

INVESTIGASI PEMANFAATAN LIMBAH BATU DAN SERBUK MARMER SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT PADA PERKERASAN KAKU

M. Sa'dillah^{1*}, Andy Kristafi Arifianto¹, Blima Oktaviastuti¹, dan Rosita Oktavia Jemadun¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tribhuwana Tungadewi, Jl. Telaga Warna, Malang, Indonesia
*muhsad93@gmail.com

Masuk: 22-03-2025, revisi: 03-05-2025, diterima untuk diterbitkan: 30-06-2025

ABSTRACT

Natural resources such as fine and coarse aggregates eventually deplete and are irreplaceable. Therefore, the materials needed to replace aggregates in rigid pavements with marble and stone powder are different. The purpose of this study was to determine the compressive strength and flexural strength of concrete at the ages of seven and twenty-eight days. This study used a quantitative experimental research design. The test objects were reinforced concrete slabs measuring 50 x 12 x 120 with variations of 0%, 15%, 25%, and 35%, as well as cylinders measuring 15 cm and 30 cm. The most ideal value for the compressive strength of used marble powder over a period of 28 days is 15%; the most ideal value for used marble stone is 25%; and only a variation of 0% meets the intended parameters for the combination of used stone and powder. The results of the compressive strength test conducted on marble powder waste concrete, marble stone waste, and a combination of stone waste and powder over a seven-day period did not meet the planned requirements. The flexural strength tests on ordinary concrete yielded deflections of 25% (4.26), 0% (3.93), and 25% (4.71), respectively, using marble powder waste, marble stone, and a combination of stone and powder with maximum load.

Keywords: rigid pavement; waste; marble stone; marble powder; compressive strength

ABSTRAK

Agregat halus dan kasar merupakan contoh sumber daya alam yang pada akhirnya akan habis dan tidak dapat digantikan. Oleh karena itu, material yang dibutuhkan untuk mengganti agregat pada perkerasan kaku dengan bubuk marmer dan batu berbeda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kuat tekan dan kuat lentur beton pada umur tujuh dan dua puluh delapan hari. Penelitian ini menggunakan desain penelitian eksperimental yang bersifat kuantitatif. Benda uji berupa pelat beton bertulang berukuran 50 x 12 x 120 dengan variasi 0%, 15%, 25%, dan 35%, serta silinder berukuran 15 cm dan 30 cm. Nilai paling ideal untuk kuat tekan bubuk marmer bekas selama periode 28 hari adalah 15%; nilai paling ideal untuk batu marmer bekas adalah 25%; dan hanya variasi 0% yang memenuhi parameter yang dimaksudkan untuk kombinasi batu bekas dan bubuk. Hasil pengujian kuat tekan beton limbah serbuk marmer, limbah batu marmer, dan campuran limbah batu dan serbuk selama tujuh hari tidak memenuhi persyaratan yang direncanakan. Dengan menggunakan limbah serbuk marmer, batu marmer, dan kombinasi batu dan serbuk dengan beban maksimum, diperoleh hasil pengujian kuat lentur pada beton biasa, dengan lendutan masing-masing bervariasi sebesar 25% (4,26), 0% (3,93), dan 25% (4,71).

Kata kunci: perkerasan kaku; limbah; batu marmer; serbuk marmer; kuat tekan

1. PENDAHULUAN

Jalan adalah prasarana transportasi darat yang mencakup semua bagian jalan, termasuk lalu lintas, baik yang berada di atas tanah, di bawah tanah dan/atau di air, atau di permukaan tanah (Edy, 2017). Agar pengemudi merasa nyaman menggunakannya, konstruksi permukaan jalan harus berkualitas tinggi. Memastikan bahwa regangan dari beban ban cukup berkurang untuk tetap berada di bawah daya dukung tanah dasar adalah tujuan utama. Ketika jalan pertama kali dibangun, satu-satunya materialnya adalah batu, kerikil, dan pasir, dengan air bertindak sebagai bahan pengikat untuk menghaluskan dan meratakan permukaan. Perkerasan kaku dan perkerasan lentur adalah dua kategori perkerasan jalan. Perkerasan kaku adalah jenis konstruksi perkerasan yang terbuat dari pelat beton kontinu dengan tulangan yang terletak di lapisan pondasi bawah, atau pelat beton terhubung dengan tulangan yang tidak kontinu dan mungkin atau mungkin tidak dilapisi aspal di atasnya. Agar perkerasan jalan dapat terus menahan beban lalu lintas, maka sangat penting untuk menjaga kinerja strukturalnya agar perkerasan jalan tersebut memiliki masa pakai atau umur desain yang sesuai dengan spesifikasi awal. Salah satu cara untuk mengurangi genangan air akibat pasang surut dan air hujan adalah dengan memanfaatkan perkerasan jalan kaku. Menurut (Oktaviastuti & Yurnalisdell, 2020), perkerasan jalan ini memiliki tingkat kekakuan yang cukup tinggi karena menggunakan semen (PC) sebagai perekat.

Penambangan mengekstraksi marmer dari alam. Sisa debu marmer (lihat Gambar 1) dari operasi pemotongan dan penggergajian masih ada di wilayah penambangan dan belum dimanfaatkan secara maksimal dan efektif. DaMPak yang paling terasa adalah polusi udara dari debu marmer yang dapat mencemari lingkungan dan menyebabkan gangguan pernapasan. Karena konsistensinya yang seperti tepung, yang menjadikannya bahan pengikat yang baik, limbah marmer berwarna putih kemerahan dan akan memadat jika dicampur dengan air (Badaron et al., 2019). Marmer semakin diminati setiap hari. Akibatnya, terdapat banyak sekali brokol atau Sampah marmer di wilayah Tulungagung, yang merupakan salah satu daerah penghasil marmer teratas di Indonesia. Untuk mengganti sebagian material kasar, terutama kerikil, dalam beton, kami mencoba memanfaatkan sisa marmer. Tujuannya adalah untuk merancang kekuatan beton yang tepat yang memenuhi persyaratan kekuatan struktural dan pertimbangan ekonomi, termasuk harga yang murah (Pramesti et al., 2022). Sekali 5–10% dari total volume produksi bubuk marmer diperkirakan berupa Sampah. Jumlah Sampah yang dihasilkan dapat berkisar antara 50 hingga 100 kg per hari jika usaha pemotongan marmer rumahan menghasilkan 100 kg per hari. Dalam seminggu, jumlah ini dapat meningkat menjadi 300–600 kg, dan dalam sebulan, dapat mencapai 1300–2600 kg. Dengan demikian, industri rumahan dapat menghasilkan ±1,3-2,6 ton bubuk marmer limbah selama setahun. Jika dibandingkan dengan harga semen Portland (PC) yang dapat mencapai Rp75.000,00 per sak, harga limbah abu marmer berkisar antara Rp10.000,00 hingga Rp15.000,00 per sak. Tentu saja, pemilihan limbah abu marmer sangat murah (Amal & Saputra, 2019)



Gambar 1. Limbah marmer

Karena kualitasnya yang unik, penggunaan limbah marmer pada perkerasan kaku sebagai alternatif agregat halus dapat memiliki sejumlah keuntungan. Karena kandungan senyawa (CaO) limbah marmer setara dengan semen—yaitu, 52,69% limbah marmer dan 60–70% semen—limbah marmer memiliki manfaat untuk membuat material lebih kaku pada lapisan beton. Keuntungan lainnya termasuk sifat pengikatan yang lebih baik, lebih sedikit ketergantungan pada material alami tradisional seperti pasir, yang menghemat sumber daya alam, peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap tekanan jika digunakan dalam proporsi yang tepat, penurunan daMPak lingkungan, dukungan untuk upaya konstruksi berkelanjutan melalui daur ulang limbah, dan efektivitas biaya (Gecong et al., 2019). Tujuan penambahan limbah batu dan bubuk marmer adalah untuk mengetahui bagaimana keduanya memengaruhi nilai kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari, serta kuat lentur pada umur 28 hari saja, jika digunakan sebagai pengganti agregat kasar dan halus.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan rancangan penelitian kuantitatif dengan jenis penelitian ekperimental. Variabel bebas pada penelitian ini adalah limbah pecahan batu marmer sebagai pengganti agregat kasar pada perkerasan kaku dengan persentase sebesar 0%, 15%, 25% dan 35% sedangkan variabel terikat pada penelitian ini adalah berat jenis dan kuat tekan beton yang menggunakan limbah pecahan batu marmer. Lokasi Penelitian untuk uji kuat tekan di Laboratorium Universitas Tribhuwana Tungadewi Malang. Laboratorium digunakan untuk melakukan pemeriksaan kualitas material (limbah pecahan batu marmer, pasir, kerikil, semen dan air), pengujian nilai *slump* serta pengujian kuat tekan rencana ($f'_c = 21,7$ MPa). Sedangkan untuk waktu pelaksanaannya selama 1 bulan dengan ketentuan hal itu sudah mencakup pengujian beton karena umur beton dalam penelitian adalah 28 hari perendaman. Data Primer adalah data yang diperoleh secara langsung di lapangan, seperti: observasi, uji lab dan dokumentasi sedangkan data sekunder adalah data pendukung yang berasal dari pengamatan tidak langsung didapatkan melalui instansi terkait. Penjelasan lebih lanjut terkait kebutuhan data dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan data

No	Data yang dibutuhkan	Dokumentasi	Data	Sumber data
1	Limbah pecahan batu marmer, pasir, kerikil, semen dan air	<ul style="list-style-type: none"> Bahan material dari benda uji 	<ul style="list-style-type: none"> Data Primer 	Lab. Universitas Tribhuwana Tunggaladewi Malang
2	Uji <i>Slump</i>	<ul style="list-style-type: none"> Alat uji Benda uji Lab 	<ul style="list-style-type: none"> Data Primer 	Lab. Universitas Tribhuwana Tunggaladewi Malang
3	Uji Kuat Tekan dan Lentur	<ul style="list-style-type: none"> Alat uji Benda uji Lab 	<ul style="list-style-type: none"> Data Primer 	Lab. Universitas Tribhuwana Tunggaladewi Malang
4	Uji XRF (X-Ray Flourencece)	<ul style="list-style-type: none"> Alat uji Benda uji Lab 	<ul style="list-style-type: none"> Data Sekunder 	Lab. Sentral Universitas Negeri Malang
5	Uji Keausan Agregat	<ul style="list-style-type: none"> Alat uji Benda uji Lab 	<ul style="list-style-type: none"> Data Sekunder 	Lab. Teknik Sipil Universitas Negeri Malang

Pengujian untuk kekuatan lentur dan tekan merupakan bagian dari populasi penelitian. Sampel yang akan diperiksa oleh para peneliti meliputi bahan pembentuk perkerasan keras, yaitu semen, air, agregat halus dan kasar, serta limbah marmer dan bubuk (1:2:2,5) untuk variasi 0%, 15%, 25%, dan 35% (Nukar et al., 2024). Penelitian ini menggunakan benda uji pelat beton bertulang berukuran 50 x 12 x 120 cm sebanyak 8 buah dan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak 48 buah. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Sampel benda uji dengan bahan tambah limbah pecahan batu marmer dan serbuk marmer

Persen limbah serbuk marmer	Jenis pengujian	Ukuran (cm)	Jumlah (buah)		Total benda uji
			7 hari	28 hari	
0%	Uji kuat tekan	15 x 30	6	6	12
15%	Uji kuat tekan	15 x 30	6	6	12
25%	Uji kuat tekan	15 x 30	6	6	12
35%	Uji kuat tekan	15 x 30	6	6	12
TOTAL			24	24	48
0%	Uji kuat lentur	50 x12x 120	-	2	2
15%	Uji kuat lentur	50 x 12 x120	-	2	2
25%	Uji kuat lentur	50 x 12 x120	-	2	2
35 %	Uji kuat lentur	50 x 12 x120	-	2	2
TOTAL			-	8	8

Tabel 3. Standar pengujian agregat

Jenis agregat	Pengujian	Acuan
Agregat Halus dan Limbah Serbuk Batu Marmer	Gradasi agregat	SNI 03-1968-1990
	Kadar air	SNI 03-2834-2000
	Berat jenis	SNI 03-1970-2008
	Penyerapan air	SNI 03-1970-2008
	Berat isi	SNI 03-4804-1998
	Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996
Agregat Kasar dan Limbah Pecahan Batu Marmer	Gradasi agregat	SNI 03-1968-1990
	Kadar air	SNI 03-2834-2000
	Berat jenis	SNI 03-1969-2008
	Penyerapan air	SNI 03-1969-2008
	Berat isi	SNI 03-4804-1998
	Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996
	Keausan agregat	SNI 2417:2008

Benda uji dalam penelitian ini menggunakan limbah pecahan batu marmer sebagai pengganti agregat kasar dan limbah serbuk batu marmer sebagai pengganti agregat halus (dapat dilihat pada Tabel 3). Untuk *mix design* (dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5) menggunakan metode ACI 211.1-91 (1991) (Lidya et al., 2025) dengan benda uji kuat tekan beton berbentuk silinder ukuran 15 cm x 30 cm. Peralatan yang digunakan dalam penelitian, seperti: timbangan, satu set saringan untuk gradasi agregat halus dan agregat kasar, oven, talam, kuas, cawan, piknometer, keranjang kawat, gelas ukur, saringan no.4 (4,75 mm), kerucut abrams, tongkat penumbuk dari baja, kotak takar, penggaris, molen (*concrete mixer*), cetakan silinder ukuran 15 cm x 30 cm, mesin pengujian kuat tekan, bak perendam, ember, sekop, sendok spesi, termometer dan meteran. Bahan yang digunakan dalam pembuatan beton, yaitu: semen (tipe 1 PC), agregat halus (pasir lumajang), agregat kasar (kerikil dan limbah pecahan batu marmer) dan air (dari lab. Universitas Thribhuwana Tungadewi Malang).

Tabel 4. Rekapitulasi komposisi campuran bahan untuk 1 m³ (Limbah Batu Marmer)

Kode beton	Limbah marmer (%)	Limbah marmer (kg/m ³)	Agregat kasar (kg/m ³)	Agregat halus (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Air (liter/m ³)
LM1	0%	0	948	703	394,23	205
LM2	15%	142,2	805,8	703	394,23	205
LM3	25%	237	711	703	394,23	205
LM4	35%	331,8	616,2	703	394,23	205

Tabel 5. Rekapitulasi komposisi campuran bahan untuk 1 m³ (Limbah Serbuk Marmer)

Kode beton	Serbuk marmer (%)	Serbuk marmer (kg/m ³)	Agregat halus (kg/m ³)	Agregat kasar (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Air (liter/m ³)
SM1	0%	0	703	948	394,23	205
SM2	15%	105,45	597,55	948	394,23	205
SM3	25%	175,75	527,25	948	394,23	205
SM4	35%	246,05	456,95	948	394,23	205

Pengujian kuat tekan mengacu pada SNI 1974:2011 tentang cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Dalam pengujian ini peneliti menggunakan umur beton 7 hari & 28 hari. Rumus kuat tekan beton, adalah sebagai berikut:

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan:

f_c' = Kuat tekan (MPa)

P = Gaya tekan aksial (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

Setelah pemrosesan dan pengujian data, analisis akan dilakukan. Serbuk marmer digunakan sebagai agregat halus dan serpihan marmer tambahan digunakan sebagai material kasar dalam pengujian kekuatan tekan dan lentur. Temuan analisis selaras dengan ukuran sampel penelitian, dan koefisien varians sampel dihitung sebelum dilakukan perhitungan matematis dengan mengacu pada ACI 1211.1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian XRF (*X-Ray Fluorencence*)

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai studi awal untuk mengidentifikasi unsur kimia yang terkandung pada limbah pecahan batu marmer, khususnya unsur oksida.

Tabel 6. Hasil uji XRF limbah marmer

Compound	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	MoO ₃	BaO	Yb ₂ O ₃
Conc Unit (%)	2,0	93,17	0,1	0,044	1,06	0,62	2,4	0,2	0,37

Berdasarkan hasil uji XRF yang diteliti oleh penulis pada Tabel 6. bahwa unsur kimia yang terdapat pada limbah batu marmer adalah sebagai berikut: SiO₂ (*Silikon Dioksida*) 2,0%; CaO (*Kalsium Oksida*) 93,17%; TiO₂ (*Titanium Dioksida*) 0,1%; MnO (*Mangan Oksida*) 0,044%; Fe₂O₃ (*Ferri Oksida*) 1,06%; SrO (*Stronsium Oksida*) 0,62%; MoO₃ (*Molibdenum Trioksida*) 2,4%; BaO (*Barium Oksida*) 0,2%; dan Yb₂O₃ (*Ytterbium Trioksida*) 0,37%. Penelitian

(Safari et al., 2023) unsur kimia yang terdapat pada limbah batu marmer, yaitu: SiO₂ (*Silikon Dioksida*) 0,13%; Al₂O₃ (*Aluminium Oksida*) 0,31%; FeO₃ (*Besi Dioksida*) 0,04%; CaO (*Kalsium Oksida*) 55,07%; MgO (*Magnesium Oksida*) 0,36%; K₂O (*Kalium Oksida*) 0,01%; SO₃ (*Sulfur Trioksida*) 0,08% dan lain-lain 44%. Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa kandungan dari unsur kimia paling besar pada limbah batu marmer adalah Cao (*Kalsium Oksida*) yang biasa disebut kapur.

Pengujian Agregat

Pengujian dilakukan pada agregat halus, agregat kasar, limbah marmer, dan bubuk marmer untuk menentukan gradasi, kadar air, berat jenis dan penyerapan, berat satuan, kadar lumpur, dan keausan sebelum menggunakan agregat sebagai komponen campuran beton. Tujuan pengujian ini adalah untuk memastikan apakah agregat yang digunakan memenuhi standar untuk menghasilkan beton yang konsisten dengan tingkat kualitas yang diinginkan. Tabel 7 merangkum prasyarat untuk pengujian agregat.

Tabel 7. Hasil pengujian agregat

Jenis Agregat	Pengujian	Syarat	Hasil	Keterangan
Agregat halus	Analisis saringan	1,5 – 3,8	2,72	Memenuhi
	Kadar air	≤5%	4,35%	Memenuhi
	Berat jenis SSD	≥2,5	2,67	Memenuhi
	Daya serap	≤3,0%	0,06%	Memenuhi
	Berat isi	≥1,4	1,59	Memenuhi
	Kadar lumpur	≤7,0	0,01	Memenuhi
Agregat kasar	Analisis saringan	6,0 – 7,1	6,21	Memenuhi
	Kadar air	≤5%	4,08	Memenuhi
	Berat jenis SSD	≥2,5	2,71	Memenuhi
	Daya serap	≤3,0	3,86	Memenuhi
	Berat isi	≥1,4	1,64	Memenuhi
	Kadar lumpur	≤1,0%	0,01	Memenuhi
	Keausan	≤40%	26,88	Memenuhi
Limbah marmer batu	Analisis saringan	6,0 – 7,1	6,0	Memenuhi
	Kadar air	≤5%	3,18	Memenuhi
	Berat jenis SSD	≥2,5	2,53	Memenuhi
	Daya serap	≤3,0	0,04	Memenuhi
	Berat isi	≥1,4 – 0,13	1,55	Memenuhi
	Kadar lumpur	≥1,0	0,004	Memenuhi
	Keausan	≤40%	36,68	Memenuhi
	Lolos saringan	-	No 3/8” – 30 (9,5 – 0,59 mm)	Memenuhi
Limbah marmer serbuk	Analisis saringan	1,5 – 3,8	2,67	Memenuhi
	Kadar air	≤5%	3,32	Memenuhi
	Berat jenis SSD	≥2,5	2,51	Memenuhi
	Daya serap	≤3,0%	0,18	Memenuhi
	Berat isi	≥1,4	1,45	Memenuhi
	Kadar lumpur	≤7,0	0,1	Memenuhi
	Lolos saringan	-	No 3/8” – 200 (9,5 – 0,075 mm)	Memenuhi

Tabel 7 menunjukkan bahwa hasil pengujian agregat halus, agregat kasar, limbah marmer, dan limbah serbuk marmer semuanya memenuhi persyaratan untuk dianggap sebagai agregat yang layak untuk digunakan dalam campuran beton. Penelitian sebelumnya dengan menggunakan parameter yang sama menghasilkan hasil berikut: pengujian agregat halus 3,16, berat jenis 2,52, daya serap 1,50, berat satuan 2,05, kadar lumpur 2,79; pengujian agregat kasar 7,07, berat jenis 2,55, daya serap 2,89, berat satuan 1,51, kadar lumpur 0,73, dan keausan 19,23; dan pengujian mutu batu marmer 8,93, berat jenis 2,72, daya serap 1,6, berat satuan 0,13, dan keausan 32,21 (Safari & Setiawan, 2023).

Hasil Pengujian Kuat Tekan

Silinder (dapat dilihat pada Gambar 2) berukuran lima belas sentimeter kali tiga puluh sentimeter digunakan sebagai benda uji untuk uji kuat tekan. Para peneliti menguji kekuatan beton pada umur tujuh dan dua puluh delapan hari. Tujuan uji kuat tekan (dapat dilihat pada Gambar 2) adalah untuk menentukan kuat tekan bahan limbah yang terdiri

dari semen, marmer, dan kombinasi limbah dan marmer. Setelah penerapan campuran beton yang ditentukan pada setiap benda uji, diperoleh hasil uji kuat tekan berikut:



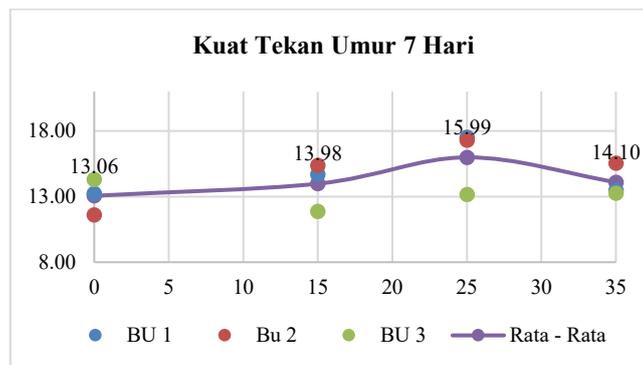
Gambar 2. Pengujian uji tekan

Kuat Tekan Limbah Serbuk Marmer Untuk Usia 7 Hari Dan 28 Hari

Tabel 8. Hasil pengujian kuat tekan limbah serbuk marmer usia 7 hari

Benda Uji	Limbah Serbuk Marmer	Berat (kg)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Beban Tekan (N)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
			T (mm)	D (mm)				
BU 1	0%	12,34	300	150	17662,5	233900	13,24	13,06
BU 2		12,26	300	150	17662,5	205300	11,62	
BU 3		12,22	300	150	17662,5	253000	14,32	
BU 1	15%	12,37	300	150	17662,5	259900	14,71	13,98
BU 2		12,46	300	150	17662,5	271500	15,37	
BU 3		12,43	300	150	17662,5	209600	11,87	
BU 1	25%	12,41	300	150	17662,5	309300	17,51	15,99
BU 2		12,5	300	150	17662,5	305300	17,29	
BU 3		12,33	300	150	17662,5	232600	13,17	
BU 1	35%	12,32	300	150	17662,5	238300	13,49	12,21
BU 2		12,36	300	150	17662,5	174500	9,88	
BU 3		12,44	300	150	17662,5	234300	13,27	

Berdasarkan Tabel 8 hasil pengujian kuat tekan dengan menggunakan serbuk marmer sisa umur tujuh hari sebagai pengganti agregat halus pada perkerasan kaku adalah 0% (13,06 MPa), 15% (13,98 MPa), 25% (15,99 MPa), dan 35% (14,10 MPa). Pada pengujian kuat tekan, rata-rata tertinggi adalah 25% (15,99 MPa) dan terendah adalah 35% (12,21 MPa).



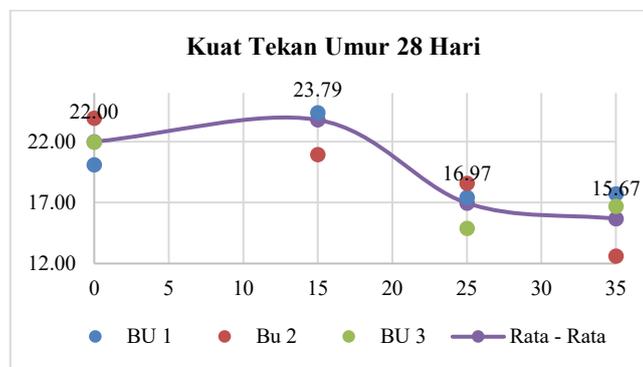
Gambar 3. Diagram kuat tekan limbah serbuk marmer usia 7 hari

Penelitian terdahulu oleh (Nastalia et al., 2023) menggunakan sisa serbuk marmer untuk menganalisis kuat tekan beton biasa. Dengan perbedaan 0%, 5%, 10%, dan 15%, rata-rata umur setelah tujuh hari adalah 25,41 MPa, 26,46 MPa, 22,63 MPa, dan 19,32 MPa. Beton dengan variasi 5% menunjukkan nilai kuat tekan beton rata-rata tertinggi hingga terendah, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil pengujian yang dilakukan pada semua varian. berdasarkan temuan uji kuat tekan pada Gambar 3 menggunakan sisa serbuk marmer sebagai pengganti agregat halus pada perkerasan kaku dengan variasi 0%, 15%, 25%, dan 35%. Tujuh hari setelah mutu beton yang ditargetkan $f_c'21,7$ MPa diterapkan, kuat tekan diukur. Benda uji berukuran 15 x 30 sentimeter. 0% (13,06 MPa), 15% (13,98 MPa), 25% (15,99 MPa), dan 35% (14,10 MPa) merupakan hasil pengujian kuat tekan pada umur 7 hari. Berdasarkan hasil tersebut, terlihat bahwa nilai kuat tekan setelah 7 hari tidak mencapai kriteria yang diinginkan yaitu 21,7 MPa.

Tabel 9. Hasil pengujian kuat tekan limbah serbuk marmer usia 28 hari

Benda Uji	Limbah Serbuk Marmer	Berat (kg)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Beban Tekan (N)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
			T (mm)	D (mm)				
BU 1	0%	12,94	300	150	17662,5	354800	20,09	22
BU 2		13,08	300	150	17662,5	422600	23,93	
BU 3		12,78	300	150	17662,5	388100	21,97	
BU 1	15%	12,58	300	150	17662,5	430500	24,37	23,79
BU 2		12,78	300	150	17662,5	369900	20,94	
BU 3		12,65	300	150	17662,5	460100	26,05	
BU 1	25%	12,37	300	150	17662,5	307600	17,42	16,97
BU 2		12,48	300	150	17662,5	328400	18,59	
BU 3		12,48	300	150	17662,5	263000	14,89	
BU 1	35%	12,4	300	150	17662,5	312900	17,72	15,67
BU 2		12,28	300	150	17662,5	222800	12,61	
BU 3		12,27	300	150	17662,5	294700	16,69	

Berdasarkan hasil uji kuat tekan pada Tabel 9 dan Gambar 4 menggunakan limbah serbuk marmer umur 28 hari yakni 0% (22,00 MPa), 15% (23,79 MPa), 25% (16,97 MPa) dan 35% (15,67MPa).



Gambar 4. Diagram kuat tekan limbah serbuk marmer 28 hari

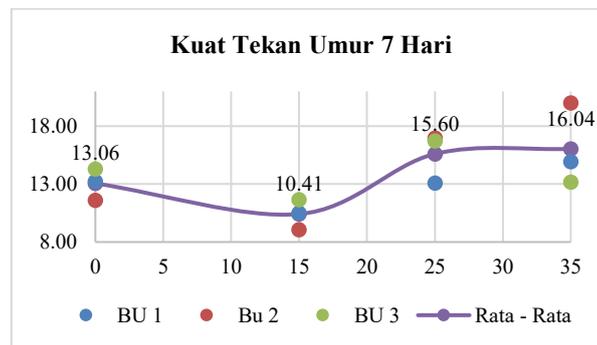
Penelitian terdahulu tentang kuat tekan telah meneliti dampak penggunaan sifat-sifat limbah sebagai filler (Rusdianto & Munir, 2015). Rata-rata umur beton 28 hari adalah 27,24 MPa, 28,28 MPa, 25,83 MPa, 26,20 MPa, 24,13 MPa, 23,28 MPa, dan 21,68 MPa dengan variansi 0%, 5%, 10%, 15% dan 20%, 25% dan 30%. Hasil nilai kuat tekan menunjukkan kuat tekan maksimum untuk variasi penambahan 5% sebesar 28,283 N/mm². Pada perubahan penambahan 10%, kuat tekan beton tidak stabil. Berdasarkan penelitian ini, salah satu kemungkinan penyebabnya adalah proses pemancangan yang tidak menentu. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton yaitu 0% (22,00 MPa), 15% (23,79 MPa), 25% (16,97 MPa), dan 35% (15,67 MPa) dengan memanfaatkan serbuk Sampah halus yang berumur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya persentase serbuk Sampah marmer.

Kuat Tekan Limbah Batu Marmer 7 Hari Dan 28 Hari

Tabel 10. Hasil pengujian kuat tekan limbah batu marmer 7 hari

Benda Uji	Limbah Serbuk Marmer	Berat (kg)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Beban Tekan (N)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
			T (mm)	D (mm)				
BU 1	0%	12,34	300	150	17662,5	233900	13,24	13,06
BU 2		12,26	300	150	17662,5	205300	11,62	
BU 3		12,22	300	150	17662,5	253000	14,32	
BU 1	15%	12,73	300	150	17662,5	185700	10,51	10,42
BU 2		12,27	300	150	17662,5	160200	9,07	
BU 3		12,68	300	150	17662,5	206000	11,66	
BU 1	25%	12,50	300	150	17662,5	231300	13,10	15,60
BU 2		12,55	300	150	17662,5	299900	16,98	
BU 3		12,43	300	150	17662,5	295500	16,73	
BU 1	35%	12,67	300	150	17662,5	264100	14,95	16,04
BU 2		12,54	300	150	17662,5	353400	20,01	
BU 3		12,52	300	150	17662,5	232600	13,17	

Hasil pengujian kuat tekan pada umur tujuh hari pada Tabel 10 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa 0% (13,06 MPa), 15% (10,42 MPa), 25% (15,60 MPa), dan 35% (16,04 MPa), berdasarkan hasil pengujian kuat tekan dengan pemanfaatan limbah marmer. Berdasarkan hasil pengujian tersebut di atas, dapat dikatakan bahwa penelitian saya telah menghasilkan beton dengan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang dibuat tanpa menggunakan limbah marmer.



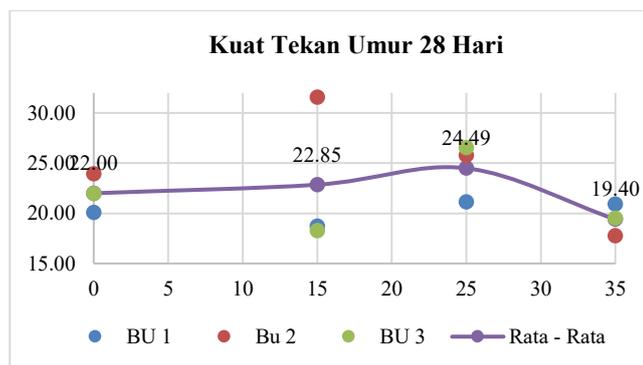
Gambar 5. Diagram kuat tekan limbah batu marmer 7 hari

Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan limbah batu marmer 28 hari

Benda Uji	Limbah Serbuk Marmer	Berat (kg)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Beban Tekan (N)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
			T (mm)	D (mm)				
BU 1	0%	12,94	300	150	17662,5	354800	20,09	22
BU 2		13,08	300	150	17662,5	422600	23,93	
BU 3		12,78	300	150	17662,5	388100	21,97	
BU 1	15%	12,75	300	150	17662,5	330700	18,72	22,85
BU 2		12,95	300	150	17662,5	557500	31,56	
BU 3		12,78	300	150	17662,5	322800	18,28	
BU 1	25%	12,72	300	150	17662,5	373400	21,14	24,49
BU 2		12,9	300	150	17662,5	455500	25,79	
BU 3		12,91	300	150	17662,5	468800	26,54	
BU 1	35%	12,83	300	150	17662,5	369500	20,92	19,4
BU 2		13,04	300	150	17662,5	313900	17,77	
BU 3		12,89	300	150	17662,5	344600	19,51	

Berdasarkan penelitian (Lestari, 2021), rata-rata kuat tekan beton setelah umur tujuh hari dengan variasi limbah marmer 0%, 15%, 25%, dan 35% adalah sebesar 18,80 MPa, 20,23 MPa, 20,98 MPa, dan 20,19 MPa. Jika dibandingkan dengan variasi 0% (beton normal), hasil nilai kuat tekan menunjukkan sedikit peningkatan kuat tekan pada setiap variasi termasuk pada substitusi agregat kasar dengan potongan marmer. Hasil pengujian kuat tekan pada umur tujuh hari pada Tabel 11 dan Gambar 6 menghasilkan pengujian kuat tekan dengan memanfaatkan limbah marmer adalah sebesar 0% (13,06 MPa), 15% (10,42 MPa), 25% (15,60 MPa), dan 35% (16,04 MPa). Berdasarkan hasil temuan di atas, dapat dikatakan bahwa penelitian saya telah menghasilkan beton dengan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton yang dibuat tanpa menggunakan puing marmer.

Berdasarkan hasil uji kuat tekan dengan 0% (22,00 MPa), 15% (22,85), 25% (24,49), dan 35% (19,40 MPa) limbah marmer yang digunakan sebagai pengganti agregat umur 28 hari. Berdasarkan hasil tersebut, terlihat jelas dari hasil di atas bahwa nilai kuat tekan beton akhir telah mengalami peningkatan dan variasi sebesar 25% merupakan nilai yang ideal.



Gambar 6. Diagram kuat tekan limbah batu marmer 28 hari

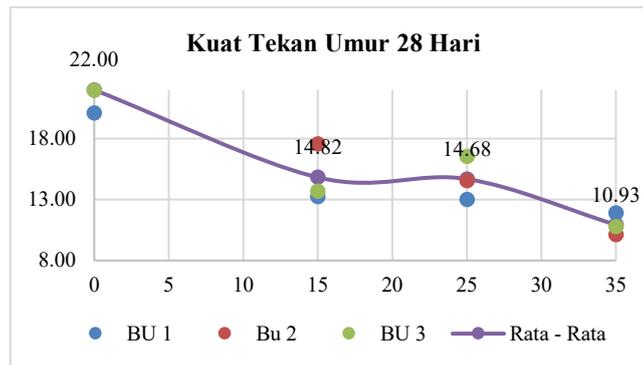
Sampah alam telah dimanfaatkan secara kreatif dalam penelitian terdahulu untuk menggantikan agregat kasar pada beton ramah lingkungan (Daffa et al., 2023). Pada umur 28 hari, rata-rata kuat tekan beton adalah 30,82 MPa, 33,88 MPa, dan 32,01 MPa, tergantung pada persentase abu aMPas kopi (0%, 30%, dan 50%). Nilai kuat tekan bervariasi, dengan 30% dari volume agregat kasar menunjukkan kualitas terbaik. 0% (22,00 MPa), 15% (22,85), 25% (24,49), dan 35% (19,40 MPa) merupakan hasil uji kuat tekan yang dilakukan dengan memanfaatkan sisa batu marmer sebagai pengganti agregat yang telah berumur 28 hari. Jelas dari statistik berikut bahwa nilai kuat tekan beton akhir telah meningkat, dengan variasi 25% menjadi jumlah ideal.

Pengujian Kuat Tekan Limbah Campuran Batu Marmer Dan Serbuk Marmer Umur 28 Hari

Tabel 12. Hasil pengujian kuat tekan limbah campuran marmer dan serbuk marmer 28 hari

Benda Uji	Limbah Serbuk Marmer	Berat (kg)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Beban Tekan (N)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
			T (mm)	D (mm)				
BU 1	0%	12,94	300	150	17662,5	354800	20,09	22,00
BU 2		13,08	300	150	17662,5	422600	23,93	
BU 3		12,78	300	150	17662,5	388100	21,97	
BU 1	15%	12,80	300	150	17662,5	233600	13,226	14,820
BU 2		12,66	300	150	17662,5	310300	17,568	
BU 3		12,87	300	150	17662,5	241400	13,667	
BU 1	25%	13,00	300	150	17662,5	229400	12,988	14,685
BU 2		12,64	300	150	17662,5	256800	14,539	
BU 3		12,73	300	150	17662,5	291900	16,527	
BU 1	35%	12,36	300	150	17662,5	210300	11,907	10,931
BU 2		12,51	300	150	17662,5	178700	10,117	
BU 3		12,49	300	150	17662,5	190200	10,769	

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari pada Tabel 12 yang menyatakan mensubstitusi agregat kasar dan agregat halus dengan kombinasi limbah marmer dan serbuk diperoleh hasil sebagai berikut: 0% (22,00 MPa), 15% (14,82), 25% (14,68), dan 35% (10,93 MPa).



Gambar 7. Diagram kuat tekan limbah campuran 28 hari

Dalam penelitian terkini, 28 hari setelah mutu beton $f_c'18,64$ MPa diukur kuat tekannya. Benda uji yang digunakan berukuran 15×30 cm. Pada umur 28 hari, rata-rata kuat tekan beton dengan variasi 25%, 50%, 75%, dan 100% pada limbah dan serbuk marmer adalah 24,42 MPa, 24,51 MPa, 25,45 MPa, dan 23,66 MPa (Nauk et al., 2012). Berdasarkan data tersebut, nilai kuat tekannya tetap berada di antara 15 sampai 30 MPa, yang merupakan kisaran tipikal untuk kuat tekan beton. Dengan menggunakan campuran marmer dan serbuk marmer sebagai pengganti agregat kasar dan halus, hasil uji kuat tekan setelah 28 hari adalah sebagai berikut: 0% (22,00 MPa), 15% (14,82), 25% (14,68), dan 35% (10,93 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan penelitian dengan menggunakan campuran limbah batu dan serbuk, nilai kuat tekan turun dan semakin rendah jika variasi penyajian semakin besar. Namun, perbedaannya semakin besar jika dibandingkan dengan 0% (beton biasa).

Pengujian Kuat Lentur

Politeknik Negeri Malang menyelenggarakan uji coba untuk mengevaluasi kekuatan lentur pelat beton bertulang (dapat dilihat pada Gambar 8) menggunakan limbah dan serbuk marmer sebagai pengganti agregat kasar dan halus. Terdapat satu item uji untuk setiap modifikasi pada pelat berukuran $120 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$. Temuan ini menunjukkan bagaimana beban dan lendutan saling terkait pada setiap variasi benda uji pelat beton. Pada Tabel 13 hasil uji beban dan lendutan gabungan dengan variasi limbah 0%, 15%, 15%, dan 35%.



Gambar 8. Pengujian lentur

Pengujian Kuat Lentur Limbah Serbuk Marmer

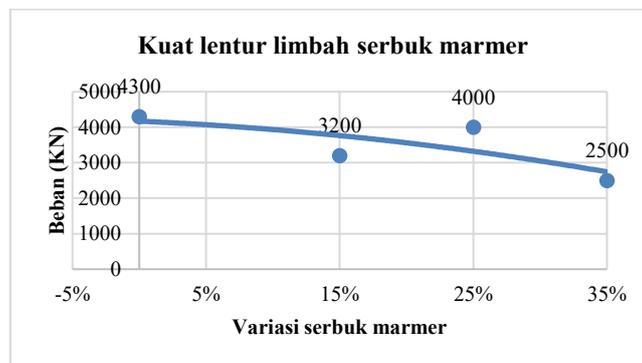
Tabel 13. Hasil pengujian kuat lentur limbah serbuk marmer

No	Beban	Variasi Limbah Serbuk Lendutan(mm)				Rata- rata
		0%	15%	25%	35%	
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	100	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02
3	200	0.12	0.04	0.07	0.02	0.06
4	300	0.16	0.07	0.11	0.05	0.10

Tabel 14 (Lanjutan). Hasil pengujian kuat lentur limbah serbuk marmer

No	Beban	Variasi Limbah Serbuk Lendutan(mm)				Rata- rata
		0%	15%	25%	35%	
5	400	0.24	0.08	0.13	0.08	0.13
6	500	0.25	0.09	0.17	0.11	0.16
7	600	0.32	0.11	0.21	0.13	0.19
8	700	0.39	0.13	0.29	0.17	0.25
9	800	0.41	0.14	0.33	0.21	0.27
10	900	0.42	0.16	0.47	0.28	0.33
11	1000	0.46	0.18	0.53	0.34	0.38
12	1100	0.52	0.21	0.55	0.36	0.41
13	1200	0.58	0.23	0.59	0.44	0.46
14	1300	0.64	0.24	0.64	0.86	0.60
15	1400	0.67	0.26	0.67	0.94	0.64
16	1500	0.69	0.29	0.71	1.02	0.68
17	1600	0.71	0.31	0.75	1.12	0.72
18	1700	0.76	0.33	0.81	1.29	0.80
19	1800	0.77	0.35	0.85	1.39	0.84
20	1900	0.81	0.39	0.93	1.66	0.95
21	2000	0.87	0.54	0.97	2.15	1.13
22	2100	0.95	1.15	1.02	2.36	1.37
23	2200	0.97	1.27	1.11	2.63	1.50
24	2300	0.99	1.36	1.15	3.13	1.66
25	2400	1.03	1.39	1.25	3.49	1.79
26	2500	1.06	1.48	1.56	5.37	2.37
27	2600	1.08	1.59	1.65		1.44
28	2700	1.12	2.15	1.74		1.67
29	2800	1.24	2.22	1.85		1.77
30	2900	1.43	2.31	1.93		1.89
31	3000	1.79	2.65	2.11		2.18
32	3100	1.89	3.34	2.21		2.48
33	3200	2.04	3.49	2.28		2.60
34	3300	2.12		2.39		2.26
35	3400	2.13		2.49		2.31
36	3500	2.14		2.64		2.39
37	3600	2.16		2.84		2.50
38	3700	2.18		3.21		2.70
39	3800	2.22		3.55		2.89
40	3900	2.24		5.37		3.81
41	4000	2.31		6.21		4.26
42	4100	2.43				2.43
43	4200	2.66				2.66
44	4300	3.93				3.93

Pada Tabel 13 dan Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur serbuk marmer diperoleh sebesar adalah 0% (4300 kg), 15% (3200 kg), 25% (4000 kg), dan 35% (2500 kg). Jumlah lendutan bervariasi sebesar 0% (3,93 mm), 15% (3,49 mm), 25% (6,21 mm), dan 35% (5,37 mm) pada setiap item pengujian.



Gambar 9. Grafik kuat lentur limbah serbuk marmer umur 28 hari

Uji beban batas tertinggi untuk setiap perilaku gravitasi unik dalam studi sebelumnya oleh (et al., 2021) adalah 0% (2300 kg), 5% (2125 kg), 10% (2042 kg), 15% (1875 kg), dan 20% (1750 kg). Defleksi setiap benda uji bervariasi sebesar 0% (5,88 mm), 5% (5,10 mm), 10% (4,31 mm), 15% (3,86 mm), dan 20% (3,61 mm). Jelas dari temuan ini bahwa (4,31) adalah nilai defleksi 0% terbesar. Berdasarkan hasil uji beban maksimum pada masing-masing benda uji yang dilakukan dengan menggunakan serbuk marmer sebagai pengganti agregat halus, diperoleh hasil sebagai berikut: 0% (4300 kg), 15% (3200 kg), 25% (4000 kg), dan 35% (2500 kg). Selisih lendutan yang dialami masing-masing benda uji adalah sebagai berikut: 0% (3,93 mm), 15% (3,49 mm), 25% (6,21 mm), dan 35% (5,37 mm). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai lendutan terbesar terdapat pada presentasi 25% sebesar 6,21.

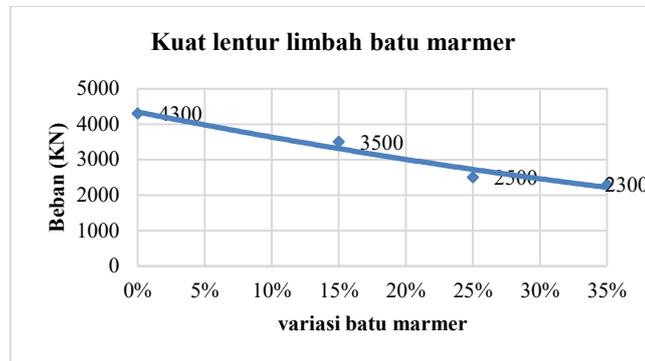
Pengujian Kuat Lentur Limbah Batu Marmer

Tabel 15. Hasil pengujian kuat lentur limbah batu marmer

No	Beban	Variasi Limbah batu				Rata-rata
		Lendutan(mm)				
		0%	15%	25%	35%	
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	100	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
3	200	0,12	0,04	0,07	0,04	0,07
4	300	0,16	0,15	0,17	0,07	0,14
5	400	0,24	0,17	0,22	0,13	0,19
6	500	0,25	0,19	0,36	0,21	0,25
7	600	0,32	0,22	0,45	0,25	0,31
8	700	0,39	0,29	0,49	0,31	0,37
9	800	0,41	0,33	0,56	0,35	0,41
10	900	0,42	0,47	0,64	0,4	0,48
11	1000	0,46	0,52	0,69	0,42	0,52
12	1100	0,52	0,60	0,75	0,48	0,59
13	1200	0,58	0,65	0,79	0,54	0,64
14	1300	0,64	0,72	0,87	0,6	0,71
15	1400	0,67	0,78	0,91	0,65	0,75
16	1500	0,69	0,85	1,02	0,69	0,81
17	1600	0,71	0,89	1,12	0,73	0,86
18	1700	0,76	0,93	1,19	0,76	0,91
19	1800	0,77	0,98	1,27	0,78	0,95
20	1900	0,81	1,07	1,71	0,81	1,10
21	2000	0,87	1,36	2,15	0,85	1,31
22	2100	0,95	1,53	2,46	0,86	1,45
23	2200	0,97	1,65	2,52	0,91	1,51
24	2300	0,99	1,74	2,63	0,32	1,42
25	2400	1,03	1,83	2,76		1,87
26	2500	1,06	2,16	2,89		2,04
27	2600	1,08	2,32			1,7
28	2700	1,12	2,51			1,815
29	2800	1,24	2,69			1,965
30	2900	1,43	2,87			2,15
31	3000	1,79	2,93			2,36
32	3100	1,89	3,13			2,51
33	3200	2,04	3,26			2,65
34	3300	2,12	3,32			2,72
35	3400	2,13	3,48			2,81
36	3500	2,14	3,67			2,91
37	3600	2,16				2,16
38	3700	2,18				2,18
39	3800	2,22				2,22
40	3900	2,24				2,24
41	4000	2,31				2,31
42	4100	2,43				2,43
43	4200	2,66				2,66
44	4300	3,93				3,93

Pada Tabel 14 dan Gambar 10 menunjukkan hasil pengujian kuat lentur batu marmer diperoleh sebesar 0% (4.300 kg), 15% (3.500 kg), 25% (2.500 kg), dan 35% (2.300 kg) berdasarkan hasil pengujian beban maksimum pada masing-

masing benda uji pemanfaatan puing marmer sebagai pengganti agregat kasar. Pada masing-masing benda uji terdapat variasi lendutan rata-rata sebesar 0% (3,93 mm), 15% (2,91 mm), 25% (2,04 mm), dan 35% (1,87 mm).



Gambar 10. Grafik pengujian kuat lentur limbah batu marmer

Beban batas maksimum untuk setiap perilaku gravitasi individu ditentukan oleh hasil pengujian pada penelitian sebelumnya (Saputro et al., 2022) dan sebesar 0% (6500 kg), 30% (5700 kg), 50% (4800 kg), dan 70% (4000 kg). Selisih lendutan yang terjadi pada setiap benda uji adalah 0% (6,50 mm), 30% (5,67 mm), 50% (4,83 mm), dan 70% (4,00 mm). Hasil uji beban maksimum pada setiap benda uji adalah 0% (4300 kg), 15% (3500 kg), 25% (2500 kg), dan 35% (2300 kg) berdasarkan hasil uji kuat lentur yang dilakukan dengan memanfaatkan puing marmer sebagai pengganti agregat kasar. Deviasi rata-rata yang diamati pada setiap benda uji, dengan persentase perubahan sebesar 0% (3,93 mm), 15% (2,91 mm), 25% (2,04 mm), dan 35% (1,87 mm). Nilai defleksi tertinggi terdapat pada penyajian 0% sebesar 2,91, menurut hasil pengujian peneliti.

Hasil pengujian kuat lentur limbah campuran batu marmer dan serbuk marmer

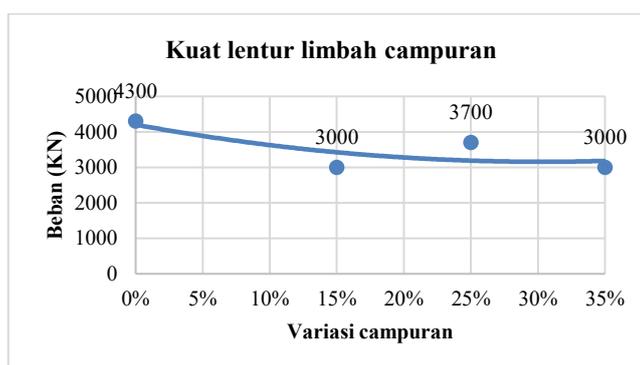
Tabel 16. Hasil pengujian kuat lentur limbah campuran marmer

No	Beban	Variasi limbah campuran Lendutan (mm)				Rata-rata
		0%	15%	25%	35%	
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3	200	0,12	0,04	0,03	0,05	0,06
4	300	0,16	0,06	0,07	0,09	0,10
5	400	0,24	0,41	0,21	0,17	0,26
6	500	0,25	0,77	0,31	0,29	0,41
7	600	0,32	0,84	0,37	0,69	0,56
8	700	0,39	0,93	0,47	1,07	0,72
9	800	0,41	0,96	0,53	1,15	0,76
10	900	0,42	0,97	0,57	1,19	0,79
11	1000	0,46	1,10	0,62	1,23	0,85
12	1100	0,52	1,12	0,71	1,27	0,91
13	1200	0,58	1,17	0,79	1,35	0,97
14	1300	0,64	1,21	0,80	1,41	1,02
15	1400	0,67	1,33	0,86	1,45	1,08
16	1500	0,69	1,40	0,92	1,56	1,14
17	1600	0,71	1,59	0,97	1,71	1,25
18	1700	0,76	1,74	1,02	1,79	1,33
19	1800	0,77	1,89	1,07	1,87	1,40
20	1900	0,81	1,98	1,14	2,15	1,52
21	2000	0,87	2,08	1,23	2,37	1,64
22	2100	0,95	2,22	1,49	2,58	1,81
23	2200	0,97	2,39	1,64	2,62	1,91
24	2300	0,99	2,56	1,70	2,82	2,02
25	2400	1,03	2,87	1,77	2,95	2,16
26	2500	1,06	3,02	1,87	3,09	2,26
27	2600	1,08	3,17	1,98	3,23	2,37
28	2700	1,12	3,31	2,07	3,34	2,46

Tabel 17 (Lanjutan). Hasil pengujian kuat lentur limbah campuran marmer

No	Beban	Variasi limbah campuran				Rata-rata
		Lendutan (mm)				
		0%	15%	25%	35%	
29	2800	1,24	3,52	2,21	3,46	2,61
30	2900	1,43	3,74	2,42	3,58	2,79
31	3000	1,79	4,17	2,53	3,62	3,03
32	3100	1,89		2,65		2,27
33	3200	2,04		2,77		2,41
34	3300	2,12		2,90		2,51
35	3400	2,13		3,04		2,59
36	3500	2,14		3,54		2,84
37	3600	2,16		4,12		3,14
38	3700	2,18		4,71		3,45
39	3800	2,22				2,22
40	3900	2,24				2,24
41	4000	2,31				2,31
42	4100	2,43				2,43
43	4200	2,58				2,58
44	4300	2,78				2,78

Berdasarkan hasil uji kuat lentur menggunakan kombinasi sisa serbuk marmer yang digunakan sebagai pengganti agregat halus dan potongan marmer yang digunakan sebagai pengganti agregat kasar. Hasil uji beban maksimum untuk setiap item uji dengan sisa serbuk sebesar 0% (4300 kg), 15% (3000 kg), 25% (3700 kg), dan 35% (3000 kg) ditunjukkan pada Tabel 15 dan Gambar 11. penyimpangan sebesar 0% (3,93 mm), 15% (4,17 mm), 25% (4,71 mm), dan 35% (3,62 mm) yang diamati pada setiap item uji.



Gambar 11. Grafik pengujian kuat lentur limbah campuran marmer

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur dengan menggunakan kombinasi serbuk marmer sisa pengganti agregat halus dan pecahan marmer pengganti agregat kasar. Hasil pengujian beban maksimum dengan menggunakan serbuk Sampah sebesar 0% (4300 kg), 15% (3000 kg), 25% (3700 kg), dan 35% (3000 kg) untuk setiap benda uji. Perubahan lendutan yang terjadi pada setiap benda uji sebesar 0% (3,93 mm), 15% (4,17 mm), 25% (4,71 mm), dan 35% (3,62 mm). Berdasarkan hasil pengujian peneliti, lendutan yang terjadi sebesar 25% dari 4,71 merupakan nilai lendutan yang paling besar.

4. KESIMPULAN

Hasil pengujian dan perhitungan nilai uji kuat tekan serbuk marmer limbah sebagai pengganti agregat halus, batu marmer limbah sebagai pengganti agregat kasar, dan campuran batu marmer limbah dan serbuk marmer sebagai pengganti agregat kasar dan agregat halus selama tujuh hari dengan variasi 0%, 15%, 25%, dan 35% dengan mutu beton rencana 21,7 MPa. Tidak ada yang memenuhi kriteria yang dijadwalkan selama jangka waktu tujuh hari. Sedangkan selama 28 hari nilai kuat tekan serbuk marmer yang paling optimal dengan variasi 15% dan juga 0% telah memenuhi persyaratan rencana; untuk limbah batu marmer nilai optimum berada pada variasi 25%; dan untuk limbah campuran hanya variasi 0% (beton normal) yang memenuhi persyaratan.

Hasil pengujian dan perhitungan kuat lentur pada perkerasan kaku dengan variasi 0%, 15%, 25%, dan 35% pada umur 28 hari, dengan mutu beton rencana $f_c'21,7$ MPa, dengan menggunakan limbah serbuk marmer sebagai pengganti agregat halus dan limbah batu marmer sebagai pengganti agregat kasar dan limbah batu campuran serta serbuk marmer

sebagai pengganti agregat kasar dan agregat halus. Berdasarkan hasil pengujian serbuk marmer, lendutan terbesar terjadi pada variasi 25% atau 4,26 mm dan beban tekan maksimum pada beton biasa. Lendutan terbesar pada limbah batu marmer terjadi pada variasi 0% (beton biasa) atau 3,93 mm sedangkan beban tekan maksimum pada beton standar. Sebaliknya pada limbah campuran lendutan terbesar terjadi pada variasi 25% atau 4,71 mm dan beban tekan maksimum pada beton biasa.

DAFTAR PUSTAKA

- Amal, A. S., & Saputra, W. (2019). Pemanfaatan Limbah Abu Marmer Sebagai Filler Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Lapis Tipis Aspal Pasir (Latasir) B. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 16(2), 67–78. <https://doi.org/10.22219/jmts.v16i2.6744>
- Badaron, S. F., Gecong, A., Anies, M. K., Achmad, W. M., & Setiani, E. P. (2019). Studi Perbandingan Kuat Tarik Tidak Langsung terhadap Campuran Aspal Beton dengan menggunakan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi sebagai Filler. *PENA TEKNIK: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Teknik*, 4(2), 145. https://doi.org/10.51557/pt_jiit.v4i2.593
- Daffa, N., Anisah, & Lenggogeni. (2023). Inovasi Pemanfaatan Limbah Marmer sebagai Substitusi Agregat Kasar Untuk Beton yang Ramah Lingkungan. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3), 27807–27813.
- Gardjito, E. (2017). Study perencanaan geometrik, perkerasan jalan dan perencanaan anggaran biaya pada jalan raya Kalidawir – Ds. Ngubalan Kec. Kalidawir. *UKaRsT*, 1(2), 11–18.
- Gecong, A., Dharmawan, B., & Novraji, A. I. (2019). Pengaruh Limbah Marmer sebagai Filler pada Campuran Beton Aspal terhadap Pengujian Modulus Resilien. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 4(2), 125–137. <https://doi.org/10.33096/jtsm.v4i2.368>
- Lestari, A. D. (2021). Pengujian Kuat Tekan Pada Beton Dengan Limbah Marmer Sebagai Substitusi Agregat Kasar. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 6(1), 61–69. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2263>
- Lidya, K., Oktaviastuti, B., & Sa'dillah, M. (2025). Kuat tekan limbah pecahan marmer sebagai pengganti agregat kasar pada perkerasan kaku. *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 23(2), 166-178.
- Nastalia, R., Naibaho, A., & Sugeng, R. (2023). Analisis Kuat Tekan Dan Tarik Beton Normal Menggunakan Serbuk Limbah Gergaji Marmer Sebagai Substitusi Semen. *JOS - MRK*, 4(1), 160–165. <http://jos-mrk.polinema.ac.id/>
- Nauk, S. S., Hunggurami, E., & Bolla, M. E. (2012). Penggunaan Limbah Batu Marmer Dari Gunung Batu Naitapan Kabupaten Timor Tengah Selatan Sebagai Alternatif Pengganti Agregat Pada Campuran Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(4), 1. www.tekmira.esdm.go.id
- Nukar, M. S., Sadillah, M., & Oktaviastuti, B. (2024). Effect of Marble Powder Waste as Fine Aggregate Substitution in Rigid Pavement. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 249–261.
- Oktaviastuti, B., & Yurnalisdell, Y. (2020). Studi Kuat Tekan Beton Geopolymer Dengan Fly Ash Sebagai Perkerasan Kaku Di Pesisir Pantai. *Jurnal Fondasi*, 9(2), 201. <https://doi.org/10.36055/jft.v9i2.8515>
- Pramesti, H. R., Qomariah, & Naibaho, A. (2022). Efisiensi Penggunaan Limbah Batu Marmer (Brokol) Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Kasar Pada Mix Design Beton. *JOS - MRK*, 3(4), 1–6. <http://jos-mrk.polinema.ac.id/>
- Rusdianto, Y., & Munir, M. (2015). Penggunaan Limbah Marmer Sebagai Filler Terhadap Absorpsi, Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Beton. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 13(1), 99. <https://doi.org/10.22219/jmts.v13i1.2549>
- Safari, A., & Setiawan, A. A. (2023). Pemanfaatan Limbah Batu Marmer sebagai Substitusi Parsial Agregat Kasar pada Campuran Beton terhadap Kuat Tekan Beton. *Dinamika Rekayasa*, 19(2), 141–146.

