

Karakteristik Beton *Eco-friendly* Menggunakan Kombinasi Material *Recycle*

Lisa Febriani^{*}, Suryanti R. Tonapa, Desi Sandy

Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar

*lisa@ukipaulus.ac.id

Diajukan : 24 Januari 2026, Revisi : 27 Januari 2026, Diterima : 01 Februari 2026

Abstract

Eco-friendly concrete in this study refers to porous concrete which characteristically has a reference pore number according to ACI 522R-10. In this study the substitute materials used were slag as a substitute for coarse aggregate by 85% and charcoal ash as a substitute for cement with variations of 8%, 12% and 16%. The test specimens used were 15x30 cm cylinders for strength tests and 10x20cm cylinders for flow concrete tests. The characteristic tests carried out were compressive strength, tensile strength, pore number and permeability tests. From the test results, the compressive strength of the S85%+AA12% test specimen increased by 8.33% while the compressive strength of the S85% + AA16% test specimen decreased by 18.94% from the S85%+AA8% test specimen. For the tensile strength test, the S85%+AA12% test specimen increased by 15.78% while the S85%+AA16% test specimen decreased by 8.77% from the S85%+AA8% test specimen. The resulting void ratio test yielded a value of around 16%, with a permeability of 0.9 cm/s to 1.2 cm/s. These test results demonstrate that waste materials such as slag and charcoal ash can be used sustainably as components for eco-friendly concrete.

Keywords: Charcoal ash, Eco-friendly concrete, Characteristics, Slag

Abstrak

Beton eco-friendly pada penelitian ini merujuk pada beton porous yang secara karakteristik mempunyai acuan angka pori menurut ACI 522R-10. Dalam penelitian ini material substitusi yang digunakan adalah slag sebagai pengganti agregat kasar sebesar 85% dan abu arang sebagai pengganti semen dengan variasi 8%, 12% dan 16%. Benda uji yang digunakan adalah silinder 15x30 cm untuk uji kekuatan dan silinder 10x20cm untuk uji beton alir. Uji karakteristik yang dilakukan adalah uji kuat tekan, kuat tarik, angka pori dan permeabilitas. Dari hasil pengujian kuat tekan benda uji S85%+AA12% naik sebesar 8,33% sedangkan kuat tekan benda uji S85%+AA16% turun sebesar 18,94% dari benda uji S85%+AA8%. Untuk uji kuat tarik benda uji S85%+AA12% naik sebesar 15,78% sedangkan benda uji S85%+AA16% turun sebesar 8,77% dari benda uji S85%+AA8%. Pada uji angka pori nilai yang dihasilkan berkisar 16% dengan permeabilitas dikisaran 0,9 cm/detik sampai 1,2 cm/detik. Hasil pengujian ini menyajikan bahwa material buangan seperti slag dan abu arang dapat dimanfaatkan sebagai material penyusun beton eco-friendly secara berkelanjutan.

Kata kunci: Abu arang, Beton *eco-friendly*, Karakteristik, *Slag*

1. PENDAHULUAN

Setiap industri material memiliki hasil produksi yang berupa material utama dan material sampingan. Material sampingan itu adalah material buangan yang dapat mengancam lingkungan jika tidak diolah menjadi material yang tepat guna. Di Indonesia banyak cara yang dilakukan untuk memanfaatkan kembali material buangan ini, dapat berupa

kerajinan, energi serta recycle material. Saat ini banyak peneliti memanfaatkan material buangan sebagai material substitusi serta material utama dalam membentuk beton normal, beton mutu tinggi dan jenis beton lainnya. Pemanfaatan material buangan ini diharapkan dapat membantu para pemerhati lingkungan serta masyarakat dalam menjaga lingkungan dan seluruh komponen didalamnya.

Konektivitas antara lingkungan, dapat dilakukan dengan memanfaatkan material buangan menjadi produk yang berguna. Material buangan dalam penelitian ini adalah slag dan abu arang, yang dimanfaatkan sebagai bahan penyusun beton eco-friendly. Beton eco-friendly ini merujuk pada beton porous sekaligus memanfaatkan bahan buangan untuk dipakai menjadi produk tepat guna. Pada penelitian ini slag yang digunakan adalah slag baja sebagai agregat kasar dan abu arang sebagai bahan substitusi semen.

Dalam sejarah yang dikemukakan oleh ACI, penggunaan beton berpori di daerah Eropa pada tahun 1930-an digunakan sebagai material konstruksi perumahan. Selain itu beton berpori hasil penelitian, dipakai sebagai pengembangan material konstruksi bangunan industri, sarana publik, dan bangunan domestik diutara daerah Arktik, yang menjadi solusi praktis ditengah biaya transportasi batu bata yang tinggi dan bahaya kebakaran kayu. Selain itu karena angka porositasnya yang dapat mencapai 35%, beton porous juga dipakai sebagai perkerasan beton yang dapat mengendalikan kelebihan air hujan, mengurangi aquaplaning pada permukaan jalan raya serta dapat mengurangi kebisingan akibat interaksi ban dan permukaan jalan (ACI Committee 522, 2010).

Beton eco-friendly yang diteliti dalam jenis beton porous telah dilakukan dengan menggunakan slag nikel sebagai bahan substitusi agregat kasar sebesar 0%, 30%, 50% dan 70%. Dari setiap variasi substitusi secara berurutan menunjukkan peningkatan berat volume sebesar 2153 kg/m³, 2398 kg/m³, 2608 kg/m³, dan 2817 kg/m³. Demikian halnya yang ditunjukkan oleh kuat tekan pada umur 28 hari, secara berurutan variasi nilainya meningkat yaitu 5,01 MPa; 5,08 MPa; 5,89 MPa; 8,31 MPa. Pada angka pori berada dikisaran 15,9% sampai 16,7% berdasarkan standar masuk pada rentang nilai yang disyaratkan (Febriani & Sandy, 2020).

Memanfaatkan limbah sisa pembakaran bambu untuk campuran beton merupakan alternatif untuk mendukung keberlanjutan penelitian beton yang ramah lingkungan. Penambahan abu arang bambu pada komposisi campuran beton normal telah diobservasi. Dengan melihat pengaruh penambahan sebesar 0%, 2%, 4% dan 8% dari berat semen, mutu yang dihasilkan mengalami peningkatan disetiap variasinya. Secara berurutan nilai penambahan abu arang bambu, kuat tekan umur 28 hari yang dihasilkan adalah 20,85 MPa; 21,89 MPa; 26,61 MPa dan 31,89 MPa. Terjadi peningkatan kekuatan sekitar 53% untuk penambahan abu arang bambu 8% jika dibandingkan tanpa penambahan abu arang (Faturohman Hidayat et al., 2021).

Gabungan material slag nikel dan slag baja telah diteliti dalam eksperimen yang meninjau sifat mekanik beton mutu tinggi. Dalam eksperimen ini ditetapkan slag nikel sebesar 50% bahan pengganti agregat halus dan slag baja dengan variasi 0%, 15% dan 30% dari bahan pengganti agregat kasar. Mutu beton yang ditetapkan adalah 42 MPa dengan menerapkan metode campuran SNI 03-2834-2000. Dari aktivitas pengujian dan analisis yang dilakukan diperoleh hasil kuat tekan umur 28 hari menurut rangkaian variasi substitusi adalah 43,76 MPa; 44,516 MPa; 45,271 MPa. Nilai kuat tarik belah beton yang diperoleh menurut rangkaian variasi adalah 3,397 MPa; 4,199 MPa dan 4,907 MPa serta

nilai kuat lentur beton yang dihasilkan adalah 3,224 MPa; 4,131 MPa dan 5,089 MPa (Lian Tiranda et al., 2021).

Sisa proyek konstruksi yang biasa menjadi limbah yaitu genteng. Pecahan genteng sebagai limbah sampai sekarang ini dipakai menjadi alternatif pemakaian material bahan konstruksi, yang sejalan dengan konsep material konstruksi hijau. Dalam observasi laboratorium yang telah dilakukan, limbah genteng dipakai sebagai bahan pengganti sebagian agregat kasar pada campuran beton dengan meninjau sifat mekanik beton keras. Proporsi penggantian agregat kasar yaitu 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Penurunan nilai kuat tekan terjadi seiring dengan kenaikan persentase limbah genteng, dengan kuat tekan acuan 0% adalah 22,55 MPa, serta persentase penurunan kekuatan secara berurutan yaitu 4%, 8%, 11% dan 12% dari nilai acuan. Begitu juga pada nilai kuat tarik belah, terjadi penurunan, secara urutan variasi sebesar 4%, 9%, 13% dan 18% dari nilai acuan sebesar 3,35 MPa. Kemudian seiring dengan kedua sifat mekanik yang sebelumnya, kuat lentur pun mengalami penurunan, secara urutan variasi sebesar 8%, 11%, 16% dan 21% dari nilai acuan sebesar 4,95 MPa (Fadhilla et al., 2022).

Abu arang tempurung kelapa dijadikan alternatif substitusi bahan campuran beton khususnya semen, sebagai bagian dari tindakan untuk menjaga kelestarian lingkungan yang memanfaatkan limbah industri. Fokus penelitian yang dilakukan yaitu mereduksi sebagian penggunaan semen dengan substitusi abu arang tempurung kelapa sebesar 0%, 5%, 10% dan 15%. Rancangan campuran yang diterapkan pada eksperimen ini yaitu metode perencanaan mix design ACI 211.1-91 untuk mendapatkan komposisi berdasarkan mutu rencana 25 MPa. Dari hasil proses pengujian serta perhitungan didapatkan nilai kuat tekan beton rata-rata 28 hari yang fluktuatif dengan acuan nilai persentase AAT 0% sebesar 37,95 MPa terjadi reduksi kekuatan sebesar 18%, 25% dan 19% secara berurutan angka variasi AAT. Namun nilai kekuatan pada setiap ragam substitusi memenuhi mutu rencana 25 MPa (Megastia et al., 2022).

Keberlanjutan inovasi pemberdayaan limbah yang didasarkan pada aspek 4R yaitu *reduce*, *refurbish*, *reuse* dan *recycle* diperlukan untuk membantu analisa dampak lingkungan. Memberdayakan limbah merupakan opsi yang dilakukan untuk mengurangi eksploitasi alam yang dapat berdampak buruk bagi lingkungan. Hal ini ditunjukkan dengan mengelola limbah industri, limbah pertanian serta limbah konstruksi sebagai pengganti sebagian material penyusun beton. Dalam penelitian yang berfokus memanfaatkan limbah cangkang telur dan granit yang diproses menjadi serbuk yang setara dengan butiran agregat halus dan limbah beton yang dimanfaatkan sebagai material pengganti agregat kasar, yang diperuntukkan sebagai material pembentuk beton memadat mandiri (SCC). Dengan mutu rencana 41,4 MPa, hasil optimum ditunjukkan pada kombinasi 40% serbuk cangkang telur, 20% serbuk granit dan 20% limbah beton dengan nilai tegangan hancur umur 7 hari mencapai angka 80,36 MPa dan dapat mereduksi nilai anggaran sebesar 29,92% jika dibandingkan dengan beton tanpa inovasi pemberdayaan limbah (Gunarso et al., 2024).

Pemanfaatan limbah industri khususnya slag nikel masih sangat terbatas, sehingga dibutuhkan cara dan produk inovatif yang dapat mendukung konsep konstruksi berkelanjutan tanpa menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan. Fokus penelitian yang melihat potensi slag nikel sebagai material limbah yang dipakai sebagai bahan pengganti agregat halus pada beton memadat mandiri (SCC) guna mengetahui kekuatan dan ketahanan terhadap korosi. Karakteristik beton segar SCC terpenuhi begitu juga pengujian kuat tekan berdasarkan mutu rencana K350 juga terpenuhi serta evaluasi

terhadap ketahanan pada kondisi lingkungan korosi juga terpenuhi. Sehingga slag nikel dapat menjadi material alternatif berkelanjutan yang dapat mengatasi permasalahan limbah industri (Fitriyanti et al., 2025).

Beton dengan komposisi material daur ulang yang mencapai 50% kualitasnya hampir sama dengan beton konvensional, namun jika pemakaian material daur ulang telah lebih dari 50% mengakibatkan angka porositas besar yang memicu penurunan kualitas beton. Hal ini berbanding terbalik dengan uji lingkungan agresif, dimana beton dengan material daur ulang 100% serta fly ash memiliki ketahanan sulfat yang baik jika dievaluasi dengan sampel uji menurut variasi komposisi material daur ulang (Tommy et al., 2025) .

Kontribusi limbah yang dapat diberdayakan sebagai material alternatif untuk formulasi beton yang optimal, dapat memberikan perkembangan khususnya dalam material konstruksi ramah lingkungan. Hal ini ditunjukkan dengan kecenderungan inovasi global yang mendapat atensi dari banyak penelitian yang mampu menggantikan agregat alami tanpa kehilangan mutu sebagai solusi berkesinambungan(Xiao et al., 2022). Namun ditengah keberadaan agregat daur ulang yang menjanjikan produk beton yang progresif, terdapat beberapa kendala yang belum terselesaikan secara optimal. Variasi kualitas dan cara pengolahan yang beragam merupakan salah satu deskripsi keterbatasan yang dimaksudkan (Marsh et al., 2022).

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, agregat kasar slag yang digunakan adalah dari PT. Barawajaya serta split lokal dengan diameter maksimum $\frac{3}{4}$ inci. Sisa pembakaran kayu yang dipakai pada penelitian ini merupakan abu arang yang diperoleh dari limbah industri. Sampel yang digunakan pada pengujian karakteristik beton keras (kuat tekan, kuat tarik belah dan angka pori) adalah silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm sedangkan untuk pengujian beton alir digunakan benda uji dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Jumlah benda uji keseluruhan adalah 90 benda uji. Selanjutnya benda uji disetiap kombinasi variasi diberi kode S85%+AA8% untuk slag 85% dan abu arang 8%, kode S85%+AA12% untuk slag 85% dan abu arang 12%, serta kode S85%+AA16% untuk slag 85% dan abu arang 16%.



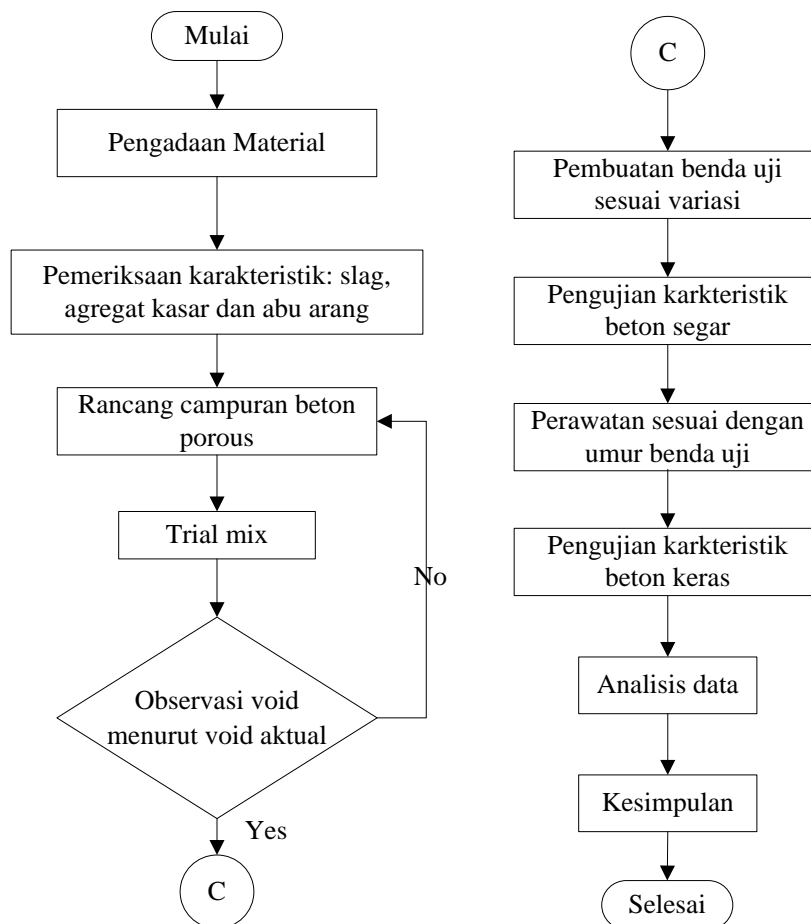
Gambar 1. Abu arang



Gambar 2. Visualisasi butiran Slag

a. Diagram alir penelitian

Tahapan penelitian pada laboratorium dirancang sesuai dengan kebutuhan serta alur penelitian. Secara deskripsi, alur penelitian dilaboratorium diberikan pada gambar berikut:



Gambar 3. Rancang alur penelitian

Alur penelitian yang dirancang, harus dilakukan sesuai dengan tahapan yang ditentukan. Adapun dalam proses trial mix, dapat terjadi proses yang dievaluasi sebagai catatan penting dalam melakukan pembuatan benda uji.

b. Mix design beton dan uji karakteristik

Dari pemeriksaan karakteristik material yang telah dilakukan selanjutnya dibuat *mix design* beton porous yang mengacu pada ACI 522R-10 yang diperlihatkan pada tabel berikut:

Tabel 1. *Mix design* beton porous

Deskripsi penentuan <i>mix design</i>	Nilai
Void Content	17.0 %
Volume rencana adukan	1 m ³
Menentukan Berat Agregat (lihat ukuran agregat)	
a. Berat agregat kasar dalam unit volume agregat kasar, (gembur) (b)	1801 kg/m ³
b. Berat agregat kasar dalam unit volume beton (telah dikompaksi), (b ₀)	1854 kg/m ³
c. Nilai rasio perbandingan b/b ₀	0.97
d. Nilai rasio perbandingan b/b ₀ berdasarkan referensi	0.99
Merubah berat agregat kedalam kondisi SSD (<i>Saturated Surface Dry</i>)	
a. Penyerapan (Absorpsi)	1.32 %
b. Berat agregat kasar dalam volume beton (kondisi SSD)	1843 kg/m ³
Menentukan Volume Pasta	
Paste Content	25.00 %
Volume pasta dalam adukan beton (V _p)	0.250 m ³
Menentukan Berat Semen	
Rasio air semen (w/c)	0.28
Berat semen (c) ,	420.17 kg/m ³
Menentukan Berat Air	
Weight of water (w),	117.65 kg/m ³
Menentukan Volume Padat	
Volume Agregat (V _a),	0.579 m ³
Volume Semen (V _c)	0.133 m ³
Volume Air (V _w)	0.118 m ³
Total Volume Solid (V _s)	0.830 m ³
Check Persentase Void	
Jumlah Void	20.45 %
Check Perkiraan Permeabilitas	
Void Aktual	20.45 %
Permeabilitas	3.67 in/min 1.55 mm/s
Komposisi <i>Mix Design</i> dalam 1 m³	
Berat Semen	420.2 kg
Berat Air	117.6 kg
Berat Agregat Kasar (<i>slag</i>)	1566.7 kg
Berat Agregat Kasar (<i>split</i>)	276.5 kg
Total Berat	2381 kg

Setiap tahapan perhitungan campuran, tetap diperiksa berdasarkan syarat yang ditentukan oleh ACI 522R-10. Komposisi material yang didapatkan, menjadi dasar untuk memperoleh jumlah material limbah yang perhitungan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Komposisi *mix design* setiap variasi

Material	Komposisi (dalam 1 m ³)		
	8% abu arang	12% abu arang	16% abu arang
Semen (kg)	386.6	369.7	352.9
Abu arang (kg)	33.6	50.4	67.2
Slag (kg)	1566.7	1566.7	1566.7
Split (kg)	276.5	276.5	276.5

Setelah penentuan komposisi dari setiap variasi ditetapkan, trial mix serta evaluasi dilakukan, maka tahapan pembuatan benda uji boleh dilakukan. Untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, benda uji yang dipakai adalah silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, sedangkan uji permeabilitas menggunakan sampel uji diameter 10 cm dan tinggi 20 cm.

**Gambar 4.** Benda uji kuat tarik belah

Gambar 5. Benda uji kuat tekan



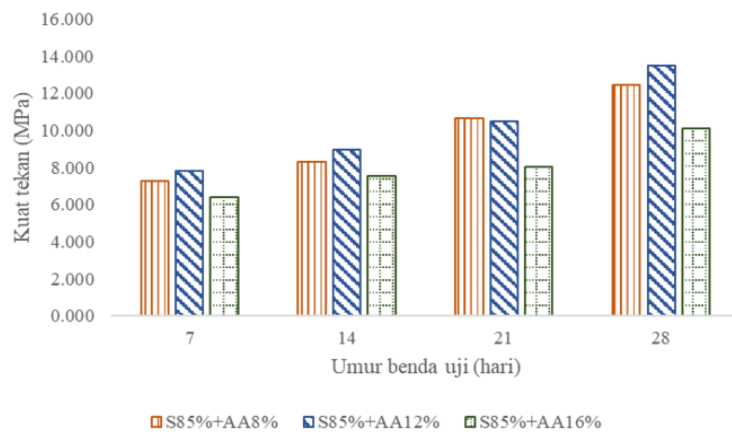
Gambar 5. Uji permeabilitas beton

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Berikut ini adalah hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, angka pori dan permeabilitas dari benda uji sesuai dengan variasi yang diberikan:

Tabel 3. Tabel hasil pengujian kuat tekan umur 28 hari

Benda Uji	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
S85%+AA8%	75	9.927	9.707
	75	9.927	
	70	9.265	
S85%+AA12%	95	12.575	13.457
	100	13.236	
	110	14.560	
S85%+AA16%	80	10.589	10.589
	85	11.251	
	75	9.927	

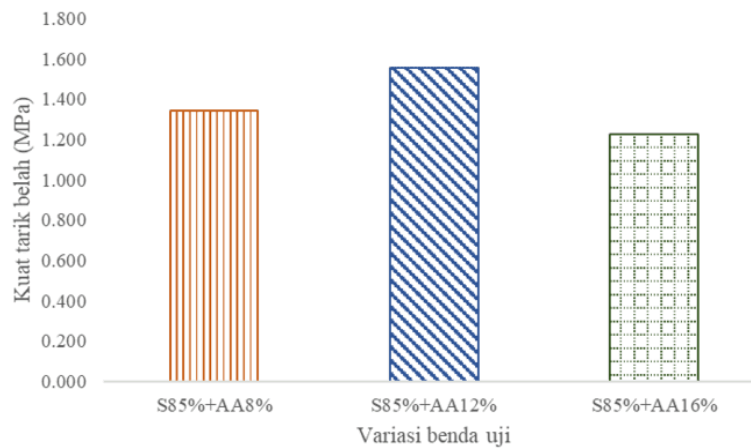


Gambar 6. Bar chart untuk pengujian kuat tekan

Dari hasil pengujian kuat tekan beton diperoleh terjadi peningkatan kekuatan dimulai dari variasi pertama dengan nilai 9,7 MPa ke variasi kedua dengan nilai rata-rata kuat tekan 28 hari 13,5 MPa namun terjadi penurunan kekuatan pada variasi ketiga.

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tarik belah umur 28 hari

Benda Uji	Beban Maksimum (KN)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Belah Rata-rata (MPa)
S85%+AA8%	100	1.415	1.345
	90	1.274	
	95	1.345	
S85%+AA12%	120	1.699	1.557
	110	1.557	
	100	1.415	
S85%+AA16%	90	1.274	1.227
	90	1.274	
	80	1.132	

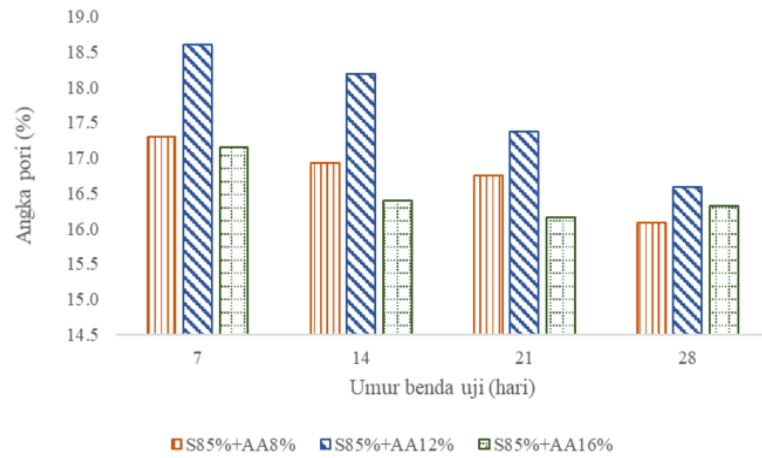


Gambar 7. Bar chart untuk pengujian kuat tarik belah

Dari hasil pengujian kuat tarik belah beton diperoleh terjadi peningkatan kekuatan seperti halnya pada pengujian kuat tarik belah beton. Nilai kuat tarik belah terbesar ada pada benda uji S85%+AA12% dengan nilai 1,56 MPa.

Tabel 5. Hasil uji angka pori

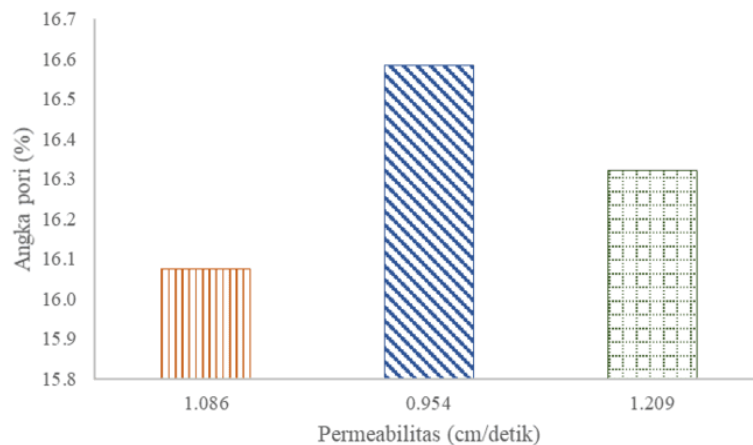
Umur benda uji	Angka Pori		
	S85%+AA8%	S85%+AA12%	S85%+AA16%
7	17.3	18.6	17.2
14	16.9	18.2	16.4
21	16.7	17.4	16.2
28	16.1	16.6	16.3



Gambar 8. Bar chart untuk angka pori

Tabel 6. Hasil uji permeabilitas

Benda uji	Berat Beton Segar (kg)	Berat Beton dalam Air (kg)	Berat Beton Diudara (kg)	Waktu (detik)	Permeabilitas rata-rata (cm/detik)
S85%+AA8%	4.19	2.39	3.75	17.56	1.086
	4.12	2.33	3.63	17.67	
	4.12	2.35	3.67	17.81	
S85%+AA12%	4.24	2.40	3.74	20.15	0.954
	4.26	2.41	3.72	20.29	
	4.39	2.50	3.85	19.95	
S85%+AA16%	4.19	2.31	3.64	15.78	1.209
	4.27	2.34	3.66	15.64	
	4.24	2.40	3.71	16.23	



Gambar 9. Bar chart permeabilitas

Dari hasil pengujian angka pori didapatkan nilai angka pori berkisar antara 16-17%, kemudian pada hasil pengujian permeabilitas beton alir, didapatkan nilai terkecil berada pada variasi S85%+AA12% dengan nilai 0,954 cm/detik. Dari kedua hasil pengujian tersebut menunjukkan hasil yang berpadanan dengan hasil pengujian kekuatan.

4. KESIMPULAN

Pengujian karakteristik telah dilakukan pada setiap benda uji dengan variasi yang telah ditentukan. Pemakaian slag sebagai agregat kasar dan substitusi abu arang pada beton porous dapat dipakai sebagai material alternatif dalam pembuatan beton eco-friendly. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk semua karakteristik nilai optimum berada pada variasi S85%+AA12% dengan nilai kuat tekan 13,46 MPa, nilai kuat tarik belah 1,56 MPa, dengan angka pori dan permeabilitas secara berturut-turut 16% dan 0,95 cm/detik. Nilai-nilai tersebut memenuhi standar ACI 522R-10. Dengan demikian kombinasi tersebut dapat dipakai sebagai material konstruksi sederhana serta secara berkesinambungan dapat dilakukan penelitian dengan meninjau durabilitas berdasarkan kondisi lingkungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 522. (2010). *Report on Pervious Concrete*. American Concrete Institute.
- Fadhilla, A., Ashad, H., Fadhil, A., & Maruddin, M. (2022). Pemanfaatan Limbah Genteng sebagai Substitusi Agregat Kasar Terhadap Sifat-Sifat Mekanik pada Beton. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 7(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.33096/vm1jfk03>
- Faturohman Hidayat, T., Herlina, N., & Al-Huseiny, S. (2021). PENGARUH PENAMBAHAN ABU ARANG BAMBU SEBAGAI BAHAN TAMBAH PADA SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON NORMAL. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 3(1).
- Febriani, L., & Sandy, D. (2020). Application of viscosity modifying admixture (VMA) in eco-friendly concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 1464(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1464/1/012051>
- Fitriyanti, Ismawati, & Annisa, H. (2025). Evaluasi Kinerja Beton Self-Compacting Concrete (SCC) Mutu Tinggi dengan Substitusi Slag Nikel sebagai Agregat Halus. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 10(3), 278–287. <https://doi.org/10.33096/c3g3f509>
- Gunarso, Dian Purnamawanti, D. A., & Reki Arbianto. (2024). INOVASI ECO-FRIENDLY SELF COMPACTING CONCRETE MENGGUNAKAN SERBUK CANGKANG TELUR, SERBUK GRANIT, DAN LIMBAH BETON UNTUK MENGURANGI LIMBAH DI INDONESIA. *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 29(1), 10–16. <https://doi.org/10.36728/jtsa.v29i1.3027>
- Lian Tiranda, Y., Parung, H., & Sandy, D. (2021). Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi Dengan Kombinasi Slag Nikel Dan Slag Baja. *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*, 3(1). <http://ojs.ukipaulus.ac.id/index.php/pcej>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>

- Megastia, G., Marthin, L., Sumajow, D. J., & Dapas, S. O. (2022). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Lokal dan Abu Arang Tempurung Kelapa sebagai Substitusi Parsial Semen. *Jurnal Sipil Statik*, 10(2), 135–142.
- Tommy, A. S., Jaya, R. P., & Zainuddin, A. (2025). Pemanfaatan Bahan Daur Ulang dalam Pembuatan Beton Ramah Lingkungan. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Arsitektur (JRSA)*, 1(1), 45–60. <https://doi.org/10.51903/xxx.xxx>
- Xiao, J., Tang, Y., Chen, H., Zhang, H., & Xia, B. (2022). Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132895. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>