

Pengaruh Penggunaan Bahan Tambahan Geopolimer Berbasis Fly Ash Sebagai Substitusi Parsial Bahan Pengikat Semen Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton

Yemima Kinanti Mawikere^{#1}, Steenie E. Wallah^{#2}, Hieryco Manalip^{#3}

[#]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

Jl. Kampus UNSRAT Kelurahan Bahu, Manado, Indonesia, 95115

¹yemikinanti@gmail.com; ²steeenie@unsrat.ac.id; ³hmanalip@unsrat.ac.id

Abstrak

Beton menggunakan campuran semen dan air sebagai bahan pengikat agregat penyusunnya. Sayangnya, proses produksi semen turut menyumbang emisi karbondioksida yang besar sehingga pembuatan beton tidak bersifat ramah terhadap lingkungan. Oleh karena itulah, penelitian ini diadakan dengan mengganti bahan pengikat semen sampel beton secara parsial dengan pasta geopolimer berbasis abu terbang atau fly ash yang merupakan bahan pengikat beton geopolimer. Hasil dari analisa data pengujian menunjukkan bahwa beton konvensional memiliki nilai kuat tekan tertinggi dibandingkan dengan beton yang menggunakan substitusi parsial pasta geopolimer, yaitu rata-rata sebesar 20.75 MPa untuk sampel usia 7 hari dan rata-rata sebesar 26.65 untuk sampel usia 28 hari. Beton konvensional memiliki nilai modulus elastisitas yang paling tinggi, yaitu sebesar 21360.42 MPa untuk usia 7 hari dan 23664.18 MPa untuk usia 28 hari. Perhitungan dengan rumus SNI 1 dan 2 dimodifikasi agar hasilnya lebih mendekati hasil dari pengujian laboratorium. Rumus hasil modifikasi tersebut adalah $E_c = 1285 f'c$ untuk beton usia 7 hari dan $E_c = 1190 f'c$ untuk beton usia 28 hari. Apabila berat volume beton turut diperhitungkan, maka rumusnya adalah $E_c = wc^{1.5} 0.013 f'c$ untuk beton usia 7 hari dan $E_c = wc^{1.5} 0.012 f'c$ untuk beton usia 28 hari.

Kata kunci – beton, geopolimer, kuat tekan, modulus elastisitas

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton sudah lama menjadi komponen penting dalam pembangunan infrastruktur. Oleh karena pembangunan infrastruktur tidak lekas akan waktu, maka dapat disimpulkan bahwa beton akan selalu diproduksi. Beton terdiri dari empat material, yaitu agregat kasar (kerikil), agregat halus (pasir), air, serta

semen yang bertindak sebagai pengikat dari material-material penyusun tersebut yang dapat membuat beton menjadi elemen struktural yang kuat. Namun, proses produksi semen menghasilkan emisi karbondioksida (CO₂) dengan kadar yang tinggi, yaitu mencapai 7%, dimana dengan nominal tersebut, industri semen menduduki peringkat kedua dalam menyebabkan efek rumah kaca terbesar (Davidovits, 1994). Pembangunan konstruksi yang terus menggunakan beton konvensional yang menggunakan semen dapat memperparah pemanasan global. Dengan adanya isu tersebut, maka dilaksanakanlah penelitian demi penelitian guna mencari komponen yang dapat berperan sebagai matriks pengikat komponen penyusun beton guna menggantikan semen. Salah satu alternatif yang diusulkan oleh Prof. Joseph Davidovits adalah geopolimer, yang merupakan sintesis dari beberapa bahan alam yang melalui proses polimerisasi. Adapun bahan utama yang dibutuhkan dalam pembuatan geopolimer ini adalah bahan yang mengandung unsur sodium silikat dan alumina. Pada penelitian ini, 2 sifat jangka pendek beton yang akan dianalisa adalah kuat tekan dan modulus elastisitas dari beton yang menggunakan pasta geopolimer berbasis abu terbang sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen.

B. Perumusan Masalah

Bagaimana pengaruh penambahan pasta geopolimer berbasis abu terbang sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen pada kuat tekan dan modulus elastisitas beton?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menemukan perbedaan dalam nilai kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton dengan bahan tambah geopolimer berbasis fly ash sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen dengan beton konvensional.
2. Mencari tahu komposisi dari pasta geopolimer yang dibutuhkan untuk mensubstitusi bahan pengikat semen.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan pemahaman lebih dalam mengenai cara mengoptimalkan limbah abu terbang sebagai substitusi semen dalam pembuatan beton sehingga kerusakan lingkungan semakin dapat ditanggulangi
2. Mengetahui perilaku mekanis beton yaitu kuat tekan dan modulus elastisitasnya apabila terdapat pasta geopolimer berbasis *fly ash* sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen pada campuran beton.

E. Batasan Masalah

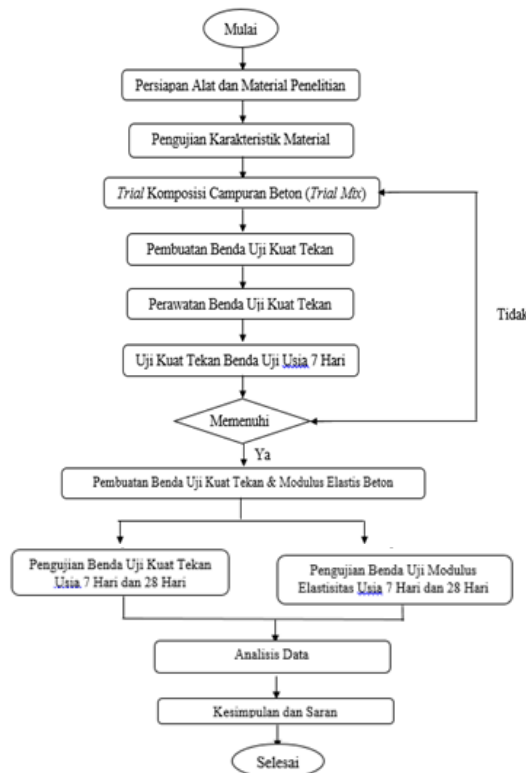
Penelitian yang dilaksanakan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Komponen penyusun beton yang terdiri dari kerikil, pasir, semen, dan air.
2. Kerikil dari Langsot, pasir dari Girian, semen Portland tipe I, dan air yang terdapat di Laboratorium Rekayasa Material Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.
3. Abu terbang (*fly ash*) kelas F yang berasal dari PLTU Amurang sebagai bahan tambah.
4. Pengujian workability beton dengan melakukan uji slump.
5. Cetakan beton berbentuk silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm.
6. Uji kuat tekan dan modulus elastisitas akan dilaksanakan pada saat beton mencapai umur 7 hari

7. Apabila terdapat rumus yang perlu dimodifikasi, maka modifikasi tersebut dilakukan pada rumus modulus elastisitas melalui dua cara, yakni memodifikasi koefisien pengali dan dengan memodifikasi pangkat variabel $f'c$ dan wc dengan menggunakan pangkat 1,2,3, dan 4. Hasil yang dipilih adalah yang paling mendekati hasil laboratorium.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi penelitian terletak pada Laboratorium Rekayasa Material Fakultas Teknik UNSRAT. Semua pekerjaan dilaksanakan dengan mengikuti prosedur yang ada. Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Mei 2021 hingga November 2021. Rangkaian kegiatan yang dilakukan selama penelitian ini berlangsung diurai pada diagram alir penelitian. Variasi pada benda uji di dalam penelitian ini adalah beton yang menggunakan pasta geopolimer sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dengan usia perendaman 7 dan 28 hari.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Komposisi Campuran Beton

Melalui hasil pemeriksaan material dan trial and error untuk mendapatkan mix design, nilai FAS campuran beton adalah sebesar 0.54 untuk mendapatkan beton dengan mutu kuat tekan 25 MPa seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

B. Pemeriksaan Nilai Slump

Nilai slump yang didapatkan dari setiap pengecoran berkisar dari 20-91 mm. Variasi beton konvensional dan variasi 5% substitusi parsial bahan pengikat semen memiliki workability yang lebih baik dibanding variasi yang lainnya seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

TABEL 1
Komposisi Campuran Variasi Sample

Bahan	Komposisi Campuran per m3				
	0%	5%	10%	15%	20%
Semen	387.86	368.47	349.07	329.68	310.29
Air	223.71	212.52	201.34	190.15	178.97
Kerikil	857.11	857.11	857.11	857.11	857.11
Pasir	764.94	764.94	764.94	764.94	764.94
Fly Ash	-	16.24	32.49	48.73	64.98
Silika	-	10.24	20.48	30.71	40.95
NaOH	-	4.10	8.19	12.29	16.38

TABEL 2
Nilai Slump

Kode	Variasi Substitusi Parsial	Persentase SK	Nilai Slump (mm)
KT 0	Konvensional	0%	91
KT 5	Pasta geopolimer = 5% berat volume semen & air	5%	77
KT 10	Pasta geopolimer = 10% berat volume semen & air	10%	33
KT 15	Pasta geopolimer = 15% berat volume semen & air	15%	73
KT 20	Pasta geopolimer = 20% berat volume semen & air	20%	25
ME 0	Konvensional	0%	87
ME 5	Pasta geopolimer = 5% berat volume semen & air	5%	73
ME 10	Pasta geopolimer = 10% berat volume semen & air	10%	73
ME 15	Pasta geopolimer = 15% berat volume semen & air	15%	33
ME 20	Pasta geopolimer = 20% berat volume semen & air	20%	20

Sumber: Hasil Penelitian

C. Pemeriksaan Berat Volume Beton

Variasi beton konvensional memiliki berat volume rata-rata yang berkisar dari 2095.27 hingga 2198.76 kg/m3 seperti yang tergambar pada tabel 3. Melalui tabel 3, dapat dilihat bahwa berat volume beton dari setiap variasi mengalami fluktuasi, hal tersebut disebabkan karena pasta geopolimer yang terkandung di dalam campuran beton tidak mengeras secara sempurna, oleh sebab itu terdapat beberapa serpihan

pasta yang terpisah dari sample dan menyebabkan sample tidak memiliki berat volume yang maksimal,

D. Pemeriksaan Kuat Tekan Beton

1. Kuat Tekan Beton

Melalui pengujian kuat tekan, nilai rata-rata kuat tekan beton dapat terlihat pada tabel 4. Kuat tekan beton menurun seiring meningkatnya jumlah pasta geopolimer yang digunakan sebagai substitusi parsial bahan pengikat semen, baik pada beton yang direndam

selama 7 hari maupun 28 hari. Nilai rata-rata kuat tekan tertinggi dimiliki oleh beton konvensional, yaitu sebesar 20.750 MPa pada usia 7 hari dan 26.652 MPa pada usia 28 hari. Nilai rata-rata kuat tekan terendah dimiliki oleh beton variasi 20% pasta geopolimer dengan kuat tekan sebesar 7.745 MPa pada usia 7 hari dan 10.807 MPa pada usia 28 hari. Pada variasi 5 persen, penurunan kuat tekan tidak terjadi secara signifikan, namun pada variasi 10 persen, dapat terlihat penurunan yang cukup drastis. Penurunan yang cukup

signifikan ini terus berlanjut seiring meningkatnya pasta geopolimer yang digunakan, seperti yang terlihat pada variasi 15 hingga 20 persen. Hal tersebut disebabkan oleh karena sodium silikat yang terkandung di dalam pasta geopolimer yang terdapat pada campuran beton merembes keluar sample pada saat direndam di dalam air. Dengan demikian, pasta geopolimer tidak dapat mengeras secara sempurna dan mengakibatkan sample beton variasi memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibanding beton konvensional.

TABEL 3
Berat Volume Beton

Variasi	Usia (hari)	Rata-Rata Berat Volume (kg/m ³)
Kuat Tekan - 0	7	2168.19
Kuat Tekan - 5		2194.61
Kuat Tekan - 10		2145.44
Kuat Tekan - 15		2109.80
Kuat Tekan - 20		2095.27
Kuat Tekan - 0	28	2165.39
Kuat Tekan - 5		2177.72
Kuat Tekan - 10		2160.15
Kuat Tekan - 15		2171.69
Kuat Tekan - 20		2092.95
Modulus Elastisitas - 0	7	2153.52
Modulus Elastisitas - 5		2198.76
Modulus Elastisitas - 10		2155.17
Modulus Elastisitas - 15		2173.65
Modulus Elastisitas - 20		2090.41
Modulus Elastisitas - 0	28	2153.52
Modulus Elastisitas - 5		2177.79
Modulus Elastisitas - 10		2181.68
Modulus Elastisitas - 15		2193.12
Modulus Elastisitas - 20		2183.62

Sumber: Hasil Penelitian

2. Modulus Elastisitas Beton

Nilai modulus elastisitas didapatkan melalui 3 cara, yaitu melalui cara laboratorium (pembacaan dial jarum), SNI 1 (memperhitungkan faktor kuat tekan), dan SNI 2 (memperhitungkan faktor kuat tekan dan berat volume beton). Hasil perhitungan dari ketiga cara tersebut dapat dilihat pada tabel 5.

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai modulus elastisitas laboratorium dengan nilai modulus dari cara SNI 1 dan SNI 2. Maka dilakukan modifikasi rumus SNI 1 dan SNI 2 agar hasilnya mendekati hasil laboratorium. Pada modifikasi koefisien pengali, untuk variasi sampel berusia 7 hari, didapatkan kumpulan koefisien pengali yang berkisar dari 3140 hingga 6760, dengan nilai rata-rata sebesar 4707. Nilai inilah yang menjadi koefisien pengali yang baru untuk variasi sampel berusia 7 hari sedangkan untuk variasi sampel berusia 28 hari, didapatkan kumpulan koefisien pengali yang berkisar antara 2674 hingga 8069. Rata-rata dari kumpulan koefisien pengali tersebut adalah 5304.

Dengan demikian, koefisien pengali untuk variasi sampel berusia 28 hari adalah sebesar 5304. Dengan demikian, rumus SNI 1 yang termodifikasi adalah:

- $E_c = 4707 \sqrt{f'c}$ untuk umur 7 hari
 - $E_c = 5304 \sqrt{f'c}$ untuk umur 28 hari
- Rumus SNI 2 yang termodifikasi adalah:
- $E_c = wc^{1.50} \cdot 0.047 \sqrt{f'c}$ untuk umur 7 hari
 - $E_c = wc^{1.50} \cdot 0.052 \sqrt{f'c}$ untuk umur 28 hari

Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6. Untuk cara yang kedua, yakni memvariasikan pangkat pada variable $f'c$, dilakukan empat kali modifikasi, masing-masing menggunakan variasi pangkat 1, pangkat 2, pangkat 3, dan pangkat 4. Didapatkan bahwa variasi pangkat 1 variabel $f'c$ adalah variasi yang memiliki total selisih paling sedikit, yang artinya variasi ini menghasilkan hitungan yang paling mendekati hasil E_c laboratorium. Maka koefisien pengali beton usia 7 hari untuk SNI (1) adalah 1285 dan untuk SNI (2) adalah 0.013, sedangkan koefisien pengali pada beton usia 28 hari untuk SNI (1) adalah

1190 dan untuk SNI (2) adalah 0.012. Dengan demikian, rumus SNI 1 termodifikasi untuk sampel berusia 7 hari dan 28 hari secara berturut-turut adalah:

$$E_c = 1285 f'c$$

$$E_c = 1190 f'c$$

Rumus SNI 2 termodifikasi untuk sampel berusia 7 hari dan 28 hari secara berturut-turut adalah:

$$E_c = wc^{1.5} 0.013 f'c$$

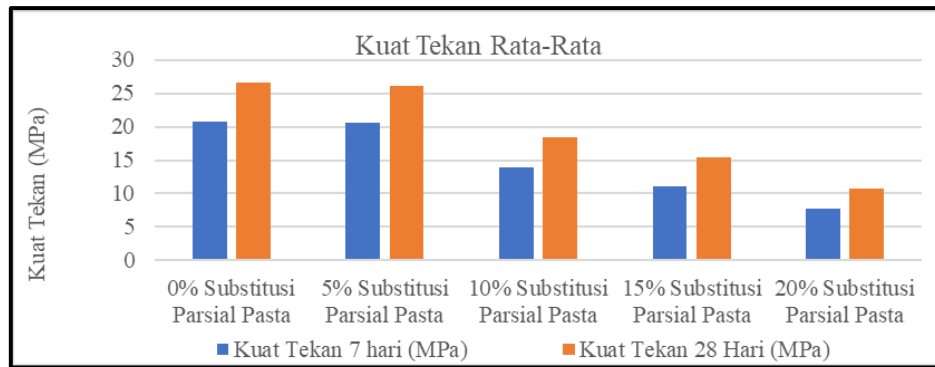
$$E_c = wc^{1.5} 0.012 f'c$$

Hasilnya dapat terlihat pada Tabel 7.

TABEL 4
Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Variasi	Kuat Tekan 7 Hari (MPa)	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
KT 0	20.75	26.65
KT 5	20.59	26.17
KT 10	13.93	18.39
KT 15	11.09	15.47
KT 20	7.75	10.81

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 2. Diagram Hasil Pemeriksaan Rata-rata Kuat Tekan Beton dengan Substitusi Parsial Pasta Geopolimer

TABEL 5
Nilai Modulus Elastisitas Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2

Kode Sample	Umur (Hari)	f'c (MPa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)		
			Lab (ASTM C469-02)	SNI (1)	SNI (2)
ME A 20	7	7.14	12121.32	13118.06	11920.13
ME A 10	7	14.61	21108.28	17948.70	16440.56
ME A 15	7	15.40	16588.80	18442.73	17104.94
ME A 5	7	20.63	22222.46	21347.03	20168.13
ME A 0	7	20.66	19900.50	21360.42	19530.52
ME B 20	28	13.29	16742.07	17130.77	15991.01
ME B 10	28	18.43	19183.88	20166.61	18801.34
ME B 15	28	20.52	22149.48	21286.82	19743.96
ME B 5	28	23.36	31330.59	22658.16	21065.39
ME B 0	28	25.38	30328.38	23664.18	21642.78

Sumber: Hasil Penelitian

E. Pemeriksaan Nilai Slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan adukan beton (*workability*). Nilai slump adalah nilai yang diperoleh dari hasil uji slump dengan cara beton segar diisikan kedalam suatu corong baja berupa kerucut terpancung, kemudian bejana ditarik keatas sehingga beton segar meleleh kebawah. Besar penurunan permukaan beton segar diukur, dan disebut nilai slump. Dalam penelitian, nilai slump diukur pada setiap pengecoran campuran beton. Nilai slump dapat dilihat pada Tabel 2.

F. Pemeriksaan Berat Volume Beton

Berat Volume beton adalah perbandingan antara berat beton (berat benda uji) dengan volume beton (volume benda uji). Dalam penelitian ini, berat volume beton diperoleh dari berat beton umur 1 hari di bagi dengan luas penampang beton. Hasil Berat Volume Beton dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Contoh Perhitungan :

- Pada berat volume beton normal benda uji silinder tinggi 200 mm diameter 100 mm

$$\text{Volume benda uji} = \pi \times 50^2 \times 200$$

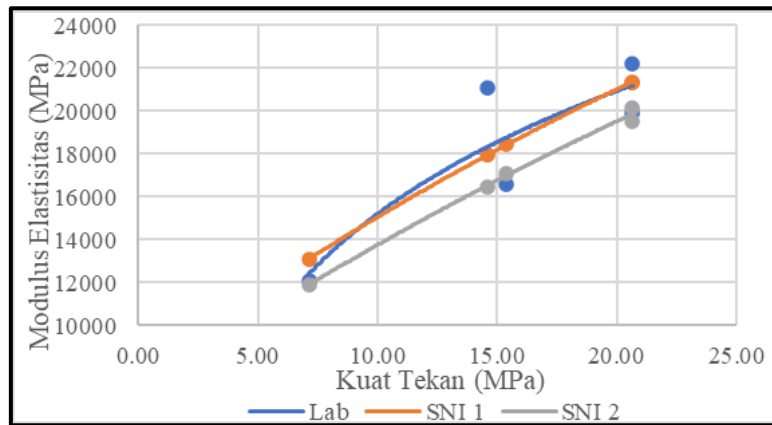
$$= 1570000 \text{ mm}^3$$

$$= 0.00157 \text{ m}^3$$

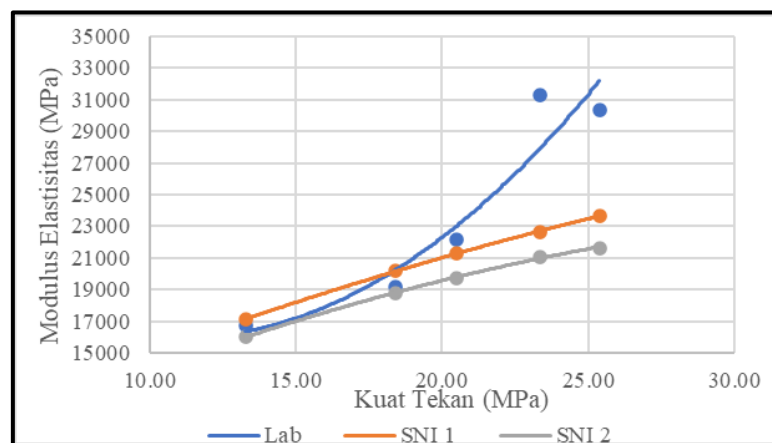
 Berat benda uji = 3.38 kg
 Berat Volume Beton = $3.38 / 0.00157 \text{ kg/m}^3$
 $= 2157.07 \text{ kg/m}^3$

- Berat Volume rata-rata beton normal benda uji silinder.
 Berat Volume rata-rata = $2157.07 + 2138.66 + 2163.63 = 2153.12 \text{ kg/m}^3$

Berdasarkan gambar 3 dan 4 diketahui bahwa, rata-rata berat volume beton pada penelitian ini berkisar 2144.14 – 2175.24 kg/m³. Maka, semua jenis beton dalam penelitian ini termasuk dalam jenis beton normal karena berat massa volume beton tersebut berada pada interval 2100-2550 kg/m³.



Gambar 3. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 Variasi Usia 7 Hari

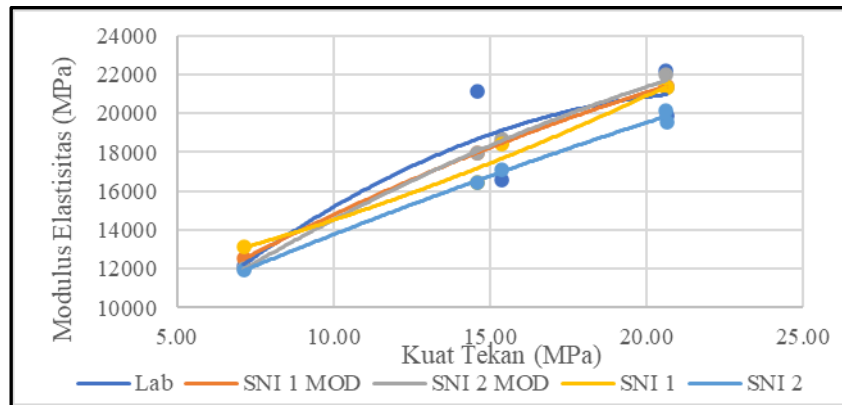


Gambar 4. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 Variasi Usia 28 Hari

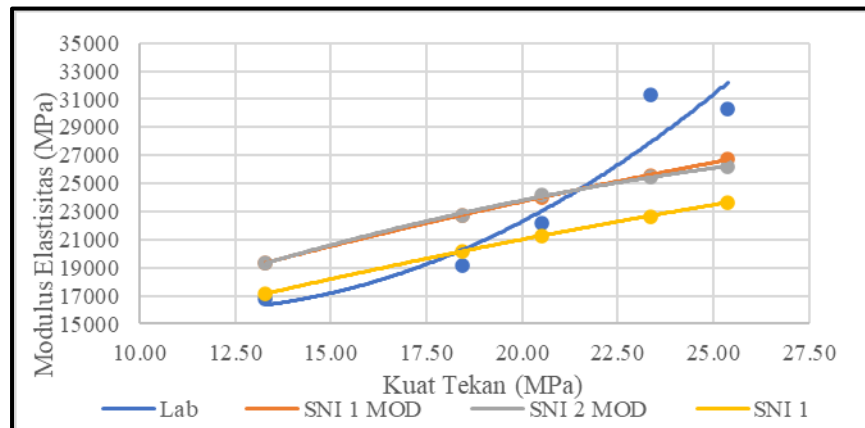
TABEL 6
Nilai Modulus Elastisitas Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2
Hasil Modifikasi Koefisien Pengali f_c

Kode Variasi	Umur	Berat Volume kg/m ³	f_c	E_c Lab	EC mod. SNI (1)	EC mod. SNI (2)
	Hari		MPa	MPa		
ME A 20	7	2090.41	7.14	12121.32	12522.10	11985.84
ME A 10	7	2155.17	14.61	21108.28	17978.87	17969.91
ME A 15	7	2173.65	15.40	16588.80	18473.73	18692.81
ME A 5	7	2198.76	20.63	22222.46	21382.92	22008.59
ME A 0	7	2153.52	20.66	19900.50	21396.32	21347.31
ME B 20	28	2183.617586	13.29	16742.07	19332.26	19337.96
ME B 10	28	2181.676678	18.43	19183.88	22758.23	22736.50
ME B 15	28	2193.115311	20.52	22149.48	24022.40	24189.08
ME B 5	28	2177.794861	23.36	31330.59	25569.98	25478.93
ME B 0	28	2153.517594	25.38	30328.38	26705.28	26173.64

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 5. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan
Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 dengan Modifikasi Koefisien Pengali Variabel f_c Usia 7 Hari

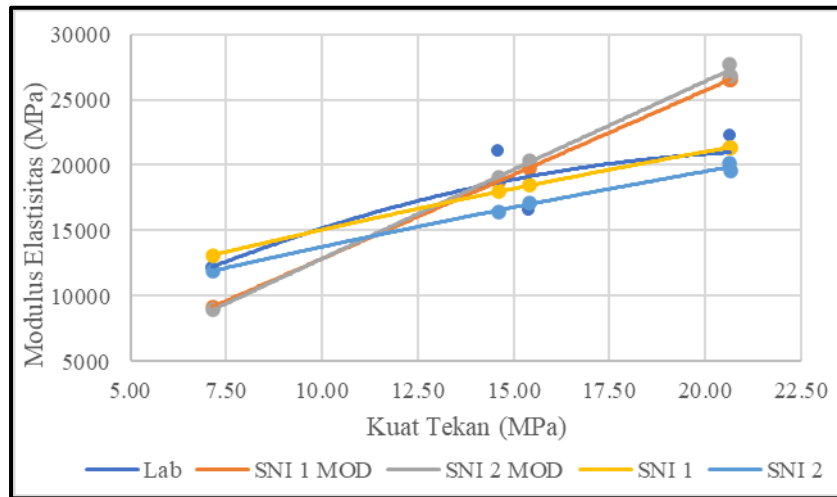


Gambar 6. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan
Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 dengan Modifikasi Koefisien Pengali Variabel f_c Usia 28 Hari

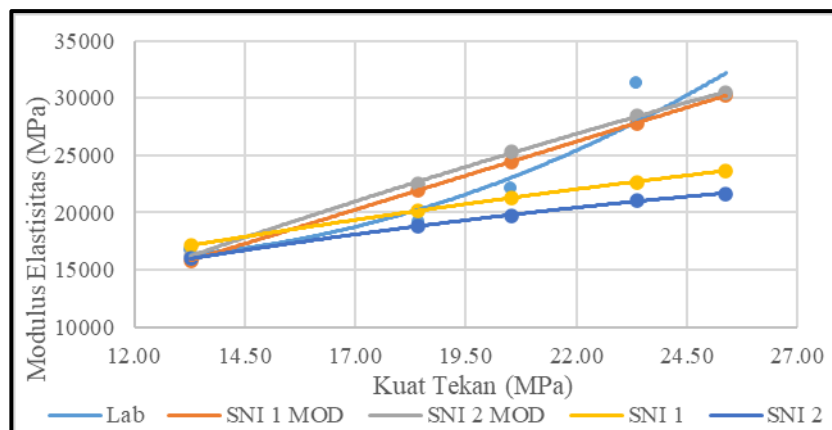
TABEL 7
Nilai Modulus Elastisitas Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2
Hasil Modifikasi Pangkat Koefisien Pengali f_c

Kode Variasi	Umur	Berat Volume	f_c	E_c Lab	E_c SNI (1) mod	E_c SNI (2) mod
	Hari	kg/m ³	MPa	MPa	MPa	MPa
ME A 20	7	2090.41	7.14	12121.32	9174.90	8933.43
ME A 10	7	2155.17	14.61	21108.28	18769.57	19037.11
ME A 15	7	2173.65	15.40	16588.80	19789.00	20308.27
ME A 5	7	2198.76	20.63	22222.46	26513.83	27674.66
ME A 0	7	2153.52	20.66	19900.50	26541.68	26855.36
ME B 20	28	2183.62	13.2875	16742.07	15823.54	16266.94
ME B 10	28	2181.68	18.43	19183.88	21947.53	22536.20
ME B 15	28	2193.12	20.5175	22149.48	24433.45	25287.76
ME B 5	28	2177.79	23.36	31330.59	27818.47	28492.35
ME B 0	28	2153.52	25.3825	30328.38	30226.98	30458.41

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 7. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan
Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 dengan Modifikasi Variasi Pangkat Variabel f_c Usia 7 Hari



Gambar 8. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan
Sample Metode Laboratorium, SNI 1, dan SNI 2 dengan Modifikasi Variasi Pangkat Variabel f_c Usia 28 Hari

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis terhadap penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan adanya pasta geopolimer berbasis fly ash, nilai kuat tekan dan modulus elastisitas sample beton apabila dibandingkan dengan sample beton konvensional. Nilai kuat tekan tertinggi dimiliki oleh variasi beton konvensional, yaitu dengan kuat tekan rata-rata sebesar 20.75 MPa untuk usia 7 hari dan 26.652 MPa untuk usia 28 hari, nilai kuat tekan terendah dimiliki oleh variasi beton substitusi parsial 20% pasta geopolimer, dengan kuat tekan rata-rata sebesar 7.74 MPa untuk usia 7 hari dan 10.80 MPa untuk usia 28 hari. Nilai modulus elastisitas tertinggi dimiliki oleh variasi beton konvensional, yaitu 21360.42 MPa untuk usia 7 hari dan 23664.18 MPa untuk usia 28 hari dan yang terendah dimiliki oleh variasi 20% pasta geopolimer, yaitu sebesar 13118.06 MPa untuk usia 7 hari dan 19530.52 MPa untuk usia 28 hari.
2. Nilai modulus elastisitas laboratorium berbeda dengan hasil nilai modulus elastisitas rumus SNI, oleh sebab itu dibutuhkan modifikasi rumus SNI agar hasilnya dapat lebih menyerupai hasil laboratorium. Rumus SNI termodifikasi yang mengacu pada nilai kuat tekan adalah $E_c = 1285 f_c^c$ untuk beton usia 7 hari dan $E_c = 1190 f_c^c$ untuk beton usia 28 hari. Jika berat volume beton turut diperhitungkan (berat volume sampel beton berkisar dari 2033.563 hingga 2207.79 kg/m³), maka rumusnya adalah $E = w_c 1.50.013 f_c^c$ untuk beton usia 7 hari dan $E = w_c 1.50.012 f_c^c$ untuk beton usia 28 hari.
3. Beton konvensional merupakan variasi yang mengalami deformasi paling kecil di antara semua variasi sample yang ada, karena jarak antarregangan yang muncul pada setiap penambahan tegangan adalah yang paling kecil dibanding variasi lainnya.

B. Saran

Berdasarkan penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat diberikan saran, yaitu:

1. Perlu diadakan penelitian mengenai variasi curing pada beton dengan substitusi parsial bahan pengikat semen pasta geopolimer dan dampaknya pada kuat tekan dan modulus elastisitas beton.
2. Untuk pencetakan sampel yang mengandung pasta geopolimer, ada baiknya mesin getar dinyalakan lebih awal agar ada lebih banyak campuran beton yang dapat masuk ke dalam cetakan.
3. Proses curing dengan cara perendaman di dalam air tidak sebaiknya dilakukan untuk beton yang mengandung pasta geopolimer, karena selain membuat kekuatan dan modulus elastisitasnya kecil, pasta geopolimer memiliki kemungkinan untuk menjadi limbah radioaktif apabila terkena langsung dengan air (Kovler dkk, 2020).

KUTIPAN

A. Peraturan, Undang-undang, Standar

- [1] ASTM C-39-86. 2002. *Standart Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, Pennsylvania.
- [2] ASTM C 469 – 94 (1996). *Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression*. Annual Books of ASTM Standards, USA, 1996.
- [3] Badan Standarisasi Nasional, SNI 2847:2013. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*, Jakarta

B. Jurnal

- [4] Davidovits, J. 1994. *High-alkali cements for 21st century concretes*. In *concrete technology, past, present, and future*. In proceeding of V. Mohan Malhotra Symposium. 1994. Editor: Kumar Metha, ACI SP-144. Pp: 383-397.
- [5] Kovler, Konstantin; hutovsky, Semion; Spatar, Sbarina; Jensen, Ole M. (2020). RILEM Bookseries. *Concrete Durability and Service Life Planning* Volume 26