
176,71	12.280	261	14,77	177,95	
Variasi 10%					
176,71	12.700	253	14,32	172,49	170,90
176,71	12.620	247	13,98	168,40	
176,71	12.500	252	14,26	171,81	
Variasi 20%					
176,71	12.440	208	11,77	141,81	149,08
176,71	12.320	213	12,05	145,22	
176,71	12.440	235	13,30	160,22	
Variasi 30%					
176,71	12.440	238	13,48	162,27	158,40
176,71	12.320	235	13,30	160,22	
176,71	12.440	224	12,68	152,72	
Variasi 40%					
176,71	12.520	225	12,73	153,40	145,68
176,71	12.660	247	13,98	168,40	
176,71	12.400	169	9,56	115,22	

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan hasil kuat tekan maksimal sudah mencapai diatas 100% dengan nilai tertinggi 182,49 kg/cm². Trend hasil kuat tekan seperti ditunjukkan pada grafik berikut



Berdasarkan dari grafik tersebut dapat dilihat kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari pada variasi 0% dengan nilai 182,49 kg/cm² atau lebih tinggi 21% dari kuat tekan rencana, sedangkan dengan penambahan *flyash* variasi yang optimal adalah variasi 10% dengan hasil kuat tekan 170,90 kg/cm² dan nilai terendah pada variasi 40% dengan nilai kuat tekan 145,68 kg/cm². Secara umum hasil kuat tekan pada umur 7 hari telah mencapai target kuat tekan rencana kecuali pada variasi 40%.

Berdasarkan dari grafik diatas terlihat nilai korelasi R mencapai 0,84, lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil uji tekan pada beton umur 7 hari.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 7 hari kuat tekan beton dengan penambahan flyash sudah mencapai lebih dari 70% dari kuat tekan rencana. Sedangkan hasil uji tekan pada umur 28 hari menunjukkan peningkatan yang signifikan mencapai 121% dari kuat tekan rencana yaitu dengan nilai tertinggi pada variasi 10% dengan nilai 170,90 kg/cm². Hal ini membuktikan bahwa penggunaan flyash pada campuran beton dapat meningkatkan mutu beton terutama untuk beton mutu K150 (fc'12,5)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. R. Gallegos-Villela et al.. "Effect of Natural Additives on Concrete Mechanical Properties". *Cogent Eng.*, Vol. 08, No. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2020.1870790.
- [2] J. Setina, A. Gabrene, and I. Juhnevic. "Effect of Pozzolanic Additives on Structure and Chemical Curability of Concrete". *Procedia Eng.*, Vol. 57, pp. 1005-1012, 2013.
- [3] D. Nagrockienė 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 Substitusi Semen," *Orbith Maj. Ilm. Pengemb. Rekayasa dan Sos.*, vol. 20, no. 3, pp. 245–255, 2025, doi: 10.32497/orbith.v20i3.6257.
- [11] T. Martha, A. Maskur, U. Saepudin, and T. Andryanto, "Kajian Penggunaan Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen Pada Beton Struktural," *J. Ilm. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 1, pp. 26–35, 2023, doi: 10.25157/jitek.v1i1.3193.