

INOVASI PENGGUNAAN LIMBAH *FLY ASH* DAN KAPUR TOHOR SEBAGAI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON MUTU TINGGI.

Andreas Mustiko Binta¹, Anggi Rahmad Zulfikar²
Teknik Sipil, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya
E-mail: *andreasbinta@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan infrastruktur Indonesia yang pesat meningkatkan kebutuhan beton. Namun, produksi semen berkontribusi ~8% terhadap emisi CO₂ global. Penelitian ini mengembangkan beton ramah lingkungan dengan mensubstitusi semen menggunakan Fly Ash (limbah pembakaran PLTU) dan kapur tohor (CaO). Kedua material memiliki sifat pozzolanik yang memungkinkan bereaksi dengan kalsium hidroksida, membentuk C-S-H sebagai pengikat tambahan. Pengujian dilakukan dengan variasi Fly Ash (5%, 7,5%, 10%) dan kapur tohor (5%) pada beton mutu tinggi. Parameter yang diuji meliputi kuat tekan dan penyerapan air berdasarkan SNI 03-2914-1992. Hasil menunjukkan penurunan kuat tekan seiring peningkatan kadar Fly Ash karena reaksi pozzolan yang lebih lambat dibanding hidrasi semen. Pengujian penyerapan air meningkat seiring bertambahnya Fly Ash, namun semua variasi masih memenuhi standar kedap air (penyerapan maksimum 6,5%). Kesimpulannya, substitusi parsial semen dengan Fly Ash dan kapur tohor berpotensi mengurangi limbah industri sambil mempertahankan karakteristik beton sebagai material kedap air.

Kata kunci Fly

Ash, Kapur Tohor, Beton Mutu Tinggi

ABSTRACT Haze

Indonesia's rapid infrastructure development increases the demand for concrete. However, cement production contributes ~8% to global CO₂ emissions. This study developed environmentally friendly concrete by substituting fly ash (coal-fired power plant combustion waste) and quicklime (CaO) for cement. Both materials have pozzolanic properties that allow them to react with calcium hydroxide, forming C-S-H as an additional binder. Tests were conducted with variations in fly ash (5%, 7.5%, 10%) and quicklime (5%) in high-strength concrete. The parameters tested included compressive strength and water absorption based on SNI 03-2914-1992. The results showed a decrease in compressive strength with increasing fly ash content due to a slower pozzolanic reaction than cement hydration. Water absorption testing increased with increasing fly ash, but all variations still met the watertightness standard (maximum absorption of 6.5%). In conclusion, partial cement substitution with fly ash and quicklime has the potential to reduce industrial waste while maintaining the characteristics of concrete as a watertight material.

Keywords Fly

Ash, Quicklime, High-Strength Concrete.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia sangatlah pesat dalam beberapa tahun belakangan. Hal ini seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan kebutuhan akan prasarana yang menunjang aktivitas sehari-hari, seperti jalan, gedung, jembatan, saluran pembuangan, dan terminal (Saputra et al., 2023). Pembangunan infrastruktur menjadi

aspek penting dalam mempercepat laju pembangunan nasional di Indonesia. Salah satu material yang sering digunakan dalam konstruksi Pembangunan fasilitas umum adalah material Beton (Arifin et al., 2024). Beton merupakan material yang tersusun dari agregat, air dan semen. Permasalahan yang timbul pada beton biasanya berkaitan langsung dengan bahan baku tersebut, terutama semen. (Saputra et al., 2023).

Semen merupakan bahan pengikat utama pada adukan beton dan menjadi salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Produksi semen yang terus meningkat seiring dengan tingginya permintaan terhadap kebutuhan beton akan sangat berpengaruh terhadap fenomena pemanasan global. Hal ini terjadi karena pabrik semen merupakan penyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ yang mengakibatkan pemanasan global (Rothenberg, 2023).

Salah satu solusi untuk mengurangi pencemaran dan kerusakan pada lingkungan dengan memanfaatkan material yang ramah lingkungan. Material yang berpotensi untuk digunakan sebagai campuran semen yaitu limbah Fly Ash dan kapur tohor. Kedua material tersebut memiliki karakteristik kimia yang memungkinkan untuk dipakai sebagai bahan substitusi pada semen dalam pembuatan Beton. (Al-Fakih et al., 2022)

Beton merupakan material komposit yang terdiri dari campuran semen hidrolis, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air dengan atau tanpa bahan tambahan admixture (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Fly Ash merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan mengandung silika, alumina, serta mineral reaktif lainnya. Fly Ash memiliki sifat pozzolan kelas F dan C sesuai klasifikasi ASTM C618, dan penggunaannya dalam campuran beton telah terbukti dapat meningkatkan kekuatan tekan jangka panjang. Sementara itu kapur tohor merupakan hasil dari batu kapur yang dipanaskan dengan suhu diatas 900°C. Seperti pada proses kalsinasi pengolahan semen, campuran yang sebagian besar terdiri dari batu kapur dipanaskan menggunakan api langsung dengan suhu diatas 1300°C. Dalam proses ini batu kapur yang bereaksi dengan panas akan menjadi kalsium oksida atau disebut juga dengan kapur tohor. Dalam semen setidaknya terkandung 70-80% kapur tohor. Maka dari itu dipilih kapur tohor sebagai pengganti sebagian semen yang berperan sebagai bahan pengikat antar agregat.

Berdasarkan SNI 03-6468:, beton dibagi menjadi 3 mutu, yaitu beton mutu rendah ($f_c' < 20$ Mpa), beton mutu sedang ($20 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 41,4$ MPa) dan beton mutu tinggi ($f_c' \geq$

41 Mpa). Beton mutu tinggi menurut PD T-04-2004-C memiliki nilai kuat tekan 40-80 MPa. Beton mutu tinggi merupakan beton yang memerlukan perlakuan yang khusus. Umumnya beton bermutu tinggi digunakan untuk struktur yang memikul beban besar (Davendraa & Trimurtiningrumb, 2022). seperti Struktur bangunan gedung bertingkat tinggi, struktur jembatan atau bangunan beton mutu tinggi yang memerlukan kuat tekan yang besar untuk dapat memikul beban struktur (Apriwelni & Bintang Wirawan, 2020).

Penelitian terdahulu (Nento et al., 2023) penggunaan Fly Ash sebagai substitusi parsial semen menunjukkan bahwa penggunaan Fly Ash $< 9.5\%$ menghasilkan kuat tekan yang lebih baik di banding penggunaan Fly Ash $> 10\%$. Penelitian tentang Substitusi Fly Ash dan Kapur Tohor pada Sebagian semen menunjukkan hasil peningkatan kuat tekan mutu beton. Dari penelitian (Muhammad Alfian Nur*, Arman Setiawan, 2025) beton dengan campuran Fly Ash 75% dan kapur 25% menghasilkan nilai kuat tekan yang optimal 25,48 Mpa dengan F_c 20 Mpa. penelitian dari (Rahmat Muhlis Mohamad1, Dr. Azis Rachman2, 2020) beton dengan campuran Fly Ash 25% menghasilkan nilai kuat tekan beton paling tinggi dari varisasi yang dibandingkan yaitu mendapatkan nilai kuat tekan

53,31 Mpa dari Mutu beton normal Fc 45 Mpa. Sedangkan Penelitian dari (Solikin & Nabiilah, 2022) menunjukkan campuran Fly Ash 30% dan Kapur Tohor 5% mendapatkan nilai optimal yaitu 36 Mpa dari mutu beton normal Fc 25 Mpa.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut penulis mengambil judul dalam tugas akhir ini yaitu “Inovasi Penggunaan Limbah Fly Ash Dan Kapur Tohor Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi” penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan formulasi campuran beton dengan memanfaatkan material ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan solusi praktis untuk pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan memiliki performa mekanik yang optimal.

1.1 Beton Mutu Tinggi

Menurut (SNI 03-6468-2000), beton mutu tinggi adalah beton yang kekuataannya mencapai diatas $f'c$ 41 MPa. Sedangkan definisi beton mutu tinggi menurut SNI-PD-T-04-2004-C beton mutu tinggi adalah beton dengan kuat tekan yang disyaratkan $f'c$ 40 Mpa – 80 Mpa. Beton mutu tinggi dapat diartikan sebagai beton yang berorientasi pada kekuatan yang tinggi (high strenght concrete) yang mempertimbangkan keawetan (durability) beton serta kemudahan pengerjaan beton (workability).

Beton mutu tinggi umunya digunakan pada struktur bangunan yang dianggap memikul beban yang berat seperti struktur jembatan, pondasi beton, serta bagian-bagian bangunan yang dianggap akan menerima beban yang tinggi (Ashad & Baso Gunawan, 2022).

1.2 Fly Ash

Fly Ash adalah abu terbang halus yang merupakan hasil sampingan pembakaran batubara pada PLTU. Fly Ash Tipe F dihasilkan dari pembakaran batubara bituminous atau antrasit dan memiliki kandungan $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 70\%$, sehingga memiliki sifat pozolanik tinggi (ASTM C618). Reaksi pozolanik Fly Ash berlangsung lebih lambat dibandingkan hidrasi semen dan baru berkontribusi signifikan pada umur 56–90 hari ke atas, namun pada jangka panjang dapat meningkatkan kepadatan pasta semen dan menurunkan porositas beton.

1.3 kapur Tohor

Tohor (CaO) diperoleh dari kalsinasi batu kapur ($CaCO_3$) pada suhu $\pm 900^\circ C$. Dalam campuran beton, CaO bereaksi dengan air membentuk $Ca(OH)_2$ yang kemudian dapat berinteraksi dengan partikel Fly Ash dalam reaksi pozolanik. Kandungan CaO pada semen Portland berkisar 60–70%, sehingga Kapur Tohor berpotensi digunakan sebagai substitusi parsial semen. Namun demikian, kontribusi Kapur Tohor terhadap kekuatan beton lebih lemah dibandingkan semen karena produk hidrasinya berupa $Ca(OH)_2$, bukan C–S–H (Angelina et al., 2023).

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium yang bertujuan mengevaluasi pengaruh Limbah *Fly Ash* dan Kapur Tohor sebagai substitusi parsial semen untuk campuran beton mutu tinggi terhadap sifat mekanik beton pengujian yaitu Kuat tekan beton.

Metode penelitian eksperimental ini yang dilakukan adalah mensubstitusikan *Fly Ash* dan Kapur Tohor pada sebagian Semen. Dalam pembuatan Beton mutu tinggi membutuhkan bahan pengikat diantaranya semen, agregat, admixture(bahan tambah) dan air, dalam penelitian ini sebagian semen di substitusi oleh *Fly Ash* dan Kapur sebagai bahan pengikat campuran beton mutu tinggi.

2.1 MATERIAL PENELITIAN

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: (1) Semen Portland Composit (PCC) Tipe I merek Dynamix; (2) Fly Ash Tipe F dari PLTU Paiton; (3) Kapur Tohor (CaO) kadar 80%; (4) Agregat halus pasir vulkanik Lumajang; (5) Agregat kasar batu pecah Jeladri ukuran 5–12 mm dan 10–20 mm; (6) Admixture Tipe F 1% dari berat bahan pengikat; dan (7) Air. Seluruh material telah diuji karakteristiknya sesuai standar SNI dan ASTM yang berlaku.

2.2 PEMBUATAN CAMPURAN BETON CYLINDER

Pada penelitian ini Mix Design yang digunakan yaitu Berdasarkan SNI 03-64682000. Berikut komposisi campuran beton dengan mutu tinggi:

Mix Design Dalam 1 M³ :

Semen : 588 kg
Air : 181 kg
Agregat Halus : 553 kg
Agregat Kasar : 1.101 kg
Admixture Tipe F 1% dari berat bahan pengikat.

Mix Design Dalam Cylinder Ukuran 30 cm x 15 cm :

Semen : 3,12 kg
Air : 0,96 kg
Agregat Halus : 2,93 kg
Agregat Kasar : 5,86 kg
Admixture Tipe F 1% dari berat bahan pengikat.

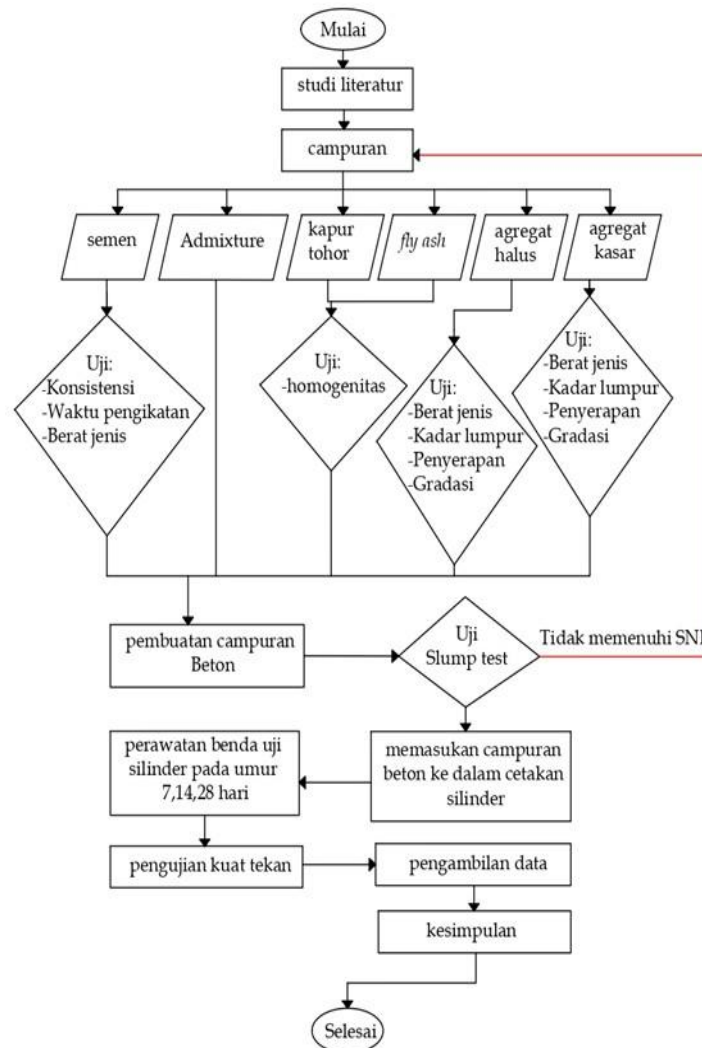
Variasi Campuran bahan pengikat bahan pengikat dijelaskan pada table 3 berikut: **Tabel 2.1 Komposisi Campuran Material Benda Uji Cylinder**

Tipe	bahan pengikat			semen (kg)	agregat kasar (kg)	agregat halus (kg)	admixture 1% dari bahan pengikat	Air (L)
	subtitusu ke semen							
	Fly ash		kapur tohor 5%(kg)					
	%	Kg						
A	0	0.00	0.00	3.12	5.83	2.93	0.03	0.96
B	0	0.00	0.16	2.96	5.83	2.93	0.03	0.96
C	5	0.19	0.16	2.80	5.83	2.93	0.03	0.96
D	7.5	0.25	0.16	2.73	5.83	2.93	0.03	0.96
E	10	0.31	0.16	2.65	5.83	2.93	0.03	0.96

2.3 BENDA UJI DAN PROSEDUR PENELITIAN

Benda uji berbentuk silinder berukuran 150×300 mm sebanyak 60 buah (12 buah per variasi). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari (3 benda uji per umur per variasi), sedangkan pengujian penyerapan air dilakukan pada umur 28 hari (3 benda uji per variasi). Perawatan (curing) dilakukan dengan perendaman dalam air pada suhu 23±2°C. Faktor Air Semen (FAS) pada seluruh campuran adalah 0,3.

Pengujian kuat tekan menggunakan Universal Testing Machine dengan laju pembebanan 0,25±0,05 MPa/detik, dihitung dengan rumus $f'_c = P/A$. Pengujian penyerapan air mengikuti prosedur pengeringan oven 100°C selama 24 jam, kemudian perendaman 24 jam dan penimbangan berat basah, dengan rumus $W_a(\%) = (W_2 - W_3)/W_3 \times 100\%$.



Gambar 2.1 Digram Alir Penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton, yang terletak di Jl. Raya Tandes Lor No. 52, Tanjung Sari, Surabaya. Penelitian yang dilakukan di PT tersebut mencakup proses pencampuran seluruh material yang telah disiapkan, serta pengujian kuat tekan dan pengujian penyerapan pada benda Beton silinder. menggunakan material pengikat berupa Semen Portland, Fly Ash, dan Kapur Tohor. Hasil pemeriksaan bahan penyusun beton meliputi uji berat jenis, konsistensi normal dan waktu ikat pada semen, Fly Ash, dan Kapur Tohor serta uji berat jenis, gradasi, kadar lumpur, dan penyerapan air pada material Agregat halus, dan Agregat Kasar. Penjelasan rinci mengenai hasil pengujian ini akan disampaikan pada subbab berikutnya.

3.1 HASIL PENGUJIAN DAN KUAT TEKAN

Nilai slump meningkat secara konsisten seiring bertambahnya kadar Fly Ash, dari 15 cm pada variasi A dan B, menjadi 16 cm (variasi C), 17 cm (variasi D), hingga 18 cm

(variasi E). Seluruh nilai slump masih berada dalam rentang yang diizinkan SNI 03-64682000 untuk beton dengan admixture (>20 cm). Peningkatan workability ini disebabkan oleh bentuk partikel Fly Ash yang bulat sehingga mampu mengurangi gesekan antar partikel (ball-bearing effect) dan meningkatkan kelecakan beton segar (ACI 232.2R-03).

3.2 HASIL PENGUJIAN KUAT TEKAN

Tabel 3.1 Rekapitulasi Hasil Kuat Tekan Beton (MPa)

Variasi	7 Hari (MPa)	%PBI	14 Hari (MPa)	%PBI	28 Hari (MPa)	%PBI
0%FA + 0%KH (A)	38,4	72,32%	45,5	85,62%	53,2	100%
0%FA + 5%KH (B)	37,5	75,07%	42,5	85,10%	50,0	100%
5%FA + 5%KH (C)	35,3	77,94%	39,9	88,05%	45,3	100%
7,5%FA + 5%KH (D)	33,2	79,37%	37,4	89,38%	41,8	100%
10%FA + 5%KH (E)	31,1	81,50%	35,1	92,01%	38,1	100%

Hasil pengujian menunjukkan penurunan kuat tekan yang konsisten pada semua umur pengujian seiring meningkatnya kadar substitusi. Pada umur 28 hari, kuat tekan beton menurun dari 53,2 MPa (kontrol) menjadi 50,0 MPa (B), 45,3 MPa (C), 41,8 MPa (D), dan 38,1 MPa (E). Persentase penurunan terhadap beton kontrol berturut-turut adalah 6%, 17%, 27%, dan 39%.

Penurunan kuat tekan ini disebabkan oleh dua mekanisme utama yang bekerja secara bersamaan. Pertama, efek dilusi semen, di mana berkurangnya proporsi semen aktif mengakibatkan berkurangnya jumlah klinker yang tersedia untuk membentuk gel C-S-H sebagai sumber kekuatan utama beton. Kedua, keterlambatan reaksi pozolanik Fly Ash yang baru berkontribusi signifikan setelah usia 56–90 hari, sehingga pada rentang pengujian 7–28 hari, Fly Ash sebagian besar masih bersifat sebagai filler pasif. Kapur Tohor hanya menghasilkan Ca(OH)_2 saat bereaksi dengan air, bukan C-S-H, sehingga kontribusinya terhadap kekuatan lebih lemah dibandingkan semen yang digantikannya.

Menariknya, meskipun kuat tekan menurun, variasi D (7,5%FA+5%KH) masih menghasilkan kuat tekan 41,8 MPa pada umur 28 hari, yang masih memenuhi target desain f'_c 41 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa substitusi maksimal hingga 12,5% (7,5% FA + 5% KH) masih dapat menghasilkan beton yang memenuhi mutu rencana.

3.3 HASIL PENGUJIAN PENYERAPAN AIR

Pengujian penyerapan air dilakukan pada umur 28 hari. Hasil pengujian disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 3.2 Hasil Pengujian Penyerapan Air Beton Pada Umur 28 Hari

Variasi	Penyerapan Air (%)	% Terhadap Kontrol	Klasifikasi ASTM C642
0%FA + 0%KH (A)	2,68%	0%	Baik Sekali ($< 3\%$)
0%FA + 5%KH (B)	2,93%	+8,63%	Baik Sekali ($< 3\%$)
5%FA + 5%KH (C)	3,40%	+21,10%	Baik (3%–5%)
7,5%FA + 5%KH (D)	3,83%	+29,94%	Baik (3%–5%)
10%FA + 5%KH (E)	4,41%	+39,25%	Baik (3%–5%)

Nilai penyerapan air meningkat seiring bertambahnya kadar Fly Ash, dari 2,68% pada beton kontrol menjadi 4,41% pada variasi E. Peningkatan ini terjadi karena reaksi pozolanik belum cukup berkontribusi pada usia 28 hari, sehingga pori-pori yang

ditinggalkan oleh air belum terisi oleh gel C-S-H tambahan (Putranto et al., 2017). Selain itu, semakin banyak Fly Ash meningkatkan luas permukaan material yang dapat menyerap air (Vardhan et al., 2016).

Meskipun demikian, seluruh variasi masih memenuhi ketentuan SNI 03-2914-1992 tentang beton kedap air dengan serapan maksimum 6,5% terhadap berat beton kering oven. Berdasarkan klasifikasi ASTM C642, variasi A dan B masuk kategori “baik sekali” (< 3%), sedangkan variasi C, D, dan E masuk kategori “baik” (3%–5%).

3.4 HUBUNGAN KUAT TEKAN DENGAN PENYERAPAN AIR

Berdasarkan data pada Tabel 4, terlihat adanya hubungan berbanding terbalik antara kuat tekan dan penyerapan air. Semakin tinggi substitusi Fly Ash dan Kapur Tohor, kuat tekan menurun namun penyerapan air meningkat.

Tabel 3.3 Hubungan Kuat Tekan Dan Penyerapan Air Pada Umur 28 Hari

Variasi	Kuat Tekan (MPa)	Penyerapan Air (%)
0%FA + 0%KH (A)	53,2	2,68%
0%FA + 5%KH (B)	50,0	2,93%
5%FA + 5%KH (C)	45,3	3,40%
7,5%FA + 5%KH (D)	41,8	3,83%
10%FA + 5%KH (E)	38,1	4,41%

Hubungan korelasi negatif ini menunjukkan bahwa variasi campuran awal (A hingga C) masih memiliki struktur beton yang padat dengan porositas rendah. Namun, saat kadar Fly Ash ditingkatkan menjadi 7,5% dan 10%, kenaikan penyerapan air menjadi lebih signifikan diikuti penurunan kuat tekan yang lebih besar, karena meningkatnya porositas akibat reaksi pozolanik yang belum sempurna dan berkurangnya produk C-S-H dari semen (Czasopismo et al., 2012). Fenomena ini sesuai dengan prinsip dalam SNI 2847:2019 dan ACI 211.1 bahwa workability dan durabilitas beton memiliki korelasi negatif dengan kuat tekan ketika FAS terlalu rendah dan material pozolanik belum aktif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa kesimpulan utama:

1. Kuat Tekan: Substitusi Fly Ash dan Kapur Tohor sebagai parsial semen menurunkan kuat tekan beton mutu tinggi secara konsisten pada setiap umur pengujian. Pada umur 28 hari, kuat tekan menurun dari 53,2 MPa (kontrol) menjadi 50,0 MPa (B), 45,3 MPa (C), 41,8 MPa (D), dan 38,1 MPa (E). Variasi D (7,5%FA+5%KH) masih memenuhi target $f'c$ 41 MPa, sedangkan variasi E tidak memenuhi target tersebut. Penurunan disebabkan oleh efek dilusi semen dan lambatnya reaksi pozolanik Fly Ash pada rentang umur 7–28 hari.
2. Penyerapan Air: Penyerapan air meningkat seiring bertambahnya kadar Fly Ash, dari 2,68% (kontrol) hingga 4,41% (10%FA+5%KH). Namun demikian, seluruh variasi masih memenuhi ketentuan beton kedap air SNI 03-2914-1992 ($\leq 6,5\%$) dan terklasifikasi “baik sekali” hingga “baik” menurut ASTM C642, sehingga beton tetap layak dari segi durabilitas. Berdasarkan temuan ini, penggunaan Fly Ash dan Kapur Tohor sebagai substitusi parsial semen tidak direkomendasikan untuk beton mutu tinggi $f'c$ 41 MPa pada kadar substitusi total melebihi 12,5%. Disarankan penggunaan kedua material ini diaplikasikan pada beton mutu rendah atau dikombinasikan dengan bahan aktivator lainnya, serta dilakukan

penelitian lanjutan dengan rentang umur pengujian yang lebih panjang (56 dan 90 hari) untuk mengoptimalkan manfaat reaksi pozolanik.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Fakih, A., Mohammed, B. S., Al-Osta, M. A., & Assaggaf, R. (2022). Evaluation of the mechanical performance and sustainability of rubberized concrete interlocking masonry prism. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 4385–4402. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.115>
- Angelina, M., Piusaputri, G., Zuraidah, S., & Sujatmiko, B. (2023). *Pengaruh Substitusi Serbuk Kapur Tohor Terhadap Semen Pada Beton Memadat Mandiri (Self-Compacting Concrete) Ditinjau Dari Kuat Tekan*. 01(October), 119–126.
- Apriwelni, S., & Bintang Wirawan, N. (2020). Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan Fly Ash dan Bubuk Kaca Sebagai Bahan Pengisi. *Jurnal Saintis*, 20(01), 61–68. [https://doi.org/10.25299/saintis.2020.vol20\(01\).4846](https://doi.org/10.25299/saintis.2020.vol20(01).4846)
- Arifin, H., Fajar, M. N., Purwantoro, D. S., Maysyurah, A., & Aris, M. (2024). Pengaruh Penambahan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan Pada Beton Campuran Air Laut. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 6(1), 89–93. <https://doi.org/10.26740/proteksi.v6n1.p89-93>
- Ashad, H., & Baso Gunawan, A. (2022). Penggunaan Terak Nikel Sebagai Bahan Alternatif Pengganti Agregat Kasar Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(3), 257–262. <https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.3.7>
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. SNI 03-2847-2002. *Bandung: Badan Standardisasi Nasional*, 251.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung Badan Standardisasi Nasional. *Bsn*. www.bsn.go.id
- Czasopismo, D., Po, N., Chemii, C. Z., Materia, T., & Tracz, T. (2012). *Wp ł yw zawarto ś ci zaczynu cementowego i wska ź nika w / c na nasi q kliwo ś c betonu wod q Effect of cement paste content and w / c ratio on concrete water absorption*. 6, 131–137.
- Davendraa, V., & Trimurtiningrumb, R. (2022). *Pengaruh Silica Fume Sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Beton Mutu Tinggi*. 5(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/potensi.2022.14864>
- Dewi, S. U., & Prasetyo, F. (2021). Analisa Penambahan Bottom Ash Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *JICE (Journal of Infrastructural in Civil Engineering)*, 2(02), 31. <https://doi.org/10.33365/jice.v2i02.1307>
- Dwi Prastiyo, F., Cahyono, I., & Hidayat, R. (2022). Pemanfaatan Limbah Pecahan Beton Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton Dengan Mutu F'C 18,68 MPa. *Nucleus Journal*, 1(1), 21–28. <https://doi.org/10.32492/nucleus.v1i1.1104>
- Ir, P., Solikin, M., & Ph, D. (n.d.). *Prof. Ir. Mochamad Solikin, S.T., M.T., Ph.D.*
- Muhammad Alfian Nur*, Arman Setiawan, E. Y. (2025). Reduksi Semen Dengan Campuran Fly Ash Dan Kapur Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 3(1), 67–74. <https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i1.4246>
- Nento, S., Olii, M. R., Wahab, A. A., Ichsan, I., & Djau, R. A. (2023). Beton Hijau Menggunakan Fly ash sebagai Substitusi Parsial Semen. *SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 11–20.

- Nuah Kalawa¹, F. S. dan M. I. Y. (2021). Jurnal kacapuri. *Keilmuan Teknik Sipil*, 4(1), 115–125. <https://www.academia.edu/download/80069609/3067.pdf>
- PBI. (1971). Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971. *Jakarta: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan*, 7, 130.
- Pujianto, A. (2015). Beton Mutu Tinggi dengan Admixture Superplastisizer dan Aditif Silicafume. *Semesta Teknik*, 14(2), 177–185. <https://doi.org/10.18196/st.v14i2.550>
- Putranto, S., Habsya, C., Rahmawati, A., Studi, P., Teknik, P., Sebelas, U., & Surakarta, M. (2017). *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Kejuruan (JIPTEK)*. X(1), 42–52.
- Rahmat Muhlis Mohamad¹, Dr. Azis Rachman², R. M. (2020). Kuat tekan beton untuk mutu tinggi 45 MPa dengan fly ash sebagai bahan pengganti sebagian semen. *Radial*, 8(1), 25–33. [http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=2082594&val=16461&title=KUAT TEKAN BETON UNTUK MUTU TINGGI 45 MPA DENGAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENGANTI SEBAGIAN SEMEN](http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=2082594&val=16461&title=KUAT%20TEKAN%20BETON%20UNTUK%20MUTU%20TINGGI%2045%20MPA%20DENGAN%20FLY%20ASH%20SEBAGAI%20BAHAN%20PENGANTI%20SEBAGIAN%20SEMEN)
- Rokhman, A., & Van Chairi, D. (2022). Pemanfaatan Substitusi Fly Ash dan Bahan Kapur Alam untuk Peningkatan Mutu Paving Block. *Jurnal Sipil Krisna*, 8(2), 57–67. <https://doi.org/10.61488/sipilkrisna.v8i2.168>
- Rothenberg, G. (2023). A realistic look at CO₂ emissions, climate change and the role of sustainable chemistry. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2(October 2022), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100012>
- Saputra, Y. R., Alaika, F. S., Andriansyah, V., Alquratu, A. C. D., Pridarta, S. B., & Sari, A. N. (2023). Studi Efektivitas Penambahan Bubuk Wortel dan Air Tebu Terhadap Kuat Tekan Beton Guna Mengurangi Dampak Pemanasan Global Akibat Produksi Semen. *Jurnal Talenta Sipil*, 6(2), 268. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v6i2.319>
- SNI-03-2834. (2002). *Tata Cara Pembuatan Rencana Beton Normal*.
- Solikin, M., & Nabiilah, M. (2022). Karakteristik, Analisis Pengaruh Penggunaan Variasi Fly Ash Terhadap Tohor, Beton Dengan Penambahan Kapur. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2022 Teknik*, 2459–9727, 29–36.
- Vardhan, R., Chandel, S., Sakale, R., & Ash, F. (2016). *Study of Cellular Light Weight Concrete*. 4(07), 3–8.