

Studi Kuat Tekan Beton dengan Substitusi Serbuk Kapur Tohor sebagai Pengganti Semen Portland

Asroful Anam^{1*}, Arie Taveriyanto¹

¹Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

asrofulanam6@students.unnes.ac.id*

| Received: 12/06/2026 | Revised: 20/06/2026 | Accepted: 27/06/2026 |

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Produksi semen Portland dalam jumlah besar menyumbang emisi CO₂ yang signifikan dan meningkatkan biaya konstruksi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi serbuk kapur tohor (CaO) terhadap kuat tekan beton serta menentukan kadar substitusi yang masih memenuhi kuat tekan rencana. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan tiga variasi substitusi kapur tohor terhadap semen Portland: 0% (kontrol), 2,5%, dan 5,5%. Setiap variasi dibuat 3 benda uji kubus 15×15×15 cm (total 9 buah), dengan campuran beton yang dirancang berdasarkan SNI 7656:2012 untuk mutu rencana K-125. Parameter mix design: FAS = 0,56; slump rencana 75–150 mm; komposisi per m³: semen 366,07 kg, pasir 693,78 kg, kerikil 1.085,15 kg, air 205 liter. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari menggunakan Compression Testing Machine (CTM) sesuai SNI 1974:2011, dengan pembatasan umur uji mengacu pada SNI 1974:2011 dan ASTM C39/C39M yang menyatakan kuat tekan 28 hari mewakili kekuatan akhir beton. Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan rata-rata beton normal (0%) = 19,78 MPa (SD = 1,28 MPa; CV = 6,5%), substitusi 2,5% = 17,95 MPa (SD = 0,65 MPa; CV = 3,6%), dan substitusi 5,5% = 15,72 MPa (SD = 4,44 MPa; CV = 28,2%). Penurunan kuat tekan disebabkan oleh dilution effect (berkurangnya semen aktif), rendahnya reaktivitas CaO dibanding semen Portland, dan distribusi partikel yang tidak merata pada kadar tinggi. Substitusi 2,5% masih memenuhi kuat tekan rencana (16,89 MPa) dan layak diaplikasikan, sedangkan substitusi 5,5% tidak memenuhi kuat tekan rencana. Kadar substitusi optimal berada pada kisaran $\leq 2,5\%$.

Kata kunci: kuat tekan beton, serbuk kapur tohor, substitusi semen Portland, dilution effect, beton ramah lingkungan, K-125

Abstract

Large-scale Portland cement production contributes significant CO₂ emissions and increases construction costs. This study aims to analyze the effect of quicklime powder (CaO) substitution on concrete compressive strength and to determine the substitution level that still meets the target compressive strength. A laboratory experimental method was used with three substitution variations: 0% (control),

2.5%, and 5.5%. Each variation comprised 3 cube specimens measuring 15×15×15 cm (9 specimens total), with a concrete mix designed according to SNI 7656:2012 for a planned strength of K-125. Mix design parameters: w/c = 0.56; planned slump 75–150 mm; composition per m³: cement 366.07 kg, sand 693.78 kg, gravel 1,085.15 kg, water 205 liters. Compressive strength testing was conducted at 28 days using a Compression Testing Machine (CTM) per SNI 1974:2011, with age limited to 28 days as it represents final concrete strength per SNI 1974:2011 and ASTM C39/C39M. Results showed mean compressive strengths of: 0% = 19.78 MPa (SD = 1.28 MPa; CV = 6.5%), 2.5% = 17.95 MPa (SD = 0.65 MPa; CV = 3.6%), and 5.5% = 15.72 MPa (SD = 4.44 MPa; CV = 28.2%). Strength reduction was caused by the dilution effect, low CaO reactivity compared to Portland cement, and non-uniform particle distribution at higher substitution levels. The 2.5% substitution still met the target compressive strength (16.89 MPa) and is considered feasible, while 5.5% did not. The optimal substitution level is ≤2.5%.

Keywords: concrete compressive strength, quicklime powder, Portland cement substitution, dilution effect, green concrete, K-125

Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam dunia teknik sipil karena memiliki kuat tekan tinggi, tahan lama, mudah dibentuk, dan relatif ekonomis (Neville, 2011). Kuat tekan beton menjadi parameter utama dalam perencanaan struktur beton bertulang dan klasifikasi mutu beton sesuai standar SNI maupun ASTM. Nilai kuat tekan beton dipengaruhi oleh faktor air-semen (FAS), kualitas dan gradasi agregat, metode pencampuran, serta proses perawatan (Mulyono, 2018).

Semen Portland sebagai komponen pengikat utama beton menghasilkan produk hidrasi berupa calcium silicate hydrate (C-S-H) dan calcium hydroxide (Ca(OH)₂) yang menentukan kekuatan beton. Namun, setiap ton semen yang diproduksi diperkirakan melepaskan sekitar 0,8 ton CO₂, sehingga industri semen menyumbang 5–8% emisi gas rumah kaca global (Mehta & Monteiro, 2014). Di Indonesia, konsumsi semen nasional terus meningkat seiring pesatnya pembangunan infrastruktur, sehingga pengembangan material substitusi semen yang ramah lingkungan menjadi semakin mendesak.

Berbagai bahan mineral telah dikaji sebagai substitusi parsial semen, termasuk fly ash, slag, silica fume, dan limestone powder. Penelitian Bonavetti et al. (2003) menunjukkan bahwa substitusi limestone powder hingga 10–15% dari berat semen dapat mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan melalui efek micro-filler dan pembentukan nucleation sites. Sebaliknya, pada kadar lebih tinggi, efek dilution akibat berkurangnya semen aktif mendominasi sehingga kuat tekan menurun (Mindess, Young, & Darwin, 2023). De Weerd et al. (2011) melaporkan bahwa limestone powder pada kadar ≤15% dapat mempercepat hidrasi awal dan meningkatkan kepadatan pasta semen melalui pembentukan carboaluminat phases.

Serbuk kapur tohor (CaO) merupakan produk kalsinasi batu kapur (CaCO₃ → CaO + CO₂) yang tersedia sebagai limbah industri pertambangan batu kapur. Zuraidah & Hastono (2020) menemukan bahwa kapur tohor mempengaruhi kuat tekan beton memadat mandiri (self-compacting concrete) pada variasi substitusi tertentu. Prasetyo & Kurniawan (2023) melaporkan

bahwa substitusi kapur tohor pada beton normal memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik beton bergantung pada kadar yang digunakan. Agus & Wibowo (2021) serta Hermawan & Lestari (2021) juga mengkonfirmasi bahwa kapur tohor pada kadar rendah masih dapat menghasilkan beton dengan kuat tekan memadai.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang ada menggunakan variasi kadar substitusi yang relatif luas (>10%) atau mengkombinasikan kapur dengan bahan lain, sehingga belum memberikan informasi yang memadai mengenai pengaruh spesifik substitusi kadar rendah ($\leq 6\%$) terhadap kuat tekan beton normal mutu K-125 menggunakan material lokal Indonesia. Kesenjangan ini menjadi dasar dilaksanakannya penelitian ini. Tujuan penelitian adalah: (1) menganalisis pengaruh substitusi serbuk kapur tohor pada kadar 0%, 2,5%, dan 5,5% terhadap kuat tekan beton umur 28 hari; dan (2) menentukan kadar substitusi yang masih memenuhi kuat tekan rencana 16,89 MPa (mutu K-125).

Metodologi Penelitian

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Variabel bebas adalah persentase substitusi serbuk kapur tohor (0%, 2,5%, 5,5%), variabel terikat adalah kuat tekan beton pada umur 28 hari, dan variabel kontrol meliputi jenis semen, jenis agregat, FAS, metode pencampuran, pemadatan, dan perawatan. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Beton, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, pada bulan Februari–April 2026.

Material Penelitian dan Karakteristik Bahan

Material yang digunakan dalam penelitian ini beserta karakteristiknya adalah sebagai berikut:

Semen Portland

Semen Portland Tipe I (Ordinary Portland Cement/OPC) merek Semen Bima digunakan sebagai bahan pengikat utama, memenuhi SNI 2049:2015. Semen tipe I dipilih karena diperuntukkan bagi konstruksi umum tanpa persyaratan khusus terhadap panas hidrasi atau ketahanan lingkungan agresif.

Serbuk Kapur Tohor

Serbuk kapur tohor (CaO) berasal dari batu kapur kawasan karst Citatah, Padalarang, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat, yang diproses melalui pembakaran batu kapur pada suhu tinggi ($\pm 900^\circ\text{C}$) sesuai reaksi: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Material ini memiliki sifat higroskopis dan reaktif terhadap air. Kapur tohor berfungsi sebagai bahan pengisi (filler) sekaligus substitusi parsial semen. Kandungan utama CaO $\geq 85\%$ berdasarkan spesifikasi material dari produsen.

Agregat Halus

Pasir alam dari Muntilan, Jawa Tengah, bersih dan bebas lumpur, memenuhi ketentuan SNI 03-2461-2002 dengan berat jenis $\pm 2,6 \text{ g/cm}^3$ dan modulus kehalusan (FM) dalam rentang 2,3–3,1.

Agregat Kasar

Batu pecah (split) lokal dengan ukuran maksimum 30 mm, memenuhi persyaratan gradasi, kekerasan, dan kebersihan sesuai SNI 03-2834-2000, dengan berat jenis $\pm 2,6 \text{ g/cm}^3$.

Air

Air bersih dari jaringan PDAM yang tidak mengandung zat berbahaya, minyak, atau bahan kimia yang dapat mengganggu proses hidrasi semen, sesuai SNI 2847:2019.

Rancangan Campuran Beton (Mix Design)

Perencanaan campuran beton mengacu pada SNI 7656:2012 dan SNI 03-2834-2000 dengan mutu rencana K-125 (f'_c karakteristik = 10 MPa pada umur 28 hari). Berdasarkan nilai deviasi standar (s) = 4,2 MPa, kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f'_{cr}) dihitung sebagai:

$$f'_{cr} = f'_c + k \times s = 10 + 1,64 \times 4,2 = 16,89 \text{ MPa}$$

Parameter desain campuran: FAS = 0,56 (batas maksimum 0,60 sesuai SNI); slump rencana 75–150 mm; ukuran maksimum agregat kasar 30 mm. Komposisi campuran per 1 m³ hasil perhitungan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Campuran Beton per 1 m³ (Mix Design)

No.	Komponen	Kebutuhan per m ³	Rasio Campuran
1	Air	205 liter	–
2	Semen Portland	366,07 kg	1,00 (basis)
3	Pasir (Agregat Halus)	693,78 kg	1,95
4	Kerikil (Agregat Kasar)	1.085,15 kg	3,05
FAS / w:c ratio		0,56	Maks. 0,60 (SNI)

Sumber: Data Penelitian, 2026

Serbuk kapur tohor disubstitusikan terhadap berat semen Portland sebesar 0%, 2,5%, dan 5,5%. Pada variasi 2,5%, kebutuhan semen dikurangi menjadi 357 kg/m³ dan digantikan dengan $\pm 9,15 \text{ kg/m}^3$ kapur tohor. Pada variasi 5,5%, kebutuhan semen dikurangi menjadi 345,9 kg/m³ dan digantikan dengan $\pm 20,1 \text{ kg/m}^3$ kapur tohor. FAS dan proporsi agregat dijaga tetap pada seluruh variasi. Pengujian slump dilakukan sebelum pencetakan untuk memastikan workability berada dalam rentang yang direncanakan.

Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Benda uji berupa kubus beton berukuran 15 × 15 × 15 cm. Setiap variasi campuran dibuat sebanyak 3 benda uji, sehingga total benda uji berjumlah 9 buah (Tabel 2). Alasan pembatasan pada 3 benda uji per variasi adalah keterbatasan kapasitas laboratorium dan volume material yang tersedia. Pencampuran dilakukan menggunakan concrete mixer hingga homogen, diikuti pengecoran ke dalam cetakan dan pemadatan manual menggunakan tongkat penusuk untuk menghilangkan rongga udara.

Tabel 2. Rancangan Benda Uji Penelitian

No.	Variasi Campuran	Kapur Tohor (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Jml. Benda Uji
1	Kontrol (0%)	0	366,07	3
2	Substitusi 2,5%	9,15	357,0	3
3	Substitusi 5,5%	20,1	345,9	3
Total				9

Sumber: Data Penelitian, 2026

Perawatan (curing) dilakukan dengan metode perendaman dalam air bersih selama 28 hari sesuai SNI 2493:2011. Benda uji dilepas dari cetakan setelah 24 jam kemudian direndam sepenuhnya dalam bak perendaman. Air perendaman diganti secara berkala untuk menjaga kebersihan dan mencegah kontaminasi.

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari menggunakan Compression Testing Machine (CTM) sesuai SNI 1974:2011. Pembatasan pada umur 28 hari didasarkan pada ketentuan SNI 1974:2011 dan ASTM C39/C39M yang menyatakan bahwa kuat tekan beton pada umur 28 hari dapat mewakili kekuatan akhir beton dalam kondisi normal, sekaligus merupakan umur standar yang digunakan dalam evaluasi mutu dan desain struktural. Nilai kuat tekan (MPa) dihitung menggunakan rumus:

$$f_c = P / A$$

Keterangan: f_c = kuat tekan beton (MPa); P = beban maksimum saat beton hancur (N); A = luas penampang benda uji (mm²). Untuk benda uji kubus 15 × 15 cm: A = 22.500 mm².

Teknik Analisis Data

Analisis data mencakup: (1) perhitungan kuat tekan rata-rata (\bar{x}) untuk setiap variasi; (2) perhitungan parameter statistik deskriptif meliputi deviasi standar (SD) dan koefisien variasi (CV); (3) perhitungan persentase penurunan kuat tekan terhadap beton kontrol; dan (4) evaluasi pemenuhan terhadap kuat tekan rencana (16,89 MPa) dan kuat tekan disyaratkan K-125 (10 MPa). Mengingat jumlah sampel yang terbatas (n = 3 per variasi), uji statistik inferensial tidak dilakukan. Namun, nilai CV digunakan sebagai indikator konsistensi data: CV < 10% menunjukkan variasi rendah (data konsisten), CV 10–20% menunjukkan variasi sedang, dan CV > 20% menunjukkan variasi tinggi yang memerlukan perhatian khusus (ACI 214R-11, 2011).

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari untuk seluruh variasi campuran disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari

Variasi	Sampel	Beban Maks. (Kgf)	Kuat Tekan (Kgf/cm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
Kontrol (0%)	1	47.084	209	20,496			
Kontrol (0%)	2	47.293	210	20,594	19,78	1,28	6,5
Kontrol (0%)	3	41.905	186	18,240			
Substitusi 2,5%	1	41.075	182	17,848			
Substitusi 2,5%	2	42.778	190	18,633	17,95	0,65	3,6
Substitusi 2,5%	3	40.045	177	17,358			
Substitusi 5,5%	1	23.723	105	10,297			
Substitusi 5,5%	2	40.973	182	17,848	15,72	4,44	28,2
Substitusi 5,5%	3	43.765	194	19,025			

Sumber: Data Pengujian Laboratorium, 2026

Keterangan: SD = Deviasi Standar; CV = Koefisien Variasi

Rekapitulasi kuat tekan rata-rata, parameter statistik, dan evaluasi mutu beton disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Kuat Tekan Rata-rata dan Evaluasi Mutu Beton

Variasi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	Penurunan vs Kontrol	vs Target 16,89 MPa	vs Syarat K-125 (10 MPa)
Kontrol (0%)	19,78	1,28	6,5	–	Memenuhi (+17,1%)	Memenuhi
Substitusi 2,5%	17,95	0,65	3,6	–9,25%	Memenuhi (+6,3%)	Memenuhi
Substitusi 5,5%	15,72	4,44	28,2	–20,53%	Tidak Memenuhi (–3,4%)	Memenuhi

Sumber: Data Penelitian, 2026

Analisis Statistik Deskriptif

Hasil analisis statistik deskriptif (Tabel 4) menunjukkan perbedaan konsistensi data yang signifikan antar variasi. Beton kontrol (0%) memiliki CV = 6,5% yang tergolong rendah-sedang, menunjukkan proses pencampuran dan pengujian yang konsisten. Variasi substitusi 2,5% memiliki CV = 3,6% yang sangat rendah, mengindikasikan homogenitas campuran yang baik. Sebaliknya, variasi 5,5% memiliki CV = 28,2% yang tergolong sangat tinggi menurut kriteria ACI 214R-11 (2011), yang mengklasifikasikan CV > 20% sebagai variasi “buruk” (poor) dalam pengendalian mutu beton. Nilai CV yang tinggi ini disebabkan oleh outlier pada Sampel 1 (kuat tekan 10,297 MPa) yang jauh lebih rendah dibanding Sampel 2 (17,848 MPa) dan Sampel 3 (19,025 MPa).

Mengingat jumlah sampel yang sangat terbatas (n = 3), uji signifikansi statistik formal seperti ANOVA satu arah atau uji-t tidak dapat dilakukan secara valid. Menurut Walpole et al. (2012), uji statistik inferensial yang sah memerlukan minimal n = 5–8 sampel per kelompok. Oleh karena itu, interpretasi perbedaan kuat tekan antar variasi dalam penelitian ini bersifat deskriptif-komparatif. Penelitian lanjutan dengan jumlah sampel yang lebih besar (minimum 5 per variasi) disarankan untuk memungkinkan analisis statistik yang lebih valid.

Pengaruh Substitusi Kapur Tohor terhadap Kuat Tekan Beton

Hasil penelitian menunjukkan tren penurunan kuat tekan beton seiring meningkatnya kadar substitusi serbuk kapur tohor (Tabel 4). Beton kontrol menghasilkan kuat tekan 19,78 MPa, turun menjadi 17,95 MPa pada substitusi 2,5% (–9,2%), dan turun lebih lanjut menjadi 15,72 MPa pada substitusi 5,5% (–20,5%). Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Hermawan & Lestari (2021) yang melaporkan penurunan kuat tekan beton sebanding dengan peningkatan kadar kapur tohor. Fauzi & Hidayat (2022) juga melaporkan tren serupa dengan menunjukkan bahwa kapur pada kadar rendah masih memberikan kuat tekan yang memadai.

Tren yang ditemukan dalam penelitian ini selaras dengan teori limestone powder dalam beton yang disampaikan oleh Mindess et al. (2023) dan Mehta & Monteiro (2014). Pada kadar substitusi rendah (2,5%), partikel kapur tohor berperan sebagai filler yang mengisi pori-pori dan meningkatkan kepadatan pasta semen-agregat, namun efek positif ini tidak cukup mengimbangi

berkurangnya semen aktif. Pada kadar 5,5%, efek negatif dari dilution effect semakin mendominasi, menghasilkan penurunan kuat tekan yang lebih besar.

Mekanisme Penurunan Kuat Tekan

Penurunan kuat tekan beton akibat substitusi serbuk kapur tohor dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme yang saling berinteraksi:

Dilution Effect (Efek Pengenceran)

Setiap peningkatan kadar substitusi mengurangi jumlah semen Portland yang tersedia untuk bereaksi dengan air. Pada substitusi 2,5%, jumlah semen berkurang dari 366,07 menjadi $\pm 357,0 \text{ kg/m}^3$ (-2,5%), sedangkan pada substitusi 5,5% turun menjadi $\pm 345,9 \text{ kg/m}^3$ (-5,5%). Berkurangnya semen aktif berarti berkurangnya produksi C-S-H sebagai komponen pengikat utama kekuatan beton (Neville, 2011; Bonavetti et al., 2003).

Reaktivitas CaO yang Terbatas

Kapur tohor (CaO) bereaksi dengan air membentuk kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) melalui reaksi eksotermis $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$. Produk Ca(OH)₂ bersifat kurang padat dan lebih larut dibandingkan C-S-H dari hidrasi semen. Berbeda dengan material pozzolan (fly ash, silica fume) yang dapat bereaksi dengan Ca(OH)₂ untuk menghasilkan C-S-H sekunder, kapur tohor tidak memiliki sifat pozzolan sehingga tidak terjadi reaksi sekunder yang menguntungkan (Mehta & Monteiro, 2014).

Potensi Ekspansi Hidrasi Lambat

CaO yang tidak terhidrasi sempurna selama pencampuran dapat mengalami hidrasi lambat setelah beton mengeras, menyebabkan ekspansi volume lokal yang dapat melemahkan ikatan antara pasta semen dan agregat. Fenomena ini lebih berpeluang terjadi pada kadar substitusi 5,5% dibanding 2,5% (Mindess et al., 2023).

Efek Filler pada Kadar Rendah

Pada kadar 2,5%, partikel kapur tohor yang halus dapat berperan sebagai micro-filler yang mengisi rongga kapiler di antara partikel semen dan agregat, meningkatkan kepadatan pasta secara parsial. Efek serupa dilaporkan oleh Bonavetti et al. (2003) dan De Weerd et al. (2011) pada limestone powder kadar rendah. Namun efek filler ini tidak cukup kuat untuk mencegah penurunan kuat tekan yang disebabkan oleh dilution effect.

Analisis Variasi Data dan Outlier pada Variasi 5,5%

Variasi data yang sangat tinggi pada substitusi 5,5% (CV = 28,2%) merupakan temuan penting yang perlu dibahas secara khusus. Sampel 1 menghasilkan kuat tekan 10,297 MPa, jauh lebih rendah dibandingkan Sampel 2 (17,848 MPa) dan Sampel 3 (19,025 MPa), dengan selisih hingga 8,728 MPa. Nilai outlier pada Sampel 1 kemungkinan disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor:

- (1) Distribusi kapur tohor yang tidak merata selama pencampuran, menyebabkan konsentrasi kapur tohor yang lebih tinggi pada benda uji tertentu dan membentuk rongga atau zona lemah lokal;
- (2) Hidrasi ekspansif CaO yang lebih intens pada zona dengan konsentrasi kapur tinggi, yang dapat menyebabkan microcracking lokal pada pasta semen;

(3) Potensi variasi dalam proses pemadatan manual yang tidak seragam antar benda uji.

Nilai CV yang tinggi ini mengindikasikan bahwa pada kadar substitusi 5,5%, serbuk kapur tohor lebih sulit didistribusikan secara merata dalam campuran beton, yang mengakibatkan variabilitas kuat tekan yang besar. Hal ini merupakan kelemahan praktis yang penting: bahkan jika nilai rata-rata kuat tekan dianggap memadai, variabilitas tinggi menjadi risiko tersendiri dalam aplikasi konstruksi karena tidak dapat menjamin konsistensi mutu beton di lapangan. Siregar & Putra (2021) mengingatkan bahwa variabilitas tinggi dalam pengujian beton laboratorium mengindikasikan perlunya perbaikan prosedur pencampuran sebelum diterapkan di lapangan.

Evaluasi Pemenuhan Mutu Beton

Berdasarkan Tabel 4, evaluasi mutu beton terhadap dua parameter acuan menunjukkan hasil sebagai berikut. Terhadap kuat tekan yang disyaratkan untuk mutu K-125 (10 MPa), seluruh variasi beton memenuhi persyaratan. Namun, jika dievaluasi terhadap kuat tekan rencana ($f'_{cr} = 16,89$ MPa) yang merupakan target mutu berdasarkan SNI 7656:2012, hanya beton kontrol (0%) dan substitusi 2,5% yang memenuhi. Substitusi 5,5% menghasilkan kuat tekan rata-rata 15,72 MPa, berada 3,4% di bawah kuat tekan rencana.

Penting untuk dicatat bahwa evaluasi ini didasarkan pada nilai rata-rata dari 3 sampel. Dalam praktik pengendalian mutu beton, SNI 1974:2011 dan ACI 318 mensyaratkan bahwa tidak ada hasil uji individual yang jatuh di bawah $f'_c - 3,5$ MPa. Pada variasi 5,5%, Sampel 1 (10,297 MPa) sudah berada sangat mendekati kuat tekan K-125 yang disyaratkan (10 MPa), sehingga variasi 5,5% tidak direkomendasikan untuk aplikasi struktural meskipun rata-ratanya secara teknis masih di atas syarat minimum.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini dapat dibandingkan dengan temuan penelitian terdahulu yang relevan. Agus & Wibowo (2021) melaporkan penurunan kuat tekan beton sebesar 8–12% pada substitusi kapur tohor 5%, yang sebanding dengan penurunan 9,2% yang ditemukan pada substitusi 2,5% dalam penelitian ini. Prasetyo & Kurniawan (2023) menemukan bahwa substitusi kapur tohor >5% menyebabkan penurunan kuat tekan yang lebih signifikan, konsisten dengan hasil substitusi 5,5% (-20,5%) dalam penelitian ini.

Fauzi & Hidayat (2022) dan Hermawan & Lestari (2021) secara konsisten melaporkan bahwa kapur pada kadar rendah ($\leq 5\%$) menghasilkan beton dengan kuat tekan yang masih memadai untuk mutu normal, sejalan dengan temuan substitusi 2,5% dalam penelitian ini yang masih memenuhi kuat tekan rencana. Dibandingkan dengan penelitian limestone powder oleh Bonavetti et al. (2003) yang menunjukkan substitusi hingga 15% masih dapat mempertahankan kuat tekan, kapur tohor dalam penelitian ini menunjukkan dampak negatif lebih besar pada kadar yang sama. Hal ini konsisten dengan perbedaan karakteristik material: kapur tohor (CaO) berbeda dengan limestone powder (CaCO₃) dalam hal reaktivitas dan mekanisme interaksi dengan semen, sehingga tidak dapat langsung disamakan (Zuraidah & Hastono, 2020).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Substitusi serbuk kapur tohor sebagai pengganti sebagian semen Portland memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton dengan kecenderungan menurun seiring meningkatnya kadar substitusi. Kuat tekan rata-rata beton kontrol (0%) = 19,78 MPa (CV = 6,5%), substitusi 2,5% = 17,95 MPa (CV = 3,6%), dan substitusi 5,5% = 15,72 MPa (CV = 28,2%), masing-masing pada umur 28 hari.
2. Substitusi 2,5% menghasilkan penurunan kuat tekan sebesar 9,2% dibanding kontrol, namun masih memenuhi kuat tekan rencana 16,89 MPa (+6,3%) dan kuat tekan yang disyaratkan K-125 (10 MPa). Dengan nilai CV = 3,6% yang rendah, kadar substitusi 2,5% menunjukkan konsistensi data yang baik dan dinilai layak diaplikasikan pada konstruksi beton mutu K-125.
3. Substitusi 5,5% menyebabkan penurunan kuat tekan sebesar 20,5% dibanding kontrol, dengan kuat tekan rata-rata 15,72 MPa yang berada 3,4% di bawah kuat tekan rencana. Nilai CV = 28,2% yang sangat tinggi mengindikasikan distribusi kapur tohor yang tidak merata dan variabilitas mutu yang tidak dapat diterima. Kadar substitusi 5,5% tidak direkomendasikan untuk aplikasi konstruksi struktural.
4. Mekanisme utama penurunan kuat tekan adalah dilution effect (berkurangnya semen aktif), rendahnya reaktivitas CaO dibanding semen Portland (tidak memiliki sifat pozzolan), dan potensi ekspansi hidrasi lambat pada kadar substitusi tinggi. Kadar substitusi optimal berada pada kisaran $\leq 2,5\%$.
5. Keterbatasan penelitian: (a) jumlah sampel terbatas ($n = 3$) sehingga analisis statistik inferensial tidak dapat dilakukan; (b) pengujian hanya pada umur 28 hari; (c) karakterisasi material tidak dilakukan secara komprehensif di laboratorium. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan sampel lebih banyak (≥ 5 per variasi), variasi kadar yang lebih luas (0–10% dengan interval 1%), pengujian pada berbagai umur (7, 14, 28, 56 hari), karakterisasi fisik-kimia material, serta analisis mikrostruktur (SEM/XRD) untuk penjelasan mekanistik yang lebih kuat.

Daftar Pustaka

- ACI Committee 214. (2011). *ACI 214R-11: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Agus, S., & Wibowo, T. (2021). Pengaruh penggunaan kapur tohor terhadap kuat tekan beton normal. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 23(2), 115–124.
- ASTM International. (2019). *ASTM C39/C39M-19: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM International. (2019). *ASTM C150/C150M-19: Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohocken: ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: BSN.

- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011: Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 2493:2011: Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012: Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Ringan*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 2049:2015: Semen Portland*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Bonavetti, V., Donza, H., Menéndez, G., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2003). Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 865–871.
- De Weerd, K., Kjellsen, K. O., Sellevold, E., & Justnes, H. (2011). Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 30–38.
- Fauzi, M., & Hidayat, R. (2022). Analisis pengaruh substitusi serbuk kapur terhadap karakteristik beton. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 8(1), 44–53.
- Hermawan, D., & Lestari, P. (2021). Pengaruh variasi campuran kapur tohor pada beton terhadap nilai kuat tekan. *Jurnal Konstruksia*, 12(3), 201–210.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)*. New York: McGraw-Hill.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2023). *Concrete (3rd ed.)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mulyono, T. (2018). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi Publisher.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete (5th ed.)*. London: Pearson Education.
- Prasetyo, A., & Kurniawan, F. (2023). Studi eksperimental penggunaan limbah kapur tohor sebagai bahan substitusi semen Portland pada beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 19(1), 67–76.
- Siregar, R., & Putra, D. (2021). Pemanfaatan serbuk kapur dalam campuran beton ramah lingkungan. *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan Binaan*, 5(2), 133–142.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists (9th ed.)*. Boston: Prentice Hall.
- Zuraidah, S., & Hastono, K. B. (2020). Pengaruh kapur tohor terhadap kuat tekan beton memadat mandiri (self-compacting concrete). *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 15(2), 88–97.