

Innovation of Green Concrete with a Combination of Coconut Coir Fiber and Glass Waste as Partial Substitution of Fine Aggregate on Concrete Compressive Strength

[Inovasi Beton Hijau dengan Kombinasi Serat Sabut Kelapa dan Limbah Kaca sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Beton]

Wahyu Arie Wicaksana¹⁾, Budwi Harsono²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: Budwiharsono@umsida.ac.id

Abstract. *The increasing amount of glass waste and coconut fiber biomass has encouraged the use of these materials as alternatives in concrete mixtures. This study analyzed the effect of a combination of coconut fiber and glass waste as a partial substitution for fine aggregate with variations of LSK1 (20% glass waste + 0.125% coconut fiber) and LSK2 (40% glass waste + 0.50% coconut fiber), as well as compressive strength tests at the ages of 7, 14, and 28 days. Tests included the physical characteristics of the material and analysis compared to concrete quality standards. The results showed that glass waste was fine-grained and met the gradation requirements of Zone II, while coconut fiber had a water content of 12.36%. The LSK1 mixture produced a compressive strength of 18.03 MPa at 28 days, only 3.27% lower than normal concrete, and met the minimum requirement for non-structural concrete. Meanwhile, LSK2 only reached 14.82 MPa and did not meet the K-225 quality target. The combination of coconut fiber and glass waste has the potential to be used as an environmentally friendly alternative with certain substitution limits to reduce textile and glass waste.*

Keywords - Green Concrete, Concrete Compressive Strength, Environmentally Friendly Concrete, Waste Material

Abstrak. *Peningkatan volume limbah kaca dan biomassa sabut kelapa mendorong pemanfaatan kedua material tersebut sebagai alternatif campuran beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi serat sabut kelapa dan limbah kaca sebagai substitusi parsial agregat halus dengan variasi LSK1 (20% limbah kaca + 0,125% serat sabut kelapa) dan LSK2 (40% limbah kaca + 0,50% serat sabut kelapa), serta uji kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Metode meliputi pengujian karakteristik fisik agregat dan bahan substitusi, pembuatan beton sesuai SNI 03-2834-2000, serta uji kuat tekan mengacu SNI 1974:2011. Data dianalisis secara empiris dan dibandingkan dengan standar mutu beton. Hasil menunjukkan limbah kaca memiliki butiran halus dengan gradasi Zona II dan modulus kehalusan butir 3,56, sedangkan serat sabut kelapa memiliki kadar air 12,36%. Campuran LSK1 menghasilkan kuat tekan 18,03 MPa pada umur 28 hari, hanya turun 3,27% dibanding beton normal, dan masih memenuhi syarat beton non-struktural. Sementara itu, LSK2 hanya mencapai 14,82 MPa dan tidak memenuhi mutu rencana K-225. Secara umum, kombinasi serat sabut kelapa dan limbah kaca berpotensi dimanfaatkan sebagai alternatif ramah lingkungan dengan batas substitusi tertentu guna mengurangi limbah tekstil dan kaca.*

Kata Kunci - Beton Hijau, Kuat Tekan Beton, Beton ramah Lingkungan, Material Limbah

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan limbah padat sebagai material alternatif dalam campuran beton telah menjadi perhatian berbagai peneliti. Salah satu limbah yang dikaji adalah abu pakaian katun bekas, sebagaimana dilaporkan oleh Ridwansyah[1] [yang menunjukkan bahwa limbah tersebut berpotensi digunakan sebagai pengganti agregat halus untuk beton non-struktural. Temuan tersebut memperkuat urgensi pengembangan material ramah lingkungan dalam teknologi beton.

Dalam pembangunan infrastruktur, beton menjadi material pilihan dikarenakan mempunyai kuat tekan secara tinggi, daya tahan jangka panjang, beserta kemudahan pada penerapannya. Bahan-bahan utamanya meliputi semen, agregat halus dan kasar, serta air. Di antara bahan-bahan tersebut, agregat merupakan komponen terbesar dalam campuran dan sangat memengaruhi kualitas akhir beton [2]. Dengan mengisi rongga di antara butiran kasar, agregat halus (biasanya berupa pasir) memengaruhi kemudahan pengerjaan (*workability*) dan kekuatan beton.

Permintaan akan pasir alam terus meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah proyek pembangunan. Selain menyebabkan kenaikan harga bahan bangunan, penambahan pasir yang berlebihan juga merusak ekosistem, khususnya di wilayah aliran sungai. Akibatnya, muncul upaya dalam mencari alternatif beton yang berkelanjutan dan

lebih ramah lingkungan. Di sisi lain, akumulasi limbah padat di Indonesia masih menjadi persoalan serius. Olli dkk. Mencatat bahwa residu berupa kayu, kaca, dan material sejenis mencapai sekitar 12,7% dari total timbunan sampah harian nasional, sementara jalur daur ulang baru mencakup sekitar 7% dari keseluruhan sampah [3].

Limbah kaca merupakan material dengan persistensi lingkungan tinggi karena sulit terdegradasi oleh mikroorganisme tanah. Pemanfaatan limbah kaca sebagai substitusi parsial agregat halus telah diteliti pada berbagai proporsi. Olli dkk. [3] melaporkan bahwa substitusi 20% dan 40% masih menghasilkan kuat tekan di atas mutu rencana, meskipun terjadi penurunan jika dibandingkan beton normal. Permatasari [4] menemukan titik optimum pada penggunaan 16% limbah kaca dengan peningkatan kuat tekan 16,05%, sedangkan Alfareza dan Devi [5] melaporkan performa optimum pada 15% dengan peningkatan 15,12%.

Selain limbah kaca, Indonesia sebagai negara agraris memiliki ketersediaan biomassa sabut kelapa yang melimpah. Serat sabut kelapa memiliki kuat tarik berkisar 117,2–200 MPa, berat jenis 1,12–1,15, serta tahan terhadap mikroorganisme dan pelapukan [6]. Dalam campuran beton, serat ini berfungsi sebagai perkuatan mikro (*micro-reinforcement*) yang menahan perambatan retak [6]. Sahrudin dan Nadia [6] melaporkan peningkatan kuat tekan hingga 29,55% pada kadar serat 0,50%, meskipun pada kadar 0,25% justru terjadi penurunan.

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian berupa belum adanya kajian yang secara spesifik menggabungkan serat sabut kelapa dan limbah kaca dalam satu campuran beton. Padahal secara teoritis, serat sabut kelapa dapat berfungsi sebagai pengikat fragmen kaca ke dalam matriks semen, sementara partikel kaca yang halus dan kedap air dapat mengisi pori-pori antar agregat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji sifat-sifat kaca daur ulang dan serat sabut kelapa, serta dampak berbagai variasi substitusi terhadap mutu dan kuat tekan beton sesuai dengan standar mutu beton [7].

II. METODE

Dengan menggunakan teknik eksperimental, para peneliti dari Laboratorium Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sidoarjo menyelidiki dampak penggunaan campuran serat sabut kelapa dan limbah kaca sebagai pengganti sebagian agregat halus terhadap mutu beton. Tahapan penelitian ini meliputi pengujian kuat tekan, penyiapan dan perawatan (*curing*) benda uji, formulasi campuran beton, serta karakterisasi material. Prinsip-prinsip teknologi beton diterapkan dalam perencanaan studi dan evaluasi mutu beton.

Langkah awal dalam proses penelitian ialah menguji efektivitas limbah kaca menjadi agregat halus dan serat sabut kelapa sebagai bahan tambah. Gradasi dan modulus kehalusan material ditentukan melalui analisis saringan sesuai dengan standar SNI 03-1968-1990. Pengujian kadar lumpur dilakukan berdasarkan SNI 03-4142-1996 untuk memastikan kandungan partikel halus tidak melebihi batas maksimum 5%. Prosedur pengeringan menggunakan oven—dengan memanaskan serat sabut kelapa pada suhu 105°C selama tiga jam—juga dilakukan untuk menentukan kadar air serat tersebut.

Rancangan campuran beton dibuat dengan mengacu pada SNI 03-2834-2000 mengenai Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal [7]. Mutu beton yang ditargetkan adalah K-225, yang setara dengan sekitar 18,68 MPa pada umur 28 hari. Persentase limbah kaca sebagai pengganti agregat halus ditetapkan masing-masing sebesar 20% dan 40%, sedangkan persentase serat sabut kelapa terhadap volume beton adalah 0,125% dan 0,50%. Variasi LSK1 terdiri dari 20% limbah kaca dan 1,5% serat sabut kelapa, sedangkan variasi LSK2 terdiri dari 40% limbah kaca dan 0,50% serat sabut kelapa.

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 10,5 cm dan tinggi 20 cm. Dimensi dan metode pengujian telah disesuaikan dengan standar pengujian kuat tekan beton silinder menurut SNI 1974:2011. Untuk memastikan hasil yang representatif, tiga benda uji dibuat untuk setiap kelompok umur pengujian pada masing-masing variasi. Sebanyak 27 spesimen dibutuhkan, yang mencakup 3 variasi campuran (beton normal, LSK1, dan LSK2), 3 variasi umur pengujian (7, 14, dan 28 hari), serta 3 kali pengulangan.

Berdasarkan perhitungan dalam perancangan campuran, proses pembuatan beton melibatkan pencampuran air, agregat kasar (batu pecah dengan ukuran maksimum 40 mm), agregat halus (pasir Lumajang atau limbah kaca, bergantung pada variasinya), dan semen Portland Tipe I. Batas maksimum rasio air-semen (w/c) ditetapkan sesuai pedoman SNI 03-2834-2000 [7], yang bertujuan menjamin kekuatan dan durabilitas beton. Kandungan air bebas ditetapkan sebesar 205 kg/m³, dengan rasio air-semen sebesar 0,56. Setelah proses pencampuran selesai untuk memastikan homogenitas, beton dipadatkan dalam tiga lapis dengan 25 kali tusukan pada setiap lapisannya. Cetakan yang digunakan berbentuk silinder. Setelah satu hari, spesimen dikeluarkan dari cetakan dan direndam untuk proses perawatan (*curing*) hingga mencapai umur pengujian yang ditentukan, yaitu 7, 14, dan 28 hari.

Untuk setiap umur beton, kekuatan tekan maksimum (f'_c) diukur menggunakan Mesin Uji Tekan (*Compression Testing Machine* atau CTM) sesuai dengan protokol SNI 1974:2011 [8]. Nilai kuat tekan dihitung menggunakan persamaan:

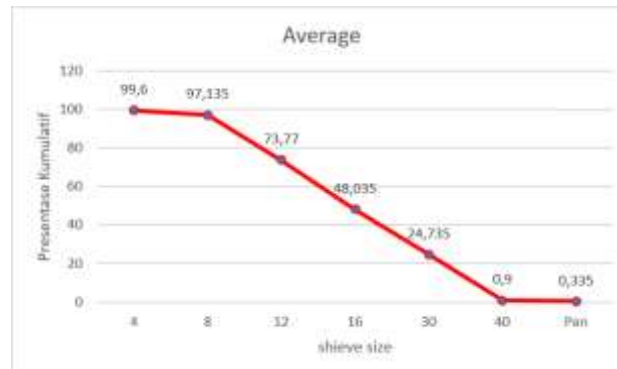
$$f'_c = \frac{P}{A}$$

di mana f_c adalah kuat tekan beton dalam MPa, P adalah beban maksimum dalam N, dan A adalah luas penampang benda uji dalam mm^2 . Selanjutnya, data dianalisis untuk mengetahui bagaimana variasi jumlah limbah kaca dan serat sabut kelapa memengaruhi perkembangan kuat tekan dan mutu beton, berdasarkan kelas mutu beton.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Saringan Limbah Kaca

Pada pengujian ini, dibuatkan masing-masing dua sampel dari limbah kaca. Data dari setiap sampel dihitung dan diperoleh nilai persentase dari pengujian tersebut. Dari nilai yang didapatkan, berikut grafik persentase nilai uji dari setiap sampel.



Gambar 1 Grafik rata-rata analisa saringan limbah kaca

Tabel 1 Perhitungan Modulus kehalusan butir

No Saringan	Sampel 1 (%)	Sampel 2 (%)	Sampel 3 (%)	Rata-Rata (%)
4	0,47	0,33	0,4	0,4
8	2,87	2,86	2,86	2,86
12	26,8	25,66	26,23	26,23
16	52,47	51,46	51,96	51,96
30	75,6	74,93	75,27	75,27
40	99,27	98,93	99,1	99,1
50	100	99,33	100	99,78
Jumlah	357,48	353,5	355,82	355,6

(Sumber : Hasil Analisa, 2026)

$$\text{MKB} = \frac{\sum (\% \text{ Tertahan Kumulatif pada Saringan No. 4, 8, 16, 30, 40, 50, dan 100})}{100}$$

Sample 1:

$$\text{MKB} = \frac{357,48}{100} = 3,57$$

Sample 2:

$$\text{MKB} = \frac{353,50}{100} = 3,54$$

Sample 3:

$$\text{MKB} = \frac{355,83}{100} = 3,56$$

Rata-rata

$$\text{MKB} = \frac{355,60}{100} = 3,56$$

Berdasarkan persyaratan ASTM C-33 [9] untuk agregat halus, rentang nilai *fineness modulus* seharusnya berada di antara 2,30 hingga 3,10. Di sisi lain, menurut standar SNI 03-1750-1990 [10], *fineness modulus* dapat berada dalam rentang 1,50 hingga 3,80. Akan tetapi, saat diuji terhadap standar SNI, agregat halus tersebut memenuhi syarat (3,56), namun tidak memenuhi ketentuan ASTM. Hasil ini sejalan dengan penelitian Olii dkk. yang melaporkan FM limbah kaca sebesar 3,69. Berdasarkan hasil analisis, limbah kaca memenuhi persyaratan gradasi SNI 03-2834-2000 untuk Zona II (Pasir Agak Kasar). Hal ini menunjukkan bahwa limbah kaca memiliki karakteristik yang serupa dengan pasir alam dan berpotensi digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton.

B. Kadar Air Serat Sabut Kelapa

Pengujian kadar air dilakukan dengan metode oven pada suhu 105°C selama 3 jam. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh kadar air serat sabut kelapa sebesar 12,36%, yang masih berada dalam rentang normal (10,05%–12,89%) dan layak digunakan sebagai bahan tambahan beton.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kadar Air Serat Sabut Kelapa

Parameter	Nilai	Satuan
Berat wadah (talam)	109	gram
Berat wadah + sampel basah	209	gram
Berat sampel basah	100	gram
Berat wadah + sampel kering oven	198	gram
Berat sampel kering	89	gram
Suhu oven	105	°C
Durasi pengovenan	3	jam
Kadar air serat	12,36	%

(Sumber : Hasil Analisa, 2026)

$$\text{Berat air} = \frac{\text{Berat basah} - \text{Berat Kering}}{\text{berat kering}} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Air} = \frac{100 - 89}{89} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Air} = \frac{11}{89} \times 100\% = 12,36\%$$

Serat sabut kelapa yang digunakan memiliki panjang 50 mm dengan kuat tarik berkisar 117,2–200 MPa dan berat jenis 1,12–1,15. Karakteristik ini menunjukkan bahwa serat sabut kelapa memiliki kapasitas mekanis yang memadai untuk berfungsi sebagai perkuatan mikro dalam matriks beton. Namun, sifat higroskopis serat menyebabkan penyerapan air yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan campuran.

C. Hasil Perencanaan Campuran (Mix Design)

Perencanaan campuran beton mengacu pada SNI 03-2834-2000 dengan target mutu beton K-225 (setara $f'c \approx 18,68$ MPa). Proses *mix design* meliputi penentuan kuat tekan rencana, deviasi standar, nilai tambah (margin), FAS, kadar air, kadar semen, dan proporsi agregat. FAS yang digunakan adalah 0,56 berdasarkan grafik hubungan FAS dengan kuat tekan beton untuk semen Portland Tipe I dan agregat batu pecah. Agregat maksimum yang digunakan adalah 40 mm dengan kadar air bebas 205 kg/m³.

Tabel 3 Hasil *Mix Design*

Bahan	Beton Normal	LSK 1 (kg)	LSK 2 (kg)
Semen	366	366	366
Air	205	205	205
Agregat kasar	1060	1060	1060
Agregat Halus	722	577,6	433,2
Limbah Kaca	0	144,4	288,8
Serat Sabut Kelapa	0	0,087	0,350
Total	2353	2353	2353

(Sumber: Analisa, 2026)

Perbedaan proporsi campuran antara beton normal, LSK1, dan LSK2 terletak pada substitusi agregat halus dengan limbah kaca dan penambahan serat sabut kelapa. Pada LSK1, 20% dari agregat halus (144,4 kg) diganti dengan limbah kaca dan ditambahkan 0,087 kg serat. Pada LSK2, 40% dari agregat halus (288,8 kg) diganti dengan limbah kaca dan ditambahkan 0,350 kg serat. Jumlah air dan semen tetap sama untuk semua variasi untuk mengisolasi pengaruh substitusi dan penambahan serat terhadap sifat fisik beton.

D. Hasil Pengujian Slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengukur tingkat konsistensi atau kekakuan beton segar yang berkaitan dengan kemudahan pengerjaan (*workability*). *Workability* yang baik diperlukan agar beton dapat dicor, dipadatkan, dan difinishing dengan mudah tanpa terjadi segregasi atau *bleeding*. Prosedur pengujian mengacu pada SNI 03-2834-2000.

Tabel 4 Hasil Pengujian *slump*

Variasi Beton	Nilai Slump (cm)
Beton Normal	9,0
LSK1 (20% kaca + 0,125% Serat sabut kelapa)	7,9
LSK 2 (40%kaca + 0,50% Serat Sabut kelapa)	7,5

(Sumber: Hasil Pengujian, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian slump pada Tabel 4, seluruh variasi beton menunjukkan nilai slump yang masih berada dalam rentang yang disyaratkan (6–12 cm). Beton normal mempunyai nilai slump tertinggi yakni 9,0 cm, sedangkan LSK1 memiliki nilai slump 7,9 cm dan LSK2 memiliki nilai slump 7,5 cm. Penurunan nilai slump pada variasi LSK1 dan LSK2 disebabkan oleh penyerapan air oleh serat sabut kelapa dan limbah kaca. Serat sabut kelapa yang bersifat higroskopis menyerap sebagian air pencampur, sehingga adukan menjadi lebih kental dan nilai slump menurun. Demikian pula, limbah kaca yang memiliki permukaan licin dan bentuk *angular* meningkatkan gesekan antar partikel, yang juga mengurangi nilai slump.

Meskipun terjadi penurunan, seluruh nilai slump masih dalam rentang yang disyaratkan, sehingga adukan beton masih mudah dikerjakan. Penurunan slump dari beton normal ke LSK1 (1,1 cm) dan ke LSK2 (1,5 cm) masih dapat ditoleransi dan tidak mengganggu proses pengecoran. Hal ini menunjukkan penggunaan FAS 0,56 telah berhasil menjaga *workability* beton tetap terjaga.

E. Interpretasi Umum dan Keterkaitan dengan Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan penelitian, sifat fisik campuran serat sabut kelapa dan limbah kaca memengaruhi kinerja beton ketika digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus. Limbah kaca tersebut memiliki modulus kehalusan 3,56 dan diklasifikasikan dalam Zona II, sedangkan kadar air serat sabut kelapa adalah 12,36%. Kombinasi karakteristik ini berdampak pada sifat fisik beton segar, khususnya kemudahan pengerjaannya (*workability*). Hasil ini sejalan dengan temuan Huy dan Luan [11] yang melaporkan bahwa limbah kaca yang digiling halus memiliki gradasi yang mendekati pasir alam, sehingga berpotensi digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton ramah lingkungan.

Hasil pengujian slump memperlihatkan ditemukannya kecenderungan penurunan *workability* sejalan meningkatnya persentase substitusi limbah kaca dan serat sabut kelapa. Pada kadar substitusi LSK1 (20% limbah kaca + 0,125% serat sabut kelapa), beton masih menunjukkan *workability* yang cukup baik, meskipun nilai slump lebih rendah dibandingkan beton normal. Namun pada kadar substitusi LSK2 (40% limbah kaca + 0,50% serat sabut kelapa), penurunan *workability* menjadi semakin terlihat. Serat sabut kelapa bersifat higroskopis, yang meningkatkan kebutuhan airnya, dan karakteristik ini secara mekanis dijelaskan oleh luas permukaan partikel yang besar. Secara teoretis, dalam bidang teknologi beton, penurunan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) dan peningkatan kebutuhan air dapat memengaruhi kepadatan beton dengan membentuk rongga-rongga yang lebih besar di dalam struktur mikro material tersebut.

Temuan penelitian ini menunjukkan pola yang konsisten jika dibandingkan dengan penelitian lain. Olli dkk menemukan bahwa ketika limbah kaca digunakan sebagai pengganti agregat halus, tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran tersebut berubah bergantung pada jumlah limbah kaca yang ditambahkan. Serupa juga dilaporkan Sahrudin dan Nadia, di mana peningkatan kadar serat sabut kelapa menyebabkan penurunan nilai slump akibat penyerapan air oleh serat. Kesamaan pola ini menunjukkan bahwa kombinasi limbah berbasis kaca dan serat alami memiliki keterbatasan dalam hal *workability*, terutama apabila digunakan dalam jumlah besar. Aslam dkk. [12] juga mencatat bahwa penambahan serat sabut kelapa hingga 2% dalam campuran beton serat menyebabkan penurunan slump yang signifikan, meskipun kuat tekan meningkat.

Serat sabut kelapa yang dicampur dengan kaca daur ulang bisa menjadi alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan beton konvensional, namun hanya jika digunakan dalam jumlah yang cukup kecil agar tidak secara drastis mengurangi kemudahan pengerjaan (*workability*) material tersebut. Material ini lebih cocok digunakan untuk beton non-struktural atau beton yang membutuhkan kekuatan rendah hingga sedang, seperti blok perkerasan (*paving block*), komponen arsitektural, dinding penahan tanah, atau perkerasan kaku. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja mekanisnya bagi aplikasi struktural berkinerja tinggi. Upaya ini dapat mencakup penggabungan material tersebut dengan bahan pozzolan aktif, optimalisasi rasio air-semen, atau penambahan bahan tambah kimia (*admixture*) seperti *superplasticizer*, di mana Ho [14] menggunakan limbah kaca medis yang memiliki karakteristik kimia dan fisik yang lebih seragam dibandingkan limbah kaca campuran. Malhotra dkk. [13] menekankan bahwa efektivitas limbah sebagai bahan campuran beton sangat bergantung pada komposisi kimia dan gradasi partikelnya.

Dari perspektif keberlanjutan, kajian terbaru menegaskan bahwa penggantian sebagian agregat dengan kaca daur ulang dapat menurunkan emisi karbon hingga 30% dibandingkan beton konvensional [15]. Hal ini menjadikan kombinasi serat sabut kelapa dan limbah kaca sebagai alternatif yang menjanjikan dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi.

IV. KESIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa limbah kaca memiliki sifat fisik yang baik (misalnya, modulus kehalusan 3,56) dan termasuk dalam gradasi Zona II, namun serat sabut kelapa memiliki kadar air yang tinggi (12,36%). Dari sisi teknis, limbah kaca tersebut memenuhi standar gradasi SNI 03-2834-2000. Akan tetapi, material ini umumnya digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton karena gradasinya lebih halus dibandingkan standar ASTM C-33.

Hasil pengujian slump menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi limbah kaca dan serat sabut kelapa cenderung menurunkan nilai *workability* beton. Beton normal memiliki nilai slump tertinggi (9,0 cm), diikuti LSK1 (7,9 cm) dan LSK2 (7,5 cm). Seluruh nilai slump masih berada dalam rentang yang disyaratkan (60–180 mm), sehingga adukan beton masih mudah dikerjakan.

Dalam batas-batas substitusi tertentu, campuran serat sabut kelapa dan limbah kaca dapat menjadi alternatif ramah lingkungan pengganti beton konvensional. Namun, pengaturan komposisi campuran secara cermat diperlukan untuk mencegah beton menjadi terlalu banyak menyerap air atau kehilangan kemudahan pengerjaannya (*workability*). Penelitian lanjutan disarankan untuk menentukan persentase optimum kombinasi, mengontrol panjang dan metode pengeringan serat, serta melakukan pengujian parameter mekanis lainnya seperti kuat tarik belah, kuat lentur, modulus elastisitas, dan durabilitas jangka panjang.

REFERENSI

- [1] M. N. Ridwansyah, "Substitusi Limbah Abu Pakaian Katun Bekas sebagai Pengganti Agregat Halus untuk Mendapatkan Mutu Beton yang Baik," Skripsi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, 2026.
- [2] K. Tjokrodinulyo, *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Nafiri, 1996.
- [3] M. R. Olii, I. E. Poe, I. Ichsan, and A. Olii, "Limbah kaca sebagai pengganti sebagian agregat halus untuk beton ramah lingkungan," *J. Tek.*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.37031/jt.v11i1.8050.
- [4] R. Permatasari, "Pengaruh penambahan limbah kaca sebagai agregat halus pada kuat tekan beton," Skripsi, Universitas Siliwangi, 2023.
- [5] Alfareza and D. S. Devi, *Analisis Pengaruh Limbah Serbuk Kaca sebagai Bahan Tambah dan Substitusi Agregat Halus terhadap Workability dan Kuat Tekan Beton Normal*. Tesis, Universitas Indo Global Mandiri, 2025.
- [6] Sahrudin and Nadia, "Pengaruh penambahan serat sabut kelapa terhadap kuat tekan beton," *Konstruksia*, vol. 8, no. 2, 2017.
- [7] B. S. Nasional, *SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Badan Standardisasi Nasional, 2000.
- [8] B. S. Nasional, *SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Badan Standardisasi Nasional, 2011.
- [9] ASTM C-33, *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, 2016.
- [10] B. S. Nasional, *SNI 03-1750-1990 Agregat Beton*. Badan Standardisasi Nasional, 1990.
- [11] L. N. T. Huy and V. N. Luan, "Research on Using Waste Glass, Fly Ash, and Coconut Fibers to Produce Eco-Friendly Concrete for Housing Construction in the Southwestern Provinces of Vietnam," *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2025.
- [12] F. Aslam, O. Zaid, F. Althoey, S. H. Alyami, S. M. A. Qaidi, J. de Prado Gil, and R. Martínez-García, "Evaluating the influence of fly ash and waste glass on the characteristics of coconut fibers reinforced concrete," *Structural Concrete*, vol. 24, no. 2, pp. 2440–2459, Apr. 2023, doi: 10.1002/suco.202200183.
- [13] S. Malhotra, A. Kanoungo, and A. Goyal, "Utilization of Industrial and Agricultural Wastes to Enhance the Properties of Concrete—A Review," in *Recent Trends in Transportation Infrastructure, Volume 1: Select Proceedings of TIPCE 2022*, Springer Nature Singapore, 2023, pp. 91–101.
- [14] L. Ho, "Recycled waste medical glass as a fine aggregate replacement in low environmental impact concrete: Effects on long-term strength and durability performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 368, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133198.
- [15] "Recycled Glass in Cementitious Composites: A Sustainable Alternative to Natural Aggregates," *Environmental Quality Management*, 2025, doi: 10.1002/tqem.70167.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.