

Pemanfaatan Serbuk Batu Basalt Saloso sebagai Substitusi Parsial Pasir terhadap Kuat Tekan Beton

Yusuf Seven¹, Israel Padang², Jufri Manga³

¹, Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

^{2,3} Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

corresponding author : israelpadang@ukitoraja.ac.id

ABSTRAK

Kata Kunci:

Serbuk Batu Basalt
Substitusi Parsial
Agregat Halus
Kuat Tekan
Analisis Varians

Penambangan pasir alam yang berlebihan menimbulkan kelangkaan bahan dan kerusakan lingkungan, sehingga diperlukan bahan pengganti agregat halus. Serbuk batu basalt dari sisa pemahatan batu di Saloso, Kabupaten Toraja Utara, berpotensi menggantikan sebagian pasir dalam beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi parsial pasir dengan serbuk batu basalt (SB) sebesar 50%, 60%, dan 70% dari berat agregat halus terhadap kuat tekan beton dengan mutu rencana f_c 20 MPa. Campuran dirancang dengan SNI 7656:2012, dan 48 benda uji silinder 100 mm × 200 mm diuji kuat tekan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Serbuk batu basalt memiliki berat jenis jenuh kering permukaan 2,55, lebih tinggi daripada pasir (2,27), tetapi penyerapan airnya lebih besar (4,77% terhadap 0,60%), sehingga slump turun dari 95 mm pada beton kontrol menjadi 80–93 mm. Kuat tekan 28 hari beton kontrol sebesar 20,17 MPa, sedangkan beton SB 50%, 60%, dan 70% masing-masing 20,59 MPa, 20,17 MPa, dan 19,75 MPa, atau berubah +2,1%, 0,0%, dan -2,1%. Analisis varians satu arah menunjukkan bahwa perbedaan kuat tekan antarvariabel tidak signifikan pada seluruh umur pengujian ($p = 0,235-0,881$; $p = 0,878$ pada umur 28 hari). Serbuk batu basalt dapat menggantikan hingga 70% berat pasir tanpa perubahan kuat tekan yang nyata, dengan kadar 50–60% sebagai pilihan yang paling aman karena seluruhnya mencapai mutu rencana 20 MPa.

Keywords:

Basalt Stone Powder
Partial Replacement
Fine Aggregate
Compressive Strength
Analysis of Variance

ABSTRACT

Excessive mining of natural sand causes material scarcity and environmental damage, so substitutes for fine aggregate are needed. Basalt stone powder from stone carving waste in Saloso, North Toraja Regency, has the potential to partially replace sand in concrete. This study aims to analyze the effect of partially replacing sand with basalt stone powder (BP) at 50%, 60%, and 70% by weight of fine aggregate on the compressive strength of concrete with a design strength f_c of 20 MPa. The mix was designed according to SNI 7656:2012, and 48 cylindrical specimens of 100 mm × 200 mm were tested for compressive strength at 3, 7, 14, and 28 days. The basalt powder had a saturated surface-dry specific gravity of 2.55, higher than that of sand (2.27), but a greater water absorption (4.77% versus 0.60%), which reduced the slump from 95 mm for the control concrete to 80–93 mm. The 28-day compressive strength of the control concrete was 20.17 MPa, while concrete with 50%, 60%, and 70% BP reached 20.59 MPa, 20.17 MPa, and 19.75 MPa, changes of +2.1%, 0.0%, and -2.1%, respectively. One-way analysis of variance showed that the differences in compressive strength among the mixtures were not significant at any test age ($p = 0.235-0.881$; $p = 0.878$ at 28 days). Basalt stone powder can replace up to 70% of the sand by weight without a significant change in compressive strength, with 50–60% being the safest choice since these mixtures reached the design strength of 20 MPa.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



I. Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi utama yang tersusun atas semen, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan agregat menempati sekitar 60–75% volume beton [1], [2]. Karena porsinya yang besar, karakteristik agregat sangat menentukan kelecakan, kepadatan, dan kekuatan beton [3]. Agregat halus yang umum digunakan adalah pasir alam dari sungai atau galian. Penambangan pasir yang terus meningkat menimbulkan kelangkaan bahan di beberapa daerah, kenaikan harga, serta kerusakan alur sungai dan lingkungan sekitarnya, sehingga diperlukan bahan alternatif yang dapat menggantikan sebagian pasir alam tanpa menurunkan mutu beton.

Salah satu alternatif yang banyak dikaji adalah serbuk batu (rock dust atau quarry dust), yaitu butiran halus hasil pemecahan, penggergajian, atau pemahatan batu. Kajian pustaka menunjukkan bahwa serbuk batu dari berbagai jenis batuan dapat menggantikan sebagian pasir dengan kuat tekan yang setara atau lebih tinggi pada kadar tertentu, tetapi kandungan butir halus dan bentuk butir yang bersudut cenderung menurunkan kelecakan dan meningkatkan kebutuhan air [4]. Oleh karena itu, kadar substitusi yang tepat perlu ditentukan untuk setiap sumber batuan.

Batu basalt merupakan batuan beku vulkanik yang padat, keras, dan tahan lama. Batu basalt telah digunakan sebagai agregat kasar pada beton dan menghasilkan kuat tarik lentur 5,36 MPa pada umur 28 hari, melampaui kuat rencana 4,5 MPa [5]. Di Saloso, Kabupaten Toraja Utara, batu basalt diolah menjadi bahan kerajinan dan bahan bangunan, dan proses pemahatannya menghasilkan serbuk yang belum dimanfaatkan. Penelitian sebelumnya di Universitas Kristen Indonesia Toraja menunjukkan bahwa serbuk batu basalt memenuhi persyaratan sebagai agregat halus, tetapi penggunaannya sebagai pengganti pasir 100% menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah daripada beton dengan pasir alam [6]. Hal ini menunjukkan perlunya kajian substitusi parsial untuk menentukan proporsi yang tetap menghasilkan kuat tekan setara dengan beton normal.

Penelitian ini bertujuan: (1) memeriksa karakteristik serbuk batu basalt Saloso dibandingkan dengan pasir alam; (2) menganalisis pengaruh substitusi parsial pasir dengan serbuk batu basalt sebesar 50%, 60%, dan 70% dari berat agregat halus terhadap kelecakan dan kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari; dan (3) menguji signifikansi perbedaan kuat tekan antarvariasi secara statistik.

II. Metode Penelitian

A. Bahan Penelitian

Penelitian dilaksanakan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja. Agregat kasar berupa batu pecah berasal dari Lampan, Kecamatan Tondon Siba'ta, Kabupaten Toraja Utara, dan agregat halus berupa pasir alam berasal dari Tapparan, Kecamatan Rantetayo, Kabupaten Tana Toraja. Semen yang digunakan adalah semen Portland komposit (PCC) produksi Tonasa kemasan 50 kg, dan air berasal dari Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja.

Serbuk batu basalt diperoleh dari sisa pemahatan batu basalt di Saloso, Kabupaten Toraja Utara (Gambar 1). Serbuk digunakan sebagai pengganti sebagian pasir dalam keadaan butiran seperti yang dihasilkan dari proses pemahatan, dan karakteristiknya diperiksa dengan metode yang sama dengan agregat halus.



Gambar 1. Bahan Substitusi: (a) Batu Basalt di Saloso; (b) Serbuk Batu Basalt Sisa Pemahatan

B. Pengujian Material dan Perancangan Campuran

Karakteristik agregat kasar, pasir, dan serbuk batu basalt diperiksa melalui analisis saringan [7], kadar air [8], kadar lumpur [9], berat isi [10], serta berat jenis dan penyerapan agregat kasar dan halus [11], [12]. Campuran beton dirancang dengan metode SNI 7656:2012 [13] untuk mutu rencana $f'_c = 20$ MPa dengan slump rencana 75–100 mm, dan kelecakan beton segar diperiksa dengan uji slump [14].

C. Variasi Campuran dan Benda Uji

Variasi campuran terdiri atas beton kontrol (BK) dengan pasir alam 100% dan beton dengan serbuk batu basalt (SB) yang menggantikan 50%, 60%, dan 70% berat pasir. Substitusi dilakukan berdasarkan berat, sedangkan jumlah semen, air, dan agregat kasar dibuat tetap. Benda uji berupa silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm, sebanyak tiga benda uji untuk setiap variasi dan umur 3, 7, 14, dan 28 hari, sehingga jumlah seluruhnya 48 benda uji. Benda uji dilepas dari cetakan setelah 24 jam dan dirawat dengan perendaman dalam air hingga umur pengujian.

D. Pengujian Kuat Tekan dan Analisis Data

Sebelum diuji, benda uji diangkat dari bak perendaman dan dibiarkan kering permukaan selama ± 24 jam, kemudian ditimbang dan diukur. Kuat tekan diuji sesuai SNI 1974:2011 [15] dengan mesin uji tekan (Gambar 2) dan dihitung dengan:

$$f'_c = P / A \quad (1)$$

dengan P adalah beban maksimum (N) dan A adalah luas penampang silinder (7.850 mm²). Pengaruh substitusi dinyatakan dengan perubahan relatif terhadap beton kontrol dan keseragaman hasil dengan koefisien variasi:

$$\Delta = (\bar{x}_{SB} - \bar{x}_{BK}) / \bar{x}_{BK} \times 100\% \quad CV = s / \bar{x} \times 100\% \quad (2)$$

Signifikansi perbedaan antarvariasi pada setiap umur diuji dengan analisis varians (ANOVA) satu arah pada taraf 5%, dilengkapi dengan uji Tukey HSD untuk membandingkan setiap pasangan variasi [16]:

$$F = [\sum n_j(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2 / (k - 1)] / [\sum \sum (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (N - k)] \quad HSD = q_{\alpha,k;N-k} \sqrt{(KT_{galat} / n)} \quad (3)$$

dengan k = 4 variasi, n = 3 benda uji, N = 12, q adalah nilai studentized range, dan KT_{galat} adalah kuadrat tengah galat. Nilai HSD menyatakan selisih rata-rata terkecil yang dapat dinyatakan signifikan dengan jumlah benda uji yang digunakan.



Gambar 2. Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Silinder

III. Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Material

Hasil pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 1. Agregat kasar dan pasir alam memenuhi persyaratan sebagai bahan beton, dengan kadar lumpur masing-masing 0,81% dan 0,91%. Serbuk batu basalt memiliki kadar lumpur 0,84%, jauh di bawah batas 5% untuk agregat halus, sehingga tidak memerlukan pencucian.

Tabel 1. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar, Pasir Alam, dan Serbuk Batu Basalt

Jenis Pengujian	Standar	Syarat (halus)	Batu Pecah	Pasir Alam	Serbuk Basalt
Kadar air (%)	SNI 03-1971-1990	3–5	1,49	3,66	4,10
Kadar lumpur (%)	SNI 03-4142-1996	≤ 5	0,81	0,91	0,84

Jenis Pengujian	Standar	Syarat (halus)	Batu Pecah	Pasir Alam	Serbuk Basalt
Berat isi lepas (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,39	1,22	1,50
Berat isi padat (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998	1,2–1,9	1,54	1,40	1,60
Berat jenis curah	ASTM C127/C128	1,6–3,1	2,63	2,26	2,44
Berat jenis SSD	ASTM C127/C128	1,6–3,1	2,66	2,27	2,55
Berat jenis semu	ASTM C127/C128	1,6–3,1	2,73	2,29	2,76
Penyerapan (%)	ASTM C127/C128	0,2–5	1,44	0,60	4,77

Dibandingkan dengan pasir alam, serbuk batu basalt memiliki berat isi yang lebih tinggi (1,50 dan 1,60 g/cm³ terhadap 1,22 dan 1,40 g/cm³) dan berat jenis jenuh kering permukaan yang lebih tinggi (2,55 terhadap 2,27), yang menunjukkan butiran yang lebih padat dan gradasi yang mengisi rongga dengan lebih baik. Sebaliknya, penyerapan air serbuk basalt sebesar 4,77%, hampir delapan kali penyerapan pasir (0,60%), dan kadar airnya 4,10%. Nilai penyerapan yang tinggi menunjukkan adanya pori permukaan dan butir halus dalam jumlah besar, sehingga serbuk basalt berpotensi menyerap sebagian air pencampuran apabila tidak dalam keadaan jenuh kering permukaan. Karena digunakan sebagai pengganti pasir, kadar air dan penyerapan serbuk basalt dinilai dengan batas agregat halus, dan keduanya masih memenuhi batas tersebut.

B. Proporsi Campuran dan Keleccakan

Proporsi campuran per meter kubik dan untuk satu silinder (0,00157 m³), beserta nilai slump, disajikan pada Tabel 2. Kadar semen 316,8 kg/m³ dengan air 198,8 kg/m³ menghasilkan faktor air-semen 0,63. Pada beton SB 50%, 60%, dan 70%, berat pasir sebesar 668,1 kg/m³ digantikan oleh serbuk basalt sebesar 334,1 kg/m³, 400,9 kg/m³, dan 467,7 kg/m³.

Tabel 2. Proporsi Campuran Beton per Meter Kubik (per Silinder 0,00157 m³) dan Nilai Slump

Bahan	BK	SB 50%	SB 60%	SB 70%
Semen (kg)	316,85 (0,497)	316,85 (0,497)	316,85 (0,497)	316,85 (0,497)
Air (kg)	198,79 (0,312)	198,79 (0,312)	198,79 (0,312)	198,79 (0,312)
Batu pecah (kg)	1.141,73 (1,793)	1.141,73 (1,793)	1.141,73 (1,793)	1.141,73 (1,793)
Pasir alam (kg)	668,15 (1,049)	334,07 (0,524)	267,26 (0,420)	200,44 (0,315)
Serbuk basalt (kg)	–	334,07 (0,524)	400,89 (0,629)	467,70 (0,734)
Slump (mm)	95	93	80	82

Nilai slump beton kontrol sebesar 95 mm, sedangkan beton SB 50%, 60%, dan 70% masing-masing 93 mm, 80 mm, dan 82 mm. Seluruh campuran berada dalam rentang rencana 75–100 mm, tetapi slump turun hingga 15 mm pada kadar 60–70%. Penurunan ini sejalan dengan penyerapan air serbuk basalt yang tinggi, butir yang bersudut hasil pemahatan, dan luas permukaan butir halus yang lebih besar, yang menurut kajian pustaka merupakan penyebab umum turunnya keleccakan beton dengan serbuk batu [4].

Karena substitusi dilakukan berdasarkan berat dan berat jenis serbuk basalt lebih tinggi daripada pasir, volume absolut agregat halus berkurang. Pada SB 70%, volume agregat halus turun dari 0,294 m³ menjadi 0,272 m³ per m³ beton, atau berkurang sekitar 0,023 m³ (7,7% volume agregat halus). Pengurangan volume ini sedikit meningkatkan proporsi pasta per satuan volume beton dan perlu diperhitungkan apabila substitusi dilakukan pada skala lapangan.

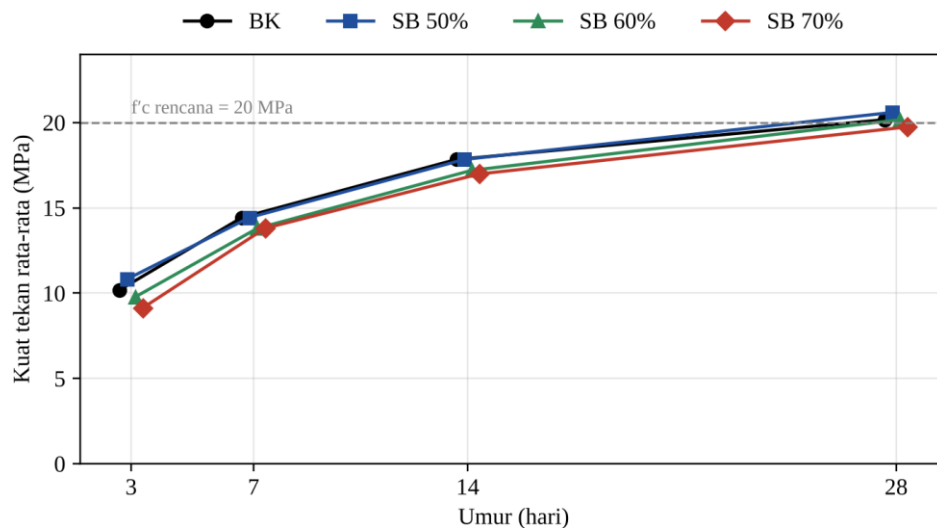
C. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan rata-rata pada setiap umur disajikan pada Tabel 3 dan perkembangannya ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai rata-rata dihitung ulang dari beban maksimum setiap benda uji dengan Persamaan (1).

Tabel 3. Kuat Tekan Rata-Rata Beton pada Berbagai Umur (MPa)

Umur (hari)	BK	SB 50%	SB 60%	SB 70%
3	10,19	10,83	9,77	9,13
7	14,44	14,44	13,80	13,80

Umur (hari)	BK	SB 50%	SB 60%	SB 70%
14	17,83	17,83	17,20	16,99
28	20,17	20,59	20,17	19,75
Δ terhadap BK, 28 hari (%)	—	+2,1	0,0	-2,1
f'_c 7 hari / f'_c 28 hari (%)	71,6	70,1	68,4	69,9



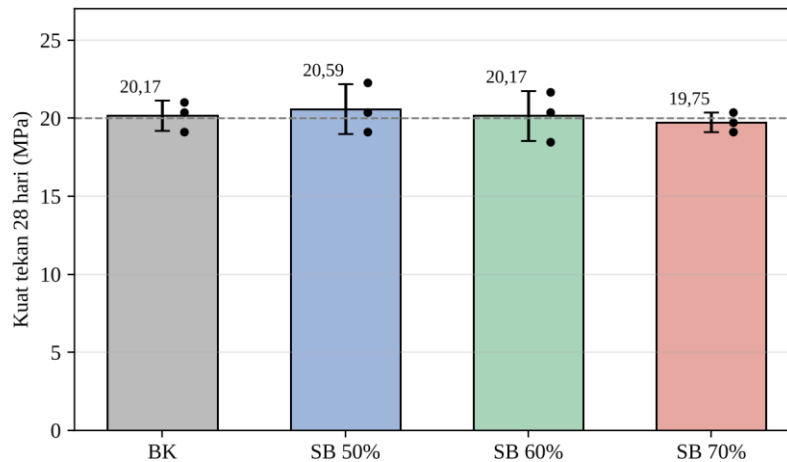
Gambar 3. Perkembangan Kuat Tekan Rata-Rata Beton terhadap Umur

Seluruh variasi menunjukkan pola perkembangan kuat tekan yang hampir sama. Pada umur 3 hari, beton SB 50% mencapai kuat tekan tertinggi sebesar 10,83 MPa, lebih tinggi 6,3% daripada beton kontrol (10,19 MPa), sedangkan SB 60% dan 70% sedikit lebih rendah (9,77 MPa dan 9,13 MPa). Pada umur 7 dan 14 hari, beton SB 50% sama dengan beton kontrol (14,44 MPa dan 17,83 MPa), sedangkan SB 60% dan 70% lebih rendah 3,6–4,8%. Rasio kuat tekan umur 7 hari terhadap umur 28 hari berada pada 68,4–71,6% untuk seluruh variasi, sehingga serbuk basalt tidak mengubah laju perkembangan kekuatan beton secara berarti.

Hasil kuat tekan setiap benda uji umur 28 hari disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 4. Kuat tekan beton kontrol sebesar 20,17 MPa, sedangkan beton SB 50%, 60%, dan 70% masing-masing 20,59 MPa, 20,17 MPa, dan 19,75 MPa, atau berubah +2,1%, 0,0%, dan -2,1%. Beton kontrol, SB 50%, dan SB 60% mencapai mutu rencana 20 MPa, sedangkan SB 70% berada 1,3% di bawah mutu rencana. Tidak ada campuran yang mencapai kuat tekan rata-rata perlu $f'_{cr} = f'_c + 8,3 = 28,3$ MPa yang disyaratkan apabila data deviasi standar tidak tersedia [13], [17], sehingga rancangan campuran perlu dikoreksi untuk penggunaan struktural.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari ($A = 7.850 \text{ mm}^2$)

Variasi	P benda uji 1/2/3 (kN)	f'_c benda uji (MPa)	Rata-rata (MPa)	s (MPa)	CV (%)
BK	160 / 150 / 165	20,38 / 19,11 / 21,02	20,17	0,97	4,8
SB 50%	175 / 150 / 160	22,29 / 19,11 / 20,38	20,59	1,60	7,8
SB 60%	170 / 160 / 145	21,66 / 20,38 / 18,47	20,17	1,60	7,9
SB 70%	150 / 155 / 160	19,11 / 19,75 / 20,38	19,75	0,64	3,2



Gambar 4. Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari, Simpangan Baku, dan Hasil Setiap Benda Uji

Koefisien variasi kuat tekan 28 hari berada pada 3,2–7,9%, sehingga keseragaman hasil beton dengan serbuk basalt termasuk baik dan sebanding dengan beton kontrol (4,8%). Beton SB 70% justru memiliki sebaran terkecil (CV 3,2%), meskipun nilai rata-ratanya sedikit lebih rendah.

D. Uji Signifikansi Statistik

Hasil ANOVA satu arah disajikan pada Tabel 5. Pada seluruh umur pengujian, nilai F hitung lebih kecil daripada F tabel 4,07 dan nilai p lebih besar daripada 0,05, sehingga perbedaan kuat tekan antara beton kontrol dan beton dengan serbuk basalt tidak signifikan. Uji Tukey pada umur 28 hari juga menunjukkan bahwa tidak ada pasangan variasi yang berbeda signifikan ($p = 0,845-1,000$).

Tabel 5. Hasil Analisis Varians Satu Arah Kuat Tekan ($df = 3; 8$; F tabel = 4,07)

Umur Pengujian	F hitung	Nilai p	Keputusan
3 hari	1,74	0,235	Tidak signifikan
7 hari	0,22	0,881	Tidak signifikan
14 hari	0,43	0,740	Tidak signifikan
28 hari	0,22	0,878	Tidak signifikan

Dengan kuadrat tengah galat $1,62 \text{ MPa}^2$ dan $q_{0,05;4;8} = 4,53$, nilai HSD pada umur 28 hari sebesar $3,33 \text{ MPa}$ atau sekitar 16,5% dari kuat tekan beton kontrol. Artinya, dengan tiga benda uji per variasi, penelitian ini hanya dapat mendeteksi perbedaan kuat tekan yang lebih besar dari sekitar $3,3 \text{ MPa}$. Selisih yang teramati ($0,42 \text{ MPa}$ atau $\pm 2,1\%$) jauh di bawah batas tersebut, sehingga kesimpulan yang tepat adalah bahwa serbuk basalt hingga 70% tidak menimbulkan perubahan kuat tekan yang besar, bukan bahwa kuat tekannya terbukti identik dengan beton kontrol.

E. Pembahasan

Kuat tekan yang setara dengan beton kontrol dapat dijelaskan oleh sifat serbuk basalt sebagai bahan yang keras dan padat. Berat jenis dan berat isi yang lebih tinggi daripada pasir menunjukkan butiran yang kuat dan susunan butir yang lebih rapat, dan butir halus serbuk dapat mengisi rongga antarbutir pasir dan agregat kasar sehingga meningkatkan kepadatan beton [4]. Di sisi lain, penyerapan air yang tinggi dan bentuk butir yang bersudut menurunkan kelecakan dan dapat mengurangi pemadatan pada kadar yang tinggi, yang kemungkinan menyebabkan sedikit penurunan kuat tekan pada SB 70%. Kedua pengaruh tersebut saling mengimbangi sehingga kuat tekan relatif tetap pada kadar 50–70%.

Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggantian pasir dengan serbuk basalt sebesar 100% menurunkan kuat tekan [6], sedangkan substitusi parsial hingga 70% masih menghasilkan kuat tekan yang setara. Dengan demikian, sebagian pasir alam tetap diperlukan untuk menjaga gradasi dan kelecakan campuran. Penggunaan serbuk sisa pemahatan juga memberi nilai tambah bagi limbah kerajinan batu di Saloso dan mengurangi kebutuhan penambangan pasir.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Gradasi serbuk basalt dan modulus kehalusan campuran pasir–serbuk belum dilaporkan, sehingga pengaruh gradasi terhadap hasil belum dapat dipisahkan. Koreksi air akibat penyerapan serbuk basalt tidak dilakukan, dan jumlah benda uji hanya tiga untuk setiap variasi dan umur. Selain itu, benda uji silinder $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ cenderung menghasilkan kuat tekan sedikit lebih tinggi daripada

silinder standar 150 mm × 300 mm. Penelitian lanjutan disarankan melaporkan gradasi dan kandungan butir lolos saringan No. 200, mengoreksi air pencampuran berdasarkan penyerapan, menambah jumlah benda uji, serta mengkaji kuat tarik belah, kuat lentur, dan durabilitas beton dengan serbuk basalt.

IV. Kesimpulan

Serbuk batu basalt Saloso memenuhi persyaratan sebagai agregat halus, dengan kadar lumpur 0,84%, berat jenis jenuh kering permukaan 2,55, dan berat isi yang lebih tinggi daripada pasir alam, tetapi penyerapan airnya tinggi (4,77%). Substitusi pasir dengan serbuk basalt menurunkan slump dari 95 mm menjadi 80–93 mm, dan seluruh campuran tetap berada dalam rentang rencana.

Kuat tekan 28 hari beton kontrol sebesar 20,17 MPa, sedangkan beton dengan serbuk basalt 50%, 60%, dan 70% masing-masing 20,59 MPa, 20,17 MPa, dan 19,75 MPa (+2,1%, 0,0%, dan -2,1%). Perbedaan kuat tekan tidak signifikan pada seluruh umur pengujian ($p = 0,878$ pada umur 28 hari).

Serbuk batu basalt dapat menggantikan hingga 70% berat pasir tanpa perubahan kuat tekan yang nyata. Kadar 50–60% merupakan pilihan yang paling aman karena menghasilkan kuat tekan yang mencapai mutu rencana 20 MPa dengan penurunan kecacakan yang lebih kecil.

Daftar Pustaka

- [1] T. Mulyono, *Teknologi Beton*. Yogyakarta, Indonesia: Andi, 2005.
- [2] I. Dipohusodo, *Struktur Beton Bertulang*. Jakarta, Indonesia: Gramedia Pustaka Utama, 1999.
- [3] P. K. Mehta dan P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, ed. ke-4. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.
- [4] M. Dobiszewska, O. Bagcal, A. Beycioğlu, D. Goulias, F. Köksal, M. Niedostatkiewicz, dan H. Ürünveren, "Influence of rock dust additives as fine aggregate replacement on properties of cement composites—A review," *Materials*, vol. 15, no. 8, Art. no. 2947, 2022, doi: 10.3390/ma15082947.
- [5] N. A. Ramadhani, D. Oktarina, dan A. Gumay, "Analisis kuat tarik lentur beton dengan menggunakan material batu basalt (studi kasus: $f_s = 4,5$ MPa)," *Jurnal Rekayasa, Teknologi, dan Sains*, vol. 6, no. 2, pp. 66–68, 2022.
- [6] Restika, "Studi kelayakan serbuk batu basalt sebagai agregat halus pada campuran beton," Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, 2024.
- [7] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1968-1990 Metode Pengujian tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-1971-1990 Metode Pengujian Kadar Air Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1990.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 mm)*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1996.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 03-4804-1998 Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*. Jakarta, Indonesia: BSN, 1998.
- [11] *ASTM C127-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.
- [12] *ASTM C128-15 Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2012.
- [14] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
- [15] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2011.
- [16] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, ed. ke-9. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [17] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2019.