

Sifat Mekanik Kuat Tekan Beton Menggunakan Limbah Beton Sebagai Substitusi Agregat Kasar

Tantoni, Khodijah Al Qubro*, Marguan Fauzi

Teknik Sipil, Universitas Indo Global Mandiri, Palembang, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Beton, Limbah Beton Daur Ulang, Kuat Tekan, Substitusi Agregat Kasar, Silica Fume

***Correspondence email:**

khodijah@uigm.ac.id

Submitted: 04 November 2025

Revised: 10 Agustus 2026

Accepted: 10 Agustus 2026

Published: 13 Agustus 2026

ABSTRAK

Limbah beton dari kegiatan konstruksi kerap hanya dibuang tanpa pemanfaatan kembali, padahal material ini masih memiliki potensi sebagai pengganti agregat kasar pada beton. Upaya pemanfaatan limbah tersebut sejalan dengan konsep konstruksi berkelanjutan yang menekankan prinsip mengurangi, mendaur ulang, dan menggunakan kembali. Dalam studi ini, limbah beton dimanfaatkan sebagai substitusi agregat kasar dengan variasi 25%, 50%, dan 75%, serta ditambahkan bahan aditif berupa silica fume sebesar 5%. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk memantau perkembangan kekuatan beton, sementara uji slump digunakan untuk menilai kemudahan pengerjaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran dengan substitusi 50% menghasilkan kuat tekan paling optimal, yaitu 25,34 MPa pada umur 28 hari. Sebaliknya, pada substitusi 75% terjadi penurunan kekuatan yang cukup signifikan. Selain itu, nilai slump tidak menurun secara linear terhadap kadar limbah beton—sempat mendekati beton normal pada substitusi 50%, sebelum menurun tajam pada substitusi 75%, yang menunjukkan berkurangnya workability pada kadar substitusi tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah beton sebagai agregat kasar dapat menjadi alternatif ramah lingkungan dalam industri konstruksi, sepanjang komposisinya diatur secara tepat agar tetap memenuhi standar teknis. Kajian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengeksplorasi penggunaan material tambahan lain guna meningkatkan kualitas beton daur ulang.

ABSTRACT

Keywords:

Concrete, Recycled Concrete Waste, Compressive Strength, Coarse Aggregate Substitution, Silica Fume

Concrete waste from construction activities is often simply discarded without being reused, even though this material still has the potential to replace coarse aggregate in concrete. Efforts to utilize this waste are in line with the concept of sustainable construction that emphasizes the principles of reducing, recycling, and reusing. In this study, concrete waste was utilized as a substitute for coarse aggregate with variations of 25%, 50%, and 75%, and an additive in the form of silica fume was added at 5%. Compressive strength tests were conducted at the ages of 7, 14, and 28 days to meet the development of concrete strength, while slump tests were used to assess workability. The test results showed that the mixture with 50% substitution produced the most optimal compressive strength, namely 25.34 MPa at the age of 28 days. Conversely, at 75% substitution, there was a significant decrease in strength. In addition, the slump value did not decrease linearly with the content of concrete waste—it approached the normal concrete value at 50% substitution before dropping sharply at 75%, indicating reduced workability at higher substitution levels. These findings confirm that the use of concrete waste as coarse aggregate can be an environmentally friendly alternative in industrial construction, with all its compositions being precisely regulated to meet technical standards. Further studies are still needed to explore the use of other additional materials to improve the quality of recycled concrete.

PENDAHULUAN

Beton dikenal sebagai material bangunan yang paling banyak dimanfaatkan di dunia karena memiliki kualitas mekanis yang unggul, khususnya pada aspek kuat tekan yang tinggi. Namun, beton juga memiliki risiko lingkungan, karena proyek konstruksi menghasilkan banyak puing beton. Perlu ada mekanisme untuk mendaur ulang sampah beton ini karena umumnya dibuang begitu saja dan berkontribusi pada limbah bangunan. Salah satu pilihannya adalah menggunakan beton daur ulang ke dalam campuran beton segar sebagai pengganti agregat kasar (Arifin & Susanto, 2020).

Kuat tekan yang tinggi dan ketahanan terhadap berbagai kondisi iklim hanyalah dua dari fitur mekanis beton yang luar biasa yang menjadikannya pilihan populer di kalangan profesional industri konstruksi. Di sisi lain, pembuatan beton tradisional menggunakan banyak agregat alami, yang merusak lingkungan dan menguras sumber daya alam. Sebagai contoh, menurut Nugroho (2020), permintaan agregat kasar yang terbuat dari batu alam terus meningkat seiring dengan perluasan infrastruktur.

Menggunakan beton daur ulang sebagai alternatif agregat kasar merupakan salah satu cara untuk mengurangi jejak ekologis dari pembuatan beton. Sumber umum limbah beton meliputi sisa-sisa proyek konstruksi, struktur usang yang dibongkar, atau beton yang tidak lulus uji laboratorium. Baik jumlah sampah konstruksi maupun jumlah agregat alami yang perlu diekstraksi dapat dikurangi dengan pemanfaatan limbah ini (Pacheco, 2020).

Penelitian yang telah dilakukan oleh Al Qubro et al. (2025) mengkaji kinerja campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) menggunakan aspal modifikasi *Asbuton Lawele* murni (PMA 2%) dibandingkan dengan aspal Pen 60/70 dan Starbit E-55. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *Asbuton Lawele* mampu meningkatkan stabilitas Marshall, mengurangi nilai *Cantabro loss*, serta menghasilkan nilai *Indirect Tensile Strength Ratio* (ITSR) yang lebih tinggi dibandingkan aspal minyak murni. Menariknya, nilai *draindown* pada campuran SMA dengan PMA 2% tercatat sebesar 0%, menunjukkan ketahanan yang baik terhadap segregasi aspal pada suhu tinggi. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa *Asbuton Lawele* dapat menjadi alternatif material pengikat yang tidak hanya sebanding dengan aspal modifikasi sintetis, tetapi juga lebih ramah lingkungan serta mendukung pengurangan ketergantungan Indonesia terhadap aspal impor.

Terdapat potensi signifikan untuk pemanfaatan limbah beton sebagai alternatif agregat kasar guna mendukung gagasan konstruksi berkelanjutan. Namun, pengujian tambahan diperlukan untuk menjamin kualitas mekanis, terutama kuat tekan, beton yang dibuat dengan bahan limbah ini tetap memenuhi spesifikasi teknis. Menurut Ramadhan et al. (2020), terdapat beberapa bukti bahwa jumlah dan kualitas limbah beton yang dimanfaatkan sebagai agregat kasar dapat memengaruhi kualitas mekanis beton.

Dengan sebagian besar sampah langsung dibuang ke tempat pembuangan sampah tanpa diolah kembali, pengelolaan limbah konstruksi di Indonesia masih menjadi perhatian utama. Oleh karena itu, studi yang menyelidiki kelayakan penggunaan beton daur ulang sebagai alternatif agregat kasar sangat relevan dengan bidang pembangunan berkelanjutan. Penemuan ini berpotensi menyediakan opsi yang hemat biaya bagi sektor konstruksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Gunasekaran et al., 2021).

METODE

Penelitian ini didasarkan pada data eksperimen yang dikumpulkan dari Laboratorium Tanah dan Beton Universitas Indo Global Mandiri, yang merupakan bagian dari Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil. Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan eksperimen dan sifat-sifat material yang digunakan juga akan dicakup dalam metodologi penelitian ini. Spesifikasi komposisi kimia campuran beton didasarkan pada penelitian sebelumnya. Uji slump, waktu pengikatan, berat jenis, dan kuat tekan merupakan bagian dari investigasi eksperimental. Benda uji yang digunakan untuk pengujian dalam investigasi ini diawetkan menggunakan prosedur pembungkus plastik.

a. Persiapan Material

b. Pengujian Agregat

Pada pengujian agregat bertujuan untuk menentukan layak atau tidaknya material agregat untuk pembuatan benda uji pada penelitian ini.

c. Pembuatan Benda Uji

Total pengujian 36 Benda

d. Formula Campuran Desain

Menemukan proporsi semen, agregat halus, air, dan abu sekam padi yang tepat merupakan pendorong utama penelitian ini.

e. Pengujian Slump

Untuk kepentingan pekerja beton, pengujian ini menentukan kemampuan kerja campuran, fluiditas, atau densitasnya.

f. Perawatan (Curing) Beton

Usia beton merupakan faktor penentu waktu perawatan.

g. Pengujian Kuat Tekan Beton

Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan apakah kuat tekan beton cukup untuk penggunaan yang diinginkan

Pengujian Agregat

Tujuan pengujian agregat adalah untuk mengidentifikasi material terbaik yang akan digunakan sebagai komponen campuran aspal, baik agregat halus maupun agregat kasar. Sesuai spesifikasi yang tercantum dalam standar agregat kasar SNI 2417:2008, pengujian agregat dilakukan, meliputi analisis saringan, pengukuran berat jenis agregat kasar dan halus, uji adhesi aspal, dan uji keausan agregat.

Pembuatan Benda Uji

Total ada 36 benda uji yang digunakan untuk membuat benda uji; setiap benda uji terdiri dari 9 sampel dengan dimensi 10 cm x 20 cm, yang diambil pada hari ke-7, ke-14, dan ke-28 setelah beton ditambahkan.

Tabel 1. Campuran Beton Dengan Tambahan Limbah Beton

Tabel 1. Sampuran Beton Dengan Jumlah Jumlah Limbah Beton					
		Jumlah Benda Uji			
		Umur beton (hari)			
No	Kode Benda Uji	7	14	28	Total
1	BN	3	3	3	9
2	BL 25% SF 5%	3	3	3	9
3	BL 50% SF 5%	3	3	3	9
4	BL 75% SF 5%	3	3	3	9
Total Benda Uji					36

Keterangan:

- BN : Beton normal.
 BL 25% : Beton substitusi limbah beton 25%.
 BL 50% : Beton substitusi limbah beton 50%.
 BL 75% : Beton substitusi limbah beton 75%.

Formula Campuran Desain

Menemukan proporsi semen, agregat halus, air, dan abu sekam padi yang tepat merupakan pendorong utama penelitian ini. Bahan-bahan ini penting untuk menghasilkan beton dengan kekuatan yang diinginkan. Tujuan perancangan campuran beton untuk penelitian ini adalah untuk menghasilkan beton berkualitas tinggi dari setiap sampel. Sesuai dengan modifikasi yang diperlukan, rasio abu sekam padi 1:2:0,4 ditambahkan ke dalam rancangan campuran untuk komposisi beton standar.

Pengujian Kuat Tekan Beton

Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan apakah kuat tekan beton cukup untuk penggunaan yang diinginkan.

- Peralatan
 - Mesin tekan hidrolis
 - Timbangan kapasitas 100 kg
- Benda Uji
Benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 10 x 20 cm
- Prosedur Pelaksanaan
 - Keluarkan sampel kering untuk pengujian.
 - Tentukan berat benda uji.
 - Letakkan benda uji di atas bench press.
 - Pastikan jarum berada di angka nol pada pengukur tekanan mesin press. Sebelum menyalakan mesin, pastikan pegangan berada pada posisi menekan.
 - Pertahankan beban yang diberikan hingga indikator dial merah berhenti bergerak dan indikator dial hitam turun secara otomatis.
 - Segera setelah Anda melihat indikator dial yang menunjukkan beban maksimum yang dapat ditahan benda uji, catat hasilnya.

HASIL

Hasil Pengujian Analisa Saringan

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui berapa banyak dan berapa ukuran agregat yang digunakan dalam campuran beton. Hasil analisis saringan harus sesuai dengan ASTM C-33 dan SNI 03-1968-1990, sebagaimana diilustrasikan dalam Lampiran Gradasi Analisis Saringan Agregat Halus. Anda dapat melihat hasil analisis saringan agregat halus pada Tabel 2.

Tabel 2. Analisa Saringan Agregat Halus

ANALISIS SARINGAN AGREGAT HALUS				
Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertentu (gr)	Jumlah Berat Tertahan (gr)	Jumlah Persen (%)	
			Tertahan	Lewat
4	0,5	0,5	0	100
8	3,8	4,3	0,860	999,14
16	19	23,3	4,660	94,48
30	315,4	338,7	67,740	32,26
50	117,5	456,2	91,240	8,76
100	39,6	495,8	99,160	0,840

Tabel 2. Analisa Saringan Agregat Halus (Lanjutan)

ANALISIS SARINGAN AGREGAT HALUS				
Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertentu (gr)	Jumlah Berat Tertahan (gr)	Jumlah Persen (%)	
			Tertahan	Lewat
200	4,2	500	100,000	0
			263,66	
$Fineness\ Modulus = \frac{Persen\ Kumulatif\ Tertahan}{100}$			2,64	

Tabel 2. Menunjukkan bahwa agregat halus memiliki modulus kehalusan berkisar antara 2,30 hingga 3,10, sesuai dengan SNI 03-2834-2000 dan ASTM C-33. Oleh karena itu, agregat halus yang diperoleh tergolong halus (dengan nilai 2,64) dan memenuhi kriteria, berdasarkan hasil uji analisis saringan. Sekarang kita berada di zona 3.

Analisis Agregat Kasar

Jika Anda ingin tahu berapa banyak dan ukuran agregat yang harus digunakan untuk menghasilkan beton, uji ini cocok untuk Anda. Hasil yang baik dari uji analisis saringan disyaratkan oleh ASTM C dan SNI 03-2461-2002. Tabel 3 menampilkan hasil pemeriksaan saringan agregat kasar.

Tabel 3. Analisa Saringan Agregat Kasar

ANALISIS SARINGAN AGREGAT HALUS				
Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertentu (gr)	Jumlah Berat Tertahan (gr)	Jumlah Persen (%)	
			Tertahan	Lewat
1 ½	0,5	0,5	0,00	100
1	30,5	30,5	1,22	98,78
¾	339,6	370,1	14,82	83,78
½	951,9	1322	52,94	47,06
3/8	835,9	2157,9	86,41	13,59
4	329,8	2487,7	99,62	0,380
8	6,1	2493,8	99,86	0,136
Pan	3,4	2497,2	100,00	0
			354,88	
$Fineness\ Modulus = \frac{Persen\ Kumulatif\ Tertahan}{100}$			3,55	

Hasil uji analisis saringan untuk agregat kasar yang lolos saringan sesuai ASTM C 136 dan SNI 1968:2010, dengan modulus kehalusan < 8,5%, dapat dilihat pada Tabel 3 di atas. Berdasarkan tabel tersebut, agregat kasar hasil analisis saringan tidak memenuhi standar yang ditetapkan, yaitu sebesar 3,55%.

Pembuatan Benda Uji

Tujuan penelitian ini adalah pembuatan benda uji silinder berukuran 10 cm x 20 cm. Benda uji tersebut akan digunakan untuk mengevaluasi kuat tekan beton. Untuk penelitian ini, 6–9 sampel dari setiap varian dibuat menggunakan mixer kecil. Beton standar, beton dengan penambahan silika fume, dan limbah beton semuanya berperan, dengan beton standar memengaruhi 5% dan beton dengan penambahan silika fume memengaruhi 25%, 50%, dan 75% dari total.

Slump

Struktur dan kualitas beton pracetak dicapai melalui proses manufaktur yang cermat. Uji slump harus dilakukan sebelum aplikasi, selain untuk mengidentifikasi komposisi dan formula. Uji slump umumnya digunakan untuk:

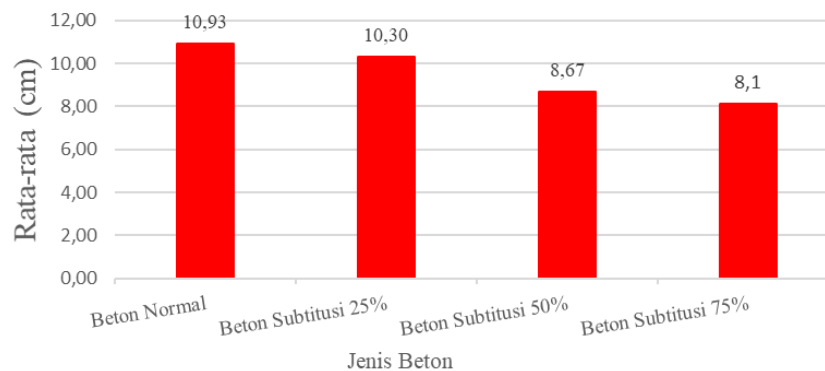
- Memeriksa viskositas campuran beton segar untuk memastikan kuat tekannya tepat.
- Uji slump adalah cara lain untuk memastikan beton dari batching plant memenuhi standar cetak biru bangunan.

Setelah campuran beton selesai, baik sebelum atau setelah pelanggan menerima beton, uji ini sering dilakukan. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah viskositas beton tipikal berbeda. Ketika kadar air terlalu tinggi atau terlalu rendah, viskositas campuran akan menurun.

Tabel 4. Slump Test

Jenis Beton	Nilai Slump (cm)			Nilai Slump (cm)
	Kanan	Tengah	Kiri	
Beton Normal	10,8	11,4	10,6	10,93
Beton Substitusi 25% SF 5%	7,9	8	8,4	8,10
Beton Substitusi 50% SF 5%	9,8	10,5	10,6	10,30
Beton Substitusi 75% SF 5%	8,5	8,7	8,8	8,67

Berdasarkan tabel 4. menunjukan hasil nilai slump untuk beton normal, beton 25%, 50%, 75%. Berdasarkan hasil nilai slump berikut didapatkan diagram pengujian slump test



Gambar 1. Diagram Pengujian Slump Test

Berdasarkan Gambar 1. pengujian slump test diatas. Nilai slump beton normal memiliki nilai slump tertinggi yaitu 10,93 cm yang menunjukan tingkat kelecakan (workability) yang lebih baik dibandingkan beton substitusi agregat kasar. Nilai slump dengan substitusi 25% memiliki nilai slump 8,10 cm, sedangkan nilai slump substitusi 50% sebesar 10,30 cm yang menunjukan bahwa pada tingkat substitusi ini memiliki kelecakan (workability) mendekati beton normal, sedangkan beton dengan substitusi 75% menghasilkan nilai slump sebesar 8,67 cm.

Setting Time

Pada penelitian ini dilakukan uji setting time pada pasta semen biasa dengan tambahan silika fume 5%. berikut hasil pengujian dari setting time sebagai berikut:

Tabel 5. Setting Time

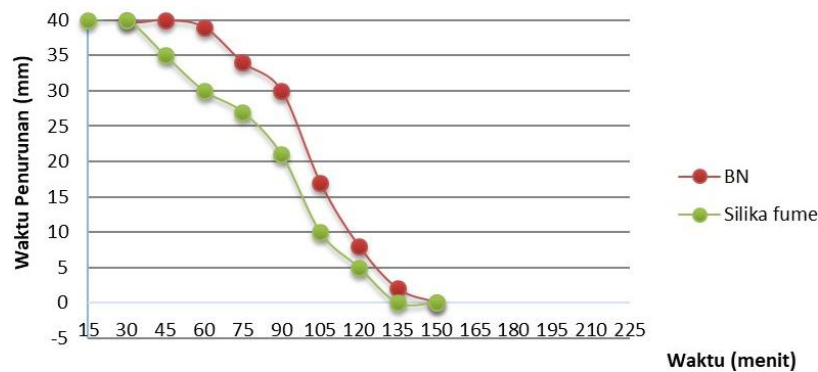
Waktu menit ke menit	Beton Normal (mm/15 menit)	Tingkat kekerasan silika fume (mm/15 menit)
30	45	45
45	40	35
60	40	30
75	39	27
90	34	21
105	30	10
120	17	5
135	5	0
150	0	0

Berdasarkan tabel hasil pengujian setting time di atas, terlihat bahwa tingkat kekerasan beton mengalami perubahan seiring dengan bertambahnya waktu. Pada menit ke-30, beton normal memiliki tingkat kekerasan sebesar 45, sedangkan beton dengan substitusi silika fume memiliki tingkat kekerasan yang sama, yaitu 45. Seiring waktu, keduanya menunjukkan penurunan nilai kekerasan, tetapi beton dengan silika fume mengalami penurunan yang lebih cepat dibandingkan beton normal.

Pada menit ke-90, beton normal masih memiliki tingkat kekerasan sebesar 34, sementara beton dengan silika fume turun drastis menjadi 21. Selanjutnya, pada menit ke-120, beton normal menunjukkan penurunan kekerasan menjadi 17, sedangkan beton dengan silika fume hanya tersisa 5. Pada menit ke-135, beton normal hampir mencapai titik nol dengan tingkat kekerasan 5, sedangkan beton dengan silika fume sudah mencapai nol.

Hasil ini menunjukkan bahwa beton dengan substitusi silika fume memiliki waktu pengerasan yang lebih cepat dibandingkan beton normal. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik silika fume yang mempercepat reaksi

hidrasi semen, sehingga mempercepat proses pengikatan dan pengerasan beton. Dengan demikian, penggunaan silika fume dapat mempengaruhi setting time dan perlu diperhatikan dalam aplikasi konstruksi yang membutuhkan waktu pengerasan tertentu.



Gambar 2. Hasil Uji Setting Time

Gambar 2. Menunjukkan hasil uji waktu pengikatan yang dilakukan pada pasta semen biasa dan pasta semen yang dicampur dengan silika fume. Hasil menunjukkan bahwa kedua jenis pasta semen membutuhkan waktu 150 menit untuk mengeras, sementara campuran yang mengandung silika fume 5% hanya membutuhkan waktu 135 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semen dapat mengeras lebih cepat dengan penambahan silika fume 5%.

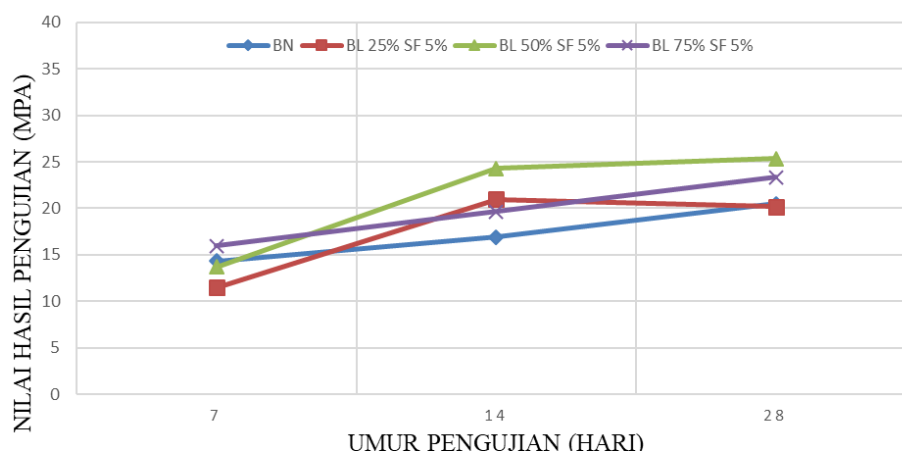
Pengujian Kuat Tekan Beton

Dalam percobaan ini, kami bertujuan untuk mengukur kuat tekan beton. Kuat tekan beton diukur menggunakan alat uji tekan. Rentang umur uji adalah tujuh hingga dua puluh delapan hari. Gambar 3 menunjukkan hasil uji kuat tekan beton variasi, sementara Tabel 6 menunjukkan hasil uji kuat tekan beton normal.

Tabel 6. Pengujian Kuat Tekan Beton

Kode Sampel	Umur Beton (Mpa)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
BN	14,34	16,92	20,51
BL 25% SF 5%	11,50	20,18	20,18
BL 50% SF 5%	13,72	24,30	25,34
BL 75% SF 5%	15,94	19,66	23,32

Sumber: Hasil Analisis Tahun 2025



Gambar 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Limbah

Hasil uji kuat tekan untuk berbagai perubahan campuran beton menunjukkan bahwa proporsi limbah beton yang diperlukan untuk meningkatkan kuat tekan bervariasi.

Pembahasan

Dari 14,34 MPa setelah 7 hari menjadi 20,51 MPa setelah 28 hari, kuat tekan beton normal (BN) relatif konstan. Di sisi lain, setelah 7 hari, kuat tekan awal beton dengan BL 25% adalah 11,50 MPa, tetapi setelah 14 dan 28 hari, kuat tekannya meningkat drastis menjadi 20,18 MPa, dan kemudian tetap tidak berubah setelah 14 hari.

Dibandingkan dengan beton biasa, sampel BL 50% menunjukkan hasil terbaik, dengan peningkatan kuat tekan dari 13,72 MPa setelah 7 hari menjadi 25,34 MPa setelah 28 hari. Hal ini membuktikan bahwa beton dapat mencapai kuat tekan maksimumnya hanya dengan setengah dari material aslinya.

Kuat tekan awal pada sampel BL 75% adalah 15,94 MPa setelah 7 hari, 19,66 MPa setelah 14 hari, dan 23,32 MPa setelah 28 hari. Meskipun angka ini lebih rendah daripada sampel BL 50%, hal ini menunjukkan bahwa beton dengan penggantian 75% memiliki kekuatan yang cukup. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah beton sebagai agregat kasar dapat memberikan performa kuat tekan yang kompetitif, terutama pada persentase 50%. Namun, substitusi yang lebih tinggi dapat menyebabkan penurunan kuat tekan, sehingga perlu keseimbangan dalam pemilihan komposisi agar tetap memenuhi standar kekuatan beton yang diharapkan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengkajian dan pengujian yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa daur ulang beton lama menjadi agregat kasar baru dapat meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan, dengan hasil laboratorium membuktikan bahwa nilai kuat tekan tertinggi diperoleh ketika 50% beton daur ulang digunakan sebagai pengganti agregat kasar, dibandingkan dengan kadar substitusi di bawah maupun di atas 50%. Dengan demikian, titik optimal untuk meningkatkan kuat tekan beton adalah kombinasi yang terdiri dari 50% puing beton, sebagaimana ditampilkan pada hasil uji kuat tekan beton limbah.

Hasil ini berkorelasi erat dengan peran penambahan silica fume terhadap kemampuan kerja (*workability*) dan kuat tekan beton, di mana silica fume berfungsi sebagai aditif (*superplasticizer*) yang mampu menstabilkan campuran beton terhadap kadar air, dan fakta bahwa kuat tekan beton meningkat pada variasi campuran yang mengandung serpihan beton menjadi bukti nyata dari peran tersebut. Untuk campuran beton berbasis limbah, penambahan silica fume sebesar 5% memberikan hasil optimal pada komposisi limbah beton 50%. Namun, pada campuran dengan kadar limbah beton sebesar 75%, kuat tekan beton menurun dibandingkan BL 50% meskipun tetap menggunakan silica fume 5% dan masih lebih tinggi dibandingkan beton normal, sejalan dengan hasil uji slump yang menunjukkan penurunan tajam *workability* beton pada kadar substitusi tersebut. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar limbah beton yang digunakan, semakin besar pula kebutuhan peningkatan kadar silica fume agar *workability* dan performa kuat tekan beton secara keseluruhan tetap terjaga.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Qubro, K., Fauzi, M., Nisumanti, S., Febryandi, F., & Hendarto, S. (2025). Kinerja campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) menggunakan aspal modifikasi Asbuton murni Lawele. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(2), 885–891. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.1014>
- Arifin, M., & Susanto, D. (2020). Penerapan teknologi pengolahan agregat limbah daur ulang pada beton bermutu tinggi untuk daerah pesisir pantai. *Cakrawala Teknik Sipil*, 14(1), 15–24. <https://jurnal.swins.ac.id/index.php/cakrawala/article/view/39>
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C33/C33M-18: Standard specification for concrete aggregates. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). SNI 03-1968-1990: Metode pengujian tentang analisis saringan agregat halus dan kasar. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-2461-2002: Spesifikasi agregat ringan untuk beton ringan struktural. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 2417:2008: Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles. BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2010). SNI 1968:2010: Cara uji analisis saringan agregat halus dan kasar. BSN.
- Fauzi, A., & Walujodjati, E. (2020). Kuat tekan beton substitusi agregat kasar daur ulang dan bahan tambah tipe F superplasticizer. *Jurnal Konstruksi*, 19(2), —. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.19-2.908>
- Gunasekaran, K., Annadurai, R., & Kumar, P. S. (2021). Recycled concrete aggregates: A sustainable alternative for concrete production. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(3), 04021015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001985](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001985)

- Harioseto, B., As'ad, S., & Sambowo, K. A. (2020). Pengaruh komposisi agregat daur ulang terhadap susut pada beton normal dan beton mutu tinggi. *Matriks Teknik Sipil* Vol. 8 No. 3.
- Ishaq, M., Nasmirayanti, R., & Trinanda, A. Y. (2020). Pengaruh limbah beton sebagai pengganti agregat kasar terhadap kuat tekan beton. *Civil Engineering Collaboration*, 6(2), —. <https://doi.org/10.35134/jcivil.v6i2.21>
- Ismail, A. G., Mustofa, A., Dwicahyani, A., Ridlo, M. M., & Sambowo, K. A. (2020). Pengaruh beton daur ulang dan bahan tambah fly ash terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton struktural ramah lingkungan. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*.
- Liu, Y., Zhang, J., & Wang, X. (2022). Recycling construction waste in concrete: Environmental and economic perspectives. *Journal of Sustainable Construction Engineering*, 15(2), 98–110. <https://doi.org/10.3390/ma15124142>
- Nugroho, F., & Kurniawan, R. (2020). Pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar pada perkerasan laston AC-WC. *Reviews in Civil Engineering*, 4(1), 45–55. <https://jurnal.untidar.ac.id/index.php/civilengineering/article/view/2215>. <https://doi.org/10.31002/rice.v4i1.2215>
- Pacheco-Torgal, F., Tam, V. W. Y., Labrincha, J. A., Ding, Y., & De Brito, J. (2020). *Eco-efficient construction and building materials: Life cycle assessment (LCA), eco-labelling and case studies*. Woodhead Publishing.
- Ramadhan, A., & Wibowo, H. (2020). Pemanfaatan limbah beton sisa pengujian sebagai substitusi agregat dalam campuran AC-WC. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 22(2), 101–110. <https://jurnal.polban.ac.id/potensi/article/view/1678>. <https://doi.org/10.35313/potensi.v22i1.1678>
- SNI 03-1974-1990. (1990). SNI 03-1974-1990 Metode pengujian kuat tekan beton. BSN.
- SNI 7394:2008. (2008). SNI 7394:2008 tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton untuk konstruksi bangunan gedung dan perumahan. BSN.
- Zen, H., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2020). Pemanfaatan recycled concrete aggregate pada beton porous. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 4(2), —. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v4i2.1363>