

Pengaruh Pecahan Batu Marmer dan *Fly Ash* Sebagai Bahan Substitusi Pada Campuran Beton

Gabriel Maholi Nahampun^{*1a}, Jonie Tanijaya^{*2}, Suryanti rapang Tonapa^{*3}

Submit :
30 Januari 2024

^{*1} Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia gabrielmaholi@gmail.com

Review :
5 Februari 2024

^{*2} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia jonie.tanijaya@gmail.com

Revised :
23 Mei 2024

^{*2} Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar, Indonesia suryantirt19@gmail.com

Published:
11 Juni 2024

^aCorresponding Author: gabrielmaholi@gmail.com

Abstrak

Beton yaitu material utama pada pembuatan suatu konstruksi. Untuk menciptakan produksi beton yang lebih ramah lingkungan adalah dengan penggunaan material alternatif, yaitu dengan memanfaatkan limbah pecahan marmer menjadi material substitusi agregat kasar pada pembuatan beton. Selain itu, material yang mempunyai karakteristik pozzolan dapat digunakan untuk mengurangi penggunaan semen dalam produksi beton salah satunya yaitu *fly ash*. Penelitian berjalan selama kurang lebih 3 bulan serta diadakan pada Laboratorium Beton, Prodi Teknik Sipil, UKI Paulus. Studi ini merupakan pengujian eksperimental meliputi pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan agregat halus, kekuatan tekanan, kekuatan tarik belah serta kekuatan lentur. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, pengaruh *fly ash* serta pecahan marmer menjadi material substitusi dalam pembuatan beton kepada nilai kekuatan tekan, tarik belah serta lentur beton diperoleh hasil maksimum *Fly ash* pada varian 10% yaitu 25,643 dengan persentase kenaikan 1,49%, pada varian 12,5% yaitu 25,549 dengan persentase kenaikan 1,12% dan mengalami penurunan kuat pada varian *fly ash* 15% yaitu 24,512 dengan persentase penurunan 2,98%. Jadi, makin tinggi persentase substitusi Abu terbang maka kuat beton juga menurun.

Kata kunci: *Fly Ash*, Batu Marmer, Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Kuat Lentur

Abstract

Concrete is the main material in making construction. To create more environmentally friendly concrete production is by using alternative materials, namely by utilizing marble fragment waste as a substitute material for coarse aggregate in making concrete. Apart from that, materials that have pozzolan characteristics can be used to reduce the use of cement in concrete production, one of which is *fly ash*. The research ran for approximately 3 months and was held at the Structures and Materials Laboratory, Civil Engineering Study Program, UKI Paulus Makassar. This study is an experimental test including examining the characteristics of coarse aggregate and fine aggregate, compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength. Based on the results of the tests carried out, the effect of *fly ash* and marble fragments as a substitute material in the concrete mixture on the pressure, splitting tensile and flexural strength values of concrete obtained the maximum result of *Fly ash* in the 10% variant, namely 25.643 with a percentage increase of 1.49%, in the variant 12.5%, namely 25,549 with a percentage increase of 1.12% and experienced a decrease in power in the *fly ash* variant of 15%, namely 24,512 with a percentage decrease of 2.98%. So, the higher the percentage of *fly ash* substitution, the strength of the concrete also decreases.

Key words: *Fly Ash*, Marble Stone, Compressive Strength, Split Tensile Strength, Flexural Strength

PENDAHULUAN

Beton yaitu suatu massa padat yang bisa dibentuk dengan menggabungkan semen portland ataupun semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar serta air, memakai maupun tanpa material tambah lain [1]. Beton normal terbuat dari batuan alami yang tidak terurai dan tidak memerlukan bahan tambahan [2]. Beton terdiri atas beberapa campuran bahan, yaitu: Semen Portland Komposit/PCC (*Portland Composite Cement*); Agregat, secara umum terbagi atas agregat kasar dan agregat halus; Air; *Fly Ash*, Pecahan Batu Marmer. Material pengganti yang biasanya digunakan sebagai bahan substitusi semen yaitu material yang mempunyai karakteristik *pozzolan*. *Pozzolan* yaitu material yang memiliki kandungan senyawa silika serta alumina yang dapat bereaksi terhadap batu kapur yang dilepas semen[3]. *Pozzolan* dibagi menjadi 2 kelompok yaitu *pozzolan* alami dan *pozzolan* buatan. Material *pozzolan* alami seperti trass, dan material *pozzolan* buatan yaitu *fly ash*, *slag*, serta *silica fume*[4]. *Fly ash* yaitu produk samping sisa penghabisan batu bara di pembangkit listrik, yang memiliki kandungan komponen Al juga Si akan berdampak signifikan terhadap karakteristik beton geopolimer. [5]. *Fly ash* dapat dipakai sebagai material campuran pada beton dan menghasilkan gel yang membuat beton yang mengandung *fly ash* padat sehingga memberikan kuat dan mengurangi permeabilitas[6].

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang mendukung hasil dari penelitian yang dilakukan, Yang Pertama dari Elli Mercy (2022) Hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat kasar disubstitusi 50% dengan potongan batu marmer, serta semen disubstitusi dengan Silica Fume persentase 0%, 10%, 12,5%, sampai 15%. Kuat tekan beton dicapai setelah usia 28 hari berurutan yaitu 25,17 Mpa, 25,83 Mpa, 24,6 Mpa, sampai 24,23 Mpa.[7]. Penelitian sejenis kedua yang dilakukan oleh Daffa Nabhan (2023) dengan judul Inovasi Penggunaan Limbah Marmer menjadi Substitusi Agregat Kasar terhadap Beton Ramah Lingkungan. Dari hasil pengujian didapatkan nilai kuat tekan substitusi limbah marmer varian 0%, 30% dan 50% berurutan 30,82, 33,88 dan 32,01 Mpa. Nilai kuat tekan optimum didapat pada varian limbah marmer 30% dari bobot agregat kasar[8]. Penelitian terdahulu ketiga yang dilaksanakan oleh Agustin Dita lestari (2021) dengan judul pengujian Kekuatan Tekanan Beton memakai Limbah Marmer menjadi Substitusi Agregat Kasar. Penelitian diadakan dengan tujuan agar penempatan sebagian agregat kasar memakai limbah pecahan marmer yang ditinjau dari nilai kekuatan tekan beton bisa didapatkan. Penelitian direncanakan memakai varian penempatan pecahan sedimen sebesar 0%, 15%, 25%, dan 35%. Hasil kuat tekan optimum terdapat pada varian 25%, yaitu senilai 33,22 pada usia sampel 28 hari[9]. Penelitian sejenis keempat diangkat oleh Helmaya Regita Pramesti (2022) yang berjudul Efisiensi pemakaian limbah marmer (brokol) menjadi substitusi agregat kasar dalam *mix design* beton. Pergantian agregat kasar limbah marmer memakai kombinasi 0%, 15%, 25%, 50% Dimana hasil kuat tekan rerata yang didapat memakai kombinasi 0%, 15%, 25%, 50% senilai 22,93 N/mm²; 23,25 N/mm²; 19,18 N/mm²; 18,70 N/mm². Apabila dilihat dari kekuatan tekan beton pada usia 28 hari, kekuatan beton mengalami kenaikan di varian 15% yaitu sebesar 9,3% dari beton varian 0%[10]. Penelitian terdahulu kelima oleh M. Yusuf Eko (2022) Pemakaian Limbah Marmer menjadi Agregat Kasar dalam campuran Beton Perkerasan Kaku Dengan penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Pencampur. Nilai yang didapat pada penelitian untuk persentase kekuatan tekanan beton 30% yaitu 46,50 MPa, varian 50% yaitu 43,95 MPa, serta persentase varian 70% sebesar 38,64 MPa. Oleh karena itu disarankan memakai persentase 50% yang dimana persentase itu paling banyak memanfaatkan limbah[11].

Pengujian sejenis keenam yang diadakan oleh Muhammad Zikir (2023) memperlihatkan akan proporsi kombinasi *fly ash* 0% (tanpa pengganti abu terbang) mempunyai kekuatan tekanan sebesar 27,052 MPa. Nilai kekuatan tekanan maksimum didapat dalam pemakaian abu terbang dengan substitusi 10%, yaitu sebesar 32,559 MPa, meningkat setinggi 16,913% apabila tanpa substitusi abu terbang. Sedangkan substitusi

abu terbang yang melebihi kuat tekan 10% berkurang. Kuat tekan terkecil dicapai dengan substitusi abu terbang 30% yaitu sebesar 25.370 MPa, turun 6.217% jika dibandingkan tanpa substitusi abu terbang.[12]. Penelitian ketujuh yang dilakukan oleh Masrul Ferdianto (2023) Tujuan penelitian ini yaitu mengukur kekuatan tekanan beton dengan perubahan penambahan limbah asbes sebanyak 3% bobot agregat halus serta bahan tambahan abu terbang sebesar 15%, 20%, serta 25% bobot semen. Hasil pengujian kekuatan tekanan beton normal sebesar 25,22 Mpa dan kekuatan tekan varian berurutan yaitu 26,22 mpa, 24,05 Mpa, dan 22,92 Mpa. Penggunaan asbes 3% dan *fly ash* 15% menghasilkan kuat tekan beton yang maksimal[13]. Penelitian serupa yang kedelapan diangkat oleh Abdi Nazrullah (2023) yang berjudul dampak penggunaan limbah styrofoam dan *fly ash* dalam pembuatan beton ringan terhadap karakteristik mekanik serta dampak lingkungan, Nilai pemeriksaan memperlihatkan bahwa pemakaian limbah styrofoam pada persentase 5 dan 10% tidak optimal menjadi bahan penggantian agregat kasar karena tidak membuat kekuatan tekanan yang diinginkan, namun campuran stroafoam mampu mengurangi berat beton. Sementara itu, penambahan limbah *fly ash* pada persentase 5 dan 10% sebagai pengganti semen menghasilkan peningkatan kuat tekan pada beton[14]. Penelitian kesembilan yang diadakan oleh M. Zakirullah (2024) yang berjudul Analisa pemakaian *fly ash* pltu ombilin menjadi penggantian semen pada kekuatan tekanan dan kekuatan tarik beton. Varian substitusi yang dipakai 0%, 14%, 15%, 16% dan 17%. Uji kekuatan tekanan dan kekuatan tarik belah beton dilaksanakan di usia 7, 14 dan 28 hari. Hasil uji kekuatan tekanan usia 28 hari yaitu 29,21MPa, 32,05MPa, 31,52MPa, 28,87MPa, 28,59MPa. Persentase optimum dari substitusi *fly ash* terhadap semen ke dalam campuran beton kepada kekuatan tekanan beton serta kekuatan tarik belah beton yaitu pada varian substitusi 14%[15]. Penelitian kesepuluh yang diadakan oleh georga papendang (2023) pemakaian abu marmer serta *fly ash* menjadi penggantian sebagian semen dalam beton normal. Hasil pengujian kekuatan tekanan dengan penambahan abu marmer 0%, 8% meningkat berurutan sebesar 4,930%, 1,533% dan pada varian 12% menurun sebesar 9,035%. Kesimpulan dalam Hasil pengujian adalah penambahan *fly ash* varian 10% masih dapat menambah nilai kekuatan tekanan.[16]

METODOLOGI

1. Lokasi Penelitian dan Pengambilan Material

Pengujian diadakan di Laboratorium Beton, Jurusan Teknik Sipil, UKI-Paulus Makassar. Bahan yang dipakai yaitu, *fly ash*, Batu Marmer, serta Agregat Kasar juga Agregat Halus.



Gambar 1. Tempat Pengambilan *Fly Ash*



Gambar 2. Tempat pengambilan Batu Marmer



Gambar 3. Tempat Pengambilan Agregat kasar serta agregat halus

2. Karakteristik Material

Pada pengujian ini, agregat yang dipakai terhadap campuran beton telah dilakukan pengujian karakteristik untuk menjamin kualitas mutu beton.

Tabel 1. Pengujian Karakteristik Agregat halus

No.	Karakteristik	Hasil	Interval SNI	Keterangan
1	Kandungan Air	3,952	0% - 5,00%	Mencukupi
2	Cairan Organik	No.1	< No.3	Mencukupi
3	KandunganLumpur	1,523	0,20% - 6,00%	Mencukupi
4	Berat VolumePadat	1,605	1,4 kg/l – 1,9 kg/l	Mencukupi
5	Berat VolumeGembur	1,419	1,4 kg/l – 1,9 kg/l	Mencukupi
6	BeratJenis SSD	2,545	1,60 – 3,20	Mencukupi
7	Absorpsi (Penyerapan)	1,833	1,20% - 2,00%	Mencukupi

Tabel 2. Pengujian Karakteristik Agregat kasar

No.	Karakteristik	Hasil	Interval SNI	Keterangan
1	Kandungan Air	0,969	0,5% - 2,00%	Mencukupi
2	Kandungan Lumpur	0,442	0,20% - 1,00%	Mencukupi
3	Berat Volume Padat	1,622	1,4 kg/l – 1,9 kg/l	Mencukupi
4	Berat Volume Gembur	1,543	1,4 kg/l – 1,9 kg/l	Mencukupi

5	Berat Jenis SSD	2,610	1,6 – 3,2	Mencukupi
6	Absorpsi (Penyerapan)	0,929	0,20% - 4,00%	Mencukupi

3. Mix Design

Pada nilai pengujian karakteristik material serta nilai perhitungan *mix design* kekuatan tekan rencana $f'_c = 25$ MPa dengan Metode SNI03-2834-2000, didapatkan proporsi adukan beton sebagai berikut:

Tabel 3. Komposisi Material Campuran Beton dalam 1 Silinder

Material	Variasi			
	0%	10%	12.5%	15%
Air (L)	1.262	1.262	1.262	1.262
Semen(kg)	2.523	2.271	2.208	2.144
Agregat kasar (kg)	5.180	5.180	5.180	5.180
Agregat halus (kg)	4.057	4.057	4.057	4.057
Marmer (kg)	1.787	1.787	1.787	1.787
Fly ash (kg)	0.00	0.252	0.315	0.379

Tabel 4. Komposisi Material Campuran Beton dalam 1 Balok

Material	Variasi			
	0%	10%	12,5%	15%
Air (L)	3,214	3,214	3,214	3,214
Semen (kg)	6,427	5,784	5,624	5,463
Agregat kasar (kg)	13,197	13,197	13,197	13,197
Agregat halus (kg)	10,334	10,334	10,334	10,334
Marmer (kg)	4,551	4,551	4,551	4,551
Fly Ash (kg)	0,00	0,643	0,803	0,964

4. Trial Mix

Pengujian *trial mix* dilakukan saat umur beton 7 hari agar mendapat komposisi yang direncana memenuhi kuat tekan yang direncanakan (f'_c).

Tabel 5. Pengujian *Trial Mix*

Benda Uji	Umur	Luas Penampang Silinder (mm)	Berat Maksimum (kN)	Kuat Tekan Aktual (Mpa)	Rata-rata
1	7 hari	17678.57143	290	25.237	25.382
2			285	24.802	
3			300	26.107	

5. Pengujian Sampel Uji

- 1) Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan mengikuti prosedur pemeliharaan, dengan jadwal perawatan 1, 3 hingga 4 minggu sesuai SNI 1974:2011. Pengujian kuat tekan diadakan memakai alat uji tekan berkapasitas 2000 kN [18]. Uji kuat tekan beton menggunakan 36 sampel uji. Terdapat 12 buah sampel pada usia beton masing-masing 7, 21, serta 28 hari.

2) Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian kuat tarik belah diadakan setelah sampel uji berusia 28 hari mengacu pada Sni 03-2491-2002. Alat yang dipakai merupakan mesin penekan (*compression testing machine*) kemampuan 2000 kN [19]. Jumlah sampel uji pada pengujian kuat tarik belah beton sejumlah 12 buah.

3) Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur beton dilaksanakan pada sampel yang di tes ketika usia 4 minggu berdasar Sni 4431:2011. Alat yang dipergunakan yaitu mesin penekan kapasitas 400 ton. Jumlah sampel uji pada pengujian kuat lentur sejumlah 12 sampel uji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian Kekuatan tekanan beton diadakan ketika sampel berusia 7, 21 serta 28 hari dengan alat *Compression Testing Machine* untuk mendapat bobot tertinggi ketika beton retak karena mendapat bobot itu (P_{maks}) satuan kN.

Tabel 6. Hasil Pengujian dan Perhitungan Kuat Tekan Aktual Beton

Varian Substitusi	Umur	Berat Maksimum (kN)	Kuat Tekan Aktual (Mpa)	Kuat Tekan Rata-rata Aktual (Mpa)
Marmer 25% & fly ash 0%	7	330	18,667	16,687
		270	15,273	
		285	16,121	
	21	435	24,606	24,229
		430	24,323	
		420	23,758	
	28	460	26,020	25,266
		455	25,737	
		425	24,040	
Marmer 25% & fly ash 10%	7	295	16,687	16,687
		310	17,535	
		280	15,838	
	21	425	24,040	24,135
		415	23,475	
		440	24,889	
	28	470	26,586	25,643
		440	24,889	
		450	25,455	
Marmer 25% & fly	7	280	15,838	15,744
		260	14,707	

ash 12,5%	21	295	16,687	24,512
		425	24,040	
		435	24,606	
		440	24,889	
	28	445	25,172	25,549
		450	25,455	
		460	26,020	
Marmer 25% & fly ash 15%	7	290	16,404	16,027
		260	14,707	
		300	16,970	
	21	400	22,626	22,815
		420	23,758	
		390	22,061	
	28	420	23,758	24,512
		455	25,737	
425		24,040		

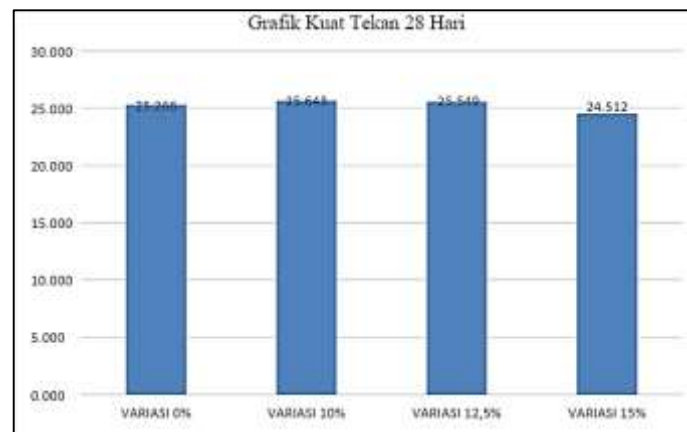
Nilai pengujian Kuat tekan beton pada sampel uji berbentuk silinder berukuran 15 cm x 30 cm pada usia beton 1, 3 hingga 4 minggu dengan substitusi marmer menjadi agregat kasar sebesar 25% dan abu terbang menjadi semen sebesar 0%, 10%, 12,5 %, dan 15%, masing-masing. Tabel 6 menunjukkan nilai kuat tekan setiap modifikasi pada usia beton 1, 3 hingga 4 minggu.



Gambar 4. Grafik Kuat Tekan Beton Berdasarkan Usia Beton

Grafik dalam gambar 4 memperlihatkan bahwa angka pengujian kekuatan tekanan beton berhubungan langsung pada usia beton, meningkat seiring tingginya usia beton sampai mencapai usia beton optimal yaitu 28 hari. Dimana kekuatan tekanan rerata pada usia beton 1, 3 serta 4 minggu berurutan pada varian *Fly ash* 0% 16.687 MPa, 24.229 MPa, 25.266 MPa, varian *fly ash* 10% 16.687 MPa, 24.135 MPa, 25.643 MPa, varian *fly ash* 12.5% 15.744 MPa, 24.512 MPa, 25.549 MPa, dan pada varian *fly ash* 15% 16.027 MPa, 22.815 MPa, 24.512 MPa.

Hubungan Kuat tekan berdasar varian *Fly Ash* dan usia beton 28 hari bisa dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Kuat Tekan Beton pada Usia 28 hari

Dari gambar 5 nilai pengujian kuat tekan pada beton normal varian *fly ash* 0% memperlihatkan rata-rata kuat tekan beton selama 4 minggu sebesar 25,266 MPa, beton varian *fly ash* 10% tertinggi 25,643 MPa, beton varian *fly ash* 12,5% setinggi 25,549 MPa, serta beton varian *fly ash* 15% setinggi 24,512 MPa. Nilai kuat tekan terbesar terjadi pada varian 10% dan menurun pada varian *fly ash* 15%.

Berdasarkan grafik di atas, kuat tekan beton meningkat hingga 10% dan penambahan *Fly Ash* sebesar 12,5%, namun kemudian turun. Meningkatnya tegangan beton disebabkan karena masuknya *Fly Ash* secara tepat ke dalam campuran beton. Namun jika pertambahan *Fly Ash* sudah mencapai batas maka tegangan tersebut akan menurun karena ruang antara partikel semen akan penuh dengan abu terbang, serta sebagian dari abu terbang tidak bereaksi kepada semen hingga menyebabkan kekuatan tekanan beton menjadi berkurang.

B. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

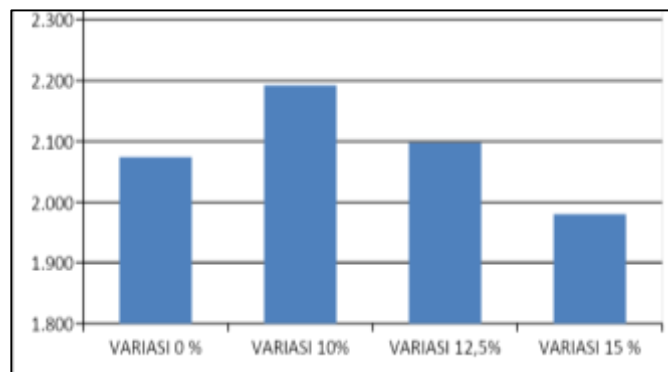
Pengujian kuat tarik belah beton diadakan ketika sampel berusia 28 hari menggunakan *Compression Testing Machine* agar mendapat bobot maksimal yaitu bobot ketika beton retak menerima bobot (P_{maks}) pada satuan kN.

Nilai pengujian kuat tarik belah beton pada sampel silinder yang berukuran 15 cm x 30 cm pada usia beton 4 Minggu, dengan substitusi marmer sebagai agregat kasar 25% serta *Fly Ash* menjadi semen setinggi 0%, 10%, 12.5% serta 15%.

Tabel 7. Hasil Pengujian dan Perhitungan Kuat Tarik Belah Beton

Varian	Berat Maksimum (Kn)	Kuat Tarik Belah (Mpa)	Rata-rata Kuat Tarik Belah (Mpa)
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 0%	140	1,980	2,074
	150	2,121	
	150	2,121	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 10%	175	2,475	2,192
	150	2,121	
	140	1,980	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 12,5%	160	2,263	2,098
	150	2,121	
	135	1,909	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 15%	140	1,980	1,980
	145	2,051	
	135	1,909	

Hubungan Kekuatan tarik belah berdasarkan varian *fly ash* bisa dilihat dalam Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik Kuat Tarik Belah Beton Berdasarkan Varian *Fly ash*

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara kuat tarik belah terhadap varian *fly ash*. Berdasar gambar di atas, nilai kuat tarik belah beton memakai pengganti sebagian marmer menjadi agregat kasar setinggi 25%, sedangkan substitusi *fly ash* dengan semen memakai varian 0%, 10%, 12.5%, serta 15% yaitu setinggi 2.074 MPa, 2.192 MPa, 2.098 MPa, hingga 1.980 MPa. Data tersebut menunjukkan bahwa kekuatan tarikan belah meninggi pada varian *Fly ash* 10% serta 15% dan menurun dalam varian *Fly ash* 15%.

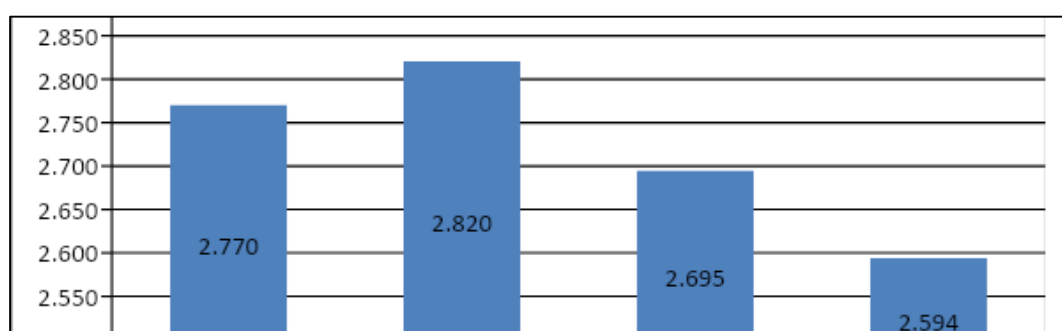
C. Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian berdasar SNI 4431:2011, dengan sampel balok yang berukuran 150 x 150 x 600 mm, sampel diletakkan pada alat tes lentur dengan 2 titik pembobotan. Hasil pengujian kuat lentur beton kepada sampel uji balok berukuran 150 x 150 x 520 mm, dengan substitusi marmer menjadi agregat kasar sebesar 25% serta *Fly ash* menjadi semen memakai varian 0%, 10%, 12.5% serta 15%.

Tabel 8. Hasil Pengujian dan Perhitungan Kuat Lentur Beton

Varian Substitusi	Berat Maksimum (ton)	Berat Maksimum (kN)	Kuat Lentur (Mpa)	Rata-rata Kuat Lentur Beton (Mpa)
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 0%	1,85	18142,395	2,795	2,770
	1,90	18632,730	2,871	
	1,75	17161,725	2,644	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 10%	1,85	18142,395	2,795	2,820
	1,95	19123,065	2,946	
	1,80	17652,060	2,720	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 12,5%	1,70	16671,390	2,569	2,695
	1,80	17652,060	2,720	
	1,85	18142,395	2,795	
Marmer 25% & <i>fly ash</i> 15%	1,70	16671,390	2,569	2,594
	1,75	17161,725	2,644	
	1,70	16671,390	2,569	

Dari hasil perhitungan pada Tabel 8, bisa dilihat hasil kuat lentur setiap varian *Fly ash* pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Grafik Kuat Lentur Berdasar Varian *Fly Ash*

Nilai kuat lentur beton memakai penggantian marmer 25% menjadi agregat kasar dan substitusi *fly ash* menjadi semen dengan varian 0%, 10%, 12.5%, dan 15% yaitu 2.770 MPa, 2.820 MPa, 2.695 MPa, dan 2.594 MPa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kuat lentur beton meningkat pada varian *Fly ash* 10%, namun menurun dalam varian *Fly ash* 12,5% dan 15%.

D. Hubungan antara Kuat Tekan dengan Kuat Tarik Belah Beton

Dalam pengujian yang telah diadakan pada beton usia 28 hari dimana substitusi marmer menjadi agregat kasar sebanyak 25% serta substitusi *Fly ash* menjadi semen dengan varian 0%, 10%, 12.5% serta 15% didapat nilai kekuatan tekan beton berurut yaitu 25,266 MPa, 25,643 MPa, 25,549 MPa dan 24,512. Sedangkan nilai kekuatan tarikan belah beton adalah 2,074 MPa, 2,192 MPa, 2,098 MPa dan 1,980 MPa. Berikut merupakan hasil perhitungan hubungan kuat tekan terhadap kuat tarik belah beton.

Tabel 9. Hubungan Kuat Tekan Dengan Kuat Tarik Belah Beton

Varian Substitusi	Rata-rata (Mpa)		Persentase (%)
	Kuat Tekan	Kuat Tarik Belah	
0%	25,266	2,074	8,209
10%	25,643	2,192	8,548
12,5%	25,549	2,098	8,210
15%	24,512	1,980	8,077

Nilai persentase hubungan kekuatan tekan terhadap kekuatan tarik belah beton terbesar terjadi dalam varian *fly ash* 10% yaitu sebesar 8,548%.

E. Hubungan Antara Kuat Tekan Dengan Kuat Lentur Beton

Dalam pengujian yang telah diadakan pada beton usia 28 hari dimana substitusi marmer menjadi agregat kasar sebanyak 25% dan substitusi *fly ash* menjadi semen varian 0%, 10%, 12.5% serta 15% didapat nilai kuat tekan beton berurut yaitu 25,266 MPa, 25,643 MPa, 25,549 MPa dan 24,512. Sedangkan nilai kuat lentur beton ialah setinggi 2,770 MPa, 2,820 MPa, 2,695 MPa, dan 2,594 MPa.

Tabel 10. Hubungan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur Beton

Varian	Rata - rata (Mpa)		Nilai Perbandingan f_r $\frac{f_r}{\sqrt{kuat\ tekan\ aktual}}$ (x)
	Kuat Tekan ($f'c$)	Kuat Lentur (f_r)	
Marmer 25% dan Fly ash 0%	25.266	2.770	0.551
Marmer 25% dan Fly ash 10%	25.643	2.820	0.557
Marmer 25% dan Fly ash 12.5%	25.549	2.695	0.533
Marmer 25% dan Fly ash 15%	24,512	2.594	0.524

Berdasar tabel 10 di bawah, pada varian 0%, 10%, 12,5% serta 15% didapatkan nilai kuat lentur berurutan setinggi $0,551\sqrt{f'c}$, $0,557\sqrt{f'c}$, $0,533\sqrt{f'c}$, dan $0,524\sqrt{f'c}$ dari nilai kuat tekan. Jadi didapatkan nilai tertinggi hubungan kuat tekan dengan kuat lentur sebesar $0,557\sqrt{f'c}$.

F. Gambar Benda Uji



Gambar 7. Sampel Uji Silinder



Gambar 8. Sampel Uji Balok



Gambar 9. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah



Gambar 10. Hasil Pengujian Kuat Lentur



Gambar 11. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

KESIMPULAN

Pada penelitian ini, substitusi *fly ash* serta pecahan batu marmer dalam campuran beton terhadap kuat tekan, tarik belah, dan lentur beton didapatkan, Nilai substitusi *fly ash* tertinggi dicapai pada varian 10%, yaitu 25,643, dengan peningkatan persentase 1,49%; pada varian 12,5 %, yaitu 25,549, dengan peningkatan persentase 1,12%; dan pada varian 15%, yaitu 24,512, dengan penurunan persentase 2,98%. Untuk hubungan kuat tekan terhadap kuat tarik belah yaitu semakin tinggi nilai Kekuatan tekanan maka semakin tinggi pula nilai kuat tarik belah.

REFERENSI

- [1] S. N. Indonesia, "Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung," *SNI*, vol. 2847, no. 2013, pp. 80–91, 2013.
- [2] D. Safitri, "Mix Design dan Pelaksanaan Campuran Beton," *J. Ilmu Tek.*, vol. 1, no. 3, 2021.
- [3] S. Melinda, S. O. Dapas, and M. D. J. Sumajouw, "Studi Eksperimental Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan Kapur Dan Batu Apung Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen," *J. Sipil Statik*, vol. 8, no. 5, 2020.
- [4] E. Rahmadona, K. R. Amalia, L. Ulfah, and N. Praditya, "Analisis Kuat Tekan Beton dengan Pemanfaatan Silica Fume dan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Sebagian," *J. Talent. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 217–223, 2024.
- [5] T. B. Santoso, "Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash Dengan Na_2SO_4 Dan Na_2SiO_3 Sebagai Aktivator," in *Seminar Nasional Teknik Sipil*, 2023, pp. 234–243.
- [6] N. Ngudiyono, "Pemanfaatan Fly Ash sebagai Bahan Substitusi Parsial Semen pada Beton Memadat Sendiri," *J. Teknol. Lingkungan*, vol. 23, no. 1, pp. 55–61, 2022.
- [7] E. M. Julmile, F. Phengkarsa, and S. R. Tonapa, "Pengaruh Silica Fume dan Pecahan Batu Marmer Sebagai Bahan Substitusi Pada Campuran Beton," *Paulus Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 29–39, 2023.
- [8] D. Nabhan, A. Anisah, and L. Lenggogeni, "Inovasi Pemanfaatan Limbah Marmer sebagai Substitusi Agregat Kasar Untuk Beton yang Ramah Lingkungan," *J. Pendidik. Tambusai*, vol. 7, no. 3, pp. 27807–27813, 2023.
- [9] A. D. Lestari, "Pengujian kuat tekan pada beton dengan limbah marmer sebagai substitusi agregat kasar," *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil dan Tek. Kim.*, vol. 6, no. 1, pp. 61–69, 2021.
- [10] H. R. Pramesti and A. Naibaho, "Efisiensi Penggunaan Limbah Batu Marmer (Brokol) Sebagai

- Pengganti Sebagian Agregat Kasar Pada Mix Design Beton,” *J. Online Skripsi Manaj. Rekayasa Konstr.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–6, 2022.
- [11] M. Y. E. Saputro, A. Hasanuddin, and D. Nurtanto, “The Use of Marble Waste as a Coarse Agregate in Rigid Pavement Concrete Mixture Using Rice Husk Ash as an Admixture,” *Reka Buana J. Ilm. Tek. Sipil dan Tek. Kim.*, vol. 7, no. 1, pp. 93–103, 2022.
- [12] M. Zikir, “Solidifikasi/Stabilisasi (S/S) Fly Ash yang Terkontaminasi Fenol sebagai Bahan Subtitusi dan Pengisi pada Pembuatan Beton,” *J. Tek. Kim. USU*, vol. 12, no. 1, pp. 54–61, 2023.
- [13] M. Ferdianto and B. Afriandini, “Pemanfaatan Limbah Asbes dan Fly Ash Sebagai Bahan Tambah Campuran Beton,” *Rev. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2023.
- [14] A. Nasrullah and V. Itteridi, “Pengaruh Limbah Styrofoam dan Fly Ash Dalam Pembuatan Beton Terhadap Karakteristik Mekanik dan Dampak Lingkungan,” *J. Ilm. BERING*, vol. 11, no. 02 Oktober, pp. 75–86, 2023.
- [15] M. Zakirullah, R. Anggraini, and D. Fajriansyah, “Analisa Penggunaan Fly Ash PLTU OLBILIN Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton,” *Civ. Eng. Collab.*, pp. 1–6, 2024.
- [16] G. Papendang, J. Tanijaya, and O. J. Sanggaria, “Penggunaan Abu Marmer Dan Fly ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen Pada Beton Normal,” *Paulus Civ. Eng. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 174–184, 2023.
- [17] Badan Standardisasi Nasional. SNI 03-2834-2000. “Mekanisme Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal”. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2000.
- [18] Badan Standardisasi Nasional. SNI 1974 - 2011. “Cara tes kuat tekan beton dengan sampel uji silinder”. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2011.
- [19] Badan Standardisasi Nasional. SNI 03-2491-2002. “Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton”. Bandung: Badan Standardisasi Nasional, 2002.