Jurnal Teknologi dan Desain (JTD)

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

Pemanfaatan Limbah *Bottom Ash* sebagai Substitusi Agregat Halus untuk Mengurangi Pasir Alam pada Beton

UTILIZATION OF BOTTOM ASH WASTE AS A FINE AGGREGATE SUBSTITUTE TO REDUCE NATURAL SAND USE IN CONCRETE

Pengki Suanto[1)*]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pradita, Tangerang, Indonesia, pengki.suanto@pradita.ac.id
*email korespondensi: pengki.suanto@pradita.ac.id

Abstrak

Kebutuhan agregat halus berupa pasir alam terus meningkat seiring dengan perkembangan pembangunan infrastruktur, sementara eksploitasi pasir secara berlebihan dapat menimbulkan dampak terhadap lingkungan. Di sisi lain, pembakaran batubara pada pembangkit listrik menghasilkan limbah abu dasar batubara (*coal bottom ash*/CBA) yang berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif dalam beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan CBA sebagai substitusi sebagian agregat halus terhadap sifat beton segar dan beton keras. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi terpadu CBA sebagai satu-satunya bahan substitusi agregat halus, tanpa bahan tambah pozzolanik, pada beton normal mutu 25 MPa, yang mengaitkan penurunan slump, penurunan berat isi, dan peningkatan penyerapan air dengan batas kadar substitusi untuk aplikasi struktural dan non-struktural. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan variasi substitusi CBA sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% terhadap berat agregat halus, pada beton dengan kuat tekan rencana f_c'25 MPa. Parameter yang diuji meliputi nilai *slump*, berat isi beton segar, kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari, serta penyerapan air beton pada umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kadar CBA menyebabkan penurunan nilai *slump* dari 85 mm menjadi 48 mm dan berat isi dari 2.380 kg/m³ menjadi 2.225 kg/m³ pada substitusi 40%. Kuat tekan umur 28 hari meningkat dari 26,2 MPa pada beton kontrol menjadi 27,4 MPa dan 28,1 MPa masing-masing pada substitusi 10% dan 20%, kemudian menurun menjadi 24,3 MPa dan 20,5 MPa pada substitusi 30% dan 40%. Penyerapan air meningkat dari 3,8% pada beton kontrol menjadi 6,5% pada substitusi 40%. Kadar optimum 20% ditetapkan hanya berdasarkan kuat tekan umur 28 hari tertinggi (28,1 MPa), meskipun tidak berbeda nyata secara statistik dari substitusi 10% (27,4 MPa) di antara parameter yang diuji, dengan penyerapan air meningkat menjadi 4,7%, dan bukan merupakan hasil evaluasi seluruh aspek keberlanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CBA berpotensi digunakan sebagai substitusi sebagian agregat halus, dengan kadar penggunaannya perlu disesuaikan dengan karakteristik material dan rancangan campuran beton. Penurunan berat isi maksimum sebesar 6,5% tidak menjadikan beton tergolong beton ringan. Kontribusi penelitian ini adalah data batas kadar substitusi CBA pada beton normal yang mempertimbangkan kekuatan, berat isi, dan penyerapan air sebagai dasar kajian durabilitas dan lingkungan lanjutan.

Kata kunci: limbah industri; coal bottom ash; agregat halus; substitusi agregat; kuat tekan

Abstract

The demand for natural fine aggregate continues to increase along with infrastructure development, while excessive sand extraction may cause adverse environmental impacts. Meanwhile, coal combustion in power plants generates coal bottom ash (CBA), which has the potential to be utilized as an alternative material in concrete. This study aimed to investigate the effect of CBA as a partial substitute for fine aggregate on the properties of fresh and hardened concrete. The novelty of this study lies in an integrated evaluation of CBA as the sole fine aggregate substitute,

without pozzolanic additives, in normal concrete of 25 MPa design strength, relating the reductions in slump and unit weight and the increase in water absorption to the permissible substitution level for structural and non-structural applications. A laboratory experimental method was employed using CBA substitution levels of 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by weight of fine aggregate in concrete with a design compressive strength of f_c' 25 MPa. The investigated parameters included slump, fresh concrete unit weight, compressive strength at 7, 14, and 28 days, and water absorption at 28 days. The results showed that increasing the CBA content reduced the slump from 85 mm to 48 mm and the unit weight from 2,380 kg/m³ to 2,225 kg/m³ at the 40% substitution level. The 28-day compressive strength increased from 26.2 MPa for the control concrete to 27.4 MPa and 28.1 MPa for the 10% and 20% substitution levels, respectively, and subsequently decreased to 24.3 MPa and 20.5 MPa at 30% and 40% substitution, respectively. Water absorption increased from 3.8% for the control concrete to 6.5% at the 40% substitution level. The 20% CBA substitution level was identified as the optimum level solely on the basis of the highest 28-day compressive strength (28.1 MPa), although it was not statistically different from the 10% substitution (27.4 MPa) among the tested parameters, with water absorption increasing to 4.7%; it does not represent an evaluation of all sustainability aspects. The results indicate that CBA has potential for use as a partial fine aggregate substitute, although its appropriate replacement level should be determined according to the material characteristics and concrete mix design. The maximum unit weight reduction of 6.5% does not make the concrete a lightweight concrete. The contribution of this study is empirical data on the permissible CBA substitution level in normal concrete that balances strength, unit weight, and water absorption, as a basis for further durability and environmental assessment.

Keywords: *industrial waste; coal bottom ash; fine aggregate; aggregate substitution; compressive strength*

Article history: Received 11 September 2026, Accepted 18 October 2026, Available online 23 October 2026

1 PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia maupun di berbagai negara berkembang terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan aktivitas ekonomi. Kondisi tersebut berimplikasi terhadap meningkatnya kebutuhan material konstruksi, terutama beton yang merupakan salah satu material utama dalam pembangunan struktur. Beton memiliki keunggulan berupa kuat tekan yang relatif tinggi, kemudahan dalam pembentukan, ketersediaan bahan penyusun, serta kemampuan untuk digunakan pada berbagai jenis struktur. Namun, tingginya konsumsi beton juga berimplikasi terhadap meningkatnya kebutuhan agregat alam dan eksploitasi sumber daya mineral. Agregat merupakan salah satu komponen terbesar dalam volume beton, sehingga peningkatan kebutuhan beton secara langsung meningkatkan tekanan terhadap sumber daya agregat alam. Penelitian terbaru mengenai beton berkelanjutan menunjukkan bahwa pengurangan penggunaan agregat alam melalui pemanfaatan material daur ulang dan produk samping industri merupakan salah satu strategi penting dalam mendukung konstruksi berkelanjutan dan ekonomi sirkular (Haddadian et al., 2023). Pengembangan beton ringan dan beton non-konvensional lainnya juga telah memanfaatkan produk samping industri, baik sebagai pengganti semen maupun agregat, dengan perubahan densitas dan kinerja yang bergantung pada jenis material dan kadar substitusinya (Haddadian et al., 2023).

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

Salah satu material alam yang menghadapi tekanan akibat tingginya kebutuhan konstruksi adalah pasir sebagai sumber agregat halus. Eksploitasi pasir sungai secara berlebihan dapat menimbulkan dampak terhadap kondisi fisik, biologis, kimia, dan sosial lingkungan. Kajian Rentier dan Cammeraat (2022) mengenai dampak lingkungan penambangan pasir sungai menunjukkan bahwa aktivitas ekstraksi dapat menyebabkan perubahan morfologi dasar dan tebing sungai, penurunan kualitas air dan tanah, serta gangguan terhadap ekosistem dan keanekaragaman hayati. Dampaknya dapat bersifat luas dan kumulatif apabila eksploitasi dilakukan tanpa pengelolaan yang memadai. Oleh karena itu, pengembangan agregat halus alternatif dari material hasil samping industri menjadi salah satu pendekatan yang relevan untuk mengurangi ketergantungan terhadap pasir alam.

Permasalahan lain yang berkembang sejalan dengan aktivitas industri adalah meningkatnya jumlah limbah padat yang memerlukan pengelolaan secara berkelanjutan. Salah satu limbah industri yang berpotensi dimanfaatkan dalam material konstruksi adalah abu dasar batubara (*coal bottom ash*/CBA). CBA merupakan residu padat hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik dan proses industri berbasis batubara yang memiliki karakteristik fisik dan kimia berbeda-beda bergantung pada sumber batubara, kondisi pembakaran, serta proses pengumpulan dan pengolahannya. Pembuangan CBA secara langsung atau penimbunan dalam jumlah besar dapat menimbulkan persoalan lingkungan, sekaligus membutuhkan lahan dan biaya pengelolaan. Oleh sebab itu, pemanfaatan CBA sebagai bahan konstruksi merupakan salah satu alternatif untuk mengubah limbah industri menjadi material bernilai tambah. Tamanna et al. (2023) menegaskan bahwa pemanfaatan CBA dalam material semen dan beton berpotensi mengurangi permasalahan pembuangan limbah serta memberikan alternatif terhadap penggunaan material alam.

Pemanfaatan CBA sebagai substitusi agregat halus pada beton telah menjadi salah satu topik penelitian yang berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Review komprehensif yang dilakukan oleh Hamada et al. (2022) menunjukkan bahwa CBA telah diteliti sebagai substitusi agregat halus pada berbagai jenis beton, termasuk beton normal dan beton berkinerja tinggi. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengaruh CBA terhadap beton sangat bergantung pada karakteristik fisik dan kimia material, ukuran serta gradasi partikel, kadar substitusi, dan rancangan campuran. Dengan pengolahan dan proporsi yang tepat, CBA dapat digunakan sebagai alternatif agregat halus alami dalam produksi beton berkelanjutan. Karakteristik CBA yang memiliki partikel relatif berpori, bentuk tidak beraturan, serta luas permukaan yang relatif tinggi dapat memengaruhi sifat beton segar. Aygun et al. (2024) melaporkan bahwa peningkatan kadar CBA sebagai agregat halus cenderung menurunkan nilai slump dan meningkatkan kebutuhan air atau bahan tambah kimia karena karakteristik partikel CBA yang lebih berpori dan bentuknya yang angular. Review tersebut juga

menunjukkan bahwa kadar substitusi sekitar 10–20% sering memberikan keseimbangan yang baik antara kemudahan pengerjaan dan kinerja beton, meskipun kadar optimum tetap bergantung pada karakteristik CBA dan rancangan campuran yang digunakan.

Temuan tersebut sejalan dengan penelitian eksperimental Bheel et al. (2022) yang menggunakan CBA sebagai pengganti agregat halus pada beton. Penelitian tersebut menggunakan variasi CBA sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40% serta mengevaluasi slump, kuat tekan, kuat tarik belah, dan penyerapan air. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan kadar CBA memengaruhi workability dan penyerapan air beton, sedangkan kombinasi tertentu antara abu sekam padi dan CBA mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah dibandingkan campuran kontrol.

Penelitian lain juga memperlihatkan bahwa kadar substitusi CBA perlu dikendalikan agar manfaat penggunaan limbah tidak diikuti oleh penurunan kinerja beton yang berlebihan. Chindasiriphan et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan bottom ash sebagai pengganti agregat halus dapat dikombinasikan dengan material tambahan lain untuk menghasilkan beton berkinerja tinggi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa pengolahan dan pengendalian ukuran partikel bottom ash berperan penting terhadap karakteristik campuran dan kinerja beton. Sementara itu, Ganesan et al. (2023) melaporkan bahwa penggunaan CBA hingga 40% sebagai substitusi agregat halus, ketika dikombinasikan dengan material semen tambahan yang sesuai, dapat menghasilkan peningkatan kuat tekan yang signifikan.

Hasil penelitian terbaru semakin memperkuat pentingnya pengendalian karakteristik dan kadar substitusi CBA. Aygun et al. (2024) menunjukkan bahwa CBA dapat digunakan pada kadar substitusi yang relatif tinggi, tetapi karakteristik campuran tetap dipengaruhi oleh porositas, gradasi, serta sifat permukaan partikel. Kim et al. (2023) mengevaluasi biaya dan emisi CO_2 beton yang menggunakan CBA dengan perlakuan awal sebagai agregat halus, sehingga manfaat lingkungan penggunaan CBA perlu dinilai secara kuantitatif dan bergantung pada proses pengolahan serta proporsi penggunaannya.

Selain penelitian internasional, penelitian yang terlampir juga menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah sebagai bagian dari material konstruksi memiliki potensi untuk mendukung pengembangan beton yang lebih berkelanjutan. Penelitian Mulyadi et al. (2022) mengenai pemanfaatan abu sekam padi dalam beton K-250 menunjukkan bahwa material limbah berbentuk abu dapat dimanfaatkan dalam campuran beton, meskipun peningkatan kadar limbah perlu dikendalikan karena berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa karakteristik limbah dan kadar penggunaannya merupakan faktor penting dalam menentukan kinerja beton.

Penelitian Suanto et al. (2025) mengenai beton dengan serat sabut kelapa juga memperlihatkan bahwa pemanfaatan limbah atau material berbasis sumber terbarukan dapat diarahkan untuk meningkatkan keberlanjutan material konstruksi. Penelitian tersebut menggunakan beton dengan kuat tekan rencana 25 MPa dan mengevaluasi beberapa kadar

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

material tambahan serta sifat beton setelah umur 28 hari. Sementara itu, penelitian Suanto dan Dharsono (2026) mengenai beton geopolimer dengan agregat kasar daur ulang dari limbah konstruksi menunjukkan bahwa peningkatan kadar material daur ulang dapat memengaruhi slump, porositas, dan sifat mekanik beton. Penelitian tersebut mendapatkan kinerja optimum pada tingkat substitusi agregat daur ulang tertentu dan menunjukkan bahwa kadar substitusi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kinerja akibat peningkatan porositas dan melemahnya zona transisi antarmuka *(interfacial transition zone*/ITZ).

Penelitian mengenai pemanfaatan limbah dalam material konstruksi juga telah dikembangkan pada material berbasis nanoteknologi. Suanto et al. (2025) menunjukkan bahwa limbah kertas dapat diolah menjadi nanocellulose sebagai material konstruksi berkelanjutan dan bahwa karakteristik material hasil pengolahan berpengaruh terhadap sifat material yang dihasilkan. Hal tersebut memperkuat pendekatan bahwa limbah industri maupun limbah padat lainnya tidak hanya perlu dipandang sebagai material buangan, tetapi dapat dikembangkan menjadi sumber material alternatif melalui karakterisasi dan pengolahan yang sesuai.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi CBA sebagai substitusi agregat halus, masih terdapat ruang penelitian yang penting, terutama terkait karakteristik CBA lokal dan respons beton terhadap variasi kadar substitusi yang berbeda. Karakteristik CBA tidak bersifat seragam karena dipengaruhi oleh jenis batubara, temperatur dan kondisi pembakaran, sistem pengumpulan abu, serta proses pengolahan setelah keluar dari boiler. Perbedaan karakteristik tersebut dapat menyebabkan perbedaan densitas, absorpsi air, gradasi, bentuk partikel, porositas, dan komposisi kimia, sehingga hasil penelitian dari suatu sumber CBA tidak dapat secara langsung digeneralisasi terhadap CBA dari sumber lainnya. Kajian Hamada et al. (2022) dan Tamanna et al. (2023) juga menekankan bahwa karakteristik fisik dan kimia CBA perlu dievaluasi sebelum digunakan sebagai bahan penyusun beton.

Penelusuran terhadap studi terdahulu menunjukkan tiga celah penelitian. Pertama, sebagian besar studi substitusi CBA sebagai agregat halus dilakukan pada beton dengan bahan tambahan atau jenis beton khusus, misalnya kombinasi CBA dengan abu sekam padi (Bheel et al., 2022), beton mutu tinggi dengan CBA sebagai pengganti semen sekaligus agregat halus (Chindasiriphan et al., 2023), CBA yang dikombinasikan dengan material semen tambahan (Ganesan et al., 2023), maupun komposit semen berkinerja regangan-mengeras (Abdulkadir et al., 2024). Akibatnya, pengaruh CBA sebagai satu-satunya variabel substitusi pada beton normal mutu 25 MPa, yang umum digunakan pada struktur bangunan gedung, belum banyak dipisahkan. Kedua, kadar optimum pada studi-studi tersebut umumnya ditetapkan berdasarkan kuat tekan, sedangkan konsekuensi penurunan berat isi dan

peningkatan penyerapan air terhadap batas kadar substitusi dan kelas penggunaan (struktural atau non-struktural) belum dibahas secara terpadu. Ketiga, karena karakteristik CBA sangat bergantung pada sumbernya, diperlukan data CBA lokal yang dilengkapi karakterisasi kimia dan fisik sebagai dasar penentuan kadar substitusi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji pemanfaatan abu dasar batubara sebagai substitusi sebagian agregat halus pada beton dengan mempertimbangkan perubahan sifat beton pada kondisi segar maupun keras. Variasi substitusi yang digunakan adalah 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% terhadap agregat halus. Parameter beton segar yang diamati meliputi nilai slump dan berat isi, sedangkan parameter beton keras meliputi kuat tekan dan penyerapan air. Pemilihan rentang substitusi tersebut didasarkan pada hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa kadar CBA pada kisaran rendah hingga menengah masih memiliki peluang untuk mempertahankan kinerja beton, sementara peningkatan kadar yang terlalu tinggi cenderung meningkatkan porositas dan kebutuhan air serta menurunkan workability dan sebagian sifat mekanik. Kebaruan penelitian ini terletak pada (i) penggunaan CBA sebagai satu-satunya bahan substitusi, tanpa bahan tambah pozzolanik atau material semen tambahan, pada beton normal mutu 25 MPa; (ii) pembahasan terpadu antara kuat tekan, slump, berat isi, dan penyerapan air untuk menetapkan batas kadar substitusi; serta (iii) penegasan bahwa penurunan berat isi merupakan respons terhadap substitusi, bukan variabel yang direkayasa, dan tidak serta-merta menjadikan beton tergolong beton ringan. Keunggulan penelitian ini dibandingkan studi terdahulu adalah rancangan campuran yang sederhana dengan kadar semen, air, dan agregat kasar yang konstan sehingga pengaruh CBA dapat diidentifikasi secara langsung, dan hasilnya dapat menjadi dasar bagi pengembangan campuran dengan perlakuan awal CBA atau bahan tambahan.

Dengan demikian, rumusan masalah penelitian ini adalah: bagaimana pengaruh variasi persentase substitusi abu dasar batubara terhadap sifat beton segar dan sifat mekanik beton keras, serta berapa persentase substitusi optimum yang mampu memberikan keseimbangan antara kinerja teknis dan pemanfaatan limbah industri? Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan mengkarakterisasi sifat kimia dan fisik abu dasar batubara yang digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus; (2) menganalisis pengaruh substitusi abu dasar batubara sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% terhadap nilai slump, berat isi, kuat tekan, dan penyerapan air beton; serta (3) menentukan persentase substitusi optimum yang memberikan keseimbangan antara kinerja teknis beton dan pemanfaatan limbah industri. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan beton berkelanjutan berbasis limbah industri, mengurangi ketergantungan terhadap agregat halus alam, serta mendukung penerapan prinsip ekonomi sirkular (*circular economy*) dalam industri konstruksi.

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

2 METODE PENELITIAN

2.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan rancangan acak lengkap (RAL) satu faktor. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase substitusi abu dasar batubara terhadap berat agregat halus, yaitu 0% (beton normal sebagai kontrol), 10%, 20%, 30%, dan 40%. Variabel terikat yang diamati meliputi nilai slump dan berat isi beton segar, kuat tekan beton keras pada umur 7, 14, dan 28 hari, serta penyerapan air beton pada umur 28 hari. Berat isi diukur sebagai respons terhadap substitusi CBA, yang timbul karena perbedaan berat jenis CBA dan pasir alam, dan bukan sebagai variabel yang dikendalikan atau dirancang dalam penelitian ini. Variabel kontrol meliputi kadar semen (400 kg/m^3), kadar air (200 L/m^3, faktor air-semen 0,50), agregat kasar (1000 kg/m^3), dimensi benda uji, dan kondisi perawatan.

2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas semen *Portland Composite Cement* (PCC) yang memenuhi persyaratan SNI 7064:2014, agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm, agregat halus berupa pasir alam yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) sesuai SNI 03-1750-1990, air bersih yang memenuhi persyaratan SNI 7974:2013, serta abu dasar batubara (*coal bottom ash*) yang diperoleh dari kolam penampungan limbah PLTU. Abu dasar batubara terlebih dahulu dikeringkan pada suhu ruang, kemudian diayak untuk memisahkan partikel yang lolos saringan No. 4 sebelum digunakan sebagai bahan substitusi.

2.3. Peralatan

Peralatan utama yang digunakan meliputi mixer beton berkapasitas 0,25 m^3, cetakan silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm, mesin uji tekan (*compression testing machine*) berkapasitas 2000 kN, kerucut Abrams untuk pengujian slump, satu set ayakan standar mengacu SNI ASTM C136:2012, oven pengering, serta timbangan digital dengan ketelitian 0,1 gram.

2.4. Karakterisasi Bahan

Karakteristik kimia abu dasar batubara ditentukan melalui pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk memperoleh kandungan oksida utama seperti SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, dan CaO. Karakteristik fisik agregat, meliputi berat jenis dan penyerapan air, diuji mengacu SNI 1970:2016, sedangkan gradasi butiran ditentukan melalui analisis saringan mengacu SNI ASTM C136:2012, dengan modulus kehalusan dihitung dari hasil analisis saringan tersebut. Kadar air agregat ditentukan mengacu SNI 1971:2011. Karakteristik fisik CBA dan pasir alam disajikan pada Tabel 2 agar dapat dibandingkan secara langsung.

2.5. Rancangan Campuran (*Mix Design*)

Rancangan campuran beton disusun mengacu SNI 03-2834-2000 dengan mutu beton rencana *f'c* 25 MPa dan nilai slump rencana 60-180 mm. Proporsi campuran untuk setiap variasi substitusi disajikan pada Tabel 1. Substitusi CBA dilakukan terhadap berat agregat halus (Tabel 1) dengan pertimbangan bahwa proporsi campuran pada SNI 03-2834-2000 dinyatakan dalam satuan massa dan penakaran bahan umumnya dilakukan berdasarkan berat, sehingga prosedur ini mudah direplikasi di laboratorium maupun di lapangan. Konsekuensinya, karena berat jenis CBA lebih rendah daripada pasir alam, volume partikel CBA yang menggantikan pasir pada berat yang sama menjadi lebih besar, sehingga proporsi volume dan luas permukaan partikel halus dalam campuran cenderung meningkat seiring kadar substitusi. Kondisi ini turut berkontribusi terhadap penurunan berat isi dan slump yang dibahas pada bagian Hasil dan Pembahasan. Substitusi berdasarkan volume tidak dilakukan dalam penelitian ini dan direkomendasikan sebagai penelitian lanjutan.

TABEL 1. PROPORSI CAMPURAN BETON PER M³ UNTUK SETIAP VARIASI SUBSTITUSI

Variasi Substitusi	Semen (kg)	Air (L)	Agregat Kasar (kg)	Pasir (kg)	Abu Dasar Batubara (kg)
0% (kontrol)	400	200	1000	650	0
10%	400	200	1000	585	65
20%	400	200	1000	520	130
30%	400	200	1000	455	195
40%	400	200	1000	390	260

2.6. Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Benda uji berupa silinder beton berukuran 15×30 cm dibuat sebanyak 3 sampel untuk setiap variasi substitusi pada setiap umur pengujian (7, 14, dan 28 hari), sehingga total benda uji berjumlah 45 buah, ditambah 15 buah benda uji untuk pengujian absorpsi pada umur 28 hari. Setelah pengecoran, seluruh benda uji dirawat (*curing*) dengan cara direndam dalam air pada suhu ruang hingga mencapai umur pengujian yang telah ditentukan.

2.7. Prosedur Pengujian dan Teknik Analisis Data

Pengujian slump pada beton segar dilakukan mengacu SNI 1972:2008, pengujian berat isi beton segar mengacu SNI 1973:2016, pengujian kuat tekan mengacu SNI 1974:2011, dan pengujian penyerapan air mengacu SNI 6433:2016. Seluruh hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan menghitung nilai rata-rata, simpangan baku, dan koefisien variasi dari tiga benda uji untuk setiap variasi dan umur pengujian, serta melakukan analisis ragam satu arah (ANOVA) dan uji lanjut Tukey HSD pada taraf 5%, dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, kemudian dibandingkan terhadap beton normal (substitusi 0%) sebagai kontrol serta terhadap syarat mutu yang disyaratkan SNI.

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Abu Dasar Batubara

Karakteristik fisik pasir alam dan CBA yang digunakan disajikan pada Tabel 2. Modulus kehalusan CBA (2,56) sedikit lebih halus daripada pasir alam (2,84), berat jenis SSD CBA (2,26) sekitar 14% lebih rendah daripada pasir alam (2,63), dan penyerapan air CBA (2,30%) sekitar 6,6 kali pasir alam (0,35%), sedangkan kadar air keduanya relatif berdekatan (0,45% dan 0,26%). CBA umumnya memiliki partikel tidak beraturan dan berpori sehingga berat jenisnya lebih rendah dan penyerapan airnya lebih tinggi dibandingkan pasir alam (Hamada et al., 2022; Aygun et al., 2024). Perbedaan berat jenis menjadi dasar penjelasan penurunan berat isi pada substitusi berdasarkan berat, sedangkan perbedaan gradasi dan penyerapan air menjelaskan penurunan slump dan peningkatan penyerapan air beton yang dibahas pada bagian berikutnya. Karena substitusi dilakukan berdasarkan berat, volume partikel halus pada substitusi 40% bertambah sekitar 16 L per m^3 (6,6%) dibandingkan beton kontrol, dan air yang terserap partikel halus meningkat dari sekitar 2,3 kg menjadi 7,3 kg per m^3, yaitu tambahan sekitar 5 kg atau 2,5% dari air pencampur 200 L (perhitungan dari Tabel 1 dan Tabel 2).

TABEL 2. KARAKTERISTIK FISIK PASIR ALAM DAN ABU DASAR BATUBARA

Parameter	Pasir Alam	Abu Dasar Batubara
Modulus kehalusan	2,84	2,56
Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD)	2,63	2,26
Kadar air (%)	0,26	0,45
Penyerapan air (%)	0,35	2,30

Hasil pengujian XRF terhadap abu dasar batubara yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil analisis tersebut, komposisi kimia abu dasar batubara didominasi oleh senyawa silikon dioksida (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3), yang merupakan komponen utama pembentuk material pozzolanik. Kandungan kedua senyawa tersebut menunjukkan bahwa abu dasar batubara memiliki potensi untuk berkontribusi terhadap reaksi pozzolanik apabila digunakan sebagai material substitusi dalam campuran. Dalam lingkungan yang mengandung air, silika dan alumina yang bersifat reaktif dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen dan membentuk produk hidrasi sekunder, terutama calcium silicate hydrate (C-S-H) dan calcium aluminate hydrate (C-A-H), yang berperan dalam meningkatkan kepadatan serta karakteristik mekanik material. Komposisi kimia yang diperoleh dalam penelitian ini juga sejalan dengan hasil penelitian Karalar et al. (2022) dan Bheel et al. (2022), yang melaporkan dominasi senyawa silika dan

alumina pada abu dasar batubara yang berasal dari PLTU berbahan bakar batubara sub-bituminus.

TABEL 3. KOMPOSISI KIMIA ABU DASAR BATUBARA HASIL UJI XRF

Senyawa Oksida	Kadar (%)
SiO_2	48,2
Al_2O_3	19,6
Fe_2O_3	11,3
CaO	6,4
MgO	2,1
SO_3	1,2
Loss on Ignition (LOI)	4,8
Lain-lain	6,4

3.2. Nilai *Slump* dan Berat Isi Beton Segar

Tabel 4 dan Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai slump beton segar cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan persentase substitusi abu dasar batubara. Nilai slump beton normal tercatat sebesar 85 mm, kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai 48 mm pada tingkat substitusi sebesar 40%. Penurunan nilai slump tersebut menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan abu dasar batubara berpengaruh terhadap tingkat kelecakan (*workability*) beton segar. Penurunan slump diduga berkaitan dengan karakteristik permukaan dan absorpsi CBA yang berbeda dari pasir alam. Karakteristik tersebut menyebabkan luas permukaan total partikel dalam campuran meningkat, sehingga kebutuhan air untuk membasahi permukaan partikel menjadi lebih besar. Sebagian air pencampur juga dapat terserap atau tertahan pada pori-pori abu dasar batubara, sehingga jumlah air bebas yang tersedia untuk memberikan mobilitas pada campuran menjadi berkurang. Akibatnya, campuran menjadi lebih kaku dan nilai slump mengalami penurunan seiring meningkatnya proporsi substitusi. Perlu dicatat bahwa nilai slump pada substitusi 40% (48 mm) berada di bawah rentang slump rencana 60–180 mm, sehingga pada kadar tersebut diperlukan penyesuaian kebutuhan air atau penggunaan bahan tambah kimia agar kelecakan memenuhi persyaratan pengerjaan. Tambahan air yang terserap CBA pada substitusi 40% hanya sekitar 5 kg per m^3 (±2,5% air pencampur), sehingga penyerapan air saja tidak cukup menjelaskan penurunan slump sebesar 43,5%; bentuk partikel yang tidak beraturan, tekstur permukaan, dan gradasi yang lebih halus (modulus kehalusan 2,56 terhadap 2,84) diduga berperan lebih besar. Penurunan slump hampir linear terhadap kadar CBA, yaitu sekitar 0,9 mm per 1% substitusi (R^2 = 0,99).

Selain nilai slump, berat isi beton segar juga menunjukkan kecenderungan menurun dengan bertambahnya persentase substitusi abu dasar batubara. Penurunan tersebut berkaitan dengan berat jenis abu dasar batubara yang relatif lebih rendah dibandingkan pasir alam. Dengan menggantikan sebagian agregat halus yang memiliki berat jenis lebih tinggi dengan material yang lebih ringan, massa beton per satuan volume menjadi berkurang.

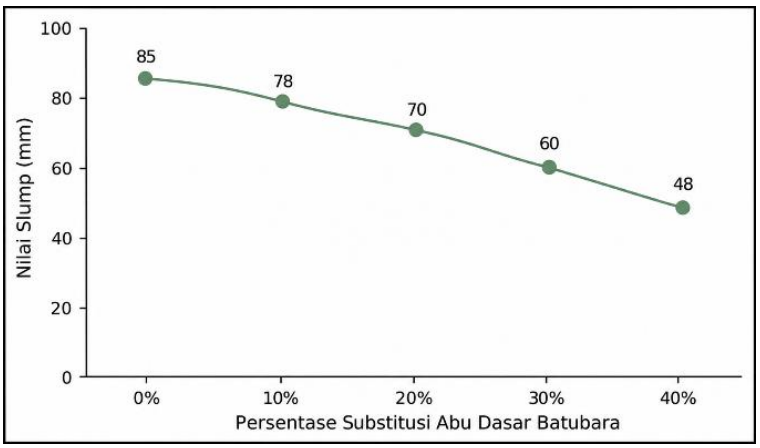
Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan abu dasar batubara tidak hanya memengaruhi sifat kelecakan, tetapi juga karakteristik densitas beton. Kecenderungan penurunan berat isi tersebut sejalan dengan hasil penelitian Smarzewski (2025) serta Manikandan dan Karuppusamy (2025), yang melaporkan perubahan karakteristik beton akibat penggunaan material limbah sebagai substitusi agregat halus.

TABEL 4. NILAI SLUMP DAN BERAT ISI BETON SEGAR

Variasi Substitusi	Nilai Slump (mm)	Berat Isi (kg/m³)
0% (kontrol)	85	2380
10%	78	2350
20%	70	2310
30%	60	2270
40%	48	2225

Dengan demikian, peningkatan kadar abu dasar batubara perlu dikendalikan agar diperoleh keseimbangan antara pemanfaatan limbah, workability, dan karakteristik fisik beton yang dihasilkan. Penurunan berat isi terhadap beton kontrol berturut-turut sebesar 1,3% (10%), 2,9% (20%), 4,6% (30%), dan 6,5% (40%). Besaran ini tergolong kecil dan berat isi seluruh variasi (2.225–2.380 kg/m³) masih berada pada rentang beton normal, sehingga beton hasil substitusi CBA tidak dapat dikategorikan sebagai beton ringan. Sebagai pembanding, SNI 2847:2019 mendefinisikan beton ringan sebagai beton dengan densitas keseimbangan sekitar 1.440–1.840 kg/m³; walaupun berat isi segar umumnya sedikit lebih tinggi daripada densitas keseimbangan, nilai 2.225 kg/m³ masih jauh di atas batas tersebut. Penurunan berat isi lebih tepat dipandang sebagai konsekuensi substitusi dengan manfaat pengurangan beban mati yang marginal; potensi efisiensi material dan biaya konstruksi dapat dikaji sebagai peluang penelitian lanjutan. Perhitungan volumetrik dari Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa perbedaan berat jenis saja hanya memperkirakan penurunan berat isi sekitar 1,6% pada substitusi 40%, sedangkan hasil pengukuran sebesar 6,5%. Selisih tersebut diduga berasal dari rongga udara akibat campuran yang lebih kaku (slump 48 mm) dan porositas internal CBA, sehingga kepadatan dan kadar udara beton perlu diperiksa pada penelitian lanjutan. Penurunan berat isi terhadap kadar CBA hampir linear, sekitar 3,9 kg/m³ per 1% substitusi (R^2 = 0,99).



GAMBAR 1. GRAFIK NILAI SLUMP TERHADAP PERSENTASE SUBSTITUSI

3.3. Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk seluruh variasi substitusi disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 2. Berdasarkan hasil pengujian, kuat tekan beton pada substitusi abu dasar batubara (coal bottom ash/CBA) sebesar 10% dan 20% menunjukkan nilai yang mendekati hingga lebih tinggi dibandingkan beton normal. Pada umur 28 hari, kuat tekan tertinggi diperoleh pada substitusi 20%, yaitu sebesar 28,1 MPa, sedangkan beton normal menghasilkan kuat tekan sebesar 26,2 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan CBA pada kadar substitusi tertentu masih mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kinerja mekanik beton.

Peningkatan kuat tekan pada kadar substitusi rendah hingga menengah dapat dikaitkan dengan filler effect, yaitu partikel CBA yang berukuran relatif halus dapat mengisi rongga di antara butiran agregat sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat. Selain itu, CBA juga dapat memberikan kontribusi melalui aktivitas pozzolanik, bergantung pada komposisi kimia, ukuran partikel, dan tingkat kehalusannya. Hamada et al. (2022) menjelaskan bahwa karakteristik fisik dan kimia CBA sangat menentukan pengaruhnya terhadap sifat beton, sementara Tamanna et al. (2023) menegaskan bahwa kehalusan, porositas, dan reaktivitas CBA merupakan faktor penting dalam menentukan perkembangan kekuatan beton.

Perkembangan kuat tekan terhadap umur menunjukkan pola yang seragam untuk seluruh variasi: rasio kuat tekan 7 hari terhadap 28 hari sebesar 69,7–71,2% dan rasio 14 hari terhadap 28 hari sebesar 87,6–88,5%. Keunggulan substitusi 10% dan 20% sudah tampak sejak umur 7 hari (masing-masing +3,2% dan +7,0% terhadap kontrol) dan tidak membesar pada umur 28 hari (+4,6% dan +7,3%). Pola ini lebih sesuai dengan efek fisik berupa pengisian rongga (filler effect) daripada reaksi pozzolanik, yang umumnya memberi tambahan kekuatan pada umur lanjut. Jumlah SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 sebesar 79,1% dengan LOI 4,8% (Tabel 3) menunjukkan potensi pozzolanik, tetapi kontribusinya belum dapat dibuktikan dari data hingga umur 28 hari.

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

TABEL 5. HASIL UJI KUAT TEKAN BETON (MPa)

Variasi Substitusi	7 Hari	14 Hari	28 Hari
0% (kontrol)	18,5	23,0	26,2
10%	19,1	24,0	27,4
20%	19,8	24,8	28,1
30%	17,2	21,5	24,3
40%	14,6	18,0	20,5

Nilai pada Tabel 5 merupakan rata-rata tiga benda uji, dengan simpangan baku dan koefisien variasi yang disajikan pada Tabel 6. Peningkatan kuat tekan 28 hari pada substitusi 20% terhadap beton kontrol adalah 1,9 MPa (7,3%), sedangkan selisih antara substitusi 10% dan 20% hanya 0,7 MPa. Simpangan baku kuat tekan 28 hari berkisar 0,30–0,55 MPa dengan koefisien variasi 1,15–2,68% yang meningkat seiring kadar CBA, sehingga hasil uji cukup konsisten tetapi cenderung lebih bervariasi pada campuran dengan CBA tinggi yang lebih kaku. Analisis ragam satu arah dari rata-rata dan simpangan baku tiga benda uji menunjukkan pengaruh kadar CBA yang signifikan terhadap kuat tekan 28 hari ($F = 150$, $p < 0{,}001$; beda nyata jujur Tukey HSD ≈ 1,16 MPa). Peningkatan pada substitusi 10% (1,2 MPa) dan 20% (1,9 MPa) terhadap kontrol melampaui nilai tersebut sehingga signifikan, sedangkan selisih antara 10% dan 20% (0,7 MPa) tidak signifikan. Dengan demikian kuat tekan substitusi 10% dan 20% secara statistik setara dan lebih tinggi daripada kontrol, sedangkan penurunan pada substitusi 30% (turun 7,3%) dan 40% (turun 21,8%) signifikan. Karena setiap kelompok hanya terdiri atas tiga benda uji, hasil uji ini bersifat indikatif.

TABEL 6. SIMPANGAN BAKU DAN KOEFISIEN VARIASI KUAT TEKAN BETON (3 BENDA UJI)

Variasi Substitusi	SD 7 Hari (MPa)	SD 14 Hari (MPa)	SD 28 Hari (MPa)	KV 28 Hari (%)
0% (kontrol)	0,30	0,30	0,30	1,15
10%	0,25	0,30	0,35	1,28
20%	0,40	0,35	0,40	1,42
30%	0,35	0,45	0,50	2,06
40%	0,45	0,40	0,55	2,68

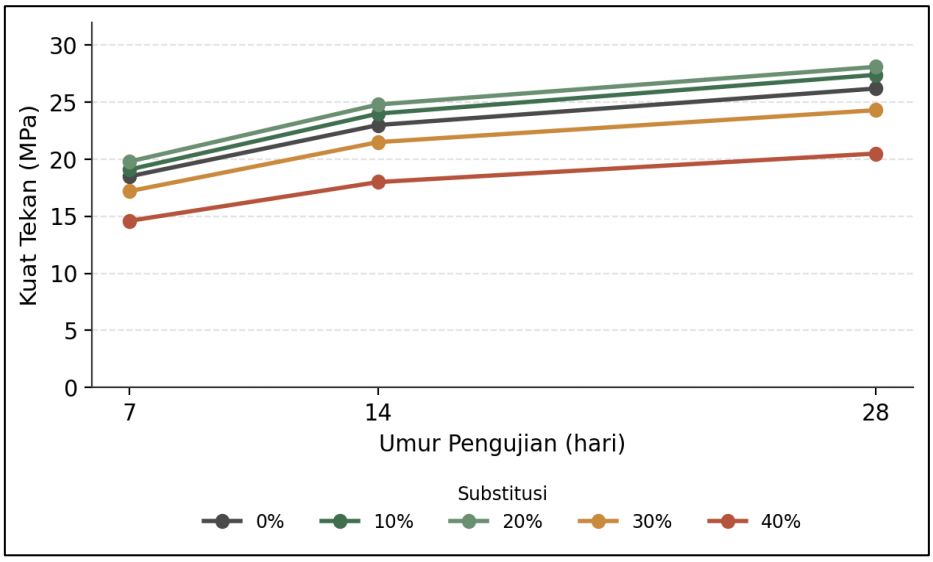
Pada substitusi 30% dan 40%, kuat tekan beton umur 28 hari mengalami penurunan masing-masing menjadi 24,3 MPa dan 20,5 MPa. Penurunan tersebut diduga berkaitan dengan meningkatnya kandungan material berpori dalam campuran serta meningkatnya kebutuhan air akibat daya serap CBA yang relatif tinggi. Menurut Aygun et al. (2024), CBA umumnya memiliki struktur yang lebih berpori dan tingkat absorpsi air yang lebih tinggi dibandingkan agregat halus alam, sehingga peningkatan proporsi CBA dapat memengaruhi workability dan struktur pori beton. Kondisi tersebut selanjutnya dapat meningkatkan

porositas beton dan menyebabkan penurunan kuat tekan apabila kadar substitusi terlalu tinggi.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan Chindasiriphan et al. (2023) yang menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan CBA dalam beton perlu dikendalikan karena karakteristik fisik CBA dapat memengaruhi perkembangan kuat tekan. Demikian pula, Abdulkadir et al. (2024) menunjukkan bahwa CBA dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus, tetapi tingkat substitusi dan karakteristik material perlu dioptimalkan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan, durabilitas, dan keberlanjutan.

Dengan demikian, berdasarkan data penelitian ini, substitusi CBA sebesar 20% merupakan kadar optimum karena menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 28,1 MPa pada umur 28 hari. Namun, nilai optimum tersebut bersifat spesifik terhadap karakteristik CBA dan rancangan campuran yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini penting karena Tamanna et al. (2023) dan Aygun et al. (2024) menunjukkan bahwa kinerja beton berbasis CBA sangat dipengaruhi oleh sumber material, gradasi, porositas, absorpsi air, serta metode pengolahan CBA. Namun, karena kuat tekan substitusi 10% dan 20% tidak berbeda nyata secara statistik, substitusi 10% dapat dipandang sebagai alternatif yang lebih konservatif dengan penurunan slump (78 mm) dan peningkatan penyerapan air (4,2%) yang lebih kecil.

Berdasarkan hasil pengujian pada umur 28 hari, variasi substitusi 0%, 10%, dan 20% menghasilkan kuat tekan masing-masing sebesar 26,2 MPa, 27,4 MPa, dan 28,1 MPa, sedangkan variasi substitusi 30% dan 40% berada di bawah nilai rencana sehingga tidak disarankan untuk elemen struktural yang menahan beban utama. Kondisi ini menegaskan pentingnya pembatasan kadar substitusi abu dasar batubara pada aplikasi struktural, meskipun pada elemen non-struktural seperti paving block, kanstin, atau beton pengisi (filler concrete), kadar substitusi yang lebih tinggi masih dapat dipertimbangkan mengingat persyaratan kuat tekannya yang relatif lebih rendah.



GAMBAR 2. GRAFIK KUAT TEKAN BETON TERHADAP UMUR PENGUJIAN

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

3.4. Penyerapan Air

Tabel 7 menunjukkan bahwa penyerapan air beton meningkat seiring dengan bertambahnya persentase substitusi CBA, yaitu dari 3,8% pada beton normal menjadi 6,5% pada substitusi 40%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kandungan CBA dalam campuran, semakin besar pula kecenderungan beton menyerap air. Kondisi ini terutama berkaitan dengan struktur CBA yang relatif berpori dan memiliki kemampuan menyerap air lebih tinggi dibandingkan pasir alam.

Menurut Hamada et al. (2022), karakteristik pori dan absorpsi air CBA merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi sifat beton ketika CBA digunakan sebagai agregat halus. Hal serupa dikemukakan oleh Aygun et al. (2024) yang menyatakan bahwa penggunaan CBA dalam jumlah tinggi dapat meningkatkan kebutuhan air campuran dan memengaruhi struktur pori beton. Oleh karena itu, peningkatan penyerapan air pada variasi substitusi 30% dan 40% dalam penelitian ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya volume partikel CBA yang berpori.

Peningkatan penyerapan air juga memiliki implikasi terhadap durabilitas beton. Beton dengan porositas yang lebih tinggi cenderung memiliki jalur penetrasi air dan zat agresif yang lebih mudah terbentuk. Ganesan et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik agregat berbasis CBA dan struktur pori beton merupakan faktor penting dalam mengevaluasi durabilitas beton berkelanjutan. Oleh karena itu, peningkatan penyerapan air pada kadar substitusi CBA yang lebih tinggi perlu menjadi pertimbangan dalam menentukan batas penggunaan material tersebut pada aplikasi konstruksi.

Pada kadar optimum 20%, penyerapan air mencapai 4,7%, meningkat 0,9 poin persentase (23,7%) dibandingkan beton kontrol sebesar 3,8%; peningkatan pada substitusi 10%, 30%, dan 40% masing-masing 10,5%, 47,4%, dan 71,1%. Dengan demikian, kuat tekan tertinggi pada substitusi 20% dicapai bersamaan dengan peningkatan penyerapan air yang moderat, sehingga kadar 20% merupakan kompromi antara kekuatan dan porositas, bukan kondisi optimum untuk seluruh parameter; penyerapan air terendah tetap dijumpai pada beton kontrol. Peningkatan penyerapan air mengindikasikan pori kapiler dan pori pada partikel CBA yang lebih banyak, sehingga berpotensi mempercepat penetrasi air, ion klorida, dan gas CO_2 yang berdampak pada durabilitas, terutama pada elemen yang terpapar kelembapan atau lingkungan agresif. Penyerapan air bukan ukuran langsung permeabilitas atau ketahanan terhadap klorida, karbonasi, dan serangan sulfat, sehingga penggunaan substitusi 20% untuk elemen struktural di lingkungan agresif sebaiknya disertai uji durabilitas dan, bila diperlukan, perlakuan awal CBA atau penurunan faktor air-semen. Analisis ragam menunjukkan pengaruh kadar CBA yang signifikan terhadap penyerapan air ($F \approx 89$, $p < 0,001$; Tukey HSD

≈ 0,54 poin): peningkatan pada substitusi 10% (0,4 poin) belum berbeda nyata dari kontrol, sedangkan substitusi 20% ke atas berbeda nyata, dengan hubungan yang hampir linear (sekitar 0,07 poin per 1% CBA, R^2 = 0,97). Perkiraan kasar menunjukkan bahwa penyerapan air partikel CBA sendiri hanya menyumbang sekitar 0,1 poin pada substitusi 20% dan 0,2 poin pada substitusi 40% terhadap penyerapan beton, jauh di bawah peningkatan terukur sebesar 0,9 dan 2,7 poin. Dengan demikian, sebagian besar peningkatan penyerapan air berasal dari porositas pasta dan zona transisi serta kepadatan campuran, bukan hanya dari pori di dalam partikel CBA, sehingga uji permeabilitas dan durabilitas tetap diperlukan.

TABEL 7. HASIL UJI PENYERAPAN AIR BETON UMUR 28 HARI

Variasi Substitusi	Penyerapan Air (%)	Simpangan Baku (%)
0% (kontrol)	3,8	0,20
10%	4,2	0,20
20%	4,7	0,20
30%	5,6	0,20
40%	6,5	0,20

3.5. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu, Kelebihan, dan Keterbatasan

Kuat tekan. Peningkatan kuat tekan pada substitusi 10–20% dan penurunannya pada kadar 30% ke atas sejalan dengan tinjauan Aygun et al. (2024) yang menyatakan bahwa substitusi sekitar 10–20% sering memberikan keseimbangan yang baik antara kemudahan pengerjaan dan kinerja beton. Pada substitusi 40%, penelitian ini mencatat penurunan kuat tekan sebesar 21,8% terhadap beton kontrol, sedangkan Ganesan et al. (2023) melaporkan peningkatan kuat tekan yang signifikan pada substitusi CBA hingga 40% ketika dikombinasikan dengan material semen tambahan yang sesuai. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kadar substitusi optimum tidak dapat dibandingkan secara langsung tanpa memperhatikan ada tidaknya material semen tambahan, perlakuan awal CBA, dan karakteristik material (Hamada et al., 2022; Tamanna et al., 2023). Campuran pada penelitian ini tidak menggunakan material semen tambahan sehingga batas kadar optimumnya lebih rendah.

Berat isi. Penurunan berat isi akibat substitusi material limbah yang lebih ringan juga dilaporkan oleh Smarzewski (2025) serta Manikandan dan Karuppusamy (2025). Pada penelitian ini penurunan maksimum hanya 6,5% pada substitusi 40%, sedangkan penurunan densitas yang bermakna pada beton ringan berbasis produk samping industri umumnya dicapai melalui agregat ringan atau sistem busa (Haddadian et al., 2023). Oleh karena itu hasil penelitian ini diposisikan sebagai beton normal dengan pengurangan berat isi yang kecil.

Kelebihan dan keterbatasan. Kelebihan penelitian ini adalah (i) rancangan campuran sederhana dengan satu variabel bebas sehingga pengaruh CBA dapat diidentifikasi secara langsung, (ii) evaluasi terpadu sifat beton segar dan keras pada tiga umur pengujian, serta (iii)

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

penentuan batas penggunaan untuk elemen struktural dan non-struktural. Keterbatasannya adalah (i) CBA berasal dari satu sumber sehingga hasil tidak dapat digeneralisasi untuk CBA lain, (ii) kadar semen dan air dijaga konstan sehingga kebutuhan air akibat penyerapan CBA tidak dikompensasi, (iii) substitusi dilakukan berdasarkan berat, bukan volume, (iv) jumlah benda uji hanya tiga per variasi sehingga uji signifikansi statistik bersifat indikatif, serta (v) durabilitas jangka panjang, mikrostruktur, dan uji pelindian zat berbahaya belum dievaluasi.

3.6. Implikasi terhadap Ekonomi Sirkular dan Lingkungan

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa substitusi CBA sebesar 20% terhadap berat agregat halus memberikan kuat tekan tertinggi dengan peningkatan penyerapan air yang masih moderat pada kondisi campuran yang diteliti. Pada kadar tersebut, kuat tekan beton umur 28 hari mencapai 28,1 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton normal sebesar 26,2 MPa, sementara penyerapan air masih lebih rendah dibandingkan variasi substitusi 30% dan 40%.

Klaim keberlanjutan pada penelitian ini perlu dibaca secara terbatas. Manfaat yang didukung langsung oleh data penelitian hanyalah pemanfaatan limbah CBA sebagai pengganti sebagian pasir alam. Sebagai indikator, massa pasir alam yang digantikan CBA adalah 65, 130, 195, dan 260 kg per m^3 beton pada substitusi 10%, 20%, 30%, dan 40% (Tabel 1), atau 130 kg per m^3 pada kadar optimum 20% (20% dari 650 kg pasir pada beton kontrol). Manfaat lingkungan lainnya, seperti berkurangnya dampak penambangan pasir, penurunan emisi karbon, serta keamanan lingkungan CBA yang meliputi potensi pelindian logam berat dan zat berbahaya, belum dibuktikan melalui analisis dampak lingkungan, penilaian daur hidup (life cycle assessment), maupun uji pelindian (misalnya TCLP), sehingga tidak diklaim sebagai hasil penelitian ini dan menjadi rekomendasi penelitian lanjutan.

Pemanfaatan CBA sebagai substitusi agregat halus berpotensi mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui pengurangan penggunaan pasir alam sekaligus meningkatkan pemanfaatan kembali limbah atau produk samping industri pembakaran batubara. Hamada et al. (2022) menyatakan bahwa pemanfaatan CBA sebagai agregat halus merupakan salah satu alternatif untuk mengurangi ketergantungan terhadap agregat alam dan meningkatkan pemanfaatan limbah industri dalam material konstruksi. Selanjutnya, Tamanna et al. (2023) menekankan bahwa pemanfaatan CBA dalam material konstruksi dapat memberikan manfaat lingkungan apabila dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik material, pengolahan, dan kebutuhan aplikasi.

Dari perspektif keberlanjutan, penggunaan CBA juga dapat dikembangkan melalui perlakuan awal atau pretreatment. Penelitian mengenai penggunaan CBA yang telah diberi perlakuan awal menunjukkan bahwa pengolahan material dapat membantu meningkatkan

kesesuaian CBA sebagai agregat halus serta memperbaiki kinerja beton. Kim et al. (2023) menunjukkan bahwa perlakuan awal terhadap CBA dapat meningkatkan kesesuaiannya sebagai agregat halus sekaligus memengaruhi kinerja teknis dan aspek lingkungan beton. Dengan demikian, pengembangan teknologi pengolahan CBA menjadi salah satu pendekatan penting untuk meningkatkan pemanfaatan limbah tersebut pada beton berkelanjutan.

Meskipun demikian, penerapan CBA pada beton struktural tetap memerlukan kajian lebih lanjut mengenai durabilitas jangka panjang, penetrasi ion klorida, karbonasi, serangan sulfat, permeabilitas, karakteristik mikrostruktur, uji pelindian (*leaching*) zat berbahaya, serta penilaian daur hidup (*life cycle assessment*). Abdulkadir et al. (2024) menunjukkan bahwa evaluasi CBA sebagai agregat halus tidak hanya perlu didasarkan pada kuat tekan, tetapi juga perlu mempertimbangkan aspek durabilitas dan keberlanjutan secara keseluruhan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, abu dasar batubara (coal bottom ash/CBA) berpotensi dimanfaatkan sebagai material substitusi sebagian agregat halus pada beton. Peningkatan persentase CBA menyebabkan penurunan nilai slump dari 85 mm pada beton kontrol menjadi 48 mm pada substitusi 40%, serta menurunkan berat isi beton dari 2.380 kg/m^3 menjadi 2.225 kg/m^3. Kondisi tersebut berkaitan dengan karakteristik CBA yang lebih berpori, tidak beraturan, dan memiliki daya serap air lebih tinggi dibandingkan pasir alam. Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa substitusi 10% dan 20% mampu meningkatkan kuat tekan dibandingkan beton kontrol. Kuat tekan tertinggi diperoleh pada substitusi 20%, yaitu 28,1 MPa pada umur 28 hari, dibandingkan 26,2 MPa pada beton kontrol. Namun, peningkatan substitusi menjadi 30% dan 40% menyebabkan kuat tekan menurun masing-masing menjadi 24,3 MPa dan 20,5 MPa. Penyerapan air juga meningkat dari 3,8% pada beton kontrol menjadi 6,5% pada substitusi 40%. Substitusi CBA sebesar 20% ditetapkan sebagai kadar optimum hanya berdasarkan kuat tekan umur 28 hari tertinggi pada parameter yang diuji (slump, berat isi, kuat tekan, dan penyerapan air), dengan peningkatan penyerapan air sebesar 23,7% terhadap beton kontrol. Kuat tekan substitusi 10% dan 20% tidak berbeda nyata secara statistik, sehingga 10% dapat dipandang sebagai alternatif yang lebih konservatif. Rekomendasi ini berlaku untuk CBA, rancangan campuran, dan kondisi pengujian pada penelitian ini serta belum dapat digeneralisasi untuk seluruh aplikasi beton struktural; substitusi 30% dan 40% tidak disarankan untuk elemen struktural utama, tetapi dapat dikaji untuk elemen non-struktural. Penurunan berat isi maksimum sebesar 6,5% tidak menjadikan beton tergolong beton ringan. Kontribusi penelitian ini adalah data empiris batas kadar substitusi CBA sebagai satu-satunya bahan substitusi pada beton normal mutu 25 MPa yang mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan, berat isi, dan penyerapan air; pada kadar 20%, CBA berpotensi menggantikan 130 kg pasir alam per m^3 beton. Manfaat lingkungan dan keberlanjutan masih bersifat potensi dan perlu dibuktikan melalui uji

Vol. 02 (02), Oktober 2026: Hal 71-90
DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549
e-ISSN: 2798-1975

durabilitas jangka panjang, uji pelindian, serta penilaian daur hidup; efisiensi material dan biaya konstruksi juga dapat menjadi peluang penelitian lanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Bahan Teknik Sipil Universitas Pradita atas dukungan fasilitas diberikan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulkadir, I., Ean, L. W., Wong, L. S., Murali, G., Mohammed, B. S., Amin, N. A. M. B. M., & Jaafar, R. A. H. B. R. (2024). Feasibility of coal bottom ash as fine aggregate in strain-hardening cementitious composites: A study on strength, durability, and sustainability. Construction and Building Materials, 457, 139379. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139379

Aygun, B. F., Bilir, T., & Uysal, M. (2024). Coal bottom ash and its applications in cement and concrete technologies: A review. Discover Civil Engineering, 1, 86. https://doi.org/10.1007/s44290-024-00090-y

Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. Jakarta: BSN.

Bheel, N., Keerio, M. A., Kumar, A., Shahzaib, J., Ali, Z., Ali, M., & Sohu, S. (2022). An investigation on fresh and hardened properties of concrete blended with rice husk ash as cementitious ingredient and coal bottom ash as sand replacement material. Silicon, 14, 677–688. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00906-3

Chindasiriphan, P., Meenyut, B., Orasutthikul, S., Jongvivatsakul, P., & Tangchirapat, W. (2023). Influences of high-volume coal bottom ash as cement and fine aggregate replacements on strength and heat evolution of eco-friendly high-strength concrete. Journal of Building Engineering, 65, 105791. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105791

Ganesan, H., Sachdeva, A., Petrounias, P., Lampropoulou, P., Sharma, P. K., & Kumar, A. (2023). Impact of fine slag aggregates on the final durability of coal bottom ash to produce sustainable concrete. Sustainability, 15(7), 6076. https://doi.org/10.3390/su15076076

Haddadian, A., Alengaram, U. J., Ayough, P., Mo, K. H., & Alnahhal, A. M. (2023). Inherent characteristics of agro and industrial by-products based lightweight concrete: A comprehensive review. Construction and Building Materials, 397, 132298. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132298

Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Adesina, A. (2022). Sustainable application of coal bottom ash as fine aggregates in concrete: A comprehensive review. Case Studies in Construction Materials, 16, e01109. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01109

Karalar, M., Bilir, T., Çavuşlu, M., Özkiliç, Y. O., & Sabri Sabri, M. M. (2022). Use of recycled coal bottom ash in reinforced concrete beams as replacement for aggregate. Frontiers in Materials, 9, 1064604. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1064604

Kim, J. E., Seo, J., Yang, K.-H., & Kim, H.-K. (2023). Cost and CO_2 emission of concrete incorporating pretreated coal bottom ash as fine aggregate: A case study. Construction and Building Materials, 408, 133706. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133706

Manikandan, A., & Karuppusamy, M. (2025). Sustainable concrete modified with industrial waste and natural fibre. Građevinar, 77(6), 553–566. https://doi.org/10.14256/JCE.4201.2024

Mulyadi, A., Yunanda, M., Suanto, P., & Yulius, Y. (2022). Analisis pemanfaatan limbah abu sekam padi sebagai pengisi dalam campuran mutu beton K.250. Jurnal Teknik Sipil, 11(2), 50–59. https://doi.org/10.36546/tekniksipil.v11i2.516

Rentier, E. S., & Cammeraat, L. H. (2022). The environmental impacts of river sand mining. Science of the Total Environment, 838(Part 1), 155877. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877

Smarzewski, P. (2025). Microstructure and mechanical properties of sustainable concrete incorporating used foundry sand and coal bottom ash. Sustainability, 17(13), 5983. https://doi.org/10.3390/su17135983

Suanto, P., Mulyadi, A., Trisnawati, I., & Eriyandi, A. (2025). Evaluation of the flexural performance of concrete FC'25 with the addition of coconut fiber. Jurnal Teknik Sipil UNPAL, 15(1), 59–68. https://doi.org/10.36546/tekniksipil.v15i1.1648

Suanto, P., Saloma, S., Nurjannah, S. A., & Ngian, S. P. (2025). Synthesis of Nanocellulose as a Sustainable Construction Material from Waste Paper Using the Alkaline Method at Low Temperature. Civ. Eng. Archit, 13, 175-192. https://doi.org/10.13189/cea.2025.130110

Suanto, P., & Dharsono, M. S. (2026). Experimental evaluation of the mechanical properties of geopolymer concrete using recycled coarse aggregates from construction waste. Jurnal Multidisiplin Indonesia, 5(7), 818–829. https://doi.org/10.58344/jmi.v5i7.2794

Tamanna, K., Raman, S. N., Jamil, M., & Hamid, R. (2023). Coal bottom ash as supplementary material for sustainable construction: A comprehensive review. Construction and Building Materials, 389, 131679. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131679

Kutipan Artikel

Pengki Suanto (2026), *Pemanfaatan Limbah Bottom Ash sebagai Substitusi Agregat Halus untuk Mengurangi Pasir Alam pada Beton*, JTD, Vol: 02, No: 02, Hal: 71-90: Oktober. DOI: https://doi.org/10.51170/jtd.v2i2.549