

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF VOLCANIC ASH SUBSTITUTION FROM MOUNT LEWOTOBI ON THE CHARACTERISTICS OF NORMAL CONCRETE****STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUBSTITUSI ABU VULKANIK GUNUNG LEWOTOBI TERHADAP KARAKTERISTIK BETON NORMAL****Rizhard Anselmus Ndolu<sup>1</sup>, Noni Banunaek<sup>2</sup>, Frengky S. Banunek<sup>3</sup>**Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana<sup>1,2,3</sup>

\*rizhardndolu@staf.undana.ac.id

*\*Corresponding Author***ABSTRACT**

*This study aims to analyze the effect of using volcanic ash from Mount Lewotobi as a partial substitute for fine aggregates on the compressive strength, density, deformation, and seismic resistance index of normal concrete. Volcanic ash, which is rich in silica ( $\text{SiO}_2$ ) and alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) compounds, has the potential to serve as a natural pozzolanic material that enhances the mechanical properties and dynamic resistance of concrete. The research was conducted experimentally in the laboratory using volcanic ash substitution variations of 0%, 10%, 15%, 20%, and 25% by weight of fine aggregate. Tests included measurements of compressive strength, density, maximum deformation, and calculation of the Seismic Resistance Index (IKG). Quadratic regression analysis showed that volcanic ash content had a significant effect on compressive strength ( $R^2 = 0.575$ ) and density ( $R^2 = 0.543$ ). The optimum compressive strength of 23.231 MPa was obtained at a volcanic ash content of 8.36%, while the optimum density of 2250.432  $\text{kg/m}^3$  occurred at 11.889%, both classified as normal concrete according to SNI 03-2847-2002. The minimum deformation value of 1.80 mm and the highest Seismic Resistance Index (IKG = 1.00) were achieved at a 10% volcanic ash content. These findings demonstrate that using approximately 10% of Mount Lewotobi volcanic ash produces denser, stronger, and more earthquake-resistant concrete, while also providing an environmentally friendly solution for the utilization of volcanic waste in the East Nusa Tenggara region.*

**Keywords:** *normal concrete; volcanic ash; compressive strength; density; seismic resistance***ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan abu vulkanik Gunung Lewotobi sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus terhadap kuat tekan, berat jenis, deformasi, dan indeks ketahanan gempa beton normal. Abu vulkanik yang kaya akan senyawa silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) memiliki potensi sebagai material pozzolan alami yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan dinamis beton. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan variasi substitusi abu vulkanik sebesar 0%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat total pasir. Pengujian meliputi kuat tekan beton, berat jenis, deformasi maksimum, serta perhitungan Indeks Ketahanan Gempa (IKG). Hasil analisis regresi kuadratik menunjukkan bahwa kadar abu vulkanik berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan ( $R^2 = 0,575$ ) dan berat jenis beton ( $R^2 = 0,543$ ). Kuat tekan optimum diperoleh sebesar 23,231 MPa pada kadar abu vulkanik 8,36%, sedangkan berat jenis optimum sebesar 2250,432  $\text{kg/m}^3$  pada kadar 11,889%, keduanya termasuk dalam kategori beton normal menurut SNI 03-2847-2002. Nilai deformasi minimum sebesar 1,80 mm dan Indeks Ketahanan Gempa tertinggi (IKG = 1,00) dicapai pada kadar abu vulkanik 10%. Temuan ini membuktikan bahwa penggunaan abu vulkanik Gunung Lewotobi sebesar  $\pm 10\%$  menghasilkan beton yang lebih padat, kuat, dan tahan gempa, sekaligus menjadi solusi ramah lingkungan dalam pemanfaatan limbah vulkanik di wilayah Nusa Tenggara Timur.

**Kata kunci:** *Beton normal; abu vulkanik; kuat tekan; berat jenis; ketahanan gempa*

## 1. PENDAHULUAN

Beton memiliki peranan yang sangat vital dalam dunia konstruksi modern. Hampir seluruh jenis infrastruktur seperti gedung bertingkat, rumah tinggal, jalan raya, jembatan, bendungan, serta sistem irigasi, menggunakan beton baik sebagai elemen utama maupun sebagai komponen pelengkap. Keberadaan beton menjadi unsur yang tak terpisahkan dalam setiap kegiatan pembangunan.

Sebagai bahan konstruksi, beton banyak dipilih karena menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan material lainnya. Beton mudah dibentuk sesuai dengan kebutuhan desain, memiliki kemampuan menahan beban tinggi, tahan terhadap suhu panas dan api, serta membutuhkan biaya perawatan yang relatif rendah. Dengan frekuensi penggunaannya yang sangat luas, penelitian terhadap beton terus dikembangkan guna menghasilkan inovasi material yang memiliki kualitas, ketahanan, dan efisiensi yang lebih baik.

Secara umum, beton merupakan hasil dari proses pengerasan campuran antara semen hidrolik (semen Portland), agregat kasar, agregat halus, dan air. Dalam beberapa kondisi, bahan tambahan (admixture) juga digunakan untuk memperbaiki karakteristik maupun kinerja beton sesuai kebutuhan tertentu. Sebagian besar bahan penyusun beton, terutama pasir sebagai agregat halus, berasal dari sumber daya alam yang ketersediaannya terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya pengembangan teknologi material dengan memanfaatkan bahan alternatif yang lebih berkelanjutan.

Salah satu bahan alternatif yang potensial adalah abu vulkanik, yaitu material hasil letusan gunung berapi yang terlempar ke atmosfer dalam bentuk partikel halus. Abu vulkanik mengandung berbagai senyawa kimia penting seperti silika ( $\text{SiO}_2$ ), oksigen ( $\text{O}_2$ ), besi (Fe), mangan (Mn), silikat (Si), aluminium (Al), kalsium (Ca), kalium (K), dan fosfor (P) (Gunawan Budianto, 2014). Kandungan kimia tersebut menjadikan abu vulkanik berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton.

Provinsi Nusa Tenggara Timur, khususnya Pulau Flores dan Lembata, memiliki sejumlah gunung berapi aktif seperti Gunung Lewotobi dan Ile Lewotolok. Kedua gunung ini terakhir mengalami erupsi besar pada tahun 2025, menghasilkan volume abu vulkanik yang sangat besar. Abu tersebut pada awalnya tidak dimanfaatkan dan justru menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, antara lain pencemaran udara dan air, serta gangguan kesehatan masyarakat. Pemanfaatan abu vulkanik sebagai bahan pengganti sebagian agregat halus atau bahan tambahan dalam campuran beton diharapkan dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus memberikan nilai tambah bagi limbah vulkanik yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh abu vulkanik, diperlukan langkah inovatif dalam pemanfaatannya agar menjadi bahan yang memiliki nilai guna. Salah satu bentuk pemanfaatan yang potensial adalah menjadikan abu vulkanik sebagai substitusi sebagian pasir dalam campuran beton.

Pemanfaatan abu vulkanik sebagai pengganti sebagian agregat halus pada beton merupakan langkah strategis untuk mendukung inovasi material konstruksi berkelanjutan. Selain mengurangi ketergantungan terhadap pasir alam, penggunaan abu vulkanik juga berperan dalam pengelolaan limbah letusan gunung berapi agar lebih bernilai guna dan ramah lingkungan. Kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ) dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dalam abu vulkanik mampu meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan stabilitas beton, sehingga cocok diterapkan pada pembangunan rumah sederhana serta penguatan jalan di wilayah rawan longsor di NTT. Inovasi ini tidak hanya memberikan solusi teknis terhadap keterbatasan material lokal, tetapi juga menghasilkan manfaat ekonomi, sosial, dan ekologis dalam mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

Beton merupakan material konstruksi yang dihasilkan dari campuran semen portland atau jenis semen hidrolik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa penambahan bahan aditif tertentu, yang kemudian mengalami proses pengerasan hingga membentuk massa padat dan kuat (SNI 03-2847:2002). Berdasarkan klasifikasi yang

dikemukakan oleh Kardiyono Tjokrodimuljo (2004), beton dapat dibedakan menjadi delapan jenis, yaitu:

- a) Beton normal, yaitu beton dengan berat jenis standar dan kekuatan umum.
- b) Beton ringan, yang menggunakan agregat berpori untuk menghasilkan bobot lebih rendah.
- c) Beton non-pasir, yaitu beton tanpa agregat halus sehingga memiliki rongga udara di antara butiran agregat kasarnya.
- d) Beton kedap air, beton yang dirancang agar tahan terhadap penetrasi air.
- e) Fero semen, beton tipis yang diperkuat dengan jaring kawat halus.
- f) Beton serat, yang mengandung serat baja, plastik, atau bahan lain untuk meningkatkan ketahanan retak.
- g) Beton siklop, campuran beton yang menggunakan batu besar sebagai agregat tambahan.
- h) Beton hampa (vacuum concrete), yaitu beton yang kadar airnya dikurangi melalui proses penghisapan vakum untuk mempercepat pengerasan dan meningkatkan kekuatan teka

Abu vulkanik merupakan material hasil letusan gunung berapi yang termasuk dalam kelompok mineral batuan vulkanik dan material gelas (vitrik) dengan ukuran butiran berkisar antara pasir hingga kerikil halus, yakni sekitar 2 mm atau lebih kecil. Partikel abu yang sangat halus dapat memiliki ukuran kurang dari 0,001 mm, sehingga bersifat ringan dan mudah terbawa angin.

Berbeda dari abu terbang (fly ash) yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan organik seperti kayu atau batu bara, abu vulkanik terbentuk secara alami melalui proses erupsi magma. Material ini memiliki karakteristik keras, tidak larut dalam air, abrasif, serta sedikit korosif. Dalam kondisi basah, abu vulkanik juga bersifat konduktif terhadap listrik karena mengandung ion-ion mineral aktif (Bayuseno, 2010). Kandungan utama abu vulkanik meliputi silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), serta sejumlah oksida logam lainnya yang menjadikannya berpotensi besar digunakan sebagai bahan tambahan atau pengganti sebagian agregat dalam pembuatan beton.



Gambar 1. Abu Vulkanik Gunung Lewotobi

## 2. METODE

### 2.1. Bahan

Penelitian ini menggunakan Semen Portland tipe I dengan merek *Semen Holcim* yang telah memenuhi standar mutu sebagaimana tercantum dalam SK-SNI-S-04-1989-F.

Bahan agregat halus yang digunakan berupa pasir asal Takari, Kabupaten Kupang. Berdasarkan hasil analisis laboratorium, pasir tersebut memiliki kadar lumpur sebesar 2,60%, kadar air 11,75%, kandungan zat organik berkisar 0–10%, nilai Bulk Specific Gravity SSD sebesar 2,45, serta modulus kehalusan 3,2 yang tergolong dalam zona I menurut klasifikasi gradasi agregat halus.

Bahan tambahan berupa abu vulkanik diperoleh dari hasil letusan Gunung Lewotobi, yang diambil dari pemukiman warga di Desa Hokeng Jaya, RT 5 RW 3, Kecamatan Wulang Gitang, Kabupaten Flores Timur. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa abu vulkanik tersebut memiliki kadar lumpur 10,63%, kadar air 0,33%, kandungan zat organik 10–20%, nilai Bulk Specific Gravity SSD sebesar 2,49, dan modulus kehalusan 1,5, yang berarti tidak termasuk dalam zona gradasi agregat halus.

Uji kimia menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF) menunjukkan komposisi utama sebagai berikut:  $\text{SiO}_2$  51,58%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  16,23%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  12,53%,  $\text{CaO}$  12,18%, dan  $\text{MgO}$  2,97%.

Sementara itu, agregat kasar yang digunakan adalah kerikil dari wilayah Takari, Kabupaten Kupang. Berdasarkan hasil uji laboratorium, kerikil tersebut memiliki modulus kehalusan 3,05 dan Bulk Specific Gravity SSD sebesar 2,46.

Air pencampur yang digunakan dalam penelitian ini merupakan air bersih yang memenuhi standar kualitas menurut SK SNI S-04-1989-F.

## 2.2. Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji beton dilakukan dengan komposisi campuran berat 1Pc : 2Ps : 3Kr, di mana abu vulkanik digunakan sebagai substitusi sebagian agregat halus (pasir) dengan variasi sebesar 0%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat total pasir. Tahapan pembuatan dimulai dengan pencampuran semen, pasir, kerikil, dan abu vulkanik hingga merata, kemudian ditambahkan air secara bertahap sampai diperoleh adukan yang homogen. Adukan yang telah merata kemudian dimasukkan ke dalam cetakan silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pematatan dilakukan setiap sepertiga tinggi cetakan untuk memastikan tidak ada rongga udara yang tersisa.

Setelah proses pengecoran selesai, benda uji dibiarkan selama 24 jam untuk proses setting awal, kemudian dikeluarkan dari cetakan dan direndam dalam air selama 28 hari untuk proses curing. Benda uji yang dihasilkan berupa silinder beton berukuran 150 mm × 300 mm dengan jumlah total 25 sampel untuk keseluruhan variasi campuran.



Gambar 2. Sampel Silinder Beton untuk Pengujian

## 2.3. Pengujian

Setelah melalui proses perawatan selama 28 hari, sampel beton berbentuk silinder kemudian diuji untuk mengetahui kuat tekan serta berat jenis dari beton tersebut.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian terhadap kuat tekan dan berat jenis beton yang menggunakan abu vulkanik sebagai substitusi sebagian agregat halus disajikan pada Tabel 1 berikut ini.

**Tabel 1.**  
**Komposisi**

Variasi Abu Vulkanik	Kuat Tekan Rata-rata Beton (MPa)	Berat Jenis Rata-rata Beton (kg/m <sup>3</sup> )
0%	21,346	2208,83
10%	23,100	2246,58
15%	24,210	2257,90
20%	17,564	2219,78
25%	17,326	2203,93

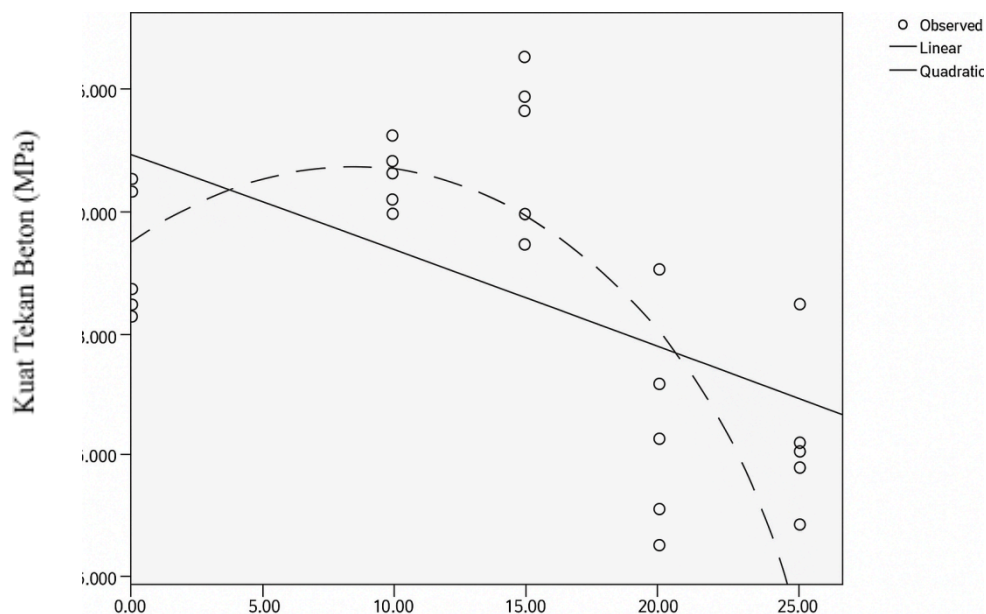
Analisis data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak statistik SPSS versi 16.0 (Statistical Package for the Social Science) melalui metode regresi (Curve Estimation) untuk melihat hubungan antara kadar abu vulkanik dengan karakteristik beton.

Hasil analisis regresi terhadap kuat tekan beton dengan uji linearitas menggunakan SPSS 16.0 dirangkum dalam Tabel 2 dan divisualisasikan pada Gambar 3.

**Tabel 2.**  
**Hasil Analisis Regresi terhadap Kuat Tekan Beton**

Model Summary and Parameter Estimates								
Variabel Dependen: Kuat Tekan Beton								
Persamaan	R Square	F	df1	df2	Sig.	Konstanta (a)	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
Kuadratik	0,575	14,895	2	22	0,000	21,484	0,418	0,025

Model regresi kuadratik menunjukkan bahwa nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,575, yang berarti 57,5% variasi kuat tekan beton dapat dijelaskan oleh perubahan pada variabel independen, yaitu persentase abu vulkanik. Nilai F sebesar 14,895 dengan signifikansi 0,000 ( $p < 0,05$ ) menandakan bahwa model regresi ini bermakna secara statistik.



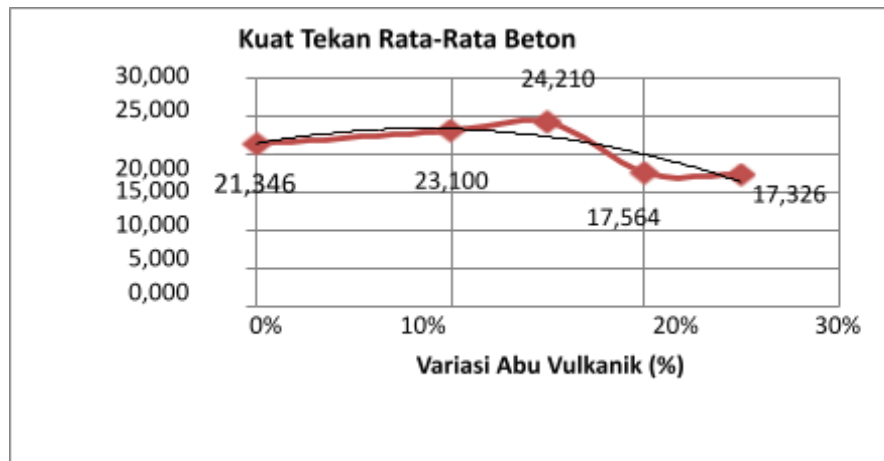
## Persentase Substitusi Abu Vulkanik (%)

**Gambar 3.****Pengaruh Penggantian Abu Vulkanik Gunung Lewotobi terhadap Kuat Tekan Beton**

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 2 dan Gambar 3, diperoleh bahwa hubungan antara variasi persentase penggantian abu vulkanik dengan kuat tekan beton menunjukkan nilai signifikansi sebesar  $0,000 < 0,05$ , yang menandakan bahwa hubungan tersebut bersifat nonlinier.

Uji keberartian regresi menghasilkan nilai F tabel = 3,44 (pada taraf kesalahan 5%, dengan  $df_1 = 2$  dan  $df_2 = 22$ ), sedangkan F hitung = 14,895. Karena F hitung (14,895) > F tabel (3,44), maka dapat disimpulkan bahwa model regresi yang digunakan signifikan secara statistik. Selain itu, hasil Model Summary menunjukkan nilai  $R^2 = 0,575$  atau  $R = 0,758$ , yang mengindikasikan bahwa abu vulkanik memiliki pengaruh yang kuat terhadap nilai kuat tekan beton. Dengan demikian, semakin tepat proporsi abu vulkanik yang digunakan, semakin optimal pula kekuatan tekan yang dihasilkan oleh beton.

Distribusi data yang menunjukkan pengaruh abu vulkanik terhadap kuat tekan beton dapat diperhatikan pada Gambar 4 berikut.

**Gambar 4.****Hubungan antara Kandungan Abu Vulkanik dan Kuat Tekan Beton**

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 2 dan Gambar 3, diperoleh bahwa pengaruh variasi penggantian abu vulkanik terhadap kuat tekan beton mengikuti model regresi non linier kuadratik dengan persamaan:  $y = 21,484 + 0,418x - 0,025x^2$

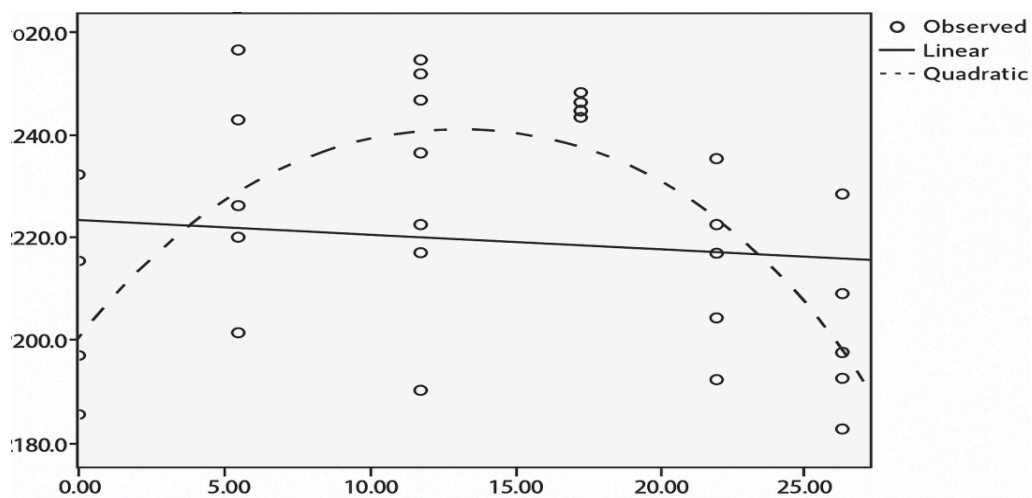
Dari persamaan tersebut diketahui bahwa kuat tekan optimum beton tercapai pada nilai 23,231 MPa, dengan persentase penggantian abu vulkanik sebesar 8,36%.

Hasil pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa peningkatan kadar abu vulkanik hingga sekitar 8,36% menyebabkan kuat tekan beton meningkat hingga mencapai titik maksimum. Namun, setelah melewati kadar tersebut (hingga 25%), nilai kuat tekan mulai menurun. Penurunan ini disebabkan oleh ukuran butir abu vulkanik yang sangat halus, sehingga menyebabkan berkurangnya ikatan antar butir pasir dan semen dalam campuran beton, abu vulkanik, pasir, kerikil, dan semen mengalami penurunan.

Pengujian terhadap berat jenis beton melalui analisis linieritas menggunakan perangkat lunak statistik SPSS versi 16.0 menghasilkan data yang dirangkum pada Tabel 3 dan Gambar 4 berikut.

**Tabel 3.**  
**Hasil Analisis Regresi untuk Berat Jenis Beton**

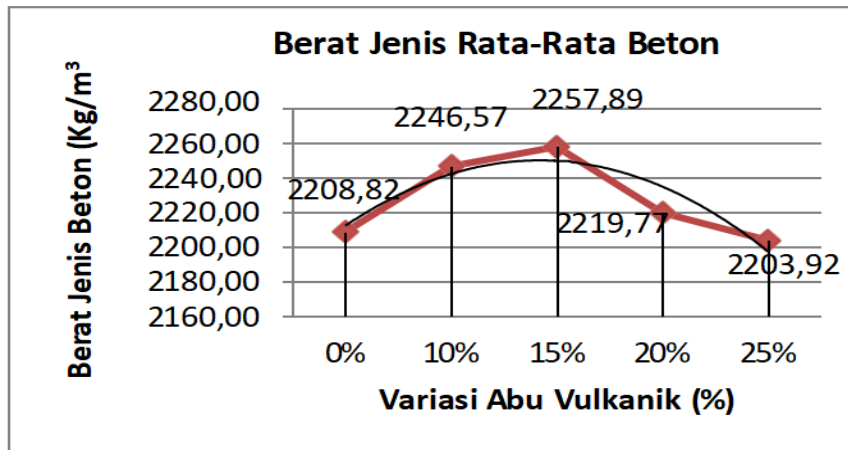
Model Summary						
Persamaan	R	R Square (%)	F	df1	df2	Sig.
Kuadratik	0,543	13,06	6	2	22	0,000
Parameter Estimates						
Konstanta	b1	b2	Keterangan			
2209,016	6,967	-0,293	Model kuadratik signifikan; menunjukkan hubungan antara variasi penggantian abu vulkanik dan berat jenis beton.			



**Gambar 4. Hubungan antara Variasi Penggantian Abu Vulkanik Gunung Lewotobi dengan Nilai Berat Jenis Beton**

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 4, diperoleh bahwa variasi penggantian abu vulkanik berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton dengan nilai signifikansi sebesar  $0,000 < 0,05$ , yang menunjukkan bahwa hubungan antara variabel bersifat nonlinier. Uji keberartian regresi menunjukkan bahwa nilai  $F_{tabel}$  pada taraf kesalahan 5% ( $df_1 = 2$  dan  $df_2 = 22$ ) adalah 3,44, sedangkan nilai  $F_{hitung}$  sebesar 13,066. Karena  $F_{hitung} (13,066) > F_{tabel} (3,44)$ , maka dapat disimpulkan bahwa penggantian abu vulkanik memberikan pengaruh yang signifikan terhadap berat jenis beton, sehingga persamaan regresi yang diperoleh layak digunakan.

Dari Model Summary pada Tabel 3, hubungan antara abu vulkanik dan berat jenis beton memiliki nilai  $R^2 = 0,543$  atau  $R = 0,737$ , yang menandakan bahwa abu vulkanik memiliki tingkat pengaruh yang cukup kuat terhadap berat jenis beton. Sebaran data yang menggambarkan pengaruh abu vulkanik terhadap kuat tekan beton disajikan pada Gambar 5 berikut.

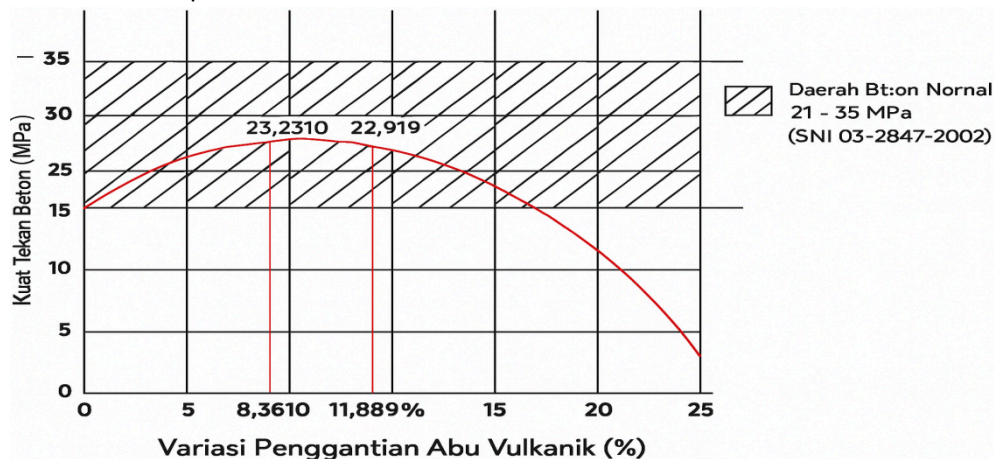


Gambar 5. Korelasi antara Variasi Persentase Abu Vulkanik dan Nilai Berat Jenis Beton

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 5, diperoleh bahwa hubungan antara variasi penggantian abu vulkanik dan kuat tekan beton mengikuti pola regresi nonlinier atau kuadrat dengan persamaan  $y = 2209,016 + 6,967x - 0,293x^2$ . Dari persamaan tersebut diketahui bahwa nilai kuat tekan maksimum sebesar  $2250,432 \text{ kg/m}^3$  terjadi pada tingkat penggantian abu vulkanik **11,889%**. Kondisi ini menunjukkan bahwa abu vulkanik memiliki pengaruh nyata terhadap berat jenis beton karena karakteristik kepadatannya yang cukup tinggi. Dengan demikian, peningkatan kadar abu vulkanik dalam campuran beton berkontribusi terhadap perubahan berat jenis beton, mengingat berat jenis beton sangat bergantung pada sifat fisik material penyusunnya.

Nilai optimum penggunaan abu vulkanik berdasarkan hasil uji kuat tekan dan berat jenis beton dapat dijelaskan sebagai berikut:

#### 1) Kuat Tekan Optimal



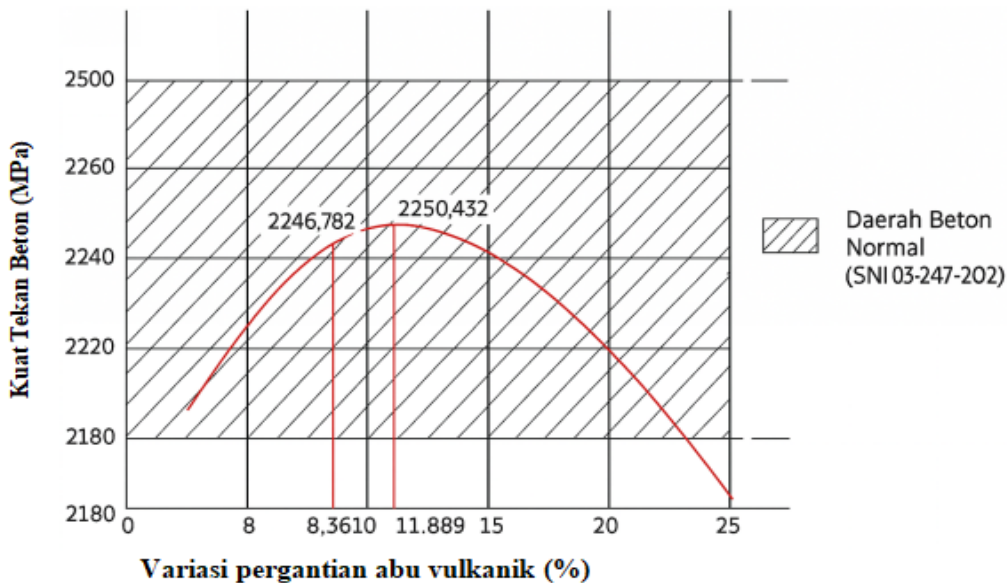
Gambar 6.

#### Hubungan Variasi Substitusi Abu Vulkanik terhadap Nilai Kuat Tekan Beton Optimal

Berdasarkan Gambar 6, dapat dilihat bahwa pada kadar penggantian abu vulkanik sebesar 8,36%, diperoleh kuat tekan beton optimum sebesar 23,231 MPa. Sementara itu, pada variasi penggantian abu vulkanik sebesar 11,889%, kuat tekan beton menurun menjadi 22,919

MPa. Nilai kuat tekan tersebut termasuk dalam klasifikasi beton normal dengan rentang 21–35 MPa sesuai ketentuan SNI 03-2847-2002

## 2) Berat Jenis Optimal



**Gambar 7.**

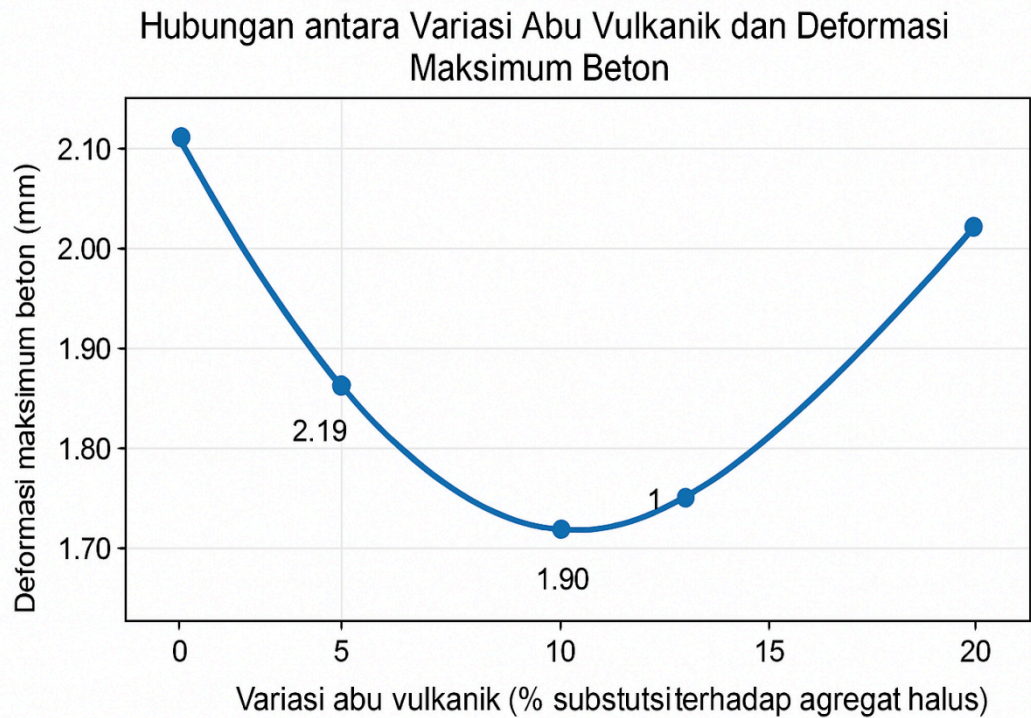
### Hubungan Variasi Substitusi Abu Vulkanik terhadap Nilai Berat Jenis Beton Optimal

Berdasarkan Gambar 7, terlihat bahwa pada kadar penggantian abu vulkanik sebesar 8,36%, beton memiliki berat jenis sebesar 2246,782 kg/m<sup>3</sup>. Sedangkan pada variasi penggantian abu vulkanik sebesar 11,889%, nilai berat jenis beton meningkat menjadi 2250,432 kg/m<sup>3</sup>. Berdasarkan klasifikasi menurut SNI 03-2847-2002, kisaran tersebut termasuk dalam kategori beton normal, yaitu antara 2200–2500 kg/m<sup>3</sup>.

Dari hasil ini dapat diinterpretasikan bahwa penambahan abu vulkanik secara proporsional dapat meningkatkan kepadatan beton hingga mencapai batas optimal sebelum menurun kembali pada kadar yang lebih tinggi. Penggunaan abu vulkanik Gunung Lewotobi sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus terbukti memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik fisik beton, baik dari segi kuat tekan maupun berat jenis.

Dengan variasi campuran abu vulkanik sebesar 11,889%, diperoleh hasil optimum dengan kuat tekan sebesar 22,919 MPa dan berat jenis 2250,432 kg/m<sup>3</sup>. Kedua parameter tersebut memenuhi standar beton normal sesuai SNI 03-2847-2002, sehingga abu vulkanik Gunung Lewotobi dapat direkomendasikan sebagai bahan tambahan alternatif yang ramah lingkungan dalam pembuatan beton.

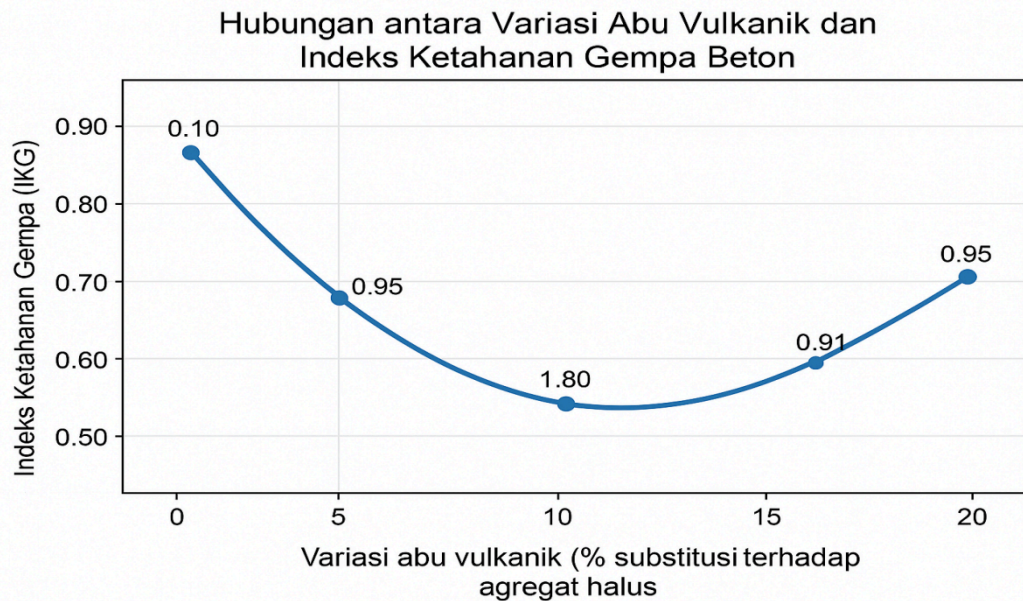
## 3) Deformasi maksimum

**Gambar 8.****Hubungan antara variasi abu vulkanik dan deformasi maksimum beton**

Hasil gambar 8 grafik hubungan antara variasi abu vulkanik dan deformasi maksimum beton menunjukkan pola berbentuk parabola menurun (U-terbalik), di mana deformasi beton menurun seiring peningkatan kadar abu vulkanik hingga mencapai titik optimum pada 10%, kemudian meningkat kembali pada kadar yang lebih tinggi. Beton tanpa abu vulkanik memiliki deformasi terbesar (2,10 mm) karena struktur masih kurang padat, sedangkan pada penambahan 5–10% abu vulkanik terjadi reaksi pozzolanik antara  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Ca(OH)}_2$  yang membentuk senyawa C–S–H sehingga beton menjadi lebih rapat dan kuat dengan deformasi minimum sebesar 1,80 mm. Namun, pada kadar 15–20%, abu vulkanik yang berlebih menyebabkan penurunan kohesi antar partikel dan menurunkan efektivitas reaksi pozzolanik sehingga deformasi kembali meningkat.

Secara mekanika material, kadar 10% menunjukkan kondisi paling optimum dengan modulus elastisitas maksimum. Hubungan matematis antara variasi abu vulkanik (x) dan deformasi maksimum beton (y) di dapat dari permodelan matematis dalam bentuk persamaan kuadrat  $y = ax^2 + bx + c$  di mana y menyatakan deformasi maksimum beton (mm), x adalah kadar abu vulkanik (%), dan a, b dan c merupakan konstanta regresi hasil pemodelan data.

4) Indeks Ketahanan Gempa Beton



**Gambar 9.**

**Hubungan antara Variasi Abu Vulkanik dan indeks ketahanan Gempa Beton**

Gambar 9 Grafik ini menunjukkan bahwa penambahan abu vulkanik meningkatkan ketahanan gempa beton hingga kadar optimum 10%, kemudian menurun kembali pada kadar yang lebih tinggi. Bentuk grafik menyerupai parabola terbalik ( $\cap$ ), dengan titik puncak yang menandakan komposisi abu vulkanik terbaik untuk kekuatan dan daya tahan dinamis beton. Secara fisik, ketahanan gempa (IKG) berbanding terbalik dengan deformasi maksimum beton, artinya semakin kecil deformasi, semakin besar ketahanan terhadap gempa. Hubungan ini dapat dinyatakan dengan rumus sederhana

$$IKG = k x = \frac{1}{\Delta_{maks}}$$

Di mana  $\Delta_{maks}$  adalah deformasi maksimum (mm) dan k adalah faktor penyesuaian agar nilai IKG berada pada rentang 0–1. Berdasarkan data, nilai IKG meningkat dari 0,85 pada 0% abu vulkanik menjadi 1,00 pada 10%, lalu menurun lagi setelahnya. Secara matematis, hubungan ini mengikuti persamaan kuadrat  $y = -0.0012x^2 + 0.024x + 0.90$  dengan titik optimum pada kadar abu vulkanik 10%, yang menunjukkan kondisi beton paling tahan terhadap beban gempa.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa abu vulkanik Gunung Lewotobi memiliki potensi signifikan sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus (pasir) dalam pembuatan beton normal. Hasil uji kuat tekan, berat jenis, deformasi, dan indeks ketahanan gempa menunjukkan bahwa variasi penambahan abu vulkanik memberikan pengaruh nyata terhadap karakteristik fisik dan mekanik beton.

Secara umum, peningkatan kadar abu vulkanik hingga sekitar 8–10% menghasilkan sifat beton paling optimum, ditunjukkan oleh:

1. Kuat tekan maksimum sebesar 23,231 MPa pada substitusi 8,36% abu vulkanik.
2. Berat jenis optimum sebesar 2250,432 kg/m<sup>3</sup> pada kadar 11,889%, masih dalam kisaran beton normal menurut SNI 03-2847-2002 (2200–2500 kg/m<sup>3</sup>).
3. Deformasi minimum 1,80 mm pada kadar abu vulkanik 10%, menandakan struktur paling padat dengan modulus elastisitas maksimum.

4. Indeks Ketahanan Gempa (IKG) tertinggi terjadi pada 10% abu vulkanik, yang menunjukkan keseimbangan ideal antara kekuatan dan ketahanan dinamis terhadap beban getaran.

Hasil regresi kuadratik untuk kuat tekan ( $R^2 = 0,575$ ) dan berat jenis ( $R^2 = 0,543$ ) menunjukkan bahwa variasi abu vulkanik berpengaruh kuat terhadap kualitas beton. Bentuk hubungan nonlinier (parabola) menandakan bahwa kadar abu vulkanik yang berlebihan (>15%) justru menurunkan performa beton akibat penurunan kohesi dan reaksi pozzolanik yang tidak optimal.

Dengan demikian, penggunaan abu vulkanik sebagai substitusi pasir sebesar  $\pm 10\%$  direkomendasikan sebagai komposisi ideal untuk menghasilkan beton yang kuat, padat, dan tahan terhadap gempa, sekaligus menjadi solusi ramah lingkungan untuk pemanfaatan limbah vulkanik di Nusa Tenggara Timur.

## 5. SARAN

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan agar pemanfaatan abu vulkanik sebagai bahan substitusi agregat halus diuji lebih lanjut melalui implementasi pada skala lapangan, seperti pada konstruksi jalan desa, bangunan sederhana, maupun talud penahan tanah. Pengujian pada proyek nyata diperlukan untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang beton, khususnya terhadap pengaruh kondisi cuaca, variasi lingkungan, serta beban dinamis yang terjadi selama masa layan. Selain itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada karakterisasi material secara lebih mendalam, terutama terkait pengaruh abu vulkanik terhadap daya serap air, porositas, serta ketahanan kimia beton terhadap serangan sulfat dan klorida, guna memastikan kelayakannya untuk aplikasi konstruksi berstandar tinggi.

Selanjutnya, optimasi campuran beton yang mengandung abu vulkanik direkomendasikan dilakukan melalui analisis mikrostruktur, seperti Scanning Electron Microscopy (SEM) dan X-Ray Diffraction (XRD), untuk mengidentifikasi interaksi senyawa C-S-H hasil reaksi pozzolanik antara abu vulkanik dan semen. Pendekatan ini diharapkan dapat memperjelas mekanisme peningkatan kekuatan dan durabilitas beton secara ilmiah. Dari perspektif lingkungan dan ekonomi, pemanfaatan abu vulkanik berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap pasir alam sekaligus menekan biaya produksi beton, sehingga layak direkomendasikan sebagai material ramah lingkungan (eco-friendly material) dalam mendukung program pembangunan berkelanjutan, khususnya di wilayah rawan vulkanik seperti Flores dan Lembata. Terakhir, untuk aplikasi di daerah rawan gempa, diperlukan pengujian beban siklik atau uji dinamis laboratorium guna memverifikasi secara empiris peningkatan ketahanan seismik beton, termasuk pengaruhnya terhadap Indeks Ketahanan Gempa pada struktur bangunan.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C39/C39M-18. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2002). SNI 03-2847-2002: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2011). SNI 1974:2011 – Cara Uji Kuat Tekan Beton Silinder. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2018). SNI 7656:2012 – Spesifikasi Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.
- BSN. (2019). SNI 1726:2019 – Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Chen, W. F., & Saleeb, A. F. (1994). *Constitutive Equations for Engineering Materials: Elasticity and Modeling*. New York: John Wiley & Sons.
- Kartika, D., & Putra, Y. (2021). Analisis Hubungan Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastisitas terhadap Indeks Ketahanan Gempa. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Struktur*, 4(2), 98–107.
- Lede, M. A., Hayon, P., & Ndoen, A. (2023). Kajian Potensi Abu Vulkanik Lewotobi sebagai Material Pozzolan pada Beton Normal. *Jurnal Teknik Sipil Undana*, 9(1), 25–33.
- Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mulyono, T. (2005). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Rahman, A., & Hidayat, R. (2020). Studi Pemanfaatan Abu Vulkanik Gunung Kelud sebagai Bahan Substitusi Semen terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, 7(1), 1–9.
- Saing, B., & Simanjuntak, J. (2020). Pengaruh Penggunaan Pozzolan Alam terhadap Durabilitas dan Modulus Elastisitas Beton. *Jurnal Material dan Konstruksi Indonesia*, 8(1), 45–56.
- Setiawan, D., & Prabowo, H. (2021). Analisis Ketahanan Gempa pada Beton Mutu Sedang dengan Variasi Material Pozzolan. *Jurnal Rekayasa Konstruksi dan Material*, 7(3), 115–123.
- Sugiyanto, & Susanti, E. (2021). Pengaruh Abu Vulkanik Gunung Sinabung terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain (JRSD)*, 9(2), 75–83.
- Thomas, M. D. A. (2013). *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. CRC Press.
- Tjokrodimuljo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Nafiri.
- Wulandari, D., & Purnomo, A. (2022). Pemanfaatan Abu Vulkanik Gunung Agung sebagai Bahan Campuran Beton terhadap Kuat Tekan dan Ketahanan Sulfat. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Udayana*, 11(2), 53–62.