

# Pengujian Properti Mekanik Beton Dengan Abu Vulkanik Gunung Marapi Sebagai Pengganti Sebagian Semen

Rizky Adisyah Putra<sup>1</sup>, Surya Eka Priana<sup>1</sup>, Zuheldi<sup>1</sup>

Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

Bukittinggi, Indonesia

**Abstrak:** Produksi semen sebagai bahan utama beton menyumbang emisi karbon yang tinggi sehingga diperlukan inovasi pembuatan beton ramah lingkungan (*green concrete*). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan abu vulkanik Gunung Marapi sebagai bahan substitusi sebagian semen terhadap kuat tekan beton. Abu vulkanik mengandung senyawa pozzolanik seperti silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat dengan variasi substitusi abu vulkanik sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat semen. Benda uji berbentuk kubus  $15 \times 15 \times 15$  cm diuji menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa penambahan abu vulkanik menurunkan kuat tekan beton pada umur awal. Namun, pada umur 28 hari, selisih kuat tekan dengan beton normal semakin kecil akibat reaksi pozzolanik yang berkembang. Substitusi 10% menghasilkan performa paling optimal dengan kuat tekan 18,65 MPa. Dengan demikian, abu vulkanik Gunung Marapi berpotensi digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen untuk menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan tanpa menurunkan kekuatan secara signifikan.

**Kata kunci:** abu vulkanik; beton; kuat tekan; pozzolanik; substitusi semen

## 1. Pendahuluan

Pemanfaatan abu vulkanik sebagai bahan pengganti sebagian semen telah diaplikasikan pada berbagai material konstruksi. (Ahmad et al., 2023)) menulis artikel tentang durabilitas dan analisis mikrostruktur pada beton yang terbuat dari abu vulkanik. Terkait dengan adanya perbedaan komposisi kimia dan perilaku material abu vulkanik pada setiap gunung berapi, dilakukan sebuah penelitian properti mekanik beton menggunakan abu vulkanik yang berasal dari letusan Gunung Marapi, Sumatera Barat. Penelitian yang dilakukan adalah pengujian property material dan uji kuat tekan beton di Laboratorium berdasarkan SNI 03-2834-2000 dan SNI 7657:2012.

Semen merupakan bahan pengikat utama dalam konstruksi, khususnya untuk pembuatan beton (Pratiwi Nadya Ayu et al., 2023). Sejarah semen modern

berkaitan erat dengan paten *Portland cement* oleh Joseph Aspdin pada 1824, yang kemudian mendorong penyebaran produksi semen industri – sebuah tren yang meningkat pesat seiring industrialisasi dan kebutuhan bangunan beton modern (Kusuma Taufik, 2021). Pada 3 Desember 2023, letusan Gunung Marapi mengeluarkan material vulkanik berupa debu, pasir, dan bebatuan yang menyebar hingga Padang Panjang, Bukittinggi, dan Kabupaten Tanah Datar. Salah satu materialnya adalah abu vulkanik yang memiliki sifat pozzolanik, yakni mengandung senyawa silika dan silika alumina. Unsur ini juga terdapat pada semen, sehingga abu vulkanik berpotensi digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Tekstur abu vulkanik yang halus dan runcing memungkinkan peningkatan kekedapan serta kekuatan beton.

Di sisi lain, industri semen menyumbang sekitar 7% dari total emisi CO<sub>2</sub> global, yakni sekitar 27 miliar ton per tahun, jauh lebih besar dari emisi gunung berapi. Hal ini menuntut inovasi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan. Pemanfaatan abu vulkanik sebagai substitusi semen menjadi salah satu solusi. (Ahmad et al., 2023) telah meneliti durabilitas dan mikrostruktur beton berbahan abu vulkanik. Karena komposisi kimia tiap gunung berapi berbeda, penelitian ini difokuskan pada abu vulkanik Gunung Marapi, Sumatera Barat, dengan pengujian sifat material dan kuat tekan beton sesuai SNI 03-2834-2000 dan SNI 7657:2012.

Sejumlah penelitian di Indonesia telah secara konsisten menunjukkan bahwa abu vulkanik berpotensi digunakan sebagai material alternatif dalam campuran beton, meskipun performanya sangat dipengaruhi oleh karakteristik kimia dan fisik abu tersebut. (Faqih & Krisnawan, 2019) mengonfirmasi bahwa abu vulkanik Gunung Merapi memiliki aktivitas pozzolanik yang mampu meningkatkan kuat tekan beton pada proporsi substitusi 10–30%. Temuan ini memperlihatkan bahwa material vulkanik dapat memberikan kontribusi positif terhadap pembentukan senyawa pengikat sekunder, meskipun penelitian tersebut masih terbatas pada umur uji 14 hari sehingga belum mengungkap perkembangan reaksi pozzolanik jangka panjang. Sementara itu, (Widayanto & Sitompul, 2021) melaporkan bahwa penggunaan abu vulkanik Gunung Sinabung pada mortar menunjukkan kecenderungan penurunan kuat tekan pada kadar tinggi, walaupun dosis rendah masih dapat dimanfaatkan. Namun demikian, tidak adanya karakterisasi kimia pada penelitian tersebut membuat mekanisme penurunan performa belum dapat dijelaskan secara struktural.

Hasil berbeda ditunjukkan oleh penelitian (Rochmah et al., 2023) yang mengkaji abu vulkanik Gunung Semeru sebagai substitusi semen pada kadar tinggi (45–50%). Penelitian tersebut menunjukkan penurunan kuat tekan yang signifikan hingga hanya mencapai rentang 5–6 MPa, yang diduga disebabkan oleh rendahnya kandungan silika dan kapur pada abu Semeru. Penelitian ini telah menggunakan metode pengujian yang komprehensif, namun masih memiliki kelemahan berupa persentase substitusi yang tidak umum diterapkan dalam beton struktural serta tidak adanya analisis komposisi kimia sebagai verifikasi ilmiah.

Sebaliknya, (Susanti, 2018) menunjukkan bahwa substitusi semen dengan abu vulkanik Sinabung pada kadar 2–4% mampu meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Hal ini mengindikasikan bahwa pada dosis optimum, abu

vulkanik dapat berfungsi sebagai bahan pengisi yang meningkatkan densitas beton. Meski demikian, penelitian tersebut tidak mengevaluasi sifat pozzolanik secara mikroskopis maupun jangka panjang, sehingga efektivitas reaksi kimia abu belum dapat dipastikan sepenuhnya.

Dari perspektif berbeda, (Rohman Anshory et al., 2018) memanfaatkan abu vulkanik Gunung Kelud sebagai pengganti agregat halus dan menemukan bahwa kadar optimal berada pada kisaran 8–12%. Namun performa beton menurun pada kadar substitusi lebih dari 15% akibat ukuran partikel abu yang sangat halus sehingga mengurangi kualitas ikatan antarpartikel. Penelitian ini menawarkan pendekatan alternatif pemanfaatan abu vulkanik, tetapi masih terbatas pada analisis fisik makroskopik tanpa pengujian mineralogi .

Dari banyaknya penelitian tersebut, peneliti sangat tertarik untuk melakukan kajian lebih lanjut terhadap abu vulkanik Gunung Marapi sebagai bahan substitusi sebagian semen, untuk melihat pengaruhnya terhadap kuat tekan beton dan menentukan proporsi optimum yang dapat digunakan dalam pembuatan beton ramah lingkungan.

## 2. Metodologi

Penelitian ini dilaksanakan di Labor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat yang beralamat di Jl. Paninjauan, Campago Guguk Bulek, Kecamatan Mandiangin Koto Selayan, Kota Bukittinggi, Sumatera Barat.

Jenis penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium, dengan tujuan memperoleh data empiris melalui pengujian langsung. Adapun variabel dalam penelitian ini terdiri atas variabel terikat yaitu penggunaan abu vulkanik sebagai benda uji dengan konsentrasi sebesar 10%, 20%, dan 30%, serta variabel bebas yaitu kuat tekan beton berdasarkan mutu rencana. Dalam pelaksanaan penelitian, digunakan berbagai alat seperti timbangan digital untuk menimbang material, gelas ukur untuk mengukur volume air dan kandungan lumpur, piknometer untuk uji berat jenis agregat halus, oven dan talem untuk pengujian kadar air, serta kerucut abrams untuk uji slump. Selain itu, digunakan pula cetakan beton berukuran 15 x 15 x 15 cm, concrete mixer untuk pengadukan, compression testing machine (CTM) untuk uji kuat tekan beton, tongkat baja, bak perendam, dan alat bantu lainnya seperti stopwatch, penggaris, sekop, dan gerobak.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain semen PCC Tipe I merek Semen Padang, pasir Palembang sebagai agregat halus, batu split sebagai agregat kasar, air bersih dari laboratorium untuk perendaman, serta abu vulkanik yang berasal dari Gunung Marapi sebagai bahan substitusi. Metode analisis data dilakukan setelah seluruh rangkaian eksperimen selesai, di mana data yang diperoleh diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama. Pertama, data hasil uji agregat yang mencakup berat jenis dan penyerapan air, kadar air alami, berat satuan, kandungan lumpur, serta gradasi agregat. Kedua, data hasil uji kuat tekan beton yang berasal dari empat variasi campuran, yaitu beton normal (tanpa tambahan) serta beton dengan substitusi abu vulkanik sebesar 10%, 20%, dan 30%. Data ini kemudian dianalisis untuk menilai sejauh mana

penggunaan abu vulkanik mempengaruhi karakteristik mekanis beton, khususnya dalam hal kekuatan tekan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pemeriksaan Bahan Penyusun Beton

Pemeriksaan bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan beton dilakukan di laboratorium beton Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat materialnya meliputi semen, agregat halus, agregat kasar, dan abu vulkanik yang protertinya mengacu pada SNI 15-2049-2004. Dimana berat jenis nya sebesar  $3.15 \text{ g/cm}^3$  dan tidak boleh berjarak terlalu besar. Untuk penelitian ini di dapat data sebagai berikut :

##### 3.1.1. Pemeriksaan Berat Jenis Semen

Pada pemeriksaan berat Jenis semen akan menggunakan alat botol Le Chatelier dan kerosin bebas air atau nafta dengan berat jenis 62 API. Berikut data yang didapatkan dari penelitian:

**Tabel 1: Berat Jenis Semen**

No	Jenis Wadah	Berat Volume	Satuan
1	Piknometer No. 1	2.832	gr/ml <sup>3</sup>
2	Piknometer No. 2	2.844	gr/ml <sup>3</sup>
3	Piknometer No. 3	2.819	gr/ml <sup>3</sup>
<b>Berat Jenis Rata-rata</b>		<b>2.832</b>	<b>gr/ml<sup>3</sup></b>

Hasil pengujian berat jenis semen menggunakan piknometer ditampilkan pada Tabel 1 dengan nilai masing-masing sebesar 2,832 gr/ml<sup>3</sup>, 2,844 gr/ml<sup>3</sup>, dan 2,819 gr/ml<sup>3</sup>. Berdasarkan hasil tersebut diperoleh rata-rata berat jenis semen sebesar 2,832 gr/ml<sup>3</sup>.

##### 3.1.2. Pemeriksaan Berat Volume Agregat

###### a. Agregat Halus

Hasil pemeriksaan berat volume agregat halus terdapat pada Tabel 2

**Tabel 2: Berat Volume Agregat Halus**

No	Kondisi	Berat Volume	Satuan
1	Padat	0.935	kg/l
2	Gembur	1.371	kg/l
3	Digoyangkan	1.244	kg/l

Pada peneriksaan kadar berat volume agregat halus yang di tampilkan pada Tabel 2, nilai berat volume agregat halus menunjukkan kerapatan butiran pasir dalam berbagai kondisi. Nilai yang relatif konsisten menandakan bahwa pasir Palembang memiliki gradasi baik dan kepadatan yang sesuai, sehingga dapat meningkatkan workability serta mengurangi rongga dalam beton.

###### b. Agregat Kasar

Hasil pemeriksaan berat volume agregat kasar terdapat pada Tabel 3

**Tabel 3: Berat Volume Agregat Kasar**

No	Kondisi	Berat Volume	Satuan
1	Padat	1.450	kg/l
2	Gembur	1.610	kg/l
3	Digoyangkan	1.449	kg/l

Berdasarkan Tabel 3, Nilai berat volume agregat kasar yang berkisar antara 1,45–1,61 kg/ℓ menunjukkan bahwa batu pecah yang digunakan memiliki kekompakan yang baik. Hal ini penting karena agregat kasar berperan besar dalam menahan beban tekan beton.

### 3.1.3 Pemeriksaan *Specific Gravity* Agregat

#### a. Agregat Halus

Tabel 4: *Specific Gravity* Agregat Halus

No	<i>Specific Gravity</i>	Berat Volume	Satuan
1	<i>Apparent specific gravity</i>	2,509	gr
2	<i>Bulk specific gravity</i> kondisi kering	2,184	gr
3	<i>Bulk spec</i> kondisi ssd	2,312	gr
4	Persentasi absorsi air	5,97	%

Nilai *specific gravity* dan penyerapan air menunjukkan kemampuan pasir dalam menyerap air campuran. Pada Tabel 4 *specific grafity* dengan nilai 5,97% tergolong wajar untuk agregat halus alami, artinya pasir memiliki daya serap yang sedang, sehingga tidak mengganggu keseimbangan air-semen dalam campuran beton.

#### b. Agregat Kasar

Tabel 5: *Specific Gravity* Agregat Kasar

No	<i>Specific Gravity</i>	Berat Volume	Satuan
1	<i>Apparent specific gravity</i>	2,189	gr
2	<i>Bulk specific gravity</i> kondisi kering	2,054	gr
3	<i>Bulk spec</i> kondisi ssd	2,114	gr
4	Persentasi absorsi air	0,030	%

Sedangkan pada Tabel 5 nilai *specific grafity* agregat kasar yang rendah (0,03%) menunjukkan batu pecah memiliki porositas kecil. Hal ini menandakan kualitas agregat kasar sangat baik dan akan memberikan kekuatan tekan beton yang tinggi.

### 3.1.4 Pemeriksaan Kadar Air Agregat

Tabel 6: Kadar Air Agregat

No	Jenis Wadah	Berat Volume	Satuan
1	Wadah 1	1.033	%
2	Wadah 2	1.525	%
3	Wadah 3	1.149	%
<b>Kadar Air Agregat Rata-rata</b>		<b>1,237</b>	<b>%</b>

Pada Tabel 6 kadar air rata-rata agregat sebesar 1,237% menunjukkan kondisi agregat cukup kering, sehingga air tambahan dalam campuran beton dapat dikontrol dengan baik. Kondisi ini penting untuk menjaga rasio air-semen tetap sesuai perancangan.

### 3.1.5 Pemeriksaan Bahan Lolos Saringan 200

Tabel 7: Bahan Lolos Saringan 200

No	Jenis Sampel	Lewat Saringan	Satuan
1	Sampel 1	5.3	%
2	Sampel 2	2.1	%
<b>Bahan Lolos saringan 200 Rata-rata</b>		<b>3.7</b>	<b>%</b>

Persentase bahan lolos saringan No. 200 seperti yang ditampilkan pada Tabel 7 sebesar 3,7% masih dalam batas aman menurut SNI (<5%), artinya kandungan debu halus pada pasir tidak berlebihan dan tidak mengganggu ikatan semen dengan agregat.

### 3.1.6 Pemeriksaan Kadar Lumpur

Tabel 8: Kadar Lumpur

No	Jenis Sampel	Persentase	Satuan
1	Sampel 1	4.55	%
2	Sampel 2	5.56	%
3	Sampel 3	4.76	%
<b>Persentase Kadar Lumpur Rata-rata</b>		<b>4.95</b>	<b>%</b>

Tabel 8 menampilkan kadar lumpur sebesar 4,95% masih memenuhi batas maksimum (5%) menurut SNI. Nilai ini menunjukkan pasir yang digunakan cukup bersih dan tidak mengandung banyak lempung yang dapat menurunkan kekuatan beton.

### 3.1.7 Analisis Saringan Agregat

#### a. Agregat Halus (Berat Sampel 5000 gr)

Tabel 9: Analisis Saringan Agregat Halus 1

No	No Saringan	Persentase tertahan	Persentase Lolos
1	No 4	0.56	99.44
2	No 8	2.82	97.18
3	No 16	17.38	82.62
4	No 30	40.42	59.58
5	No 50	64.84	35.16
6	No 100	95.54	4.46
7	No 200	98.66	1.34
	Wadah	100	0

Hasil dari melakukan penyaringan pada agregat halus pada sampel pertama dapat di lihat pada Tabel 9, ukuran agregat halusnya banyak tertahan pada saringan no 100 dengan persentase sebanyak 30,7%. Pada no 50 sebanyak 24,42% dan no 30 23,04%

Tabel 10: Analisis Saringan Agregat Halus 2

No	No Saringan	Persentase tertahan	Persentase Lolos
1	No 4	0.88	99.12
2	No 8	3.48	96.52
3	No 16	12.56	87.44
4	No 30	41.62	58.38
5	No 50	72.00	28.00
6	No 100	96.48	3.52
7	No 200	98.94	1.06
	Wadah	100	0

Pada sampel ke 2 yang bisa di lihat pada Tabel 10, hasil yang di dapat ukuran agregat halusnya banyak tertahan pada saringan di no 50 dengan persentase 30,38%, dan pada no 30 sebanyak 29.06% dan no 100 24,48%

#### b. Agregat Kasar (Berat Sampel 2500 gr)

Tabel 11: Analisis Saringan Agregat Kasar 1

No	No Saringan	Persentase tertahan	Persentase Lolos
1	No 4	99.12	0.88
2	No 8	99.68	0.32
3	No 16	100	0
	Wadah	-	-

Untuk agregat kasar pada Tabel 11, umumnya tertahan di saringan no 4 dengan persentase sebesar 99,12 % dan dikarenakan penggunaan ukuran yang terlalu besar akan mempengaruhi proses penelitian maka hanya di gunakan agregat kasar di mulai dari ukuran no 4

**Tabel 12: Analisis Saringan Agregat Kasar 2**

No	No Saringan	Persentase tertahan	Persentase Lolos
1	No 4	98.92	1.08
2	No 8	99.76	0.24
3	No 16	100	0
	Wadah	-	-

Pada Tabel 12, tidak jauh berbeda dengan sampel pertama , ukuran agregat kasar banyak tertahan pada saringan no 4 dengan persentase 98,92%. Hasil analisis gradasi dari Tabel 9 hingga Tabel 12 menunjukkan bahwa distribusi ukuran butiran agregat halus dan kasar berada dalam rentang ideal menurut SNI. Gradasi yang baik akan menghasilkan beton yang padat, sedikit rongga, dan memiliki kekuatan tekan optimal.

### 3.1.8 Hasil Perencanaan Campuran Beton

**Tabel 13: Komposisi Campuran Beton per 12 Benda Uji**

No	Komposisi	Normal	10%	20%	30%	Satuan
1	Semen	18,386	16,548	14,709	12,871	kg
2	Air	9,939	9,939	9,939	9,939	ℓ
3	Agregat halus	26,606	26,606	26,606	26,606	kg
4	Agregat kasar	45,886	45,886	45,886	45,886	kg
5	Abu vulkanik	0	1,839	3,677	5,516	kg

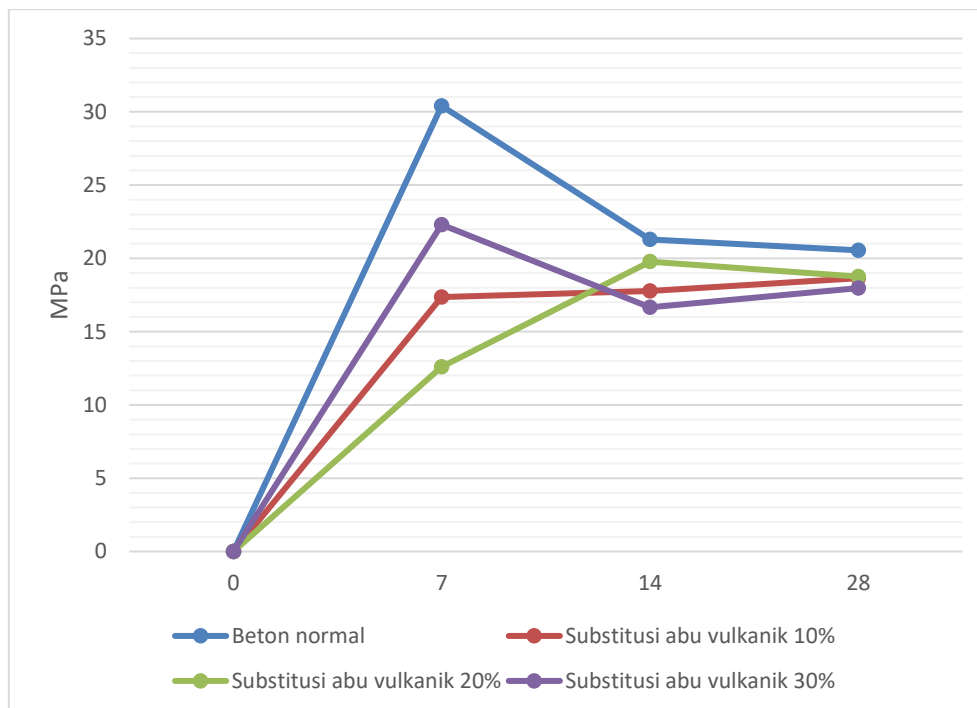
Dapat dilihat pada tabel 13, komposisi ini menunjukkan penggantian sebagian semen dengan abu vulkanik sebesar 10%, 20%, dan 30%. Tujuannya untuk mengetahui sejauh mana abu vulkanik dapat berperan sebagai bahan pozzolan. Penurunan proporsi semen diimbangi dengan peningkatan abu vulkanik agar total bahan pengikat tetap konstan.

### 3.1.9 Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton normal dan beton dengan variasi substitusi abu vulkanik sebesar 10%, 20%, dan 30% terhadap semen. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 14 di bawah

Tabel 14: Hasil Uji Kuat Tekan Beton

No	Jenis Sampel	Umur			Satuan
		7 Hari	14 Hari	28 Hari	
1	Beton Normal	30.40	21.30	20.55	MPa
2	Abu Vulkanik 10%	17.35	17.77	18.65	MPa
3	Abu Vulkanik 20%	12.59	19.77	18.76	MPa
4	Abu Vulkanik 30%	22.30	16.66	17.96	Mpa



Gambar 2: Perbandingan Kenaikan Kuat Tekan Benda Uji

Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari ditampilkan pada Tabel 14. dan Gambar 2 diatas. Beton normal memiliki kuat tekan sebesar 30,40 MPa pada umur 7 hari, 21,30 MPa pada umur 14 hari, dan 20,55 MPa pada umur 28 hari. Beton dengan substitusi abu vulkanik 10% menunjukkan kuat tekan 17,35 MPa pada umur 7 hari, 17,77 MPa pada umur 14 hari, dan 18,65 MPa pada umur 28 hari. Substitusi abu vulkanik 20% menghasilkan kuat tekan 12,59 MPa pada umur 7 hari, 19,77 MPa pada umur 14 hari, dan 18,76 MPa pada umur 28 hari. Sedangkan substitusi abu vulkanik 30% memiliki kuat tekan 22,30 MPa pada umur 7 hari, 16,66 MPa pada umur 14 hari, dan 17,96 MPa pada umur 28 hari.

#### 4. Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan abu vulkanik Gunung Marapi sebagai bahan substitusi sebagian semen berpengaruh terhadap penurunan kuat tekan beton dibandingkan dengan beton normal. Pada umur 28 hari, beton substitusi dengan kadar 10%, 20%, dan 30% hanya mencapai 87%–91% dari kuat tekan beton normal. Meskipun demikian, kecenderungan yang terlihat adalah perbedaan kuat tekan semakin mengecil seiring bertambahnya umur beton, yang menunjukkan adanya potensi reaksi pozzolanik abu vulkanik pada jangka waktu lebih panjang. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam

pengembangan alternatif material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah erupsi vulkanik sebagai bahan tambahan beton.

Adapun keterbatasan penelitian ini adalah pengujian hanya difokuskan pada kuat tekan tanpa analisis mendalam terhadap komposisi kimia, karakteristik mineral, maupun perilaku mikrostrukturnya akibat keterbatasan fasilitas laboratorium. Untuk itu, penelitian lanjutan disarankan agar menggunakan variasi substitusi yang lebih rendah, melakukan optimasi campuran, serta menambahkan aktivator kimia atau bahan tambahan lain guna meningkatkan reaktivitas pozzolanik sehingga kinerja beton dengan substitusi abu vulkanik dapat lebih kompetitif terhadap beton normal dalam aplikasi struktural.

## 5. Referensi

- Alkhaly, et al. (2015). *Evaluasi kekuatan tekan beton polimer yang memanfaatkan abu vulkanik dari Gunung Sinabung dan resin epoksi*. Jurnal Teknik Sipil, 8(2), 125–132.
- Ahmad, et al (2023). *Durability and microstructure analysis of concrete made with volcanic ash: A review (Part II)*. Science and Engineering of Composite Materials, 30(1). De Gruyter Open Ltd. <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0211>
- Andi. (2007). *Teknologi beton*. Yogyakarta: Andi Publisher.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-2002)*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 2847-2019)*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Bayuseno, A. P. (2010). *Karakteristik abu vulkanik sebagai bahan pozzolan alami*. Jurnal Teknik Sipil.
- Faqih, N., & Krisnawan, G. (2019). *Analisis kuat tekan beton dengan abu vulkanik sebagai pengganti sebagian semen*.
- Girsang, F. (2017). *Pengaruh abu vulkanik Gunung Sinabung sebagai substitusi semen terhadap kuat tekan beton (Penelitian)*. Medan: Universitas Medan Area. <https://repositori.uma.ac.id/bitstream/123456789/9423/1/Febrina%20Girsang%20-%20Fulltext.pdf>
- Kusuma Taufik. (2021). *Pra Rancangan Pabrik Ordinary Portland Cement (OPC) dengan dry process kapasitas 2.000.000 ton/tahun*.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete technology*. Harlow: Pearson Education.
- Pratiwi Nadya Ayu, et al. (2023). *Testing the compressive strength of concrete with the addition of coconut shell waste*.
- Rochmah, et al. (2023). *Perbandingan beton normal dengan beton menggunakan abu vulkanik Gunung Semeru ditinjau dari kuat tekan dan setting time*.
- Rohman Anshory, et al. (2018). *Pemanfaatan abu vulkanik Gunung Kelud sebagai pengganti sebagian agregat halus pada beton normal sebagai pendukung*.
- Siddique, R. (2011). *Utilization of volcanic ash in cement concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 55(12), 1079–1087.
- Susanti, R. D. (2018). *Studies on concrete by partial replacement of cement with volcanic ash*.
- Widayanto, & Sitompul, M. (2021). *Pengaruh penggunaan abu vulkanik Gunung Sinabung sebagai bahan substitusi parsial semen terhadap kuat tekan dan daya serap air mortar*.