

Comparison of the Effect of Coffee Ground Biochar Produced via Closed Pyrolysis on Concrete Compressive Strength [Perbandingan Pengaruh Biochar Ampas Kopi Hasil Pirolisis Tertutup Terhadap Kuat Tekan Beton]

Yan Syahrial Tyas Ekarosa¹⁾, 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. Concrete is a widely used construction material due to its relatively high compressive strength and the ready availability of its constituent materials. However, the continuous use of natural aggregates and the increasing volume of organic waste have created a need for more environmentally friendly alternative materials. One material with potential for utilization is spent coffee grounds, which can be processed into biochar via pyrolysis. This study aimed to investigate the effect of using biochar derived from spent coffee grounds (produced via closed pyrolysis) as a partial substitute for fine aggregate on concrete compressive strength; to compare the compressive strength of normal concrete with that of biochar-containing concrete; and to determine the substitution percentage that yields the best compressive strength results. An experimental laboratory study was conducted using concrete with a target grade of K-300. The spent coffee ground biochar was produced through closed pyrolysis at 300°C for 2 hours and used to substitute fine aggregate at levels of 0%, 5%, 10%, and 15%. Cylindrical specimens (10 cm in diameter and 20 cm in height) were tested for compressive strength at 7, 14, and 28 days. The results indicate that the use of spent coffee ground biochar affects concrete compressive strength. The 5% substitution variation yielded the highest average compressive strength at 28 days (17.04 MPa), compared to 14.82 MPa for normal concrete. For the 10% and 15% variations, the 28-day compressive strengths were 12.48 MPa and 8.90 MPa, respectively. None of the variations met the K-300 target strength of 24.9 MPa. In conclusion, the 5% biochar substitution yielded the highest compressive strength among the tested variations, whereas increasing the biochar percentage beyond 5% tended to reduce the concrete's compressive strength.

Keywords – Spent Coffee Ground Biochar, Closed Pyrolysis, Fine Aggregate Substitution, Concrete Compressive Strength, K-300

Abstrak. Beton merupakan salah satu material konstruksi yang banyak digunakan karena memiliki kuat tekan yang relatif tinggi dan bahan penyusunnya mudah diperoleh. Namun, penggunaan agregat alam secara terus-menerus serta meningkatnya jumlah limbah organik mendorong perlunya pemanfaatan material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu material yang berpotensi dimanfaatkan adalah ampas kopi yang diolah menjadi biochar melalui proses pirolisis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan biochar ampas kopi hasil pirolisis tertutup sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap kuat tekan beton, mengetahui perbandingan kuat tekan beton normal dengan beton yang menggunakan biochar, serta menentukan persentase substitusi yang memberikan hasil kuat tekan terbaik. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan beton mutu rencana K-300. Biochar ampas kopi dibuat melalui pirolisis tertutup pada temperatur 300°C selama 2 jam dan digunakan sebagai substitusi agregat halus sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm, kemudian diuji kuat tekannya pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biochar ampas kopi memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton. Variasi 5% menghasilkan kuat tekan rata-rata tertinggi pada umur 28 hari, yaitu sebesar 17,04 MPa, sedangkan beton normal sebesar 14,82 MPa. Pada variasi 10% dan 15%, kuat tekan umur 28 hari masing-masing sebesar 12,48 MPa dan 8,90 MPa. Seluruh variasi belum mencapai target mutu K-300 sebesar 24,9 MPa. Berdasarkan hasil penelitian, substitusi biochar sebesar 5% memberikan nilai kuat tekan tertinggi dibandingkan variasi lainnya, sedangkan peningkatan persentase biochar di atas 5% cenderung menurunkan kuat tekan beton.

Kata Kunci – Biochar Ampas Kopi, Pirolisis Tertutup, Substitusi Agregat Halus, Kuat Tekan Beton, K-300

I. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang banyak digunakan dalam pembangunan berbagai infrastruktur, seperti gedung, jembatan, jalan, bendungan, dan struktur lainnya. Penggunaan beton yang luas disebabkan oleh beberapa keunggulan, antara lain memiliki kuat tekan yang relatif tinggi, bahan penyusunnya mudah

diperoleh, serta dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan konstruksi. Dalam perencanaan beton, proporsi bahan penyusun seperti semen, air, agregat halus, dan agregat kasar harus ditentukan secara tepat agar beton yang dihasilkan memenuhi persyaratan kekuatan dan kemudahan pengerjaan. Tata cara pemilihan campuran beton normal, beton berat, dan beton massa di Indonesia salah satunya mengacu pada SNI 7656:2012 [1].

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan pembangunan, penggunaan beton dalam jumlah besar juga menyebabkan kebutuhan terhadap bahan penyusunnya semakin meningkat. Kondisi tersebut mendorong berkembangnya penelitian mengenai beton yang lebih ramah lingkungan melalui pemanfaatan material alternatif dan limbah sebagai bagian dari bahan penyusun beton. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah memanfaatkan limbah organik yang tersedia dalam jumlah besar sebagai material alternatif dalam campuran beton. Pemanfaatan limbah tersebut tidak hanya bertujuan mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan, tetapi juga dapat menjadi salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan sumber daya alam pada material konstruksi [2].

Salah satu jenis limbah organik yang berpotensi untuk dimanfaatkan adalah ampas kopi atau *spent coffee grounds* (SCG). Ampas kopi merupakan residu yang dihasilkan setelah proses penyeduhan kopi. Meningkatnya konsumsi kopi menyebabkan jumlah ampas kopi yang dihasilkan juga semakin besar. Apabila tidak dikelola dengan baik, ampas kopi dapat menjadi limbah yang menimbulkan permasalahan lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan alternatif pemanfaatan ampas kopi yang dapat memberikan nilai tambah, salah satunya melalui pengolahan menjadi biochar untuk digunakan dalam material konstruksi [3].

Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan melalui proses konversi termokimia biomassa pada kondisi oksigen terbatas. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan biochar adalah pirolisis. Proses pirolisis dapat mengubah karakteristik fisik dan kimia bahan organik, termasuk kadar karbon, struktur pori, luas permukaan, serta karakteristik lainnya. Karakteristik biochar yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan kondisi proses pirolisis, seperti temperatur, laju pemanasan, waktu tinggal, serta kondisi oksigen selama proses berlangsung [4].

Penggunaan biochar dalam material berbasis semen telah banyak diteliti karena biochar memiliki struktur berpori yang dapat memengaruhi karakteristik beton. Struktur pori tersebut memungkinkan biochar menyerap dan menyimpan air yang selanjutnya berpotensi memberikan efek *internal curing* pada beton. Selain itu, partikel biochar yang berukuran kecil dapat mengisi rongga-rongga pada matriks beton sehingga berpotensi meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan memperbaiki zona transisi antara pasta semen dan agregat [4]. Namun, pengaruh biochar terhadap kuat tekan beton tidak selalu sama karena sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, temperatur pirolisis, ukuran partikel, kadar penggunaan, metode pengolahan, serta cara penerapannya dalam campuran beton [5].

Penelitian mengenai pemanfaatan ampas kopi sebagai material beton telah dilakukan oleh Roychand dkk. dengan menggunakan ampas kopi mentah dan ampas kopi hasil pirolisis sebagai pengganti sebagian agregat halus. Dalam penelitian tersebut, *spent coffee grounds* digunakan sebagai substitusi agregat halus dengan tingkat penggantian sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% berdasarkan volume. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ampas kopi mentah dapat menurunkan kuat tekan beton karena senyawa organik yang terdapat pada ampas kopi dapat menghambat proses hidrasi semen. Sebaliknya, proses pirolisis pada temperatur 350 °C menghasilkan biochar ampas kopi yang memberikan peningkatan sifat material dan menghasilkan peningkatan kuat tekan beton hingga 29,3% pada kondisi campuran tertentu [6].

II. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian **eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif**. Penelitian eksperimental dilakukan dengan memberikan perlakuan tertentu terhadap benda uji dalam kondisi yang dikendalikan, kemudian mengamati perubahan yang terjadi pada parameter yang diteliti.

Dalam penelitian ini, perlakuan yang diberikan berupa penggunaan biochar ampas kopi hasil pirolisis tertutup sebagai substitusi parsial agregat halus dalam campuran beton. Persentase biochar ampas kopi yang digunakan terdiri atas 0%, 5%, 10%, dan 15%. Beton dengan substitusi 0% digunakan sebagai beton kontrol atau beton normal, sedangkan variasi 5%, 10%, dan 15% digunakan untuk mengetahui pengaruh peningkatan persentase biochar terhadap kuat tekan beton.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase biochar ampas kopi sebagai substitusi parsial agregat halus. Variabel terikat adalah kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari. Sementara itu, variabel kontrol meliputi jenis semen, jenis agregat, sumber air, metode pencampuran, metode pencetakan, metode pemadatan, kondisi curing, umur pengujian, serta prosedur pengujian.

Pemilihan metode eksperimental dilakukan agar pengaruh penggunaan biochar dapat diamati secara langsung melalui perbandingan antara beton normal dengan beton yang menggunakan biochar pada berbagai persentase substitusi. Penelitian terdahulu yang secara khusus menggunakan *spent coffee grounds* yang dipirolisis sebagai pengganti sebagian pasir menunjukkan bahwa material tersebut dapat digunakan pada tingkat substitusi agregat halus

dan bahwa proses pirolisis memengaruhi performa material dalam beton. Roychand et al. melaporkan penggunaan spent coffee grounds terpirolisis sebagai pengganti pasir pada beberapa tingkat substitusi dan memperoleh peningkatan kuat tekan pada kondisi tertentu.

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, 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. 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 mm². 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 Ampas Kopi

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.

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	368,48	369,5	370,82	369,6

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

Sample 1:

$$MKB = \frac{368,48}{100} = 3,68$$

Sample 2:

$$MKB = \frac{369,50}{100} = 3,69$$

Sample 3:

$$MKB = \frac{370,83}{100} = 3,70$$

Rata-rata

$$MKB = \frac{355,60}{100} = 3,69$$

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 abu ampas kopi sebesar 3,69. Berdasarkan hasil analisis, limbah abu ampas kopi 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 Organik Abu Ampas Kopi

Pengujian kadar organik abu ampas kopi dilakukan dengan cara pengendapan sendimen selama 24 jam pada tabung ukur dengan penambahan larutan NaOH guna mengekstrak senyawa organik yang ada

Tabel 2.Data Hasil Pengujian Kadar Organik

Keterangan	Hasil
Berat pasir (gram)	240
NaOH (gram)	7,2
Warna	Bening kekuningan ☐ Bening ☐ Bening kekuningan ☐ Coklat ☐ Coklat kehitaman ☒ Hitam

Dari hasil praktikum menggunakan benda uji agregat halus sebanyak 240 gram dengan merendam sampel agregat halus dalam larutan Natrium Hidroksida (NaOH) 3% selama 24 jam. Larutan NaOH bersifat basa dan akan mengekstrak senyawa organik yang ada, menghasilkan warna pada larutan di atas sampel. Intensitas warna yang terbentuk menjadi indikator kadar zat organik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa setelah 24 jam, warna larutan adalah hitam. Berdasarkan standar dan literatur acuan, hasil ini termasuk dalam kategori warna Hitam (No.4) menandakan bahwa kandungan zat organik dalam agregat halus masih tergolong tinggi dan tidak sesuai dengan SNI 2816:2014.

puran.

C. Hasil Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan prosedur dalam SNI 03-2834-2000 [19] dengan target mutu beton K-300 (setara $f_c \approx 24$ 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 0,52 berdasarkan grafik hubungan FAS dengan kuat tekan beton untuk semen Portland tipe.

Tabel 3. Hasil *Mix Design*

Bahan	Beton Normal	AAB 1 (kg)	AAB 2 (kg)	AAB
Semen	185	185	185	185
Air	356	356	356	356
Agregat kasar	1.187	1.187	1.187	1.187
Agregat Halus	668	634	601	567
Limbah Abu Kopi	0	33	66	100
Total	2,398	2,398	2,398	2,398

Perbedaan proporsi campuran antara Beton Normal, AAB1 (05% Abu Ampas Kopi), AAB2 (10% Abu Ampas Kopi), dan AAB3 (15% Abu Ampas Kopi) terletak pada substitusi agregat halus dengan AAB1. Pada AAB1, 5% dari agregat halus (0.033 kg) diganti dengan AAB1. Pada AAB2, 10% dari agregat halus (0.066kg) diganti dengan AAB2. Pada AAB3, 15% dari agregat halus (0.100kg) diganti dengan AAB3. Jumlah air dan semen tetap sama untuk semua variasi untuk mengisolasi pengaruh substitusi dan penambahan serat terhadap kuat tekan 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
AAB 1 (5% Abu Ampas Kopi)	8,5
AAB 2 (10% Abu Ampas Kopi)	4,5
AAB 3 (15% Abu Ampas Kopi)	5

Berdasarkan hasil pengujian slump, penambahan abu ampas kopi memengaruhi kelecakan campuran beton. Beton normal memiliki nilai slump tertinggi sebesar 9,0 cm, sedangkan nilai slump terendah diperoleh pada variasi 10% abu ampas kopi, yaitu 4,5 cm. Variasi 5% abu ampas kopi menghasilkan nilai slump sebesar 8,5 cm, yang masih mendekati beton normal sehingga memiliki *workability* yang baik. Secara keseluruhan, semakin tinggi persentase penambahan abu ampas kopi, semakin rendah nilai slump beton karena meningkatnya penyerapan air dan berkurangnya air bebas dalam campuran beton. Hasil ini juga sejalan dengan pengujian kuat tekan, di mana variasi 5% memberikan keseimbangan terbaik antara *workability* dan kuat tekan beton.

E. Interpretasi Umum dan Keterkaitan dengan Penelitian Sebelumnya

Hubungan antara biochar ampas kopi dan kuat tekan beton dapat dijelaskan melalui perubahan karakteristik campuran setelah sebagian agregat halus digantikan. Pada beton normal, agregat halus berfungsi mengisi rongga di antara agregat kasar dan membantu menghasilkan struktur beton yang padat. Ketika sebagian pasir digantikan biochar, susunan granular berubah karena biochar mempunyai karakteristik ukuran, berat jenis, bentuk, tekstur, dan porositas yang berbeda dari pasir. Hasil penelitian Roychand dkk. menunjukkan bahwa coffee biochar hasil pirolisis dapat memberikan peningkatan kuat tekan ketika digunakan sebagai pengganti agregat halus pada proporsi tertentu [3]. Hal tersebut menjadi dasar bahwa variasi 5%, 10%, dan 15% perlu dibandingkan dengan beton normal 0% untuk mengetahui pengaruh aktual biochar ampas kopi hasil pirolisis tertutup pada sistem campuran yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, kajian biochar dalam beton menunjukkan bahwa perbedaan bahan baku, temperatur pirolisis, ukuran partikel, persentase penggunaan, dan kondisi curing dapat menghasilkan respons beton yang berbeda [2][7]. Hal tersebut menunjukkan adanya kebutuhan untuk melakukan penelitian berdasarkan karakteristik biochar dan kondisi penggunaannya secara spesifik.

Pada beton normal, agregat halus berfungsi mengisi rongga di antara agregat kasar dan membantu menghasilkan struktur beton yang padat. Ketika sebagian pasir digantikan biochar, susunan granular berubah karena biochar mempunyai karakteristik ukuran, berat jenis, bentuk, tekstur, dan porositas yang berbeda dari pasir. Hasil penelitian Roychand dkk. menunjukkan bahwa coffee biochar hasil pirolisis dapat memberikan peningkatan kuat tekan ketika digunakan sebagai pengganti agregat halus pada proporsi tertentu [3]. Hal tersebut menjadi dasar bahwa variasi 5%, 10%, dan 15% perlu dibandingkan dengan beton normal 0% untuk mengetahui pengaruh aktual biochar ampas kopi hasil pirolisis tertutup pada sistem campuran yang digunakan dalam penelitian ini.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji saringan, abu ampas kopi memiliki gradasi butiran yang didominasi oleh ukuran halus dengan persentase lolos saringan No. 4 sebesar 98,39%, No. 50 sebesar 64,52%, dan No. 200 sebesar 3,05%. Berdasarkan perbandingan dengan gradasi agregat halus menurut SNI, abu ampas kopi termasuk gradasi Zona IV (pasir sangat halus). Karakteristik ini menunjukkan bahwa abu ampas kopi lebih tepat berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) atau substitusi sebagian semen, bukan sebagai pengganti agregat halus secara penuh. Penggunaan dalam kadar optimum (5%) dapat meningkatkan kepadatan campuran beton, sedangkan penggunaan yang terlalu tinggi cenderung menurunkan kuat tekan beton.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak ada satu pun variasi campuran yang mencapai target mutu K-300 pada umur 28 hari. Beton normal hanya menghasilkan kuat tekan rata-rata 14,82 MPa, sedangkan beton dengan penambahan AAB1 5% mencapai 17,04 MPa. Walaupun nilai tersebut merupakan yang tertinggi dalam penelitian ini, kuat tekannya masih berada 7,86 MPa di bawah target mutu K-300.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa abu ampas kopi dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambah atau substitusi sebagian semen dalam campuran beton, namun penggunaannya harus dibatasi pada kadar tertentu. Variasi 5% abu ampas kopi merupakan komposisi yang paling optimum pada penelitian ini karena memberikan peningkatan kuat tekan dibandingkan beton normal serta masih memiliki nilai slump yang baik. Sementara itu, penggunaan abu ampas kopi sebesar 10% dan 15% menyebabkan penurunan *workability* dan kuat tekan beton,

sehingga kurang efektif digunakan untuk beton mutu K-300 dengan komposisi campuran yang digunakan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7656:2012: Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2012. SNI 7656:2012 tercatat berstatus berlaku di BSN.
- [2] X. Lin, W. Li, Y. Guo, W. Dong, A. Castel, and K. Wang, "Biochar-cement concrete toward decarbonisation and sustainability for construction: Characteristic, performance and perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 419, 138219, 2023.
- [3] R. Roychand, S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, G. Zhang, and C. Q. Li, "Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength," *Journal of Cleaner Production*, vol. 419, 138205, 2023. Penelitian ini secara langsung menggunakan ampas kopi mentah dan hasil pirolisis sebagai substitusi agregat halus pada kadar 5–20% volume.
- [4] J. Singh, R. Roychand, A. M. H. S. M. Al-Aghbari, J. Li, M. Saberian, and S. Kilmartin-Lynch, "Engineering biochar-enhanced cementitious materials: A comprehensive review of production-performance relationships and optimization strategies for sustainable construction," *Journal of Building Engineering*, vol. 120, 115404, 2026.
- [5] DZ. Zhao, A. El-Naggar, J. Kau, C. Olson, D. Tomlinson, and S. X. Chang, "Biochar affects compressive strength of Portland cement composites: A meta-analysis," *Biochar*, vol. 6, no. 1, p. 21, 2024.
- [6] R. Roychand, S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, G. Zhang, and C. Q. Li, "Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength," *Journal of Cleaner Production*, vol. 419, 138205, 2023.
- [7] R. Roychand, S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, and C. Q. Li, "Translating lab success to the field: Evaluating coffee biochar-enhanced concrete in real-world construction," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, e04233, 2025.
- [8] N. Badan, Standarisasi, "SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder," 2011.
- [9] A. C-33, "Standard Specification for Concrete Aggregates," 2016.
- [10] N. Badan, Standarisasi, "SNI 03-1750-1990 Agregat Beton," 1990.
- [11] Barbhuiya, S., Das, B. B., & Kanavaris, F. (2024). *Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability*. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>.
- [12] Zhao, et al. (2024). *Biochar affects compressive strength of Portland cement composites: a meta-analysis*. *Biochar*, 6, 2
- [13] L. S. Ho and T.-P. Huynh, "Recycled waste medical glass as a fine aggregate replacement in low environmental impact concrete: Effects on long-term strength and durability performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 368, p. 133144, 2022.
- [14] S. Malhotra, A. Kanoung, and A. Goyal, "Utilization of Industrial and Agricultural Wastes to Enhance the Properties of Concrete—A Review," in *International Conference on Transportation Infrastructure Projects: Conception to Execution*, Springer, 2022, pp. 91–101.
- [15] M. R. Olii, I. E. Poe, I. Ichsan, and A. Olii, "AAB1 sebagai pengganti sebagian agregat halus untuk beton ramah lingkungan," *J. Tek.*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.37031/jt.v11i1.805

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.