

Pengaruh pemanfaatan limbah marmer sebagai bahan substitusi *fly ash* pada campuran beton geopolimer terhadap sifat mekanik

Kurniawan Nur Razaq^{1,*}, Astriana Hardawati¹, Daru Salam¹

¹Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Geopolymer concrete
Marble waste
Fly ash

Corresponding Author:

Kurniawan Nur Razaq
kurniawanrazaq@gmail.com

Abstract

The demand for environmentally friendly construction materials has become increasingly critical due to rising carbon emissions from the cement industry. Geopolymer concrete offers a sustainable alternative by eliminating Portland cement and employing fly ash with alkaline activators. This study investigates the effect of marble waste substitution on the mechanical properties of geopolymer concrete—namely compressive strength, split tensile strength, and modulus of elasticity—and aims to determine the optimal substitution level within the 15% to 30% range. The research was conducted experimentally using cylindrical specimens (15 cm × 30 cm) with marble waste replacing binder mass at 0%, 15%, 20%, 25%, and 30%. The activator solution comprised Na₂SiO₃ and 10 M NaOH in a 4:2 ratio. Normal concrete was designed with a target compressive strength of 25 MPa as a performance benchmark. All specimens were tested at 28 days following SNI and ASTM standards. Data were analyzed descriptively and comparatively to assess performance across variations. Results indicated that marble waste substitution significantly enhanced mechanical properties, with the 15% level achieving the best performance: a compressive strength of 44.3 MPa versus 26.2 MPa for normal concrete, a split tensile strength of 3.252 MPa versus 2.817 MPa, and a modulus of elasticity of 24,881 MPa, closely aligning with predictions from ASTM C-469-94 and Tempest (2010). Substitution above 15% led to decreased performance due to increased porosity and disrupted interparticle bonds. Thus, incorporating 15% marble waste is recommended as the optimal proportion to improve the mechanical performance of geopolymer concrete while advancing sustainable construction practices.

Copyright © 2025 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Dalam era modern, kebutuhan akan material konstruksi yang ramah lingkungan semakin mendesak seiring meningkatnya kekhawatiran terhadap emisi karbon. Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena kekuatannya dan biaya yang relatif rendah, namun produksi semen sebagai bahan utama beton menyumbang sekitar 8% emisi CO₂ global setiap tahun (Global Carbon Project, 2020). Kondisi ini mendorong pencarian alternatif yang lebih berkelanjutan. Salah satu solusi

potensial adalah beton geopolimer yang tidak menggunakan semen Portland, melainkan memanfaatkan bahan *pozzolan* seperti *fly ash* yang merupakan limbah PLTU. *Fly ash* memiliki sifat *pozzolan* yang baik untuk meningkatkan kuat tekan, tarik belah, maupun lentur beton. Namun, keterbatasan pasokan di beberapa daerah serta harga yang relatif tinggi menjadi kendala pemanfaatannya.

Di sisi lain, industri marmer menghasilkan limbah dalam jumlah besar yang sering dibuang tanpa diolah, menimbulkan masalah lingkungan. Pemanfaatan limbah marmer sebagai substitusi dalam beton tidak hanya

mengurangi dampak lingkungan tetapi juga memberikan nilai tambah pada limbah tersebut. Dalam konteks beton geopolimer, limbah marmer digunakan sebagai bahan substitusi parsial terhadap *fly ash*, seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan material alternatif yang lebih ramah lingkungan dan lokal. Substitusi ini tidak hanya berfungsi sebagai filler, tetapi juga berperan dalam memperbaiki reaktivitas dan kepadatan mikrostruktur beton melalui kontribusi kalsium karbonat (CaCO_3) dalam pembentukan gel C-A-S-H (Nath & Sarker, 2015; Nuaklong, dkk. 2018).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa substitusi debu marmer hingga 30% dapat meningkatkan kekuatan pasta geopolimer (Alharthy, dkk. 2022), sementara penelitian Wijayanti dan Wardhono (2022) menemukan substitusi 10% limbah marmer pada beton geopolimer menghasilkan kuat tekan dan berat jenis optimum.

Selain bahan, kualitas beton geopolimer juga dipengaruhi oleh komposisi larutan aktivator. Kombinasi Na_2SiO_3 dan NaOH dalam rasio 4:2 (2:1) banyak digunakan karena menghasilkan workability yang baik dan kuat tekan kompetitif. Konsentrasi NaOH 10 M dianggap optimal karena memberikan keseimbangan antara kekuatan tekan, stabilitas larutan, dan kemudahan pencampuran (Putra, dkk. 2018; Singh & Middendorf, 2020).

Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer terhadap sifat mekanik beton geopolimer, meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas, dengan variasi substitusi 15% hingga 30%. Diharapkan penelitian ini dapat menemukan komposisi optimal yang tidak hanya meningkatkan performa mekanik beton geopolimer, tetapi juga mendukung upaya pengurangan dampak lingkungan dari industri semen, *fly ash*, dan limbah marmer.

Landasan Teori

Beton

Beton adalah material komposit yang tersusun dari agregat halus dan kasar, semen, serta air yang dicampur hingga homogen, kemudian dicetak dan dibiarkan mengeras. Beton dikenal karena kekuatan tekan yang tinggi, tahan api, serta dapat dibentuk sesuai kebutuhan. Agregat menyusun sekitar 60–75% volume beton dan berperan penting dalam mengurangi penyusutan, meminimalkan pergerakan, serta meningkatkan kekuatan tekan. Mutu beton sangat dipengaruhi oleh kualitas agregat yang digunakan.

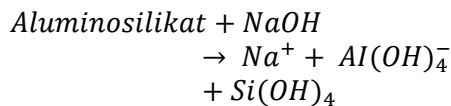
Beton geopolimer

Beton geopolimer merupakan inovasi material konstruksi yang dikembangkan untuk mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen Portland. Beton ini memanfaatkan bahan ikat anorganik dari limbah industri seperti *fly ash*, *slag*, atau *pozzolan* lain yang bereaksi dengan larutan alkali (natrium silikat dan natrium hidroksida) membentuk struktur polimerik aluminosilikat yang kuat dan tahan lama. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits pada 1970-an sebagai alternatif ramah lingkungan. Menurut Davidovits (2013), geopolimer terbentuk melalui polimerisasi aluminosilikat dalam larutan alkali, menghasilkan struktur tiga dimensi mirip zeolit dengan sifat mekanik unggul. Beton geopolimer tidak hanya memiliki kuat tekan tinggi, tetapi juga ketahanan terhadap serangan kimia, suhu tinggi, dan lingkungan agresif. Selain itu, penggunaannya berpotensi menurunkan emisi CO_2 secara signifikan, mengingat industri semen menyumbang sekitar 8% emisi global (Global Carbon Project, 2020), sehingga mendukung pembangunan berkelanjutan.

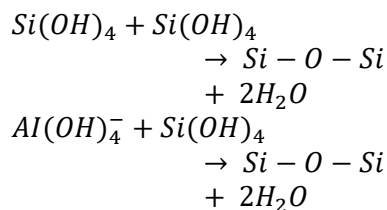
Proses pembentukan geopolimer

Proses pembentukan geopolimer melibatkan reaksi bahan kaya aluminosilikat (seperti *fly ash* atau *slag*) dengan larutan alkali,

menghasilkan struktur tiga dimensi polimerik aluminosilikat. Tahap awal adalah pelarutan (*dissolution*), di mana ion alkali dari NaOH dan Na₂SiO₃ memecah ikatan dalam aluminosilikat, melarutkan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) ke dalam larutan (Provis & van Deventer, 2009). Reaksi dasar dapat digambarkan sebagai:



Tahap berikutnya adalah polikondensasi (*polycondensation*), di mana ion silika dan alumina saling berikatan membentuk jaringan polimer melalui ikatan Si–O–Si dan Al–O–Si, yang meningkatkan kekuatan dan durabilitas (Davidovits, 2013). Contoh reaksi:



Tahap akhir adalah pemadatan dan curing, di mana struktur gel aluminosilikat yang terbentuk umumnya bersifat amorf atau semi-kristalin. Proses *curing* pada suhu 60–80°C mempercepat pembentukan jaringan polimer dan meningkatkan sifat mekanik serta ketahanan terhadap pelapukan dan serangan kimia (van Deventer, dkk. 2012).

Bahan penyusun beton geopolimer

Beton geopolimer dalam penelitian ini disusun dari beberapa komponen utama, yaitu agregat, bahan *pozzolan* (*fly ash*), limbah marmer, larutan aktivator alkali (Na₂SiO₃ dan NaOH), serta air (*aquades*).

1. Agregat terdiri dari agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil) yang memenuhi spesifikasi SNI 03-2847-2002 dan ASTM C33. Agregat menyumbang sekitar 60-75% volume beton dan berperan penting dalam memberikan kekuatan serta stabilitas beton.

2. *Fly ash* kelas F digunakan sebagai prekursor utama, karena kandungan SiO₂ + Al₂O₃ yang tinggi (>70%) dan berat jenis berkisar 1,8–2,3 g/cm³, sesuai ASTM C618-12. *Fly ash* membantu membentuk matriks aluminosilikat melalui reaksi geopolimerisasi.
3. Limbah marmer digunakan sebagai bahan substitusi parsial terhadap *fly ash* dalam rentang 15–30% dari massa *fly ash*. Limbah ini didominasi oleh kalsium karbonat (CaCO₃ 94–98%) dengan berat jenis sekitar 2,6–2,8 g/cm³. Kandungan CaCO₃ berpotensi memengaruhi reaksi geopolimerisasi melalui pembentukan produk hidrat tambahan berupa gel C-A-S-H, yang melengkapi sistem N-A-S-H dari *fly ash* (Nath & Sarker, 2015; Nuaklong, dkk. 2018). Limbah marmer tidak hanya berperan sebagai filler pasif, tetapi juga sebagai bahan aktif yang dapat meningkatkan kerapatan mikrostruktur serta kekuatan mekanik beton geopolimer.
4. Larutan aktivator alkali terdiri dari natrium silikat (Na₂SiO₃) cair dan natrium hidroksida (NaOH) padat yang dilarutkan dalam *aquades* hingga mencapai konsentrasi 10 M. Rasio Na₂SiO₃ terhadap NaOH yang digunakan sebesar 2:1, untuk menghasilkan reaktivitas kimia dan *workability* optimal.
5. *Aquades* berfungsi sebagai pelarut NaOH serta membantu proses pencampuran menjadi homogen.

Sifat dan karakteristik beton

Beton memiliki kuat tekan tinggi, tetapi kuat tarik rendah hanya sekitar 9–15% dari kuat tekannya, sehingga rentan retak. Beton mencapai kuat tekan optimal pada umur 28 hari melalui proses hidrasi, yakni reaksi semen dan air yang menghasilkan panas.

1. Kuat Tekan Beton (f'c)
Kuat tekan beton didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas yang menyebabkan sampel uji hancur (SNI

03-1974-1990). Nilai $f'c$ diperoleh dari pengujian silinder Ø150 mm × 300 mm, sedangkan f_{cr} adalah target rata-rata yang melebihi $f'c$ (SNI 03-2834-2000). Rumus kuat tekan:

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

Keterangan:

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

2. Kuat Tarik Belah

Kuat tarik belah menunjukkan ketahanan beton terhadap retak, diuji dengan beban pada silinder Ø150 mm × 300 mm (SNI 03-2491-2002). Nilainya dihitung dengan:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

Keterangan:

f_{ct} = Kuat Tarik belah (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Panjang sampel uji (mm)

D = Diameter sampel uji (mm)

3. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas (E) adalah ukuran kekakuan beton. Berdasarkan ASTM C-469-94 dihitung dengan:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050} \quad (3)$$

Keterangan:

E = Modulus Elastis

S_2 = Tegangan ketika 40 % dari beban ultimate (MPa)

S_1 = Tegangan ketika regangan 0,000050 (MPa)

ϵ_2 = Regangan akibat Tekanan S_2

Selain itu, standar SNI 03-2847:2019 memberikan pendekatan empiris:

$$4700 \times \sqrt{f'c} \quad (4)$$

Keterangan:

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

$\sqrt{f'c}$ = Kuat tekan beton (MPa).

Sedangkan Tempest (2010) mengusulkan:

$$3421 \times \sqrt{f'c} \quad (5)$$

Keterangan:

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

$\sqrt{f'c}$ = Kuat tekan beton (MPa).

Metodelogi Penelitian

Perencanaan mix design

Dalam penelitian ini, perancangan komposisi campuran beton dilakukan dengan mengacu pada SNI 03-2834-2000. Rancangan ini bertujuan untuk menentukan proporsi material yang tepat guna menghasilkan beton normal dengan mutu rencana sebesar 25 MPa. Mutu tersebut digunakan sebagai acuan pembandingan terhadap performa mekanik beton geopolimer yang disusun dalam variasi substitusi limbah marmer terhadap *fly ash*.

Benda uji

Benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm terdiri atas beton normal (BN) dan beton geopolimer (BG) dengan variasi substitusi limbah marmer 0–30% terhadap *fly ash*. Setiap variasi diuji kuat tekan, tarik belah, dan modulus elastis pada umur 28 hari dengan 3 sampel per uji. Tabel 1 berikut menunjukkan rincian benda uji.

Tabel 1. Rincian benda uji

Kadar Limbah Marmer	Jenis Pengujian dan Jumlah Benda Uji		Umur Benda Uji (hari)	Kode Benda Uji
	Kuat Tekan Beton dan Modulus Elastis	Kuat Tarik Belah Beton		
-	3	3	28	BN
0%	3	3	28	BG0
15%	3	3	28	BG15
20%	3	3	28	BG20
25%	3	3	28	BG25
30%	3	3	28	BG30
Total	18	18		
	36			

Keterangan:

BN : Beton normal.

BG0 : Beton geopolimer dengan kadar limbah marmer 0%.

BG15 : Beton geopolimer dengan kadar limbah marmer 15%.

- BG20 : Beton geopolimer dengan kadar limbah marmer 20%.
BG25 : Beton geopolimer dengan kadar limbah marmer 25%.
BG30 : Beton geopolimer dengan kadar limbah marmer 30%.

Bahan dan peralatan pembuatan benda uji

Penelitian ini menggunakan bahan berupa *fly ash* dari PT Suradi Sejahtera Raya Bantul, limbah marmer hasil ayakan 100–200 μm dari Central Marmer Murah Bantul sebagai substitusi *fly ash*, serta aktivator alkali yang terdiri dari natrium silikat (Na_2SiO_3) larutan dan natrium hidroksida (NaOH) padatan 10 M dengan rasio 2:1. Agregat halus, agregat kasar, dan air bersih diperoleh dari Laboratorium Bahan Konstruksi FTSP UII, sedangkan aquades digunakan untuk melarutkan NaOH . Peralatan yang digunakan meliputi timbangan digital, set saringan agregat, pan, ember, cetakan silinder diameter 15 cm tinggi 30 cm, oven untuk *curing*, kaliper, sekop, gelas ukur, *concrete mixer*, kerucut Abrams, *dial gauge* regangan, serta *Compression Testing Machine* (CTM) untuk pengujian kuat tekan, tarik belah, dan modulus elastisitas beton.

Lokasi dan proses penelitian

Proses penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Mix design beton normal mengacu pada SNI 03-6468:2000, sedangkan beton geopolimer menggunakan *fly ash* yang disubstitusi limbah marmer sebagai pengganti semen. Seluruh material ditimbang sesuai komposisi, dicampur dalam *concrete mixer*, diuji *slump*, lalu dicetak dalam cetakan silinder. Beton normal dirawat secara konvensional, sedangkan beton geopolimer menjalani oven *curing* pada suhu 90°C selama 8 jam. Pengujian meliputi kuat tekan sesuai SNI 1974-2011, tarik belah mengacu SNI 03-2491-2002, serta modulus elastis berdasarkan SNI 03-4169-1996 dengan *dial gauge* untuk merekam regangan.

Langkah-langkah alur tahapan penelitian

Penelitian diawali dengan menyusun langkah-langkah penelitian dan mempersiapkan alat dan bahan. Selanjutnya dilakukan pengujian material/agregat untuk mengecek terpenuhinya syarat agregat sebagai material penelitian. Apabila agregat belum memenuhi, maka perlu dilakukan pembersihan agregat atau persiapan ulang. Jika agregat memenuhi syarat, dapat dilanjutkan ke proses uji propertis. Setelah hasil uji propertis didapat, dilakukan perencanaan campuran untuk beton normal dan beton geopolimer. Perencanaan campuran disesuaikan dengan pedoman yang berlaku dan dilakukan untuk semua variasi beton. Sebelum melakukan pembuatan beton untuk semua variasi, perlu dilakukan pembuatan beton uji coba untuk memastikan tercapainya kuat tekan rencana. Sebanyak 3 buah beton uji ini dirawat selama 7 hari dan diuji kuat tekannya. Apabila kuat tekan memenuhi syarat, maka dapat dilanjutkan untuk membuat semua variasi beton. Jika belum memenuhi, maka dilakukan perencanaan campuran ulang. Seluruh variasi beton dibuat dan dilakukan perawatan selama 28 hari. Beton, kemudian diuji sifat mekaniknya dan diolah datanya. Data-data tersebut disajikan dan dibahas untuk didapat kesimpulannya.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian agregat halus

Hasil analisis data dari pengujian agregat halus yang telah dilakukan disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat Jenis Curah	2,42	
Berat Jenis SSD	2,48	
Berat Jenis Semu	2,56	
Penyerapan Air	2,25	%
Gradasi	Gradasi II	
Berat Volume Gembur	1,25	gram/cm ³
Berat Volume Padat	1,52	gram/cm ³
Kadar Lumpur	1,7	%

Berdasarkan hasil tersebut, agregat halus yang diuji dinyatakan layak digunakan

sebagai bahan campuran beton, karena seluruh parameter pengujian telah memenuhi ketentuan yang tercantum dalam SNI 03-2834-2000.

Pengujian agregat kasar

Hasil analisis data dari pengujian agregat kasar ditampilkan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Hasil pengujian agregat kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
Berat Jenis Curah	2,57	
Berat Jenis SSD	2,59	
Berat Jenis Semu	2,63	
Penyerapan Air	0,85	%
Ukuran Butir Maksimal	20	mm
Berat Volume Gembur	1,30	gram/cm ³
Berat Volume Padat	1,42	gram/cm ³

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar yang diteliti memenuhi ketentuan SNI 03-2834-2000, sehingga layak digunakan sebagai material campuran beton.

Proporsi Campuran Beton Geopolimer

Komposisi campuran beton geopolimer dengan variasi substitusi *fly ash* oleh limbah marmer yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah total 36 benda uji berbentuk silinder, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Proporsi campuran beton geopolimer

Komponen	BN	0%	15%	20%	25%	30%
Jumlah (buah)	6	6	6	6	6	6
Semen (kg)	17,89	-	-	-	-	-
Fly Ash (kg)	-	17,89	15,21	14,31	13,42	12,53
Limbah Marmer (kg)	-	0	2,68	3,58	4,47	5,37
Air (kg)	8,95	-	-	-	-	-
Na ₂ SiO ₃ (kg)	-	5,96	5,96	5,96	5,96	5,96
NaOH (kg)	-	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Agregat Halus (Pasir) (kg)	26,61	26,61	26,61	26,61	26,61	26,61
Agregat Kasar (Kerikil) (kg)	37,51	37,51	37,51	37,51	37,51	37,51

Pengujian Slump

Hasil uji *slump* yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Uji *slump*

Benda Uji	Varisi limbah Marmer	Nilai Slump (cm)	Syarat Slump (6-18) cm
BN	-	13,5	Memenuhi
BG0LM	0%	16	Memenuhi
BG15LM	15%	15	Memenuhi
BG20LM	20%	15	Memenuhi
BG25LM	25%	15,6	Memenuhi
BG30LM	30%	16	Memenuhi

Nilai *slump* menjadi indikator penting kelecakan beton segar. Beton geopolimer 0% variasi substitusi limbah marmer (BG0LM) menunjukkan slump 16 cm, lebih tinggi dari beton normal (BN) 13,5 cm, mengindikasikan *workability* awal lebih baik akibat larutan aktivator yang meningkatkan pelumasan antar partikel. Penambahan limbah marmer 15–20% menurunkan slump menjadi 15 cm karena sifat partikel halusnya menyerap larutan dan memperbesar luas permukaan, sehingga campuran menjadi lebih kaku. Namun pada kadar 25–30%, nilai slump naik kembali menjadi 15,5–16 cm, menunjukkan fungsi filler aktif yang meningkatkan aliran campuran. Temuan ini selaras dengan Desimaliana dkk. (2024) yang menyatakan limbah marmer memengaruhi sifat reologi dan mikrostruktur mortar geopolimer. Seluruh nilai *slump* berada dalam rentang syarat (6–18 cm), dengan kelecakan optimum tercapai pada kadar 15–20%.

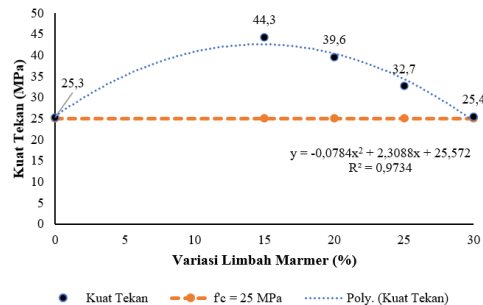
Pengujian kuat tekan

Sebagai contoh, perhitungan kuat tekan beton untuk sampel beton geopolimer dengan substitusi limbah marmer 15% (BG15LM) dapat dilihat berikut ini.

$$\begin{aligned}
 f'c &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{782,5 \times 10^3}{18313,357} \\
 &= 42,728 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Perhitungan kuat tekan beton dengan prosedur serupa juga dilakukan untuk seluruh variasi. Nilai-nilai yang diperoleh kemudian dipresentasikan dalam bentuk grafik perbandingan antara beton geopolimer dengan berbagai kadar limbah

marmer, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik pengujian kuat tekan beton geopolimer

Dalam penelitian ini, beton normal (BN) dijadikan acuan untuk membandingkan performa beton geopolimer, mengingat proses mix design beton geopolimer mengikuti prosedur beton konvensional sesuai SNI 03-2834-2000, dengan mutu rencana sebesar 25 MPa. Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa substitusi limbah marmer pada beton geopolimer meningkatkan kekuatan secara signifikan hingga kadar 20%, dengan nilai puncak sebesar 44,3 MPa pada komposisi 15% (BG15LM) dan 39,6 MPa pada 20% (BG20LM). Nilai ini jauh melampaui mutu rencana beton normal dan bahkan telah memenuhi klasifikasi beton mutu tinggi menurut SNI, yang mensyaratkan kuat tekan > 41 MPa.

Gambar 1 memperlihatkan tren kuadratik dengan korelasi yang sangat baik ($R^2 = 0,9734$) antara kadar limbah marmer dan kuat tekan. Penambahan hingga 15% berperan sebagai filler yang meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan memperkuat ikatan antar partikel. Namun, kadar di atas 20% cenderung memicu segregasi, peningkatan porositas, dan rongga mikro yang menurunkan performa mekanik. Temuan ini konsisten dengan Lee, dkk. (2020) yang melaporkan kuat tekan optimum pada beton geopolimer berbasis serbuk marmer, menegaskan pentingnya proporsi yang tepat untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan tekan dan kelecakan. Berdasarkan hasil ini, substitusi sekitar 15% dapat dikatakan sebagai

komposisi optimum untuk beton geopolimer dengan tambahan limbah marmer.

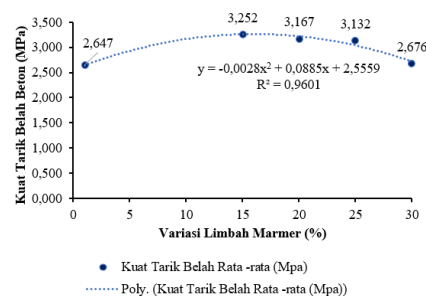
Peningkatan kuat tekan ini tidak lepas dari kombinasi inovatif antara pemanfaatan limbah marmer kaya CaCO_3 sebagai filler aktif dan formulasi larutan aktivator alkali yang optimal. Kehadiran CaCO_3 berperan dalam pembentukan gel C-A-S-H yang melengkapi sistem N-A-S-H khas geopolimer berbasis fly ash, sehingga memperkuat ikatan antar partikel dan mengurangi porositas. Selain itu, ukuran partikel limbah marmer yang halus mampu mengisi celah-celah mikro dalam pasta, meningkatkan densitas dan homogenitas campuran. Sinergi antara mikrostruktur yang padat dan reaktivitas kimia inilah yang menjadi pemicu utama meningkatnya kekuatan tekan secara signifikan pada komposisi 15%.

Pengujian kuat tarik belah

Sebagai contoh, perhitungan kuat Tarik belah beton untuk sampel beton geopolimer dengan substitusi limbah marmer 15% (BG15LM) dapat dilihat berikut ini.

$$\begin{aligned}
 f'_{ct} &= \frac{2 \cdot P}{\pi L D} \\
 &= \frac{2 \times 222000}{\pi \times 302,167 \times 150,864} \\
 &= 3,1002 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Perhitungan kuat Tarik belah beton dengan prosedur serupa juga dilakukan untuk seluruh variasi. Nilai-nilai yang diperoleh kemudian dipresentasikan dalam bentuk grafik perbandingan antara beton geopolimer dengan berbagai kadar limbah marmer, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik pengujian kuat tarik belah beton geopolimer

Berdasarkan hasil uji (terlihat pada Gambar 2), beton geopolimer dengan 15% limbah marmer (BG15LM) mencapai kuat tarik belah tertinggi sebesar 3,25 MPa, melampaui beton normal (2,82 MPa) maupun beton geopolimer tanpa marmer (2,65 MPa). Peningkatan ini diatribusi pada peran partikel marmer yang halus dan kaya kalsium sebagai filler aktif, yang memperbaiki ikatan antar partikel serta memadatkan mikrostruktur beton sehingga lebih tahan terhadap gaya tarik.

Namun pada kadar di atas 20%, kuat tarik belah justru menurun, misalnya pada 30% (BG30LM) hanya 2,68 MPa. Penurunan ini diduga akibat kelebihan partikel halus yang memicu segregasi dan meningkatkan porositas, sehingga melemahkan pasta geopolimer. Grafik *polynomial* dengan $R^2 = 0,9573$ mengonfirmasi hubungan erat antara kadar limbah marmer dan kuat tarik belah, dengan puncak pada 15% sebelum menurun kembali. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan limbah marmer 15% merupakan komposisi optimum tidak hanya untuk kuat tekan, tetapi juga meningkatkan kekuatan tarik belah beton geopolimer secara signifikan. Dari sisi mekanika material, kekuatan tarik belah yang meningkat juga menunjukkan bahwa modifikasi campuran melalui penambahan limbah marmer tidak hanya memperkuat zona antar partikel, tetapi juga meningkatkan kemampuan ikatan mikro di bawah gaya tarik. Partikel halus marmer berperan sebagai titik sebar tegangan yang mencegah terjadinya retakan awal, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap gaya tarik. Dengan demikian, peningkatan sifat mekanik beton geopolimer pada komposisi 15% tidak hanya terjadi karena optimasi bahan, tetapi juga karena rekayasa mikrostruktur yang menghasilkan ketahanan mekanis lebih tinggi.

Pengujian Modulus Elastisitas

Sebagai ilustrasi, untuk beton geopolimer dengan substitusi limbah marmer 15% (BG15LM), nilai modulus elastisitas uji langsung pada sampel 1 diperoleh sebesar

25.808 MPa dengan kuat tekan 45,27 MPa. Perhitungan teoritis menggunakan ASTM C-469-94 menghasilkan:

$$\begin{aligned} E_{c \text{ ASTM C-469-94}} &= \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \\ &= \frac{18,106 - 1,097}{0,00074 - 0,00005} \\ &= 24650,903 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

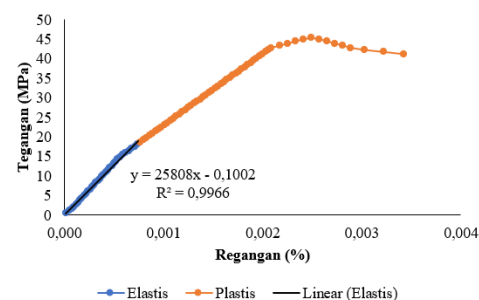
Sedangkan dengan persamaan SNI 2847-2019:

$$\begin{aligned} E_{c \text{ SNI 2847-2019}} &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 4700 \times \sqrt{45,27} \\ &= 31621,680 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

dan menurut Tempest (2010):

$$\begin{aligned} E_{c \text{ Tempest (2010)}} &= 3421 \times \sqrt{f'_c} \\ &= 3421 \times \sqrt{45,27} \\ &= 23016,547 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Dengan metode perhitungan yang sama, dilakukan analisis modulus elastisitas pada benda uji untuk setiap variasi campuran beton geopolimer. Grafik pada Gambar 3 berikut memperlihatkan hubungan tegangan-regangan dari salah satu sampel, yang menunjukkan perilaku elastis beton hingga mencapai beban puncak.



Gambar 3. Grafik tegangan-regangan BG15LM

Berdasarkan grafik hubungan tegangan-regangan (Gambar 3), regangan maksimum pada campuran BG15LM tercatat melebihi 0,003, yang umumnya dianggap sebagai batas regangan maksimum beton normal. Nilai regangan yang lebih tinggi ini mengindikasikan bahwa beton geopolimer dengan 15% limbah marmer memiliki

kemampuan deformasi yang lebih baik sebelum mencapai titik keruntuhan. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh kontribusi partikel halus limbah marmer yang berfungsi sebagai *filler* aktif, memperbaiki kepadatan mikrostruktur dan mengurangi rongga kosong antar partikel. Selain itu, keberadaan CaCO_3 dalam limbah marmer dapat berperan dalam pembentukan produk hidrasi tambahan seperti gel C-A-S-H, yang menambah fleksibilitas matriks dan meningkatkan kapasitas deformasi beton (Nuaklong 2018). Dengan demikian, selain meningkatkan kekuatan, substitusi 15% limbah marmer juga memperluas batas elastisitas beton geopolimer. Selanjutnya, hasil uji dan perhitungan modulus elastisitas untuk semua variasi beton geopolimer dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi nilai modulus elastisitas beton

Variasi	E ASTM C-469- 94	E SNI- 2847- 2019	E Tempest (2010)	E Pengujian
Beton Normal	16888	24072	17521	17218
0%	17123	23637	17205	17278
15%	24434	31264	22756	24881
20%	22694	29558	21514	23030
25%	20630	26858	19549	20864
30%	17588	23697	17249	17773

Tabel 6. menyajikan rekapitulasi nilai modulus elastisitas rata-rata (E) beton geopolimer pada berbagai kadar substitusi limbah marmer, baik berdasarkan hasil pengujian langsung maupun estimasi melalui pendekatan SNI 2847:2019, ASTM C-469-94, dan Tempest (2010). Dari tabel terlihat bahwa nilai E tertinggi dicapai pada variasi 15% (BG15LM), yaitu 24.881 MPa, yang relatif dekat dengan estimasi Tempest (22.756 MPa) dan ASTM (24.434 MPa), namun lebih rendah dibanding prediksi SNI (31.264 MPa). Secara umum, pendekatan SNI cenderung memberikan estimasi lebih tinggi dari hasil aktual, sedangkan ASTM dan Tempest menunjukkan hasil yang lebih sesuai, terutama pada kadar substitusi hingga 20%. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan ASTM dan Tempest

lebih representatif untuk beton geopolimer berbasis *fly ash* dan limbah marmer.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis pengaruh substitusi limbah marmer 15%–30% terhadap sifat mekanik beton geopolimer, meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas, untuk menentukan proporsi optimalnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Substitusi limbah marmer secara signifikan mempengaruhi performa mekanik beton geopolimer. Variasi 15% menghasilkan kuat tekan tertinggi 44,3 MPa, kuat tarik belah 3,252 MPa, serta modulus elastisitas rata-rata 24.881 MPa, yang selaras dengan estimasi ASTM dan Tempest, serta mengindikasikan peningkatan kekakuan sejalan dengan kuat tekan.
2. Proporsi optimal substitusi limbah marmer terdapat pada kadar 15%, yang memberikan keseimbangan terbaik pada semua parameter mekanik. Substitusi di atas 15% cenderung meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan, sehingga kurang efektif dalam meningkatkan kualitas beton geopolimer.

Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan agar studi selanjutnya:

1. Mengeksplorasi kadar substitusi limbah marmer lebih detail (misalnya 10%, 12,5%, 17,5%) untuk memperoleh titik optimum yang lebih presisi;
2. Melakukan uji durabilitas jangka panjang terhadap suhu tinggi, sulfat, serta siklus beku-cair;
3. Mengkaji mikrostruktur melalui SEM, XRD, atau FTIR guna memahami mekanisme peningkatan kekuatan;
4. Menyusun analisis kelayakan teknis dan ekonomis, termasuk potensi pemanfaatan limbah marmer, efisiensi produksi, serta dampak lingkungannya.

Daftar Pustaka

- Alharthy, M., Alghamdi, A., & Alzahrani, M. (2022). Developing a geopolymer pastes using marble dust. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129724. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129724>
- ASTM International. (1994). *ASTM C469-94: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*.
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1970-1990: Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-4169-1996: Metode pengujian modulus elastisitas beton*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2491-2002: Metode pengujian kuat tarik belah beton silinder*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 03-2847-2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Jakarta: BSN.
- Davidovits, J. (2013). *Geopolymer chemistry and applications* (4th ed.). Geopolymer Institute.
- Global Carbon Project. (2020). *Global carbon budget 2020*. <https://www.globalcarbonproject.org>
- Lee, S. J., Park, C., & Cho, H. (2020). Sustainable development and performance evaluation of marble-waste-based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120290>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing.
- Putra, A. M., Sutanto, M. H., & Susanti, L. (2018). Pengaruh variasi molaritas NaOH terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis fly ash. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 22(1), 33–41.
- Desimaliana, I., Suhendro, B., & Wibowo, M. A. (2024). Pengaruh penambahan serbuk marmer pada sifat reologi dan mikrostruktur mortar geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 21(1), 12–22. <https://doi.org/10.22146/jtsi.v21i1.XXXX>
- Singh, B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymer concrete: A review of development and opportunities. *Construction and Building Materials*, 241, 118112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.118112>
- Tempest, B. (2010). *Assessing the sustainability of alkali-activated concrete* [Doctoral dissertation, University of Leeds].
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104.
- Wijayanti, F. D., & Wardhono, A. (2022). Pengaruh substitusi limbah marmer terhadap nilai kuat tekan dry geopolymer mortar. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 35–42.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of CaCO₃-rich waste as partial replacement of fly ash in geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.081>
- Nuaklong, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2018). Influence of calcium-rich waste materials on mechanical and durability properties of geopolymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 86, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.003>
- Zawrah, M. F., Gado, R. A., & Gado, M. S. (2021). Effect of marble powder as a partial replacement of fly ash in geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7467–7472. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.571>