BOUWPLANK
Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Lingkungan
Vol. 6 No. 2, Oktober 2026

E-ISSN 2807-5579
P-ISSN 2807-5889
Halaman 156-164

Pengaruh Penggunaan Agregat Daur Ulang Dari Limbah *Paving block* Sebagai Pengganti Agregat Alami Terhadap Sifat Segar dan Kuat Tekan Beton Hibrida Berbasis *Fly ash*

Septian Bagus Perkasa[1*], Abdul Halim[2], Dafid Irawan[3]

[1]PT. PLN (Persero)
[2,3]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Gama, Malang
*Email Korespondensi: septianperkasa@gmail.com

ABSTRAK

Kebutuhan akan material konstruksi yang ramah lingkungan mendorong pemanfaatan Limbah Pembangunan dan Pembongkaran (C&D *waste*) seperti limbah *paving block*, guna mengurangi ketergantungan pada agregat alami. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terhadap sifat segar serta kuat tekan beton sekaligus menentukan variasi campuran optimum. Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan alternatif substitusi material konstruksi yang berkelanjutan serta mendukung pengurangan dampak lingkungan akibat limbah. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental laboratorium dengan rancangan 9 variasi campuran, di mana porsi *fly ash* ditetapkan konstan sebesar 25% dari total bahan pengikat serta variasi substitusi agregat halus dan kasar daur ulang dilakukan pada tingkat 0%, 50%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar agregat daur ulang cenderung menurunkan nilai *fly ash* (berkisar antara 10,7 cm hingga 12,4 cm) akibat tingginya penyerapan air pada mortar lama, namun seluruh variasi tetap memenuhi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*). Uji ANOVA membuktikan adanya pengaruh signifikan substitusi agregat terhadap kuat tekan (P-value = 0,001218 < 0,05 α), di mana variasi optimum dicapai pada kode A2B0 (100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang) dengan kuat tekan sebesar 13,59 MPa, atau meningkat 51,8% dibandingkan beton kontrol A0B0 (8,95 MPa).

Kata Kunci: Limbah Paving, *Fly ash*, Kuat Tekan Beton, *Fly ash Test*, dan Beton Hibrida.

ABSTRACT

The need for environmentally friendly construction materials is driving the use of construction and demolition (C&D) waste—such as paving block waste—to reduce dependence on natural aggregates. This study aims to analyze the effect of using recycled aggregates from paving block waste on the fresh properties and compressive strength of concrete, while also determining the optimal mix design. The benefits of this study are to provide a sustainable alternative for construction material substitution and to support the reduction of environmental impacts caused by waste. The research method used was a laboratory experiment with a design of 9 mix variations, in which the fly ash content was kept constant at 25% of the total binder, and the substitution of recycled fine and coarse aggregates was varied at levels of 0%, 50%, and 100%. The results showed that increasing the proportion of recycled aggregates tended to lower the fly ash value (ranging from 10.7 cm to 12.4 cm) due to high water absorption in the old mortar; however, all variations still met the workability criteria. An ANOVA test confirmed a significant effect of aggregate substitution on compressive strength (P-value = 0.001218 < 0.05 α), with the optimal variation achieved in code A2B0 (100% recycled fine aggregate and 0% recycled coarse aggregate), yielding a compressive strength of 13.59 MPa—a 51.8% increase compared to the control concrete A0B0 (8.95 MPa).

Keywords: *Paving Waste, Fly ash, Concrete Compressive Strength, Fly ash Test, and Hybrid Concrete.*

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang dominan digunakan karena ketersediaan bahan penyusun, kemudahan pembentukan, dan kemampuan memikul beban tekan. Namun, pemakaian agregat alam dalam volume besar dan penggunaan bahan pengikat berbasis semen menimbulkan kebutuhan untuk mengembangkan pendekatan material yang lebih efisien terhadap sumber daya. Salah satu strategi yang relevan adalah mengombinasikan pemanfaatan agregat daur ulang dari limbah konstruksi dengan bahan *cementitious* tambahan seperti *fly ash*. Naskah sumber penelitian menempatkan limbah *paving block* sebagai material berbasis semen dan agregat yang masih dapat diolah menjadi agregat daur ulang. Limbah *paving block* memiliki karakteristik yang berbeda dari agregat alam karena permukaannya dapat mengandung mortar lama [1]. Kondisi tersebut berkaitan dengan perubahan berat jenis, tekstur, porositas, dan penyerapan air yang pada akhirnya dapat memengaruhi *workability* serta kuat tekan. Kajian terbaru yang secara khusus meneliti *concrete paving block* waste juga menunjukkan bahwa agregat *paving block* daur ulang layak dikaji sebagai pengganti agregat alam, tetapi pengaruhnya tetap bergantung pada fraksi agregat, tingkat substitusi, dan karakteristik material hasil sortasi [2]. *Fly ash* memberikan mekanisme tambahan berupa reaksi pozzolanik pada matriks beton. Dalam penelitian sumber, *fly ash* ditetapkan konstan sebesar 25% dari total bahan pengikat untuk memfokuskan analisis pada variasi agregat daur ulang. Kombinasi tersebut penting karena penyerapan air agregat daur ulang dan perubahan rheologi pasta akibat *fly ash* dapat saling memengaruhi [3]. Penelitian mengenai beton dengan *recycled aggregate* dan *fly ash* juga menunjukkan bahwa sifat agregat, kadar substitusi, dan komposisi binder secara bersama-sama memengaruhi kekuatan dan kinerja beton.

Celah penelitian yang ditangani studi ini adalah kombinasi khusus limbah *paving block* sebagai sumber agregat daur ulang halus dan kasar dengan *fly ash* yang dipertahankan konstan, lalu dievaluasi secara bersamaan melalui parameter *fly ash* dan kuat tekan umur 28 hari. Sembilan kombinasi tingkat substitusi 0%, 50%, dan 100% memberikan desain faktorial praktis untuk melihat kecenderungan kinerja campuran. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh substitusi agregat *paving* daur ulang terhadap sifat segar. Menganalisis pengaruh substitusi terhadap kuat tekan 28 hari. Menentukan variasi yang memberikan kombinasi kinerja paling baik. *Research gap* dari penelitian sebelumnya yaitu sebagian penelitian *recycled aggregate* menggunakan limbah beton umum, bukan limbah *paving block* yang mempunyai karakteristik sumber material berbeda. Penelitian mengenai *paving block* waste telah berkembang tetapi belum seluruhnya mengombinasikan penggunaan agregat daur ulang halus dan kasar secara simultan. Penelitian mengenai *recycled aggregate* concrete dan *fly ash* telah menunjukkan adanya potensi kombinasi kedua material tersebut, tetapi fokusnya banyak menggunakan *recycled concrete aggregate* dari beton konstruksi umum. Penggunaan *fly ash* sebagai bagian tetap sebesar 25% memberikan kondisi yang memungkinkan penelitian lebih terfokus pada pengaruh perubahan agregat daur ulang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan material komposit yang dihasilkan dari pengikatan dan pengerasan campuran antara semen hidraulis, air, agregat halus, agregat kasar, serta dengan atau tanpa bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Kualitas beton yang dihasilkan sangat bergantung pada ketepatan proporsi campuran yang digunakan. Mengacu pada SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan proporsi untuk beton normal, beton berat, dan beton massa, perancangan proporsi campuran beton harus mempertimbangkan pemenuhan dua aspek utama [4]. Aspek tersebut meliputi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*) pada kondisi beton segar, serta pencapaian kuat tekan rencana dan keawetan (*durability*) pada kondisi beton keras. Standar ini menegaskan bahwa keberhasilan suatu proporsi adukan sangat ditentukan oleh pengontrolan parameter utama, salah satunya adalah rasio antara air dan bahan pengikat [5].

2.2 FABA

FABA merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran Batubara yang biasanya dilakukan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) [6]. Dalam proses pembakaran Batubara umumnya menghasilkan 80-90% *Fly ash* (FA) dan 10-20% *Bottom Ash* (BA). Secara fisis berdasarkan SNI 03-6414-2002, FA tergolong limbah hasil pembakaran Batubara yang berbentuk halus dan besar secara memiliki sifat *pozalonik* [7] [8].

2.3 Limbah *Paving block*

Paving block merupakan salah satu material konstruksi berbasis semen, agregat halus, dan air yang dimanfaatkan secara luas sebagai lapis perkerasan non-struktural pada pekarangan, jalan lingkungan, maupun area parkir. Peningkatan aktivitas pembangunan dan manufaktur beton secara langsung meningkatkan volume limbah, baik berupa sisa pecahan *paving block* (*demolition/crushed waste*) maupun limbah industri/domestik yang dimanfaatkan kembali menjadi bahan komposit *paving block* (eco-*paving block*) [9].

Pemanfaatan limbah dalam teknologi perkerasan *paving block* sejatinya memiliki dua orientasi utama. Pertama, pengelolaan limbah sisa bongkaran atau *paving block* rusak yang dihancurkan kembali untuk dimanfaatkan sebagai substitusi agregat kasar maupun halus pada campuran beton baru. Kedua, substitusi material penyusun *paving block* menggunakan limbah non-organik (seperti limbah plastik PET/LDPE, abu terbang/*fly ash*, maupun limbah kaca) guna mengurangi ketergantungan pada penggunaan semen Portland dan pasir alami [10]. Penggunaan limbah sebagai agregat Daur Ulang (*Recycled Concrete Aggregate*) atau bahan pengikat (binder) terbukti mampu menjaga performa fisik dan mekanis *paving block* agar tetap memenuhi kriteria Standar Nasional Indonesia (SNI 03-0691-1996) tentang Bata Beton (*Paving block*) [11]. Selain memperbaiki efisiensi biaya produksi, pendekatan ini menjadi bagian penting dari penerapan prinsip ekonomi sirkuler dan konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*) untuk menekan beban pencemaran lingkungan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian merupakan eksperimen laboratorium yang membandingkan beton kontrol dengan beton yang menggunakan agregat halus dan/atau kasar daur ulang dari limbah *paving block*. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Beton dan Bahan Konstruksi Universitas Widya Gama Malang pada Mei–Agustus 2026. Variabel bebas adalah proporsi agregat halus daur ulang dan agregat kasar daur ulang; variabel terikat adalah *fly ash* dan kuat tekan 28 hari; sedangkan jenis semen, kadar *fly ash*, air, ukuran benda uji, metode pencampuran, pemadatan, *curing*, umur pengujian, dan prosedur pengujian dikontrol.

3.1 Material dan Karakterisasi

Material penelitian terdiri atas Portland semen, *fly ash*, pasir alam, agregat halus daur ulang *paving block*, kerikil alam, agregat kasar daur ulang *paving block*, dan air. Limbah paving dibersihkan, dihancurkan, diayak, kemudian dipisahkan menjadi fraksi halus dan kasar. Karakterisasi agregat mencakup kadar air, gradasi, berat jenis, penyerapan air, kadar lumpur untuk fraksi halus, serta berat isi. Prosedur karakterisasi dan pengolahan material mengikuti dokumentasi penelitian pada skripsi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa agregat kasar alam memiliki kadar air 3,84%, berat jenis SSD 1,79, dan penyerapan 0,56%; agregat halus alam memiliki kadar air 1,70%, berat jenis SSD 2,02, kadar lumpur 0,36%, dan penyerapan 1,48%. Pecahan paving kasar memiliki kadar air 4,54%, berat jenis SSD 1,58, dan penyerapan 0,31%, sedangkan pecahan paving halus memiliki kadar air 2,39%, berat jenis SSD 1,89, kadar lumpur 1,55%, dan penyerapan 1,80%. Penelitian eksperimental ini menguji pengaruh penggantian agregat alami dengan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terhadap kinerja beton hibrida. Variabel bebas dari penelitian ini adalah persentase penggantian agregat halus dan agregat kasar alami dengan agregat daur ulang limbah *paving block*, masing-masing

sebesar 0%, 50%, dan 100%. Variabel terikat penelitian ini yaitu performa beton hibrida yang meliputi sifat segar (*workability* melalui uji *fly ash*) serta sifat mekanis (kuat tekan beton silinder pada umur 28 hari). Sedangkan variabel kontrolnya adalah parameter yang dijaga konstan meliputi jenis semen, kadar *fly ash* (25%), sumber air, dimensi benda uji, metode pencampuran, pemadatan, curing, target *fly ash*, umur pengujian, serta standar prosedur pengujian.

3.2 Rancangan Campuran dan Benda Uji

Pembuatan benda uji beton silinder dengan variasi campuran 1:2:3 memadukan semen dan *fly ash* sebagai bahan pengikat hibrida, serta pecahan *paving block* halus dan kasar. Tabel kebutuhan bahan untuk pembuatan 5 silinder setiap campuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perhitungan Kebutuhan Campuran

Kode	Semen	*Fly ash*	Air	Pasir alami	Paving halus	Kerikil alami	Paving kasar	Total
	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
A0B0	6,897	2,299	6,000	21,202	0,000	27,966	0,000	64,364
A0B1	6,897	2,299	6,200	21,202	0,000	13,983	14,126	64,707
A0B2	6,897	2,299	6,200	21,202	0,000	0,000	28,252	64,850
A1B0	6,897	2,299	6,400	10,601	10,629	27,966	0,000	64,792
A1B1	6,897	2,299	6,500	10,601	10,629	13,983	14,126	65,035
A1B2	6,897	2,299	6,600	10,601	10,629	0,000	28,252	65,278
A2B0	6,897	2,299	6,700	0,000	21,258	27,966	0,000	65,121
A2B1	6,897	2,299	6,700	0,000	21,258	13,983	14,126	65,264
A2B2	6,897	2,299	6,600	0,000	21,258	0,000	28,252	65,307

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

3.3 Pengujian dan Analisis Statistik

Fly ash diuji pada beton segar setelah pencampuran. Setelah pencetakan, benda uji dilepas pada umur sekitar 24 jam dan dirawat melalui perendaman hingga umur pengujian 28 hari. Kuat tekan diuji menggunakan *compression testing machine*. Kuat tekan dihitung dari rasio beban maksimum terhadap luas penampang silinder. Dalam pelaporan standar saat ini [12] ,[13] ,[4], untuk menguji apakah variasi campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan, digunakan ANOVA *Single Factor* dengan taraf signifikansi 5%. Pengujian dibandingkan menggunakan p-value terhadap $\alpha = 0,05$. Pendekatan ini dipertahankan dari pengolahan data pada naskah sumber.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Agregat Limbah Paving Halus dan Kasar

Analisis agregat limbah paving dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kelayakan agregat sebagai bahan penyusun campuran beton melalui beberapa pengujian, yaitu kadar air, berat jenis, gradasi, kadar lumpur, penyerapan air dan berat isi. Hasil seluruh pengujian digunakan untuk menyusun campuran beton. Hasil dari pengujian agregat limbah paving ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Limbah Paving

Nama Pengujian	Hasil Pengujian Agregat Halus		Hasil Pengujian Agregat Kasar		Satuan
Kadar Air	2,39%		4,54%		%
Modulus Halus	3,93		9,88		mm
Berat Jenis Jenis bulk Jenis SSD Jenis semu	 1,84 1,89 1,96		 1,57 1,58 1,58		-
Kadar Lumpur	1,55%		-		-
Penyerapan Air	1,80%		0,31%		%
Berat Isi	Rodded : Shoveled :	1,60 1,44	Rodded : Shoveled :	1,26 1,25	g/cc

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

4.2 Hasil Pengujian Agregat Alami Halus dan Kasar

Analisis agregat alami dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan kelayakan agregat sebagai bahan penyusun campuran beton melalui beberapa pengujian, yaitu kadar air, berat jenis, gradasi, kadar lumpur, penyerapan air dan berat isi. Hasil dari seluruh pengujian tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik fisik agregat alami sebagai material penyusun campuran beton. Hasil dari pengujian agregat alami halus dan kasar ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Alami

Nama Pengujian	Hasil Pengujian Agregat Halus	Hasil Pengujian Agregat Kasar	Satuan
Kadar Air	1,70%	3,84%	%
Modulus Halus	3,64	9,79	mm
Berat Jenis Jenis bulk Jenis SSD Jenis semu	 1,98 2,02 2,09	 1,77 1,79 1,81	-
Kadar Lumpur	0,36%	-	-
Penyerapan Air	1,48%	0,56%	%
Berat Isi	Rodded : 1,65 Shoveled : 1,61	Rodded : 1,47 Shoveled : 1,42	g/cc

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

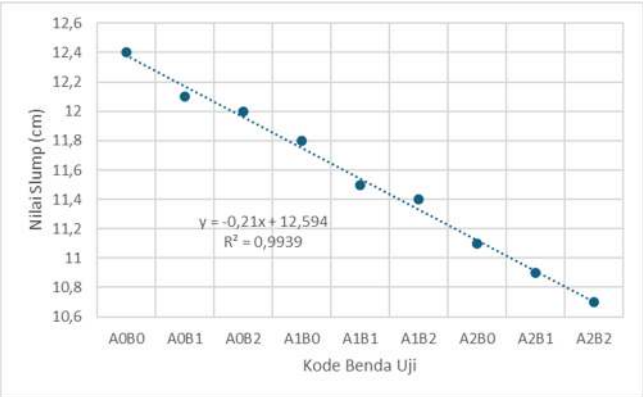
4.3 Sifat Segar (*Slump Test*)

Nilai *fly ash* seluruh variasi berada pada rentang 10,7-12,4 cm dengan rata-rata keseluruhan 11,54 cm. Campuran kontrol A0B0 memiliki *fly ash* tertinggi 12,4 cm, sedangkan nilai terendah terjadi pada A2B2 sebesar 10,7 cm. Variasi A2B0 yang kemudian menjadi variasi kuat tekan optimum memiliki *fly ash* 11,1 cm.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Fly ash*

No	Kode	Nilai Sump Test (cm)	Rata-rata	Prosentase	Naik / Turun
1	A0B0	12,4	11,54	100%	0%
2	A0B1	12,1		98%	-2%
3	A0B2	12,0		97%	-3%
4	A1B0	11,8		95%	-5%
5	A1B1	11,5		93%	-7%
6	A1B2	11,4		92%	-8%
7	A2B0	11,1		90%	-10%
8	A2B1	10,9		88%	-12%
9	A2B2	10,7		86%	-14%

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

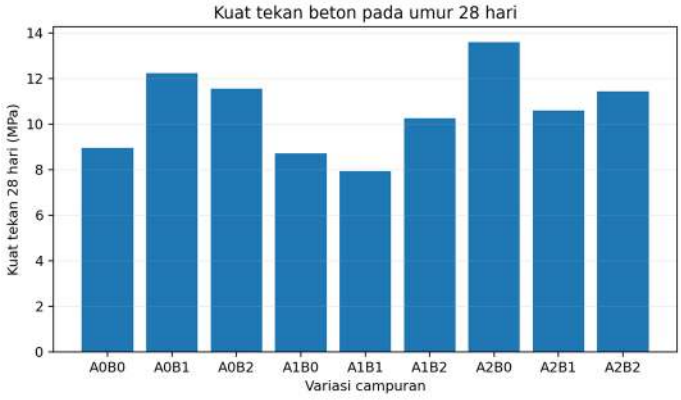


Gambar 1. Hubungan Nilai *Fly ash* Dengan Benda Uji

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, campuran kontrol A0B0 menghasilkan nilai *fly ash* tertinggi sebesar 12,4 cm, sementara sampel A2B2 dengan substitusi agregat daur ulang menghasilkan nilai terkecil sebesar 10,7 cm (A0B1 = 12,1 cm; A0B2 = 12,0 cm; A1B0 = 11,8 cm; A1B1 = 11,5 cm; A1B2 = 11,4 cm; A2B0 = 11,1 cm; A2B1 = 10,9 cm). Pada Gambar 1, penurunan nilai *fly ash* seiring bertambahnya variasi substitusi ini dipengaruhi oleh karakteristik daya serap air yang tinggi pada pecahan *paving block*. Hal ini sejalan dengan temuan yang mengonfirmasi bahwa penggunaan agregat daur ulang secara signifikan menurunkan *workability* dan nilai *fly ash* beton akibat tingginya porositas serta penyerapan air pada material limbah tersebut [14].

4.4 Kuat tekan 28 hari

Pengujian mencakup 45 benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm pada umur 28 hari. Hasil rata-rata menunjukkan A2B0 sebagai campuran dengan kuat tekan tertinggi 13,59 MPa, sedangkan A1B1 terendah 7,93 MPa (Gambar 2). Kontrol A0B0 menghasilkan 8,95 MPa. Data lengkap rata-rata sembilan variasi dipertahankan dari Tabel 5.



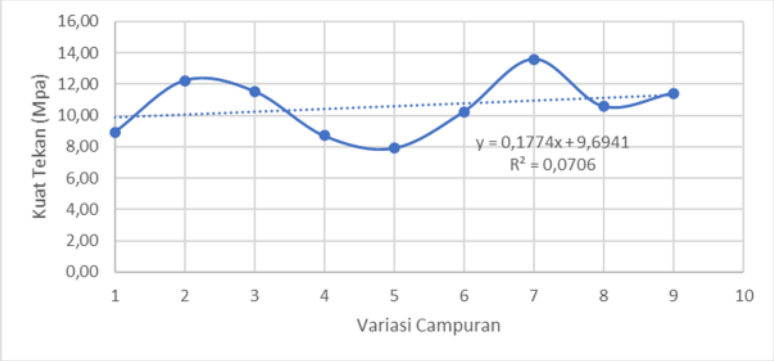
Gambar 2. Kuat Tekan Beton Pada Umur 28 Hari

Pengujian kuat tekan mengevaluasi sebanyak 45 sampel benda uji silinder. Tahapan pengujian ini dilaksanakan saat beton telah memasuki umur 28 hari pasca masa perawatan (*curing*), proses pengukuran kapasitas beban tekan tersebut menggunakan perangkat *Compression Testing Machine*. Hasil pengujian kuat tekan beton setiap campuran terdapat pada Tabel 5. Grafik hubungan variasi campuran dengan kuat tekan terdapat pada Gambar 3.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No.	Kode	Fcr (Mpa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan Kuat Tekan Terhadap Beton Normal (%)
1	A0B0	8,95	0%
2	A0B1	12,23	26,85%
3	A0B2	11,55	22,55%
No.	Kode	Fcr (Mpa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan Kuat Tekan Terhadap Beton Normal (%)
4	A1B0	8,72	-2,60%
5	A1B1	7,93	-12,86%
6	A1B2	10,25	12,71%
7	A2B0	13,59	34,17%
8	A2B1	10,59	15,51%
9	A2B2	11,44	21,78%

Sumber : Perhitungan Excel (2026)



Gambar 3. Hubungan Variasi Campuran Dengan Kuat Tekan

Kenaikan kuat tekan terbesar terjadi pada variasi A2B0 (100% agregat halus daur ulang) yaitu sebesar 13,59 MPa atau naik 51,8% dari kontrol A0B0 (8,95 MPa), sedangkan kombinasi simultan A1B1 justru menghasilkan nilai terendah sebesar 7,93 MPa. Kenaikan signifikan pada A2B0 didorong oleh *micro-filler effect* dan reaktivitas semen tua yang belum terhidrasi sempurna (*unhydrated cement*) pada agregat halus, yang bereaksi kembali serta memperdensifikasi matriks *Interfacial Transition Zone* (ITZ). Sebaliknya, penurunan pada A1B1 dipicu oleh munculnya sistem ganda ITZ (*multiple* ITZs) yang lemah serta tingginya penyerapan air akibat gabungan fraksi halus dan kasar daur ulang, sehingga memicu pembentukan retak mikro (*micro-cracking*) [9].

4.5 Hubungan Antara Komposisi Air dan Kuat Tekan Beton

Berdasarkan pengujian fisik dan mekanis di laboratorium, variasi komposisi air dalam campuran beton memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tekan akhir beton. Penyesuaian jumlah air berbanding lurus dengan tingkat kerapatan rongga udara internal matriks semen. Hubungan kuantitatif antara proporsi penggunaan air dan hasil pengujian kuat tekan beton tersebut ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hubungan Komposisi Air dan Kuat Tekan

Kode	Air (Kg)	Kuat Tekan Rata-rata
A0B0	6,000	8,95
A0B1	6,200	12,23
A0B2	6,200	11,55
A1B0	6,400	8,72
A1B1	6,500	7,93
A1B2	6,600	10,25
A2B0	6,700	13,59
A2B1	6,700	10,59
A2B2	6,600	11,44

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 6, dapat dilihat hubungan antara komposisi penggunaan air (Kg) terhadap nilai kuat tekan rata-rata beton yang dihasilkan dari berbagai kode sampel (A0B0 hingga A2B2). Kuat tekan tertinggi dicapai oleh sampel kode A2B0 dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 13,59 MPa pada penggunaan air sebanyak 6,700 Kg. Kuat tekan terendah terdapat pada sampel kode A1B1 dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 7,93 MPa pada penggunaan air sebanyak 6,500 Kg. Penelitian Meh dkk. [15] memperkuat alasan ilmiah mengapa fluktuasi naik-turun kuat tekan terjadi pada variasi A1 dan A2 seiring penurunan bertahap kadar air.

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan agregat daur ulang dari limbah *paving block* pada beton hibrida berbasis *fly ash*. Penelitian tersebut menggunakan sembilan variasi campuran dengan substitusi agregat halus dan kasar sebesar 0%, 50%, dan 100%, kemudian mengevaluasi sifat segar melalui *fly ash* serta sifat mekanik melalui kuat tekan beton umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan substitusi agregat daur ulang menyebabkan penurunan nilai *fly ash*

dari 12,4 cm pada A0B0 menjadi 10,7 cm pada A2B2, yang dikaitkan dengan tingginya penyerapan air agregat dari limbah *paving block*. Benda uji hasil pengujian kuat tekan ditampilkan pada Gambar 4. Pada penelitian Pasapan [1], terdapat perbedaan pada penelitian saat ini yang menunjukkan adanya respons kuat tekan yang berbeda ketika agregat halus dan kasar daur ulang dikombinasikan, sehingga masih diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme interaksi kedua fraksi tersebut. Pada sifat mekanik, penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan antara tingkat substitusi agregat daur ulang dan kuat tekan tidak bersifat linier. Variasi A2B0, yaitu 100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang, menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,59 MPa, sedangkan A1B1 menghasilkan nilai terendah sebesar 7,93 MPa. Penulis mengaitkan fenomena tersebut dengan *micro-filler effect*, kemungkinan reaktivitas semen lama, *Interfacial Transition Zone* (ITZ), penyerapan air, dan *micro-cracking*.



Gambar 4. Benda uji hasil pengujian kuat tekan

4.6 Analisis ANOVA

ANOVA *Single Factor* pada Tabel 7 menghasilkan SS antara kelompok sebesar 133,6515, df = 8, MS = 16,70644, F = 4,214398, p-value = 0,001218, dan F-kritis = 2,208518. Karena p-value < 0,05, hipotesis nol ditolak. Dengan demikian, variasi campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan beton pada data penelitian ini. Hasil tersebut merupakan data statistik asli dari pengolahan Excel pada skripsi.

Tabel 7. Hasil Analisis ANOVA

Sumber variasi	Df	MS	F	p-value
Antarkelompok	8	16,70644	4,214398	0,001218
Dalam kelompok	36	3,964134	-	-
Total	44	-	-	-

Sumber : Perhitungan Excel (2026)

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian laboratorium, penggunaan agregat daur ulang dari limbah *paving block* terbukti memengaruhi sifat segar dan kuat tekan beton hibrida secara signifikan. Dari parameter sifat segar, peningkatan kadar agregat daur ulang menyebabkan penurunan nilai *fly ash* (berkisar antara 10,7 cm hingga 12,4 cm) akibat tingginya daya serap air pada mortar lama yang melekat, namun seluruh variasi adonan beton segar tetap memenuhi kriteria kemudahan pengerjaan (*workability*). Dari parameter sifat mekanis, substitusi agregat daur ulang memberikan pengaruh nyata terhadap kuat tekan beton umur 28 hari (P-value = 0,001218 < 0,05), di mana campuran optimum dicapai oleh variasi A2B0 (100% agregat halus daur ulang dan 0% agregat kasar daur ulang dengan kadar *fly ash* 25%) yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,59 MPa atau meningkat 51,8% dibandingkan beton kontrol A0B0 (8,95 MPa). Penemuan ini mengonfirmasi bahwa limbah

paving block efektif dimanfaatkan sebagai substitusi agregat alami untuk menghasilkan beton hibrida berkinerja optimal sekaligus mendukung konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Pasapan, "Karakteristik Paving Blok Yang Terbuat Dari Limbah Batu Bata Tahan Api Dan Semen Portland Komposit" 2023, *Universitas Hasanuddin*.

[2] J. Pizoń, K. Matýsková, M. Horňáková, M. Gołaszewska, and G. Kratošová, "Recycled concrete paving block waste as a selected sustainable substitute for natural aggregate in cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 478, p. 141356, 2025.

[3] U. Ayuningtyas *et al.*, "Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Konstruksi Ramah Lingkungan Dalam Rangka Mendukung Kriteria Bangunan Hijau," *SNPPM*, pp. 51–56, 2022.

[4] SNI, "SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa," *Badan Standarisasi Nasional*, p. 52, 2012.

[5] S. A. N. Wahidin, M. I. Rasyid, A. A. Adam, S. N. Akifa, and B. R. Ramadhan, "Pengaruh Rasio Air – Pengikat terhadap Waktu Pengikatan dan Kuat Tekan Pasta Geopolimer," *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*, vol. 7, no. 3, pp. 349–361, 2025.

[6] A. M. Kusuma, "Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash Sebagai Bahan Material Kontruksi Ramah Lingkungan Pada Bangunan," *J-Sipil : Jurnal Teknologi Dan Ilmiah Teknik Sipil Dan Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 13–23, 2024.

[7] B. S. Nasional, "SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton," p. 16, 2014.

[8] F. Anggara, H. T. B. M. Petrus, D. B. A. Anisa, H. Manurung, and F. Y. A. Saputra, "Tinjauan Pustaka Karakterisasi Dan Potensi Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash (FABA)," *Buletin Sumber Daya Geologi*, vol. 16, no. 1, pp. 53–70, 2021.

[9] V. Revilla-Cuesta, F. Faleschini, M. A. Zanini, M. Skaf, and V. Ortega-Lopez, "Porosity-based models for estimating the mechanical properties of self-compacting concrete with coarse and fine recycled concrete aggregate," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 103425, 2021.

[10] A. N. Majid, R. Roestaman, and S. Permana, "Penggunaan Agregat Halus Ex Paving Block untuk Campuran Beton," *Jurnal Konstruksi*, vol. 19, no. 2, pp. 340–350, 2022, doi: 10.33364/konstruksi/v.19-2.924.

[11] Y. Amran, A. W. Permana, and S. Kurniawan, "Pemanfaatan Limbah Plastik Jenis Polypropylene Sebagai Bahan Utama Paving Block Plastis Dengan Campuran Arang Sekam Padi Mengacu Pada Sni 03-0691-1996," *TAPAK [Teknologi Aplikasi Konstruksi]: Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, vol. 13, no. 2, pp. 97–109, 2024.

[12] B. S. Nasional, "SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton Semen Portland," 2008.

[13] B. S. Nasional, "SNI 1974-2023 Metode uji untuk kekuatan tekan beton spesimen silinder," *Jakarta:BSN*, 2023.

[14] C. Hui, Y. Liu, R. Hai, and M. Liu, "Experimental Study and Analysis on Workability and Mechanical Performance of High Fluidity Recycled Concrete," *Journal Materials*, vol. 15, no. 6104, p. 13, 2022.

[15] K. M. F. K. Meh, Z. Omar, and S. K. Mohamed, "Compressive Strength–Water Absorption Behaviour of Concrete with Coal Bottom Ash as Sand Replacement across Water–Cement Ratios," Journal of Building Material Science| Volume, vol. 8, no. 01, 2026.