



Pengaruh Serbuk Kaca sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus dan Silica Fume sebagai Substitusi Parsial Semen terhadap Nilai Propertis Mekanik Beton

Kisna Hafizh Jamaaluddin¹, Jafar^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil
Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang KM 14,4, Kab.
Sleman, Yogyakarta, 55584
Jafar@uii.ac.id

ABSTRAK

Limbah kaca merupakan salah satu jenis limbah yang tidak dapat terurai secara alami namun dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran beton. Penelitian ini mempelajari pengaruh serbuk kaca sebagai substitusi parsial agregat halus dan silica fume sebagai substitusi parsial semen terhadap sifat mekanik beton. Beton diuji dengan berbagai variasi serbuk kaca (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) sebagai pengganti sebagian agregat halus dan silica fume (0% dan 10%) sebagai pengganti sebagian semen. Pengujian meliputi uji kuat tekan, uji kuat tarik belah, dan uji kuat lentur pada beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan 5% serbuk kaca (BSK5) menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 29,42 MPa dibandingkan dengan beton normal sebesar 25,78 MPa. Serbuk kaca terbukti dapat meningkatkan sifat mekanik beton, sementara penggunaan silica fume memberikan tambahan kekuatan serta ramah lingkungan. Variasi penambahan serbuk kaca dan silica fume menunjukkan tren yang serupa dalam meningkatkan modulus elastisitas beton.

Kata kunci: Serbuk kaca; Silica fume; Sifat mekanik beton; Substitusi agregat halus; Kuat tekan beton

ABSTRACT

Glass waste is a type of waste that cannot decompose naturally but can be utilized as a concrete mix material. This study investigates the effect of glass powder as a partial replacement for fine aggregate and silica fume as a partial replacement for cement on the mechanical properties of concrete. Concrete was tested with various glass powder substitutions (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) as partial replacements for fine aggregate and silica fume (0% and 10%) as partial replacements for cement. Tests included compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of the concrete. The results showed that adding 5% glass powder (BSK5) achieved the highest compressive strength of 29.42 MPa compared to normal concrete at 25.78 MPa. Glass powder proved to enhance the mechanical properties of concrete, while the use of silica fume provided additional strength and environmental benefits. The variations in glass powder and silica fume showed similar trends in increasing the modulus of elasticity of the concrete.

Keywords: *Glass powder; Silica fume; Mechanical properties of concrete; Fine aggregate substitution; Concrete compressive strength*

1. PENDAHULUAN

Limbah merupakan permasalahan yang harus ditangani dengan serius. Apabila tidak ditangani dengan serius, limbah dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Salah satu limbah yang dapat dijumpai dengan mudah adalah limbah dengan bahan dasar kaca. Limbah kaca tidak dapat terurai secara alami, akan tetapi dapat dimanfaatkan. Bentuk pemanfaatan tersebut yaitu dengan

Corresponding Author:

✉ Jafar

Accepted on: 2024-06-28

menggunakan kaca yang sudah melalui proses penggilingan sehingga limbah kaca berbentuk serbuk sebagai bahan campuran beton.

Dengan berbagai keunggulannya, beton banyak digunakan dalam konstruksi. Menurut SNI 2847-2019 [1], beton terbentuk dari campuran antara agregat kasar, agregat halus, semen portland maupun semen hidrolis dan air, baik itu dengan ataupun tanpa bahan tambah (*admixture*) lainnya. Serbuk kaca dapat digunakan sebagai pengganti sebagian pasir. Serbuk kaca memiliki potensi yang menguntungkan untuk digunakan karena kaca tidak mengandung lumpur seperti agregat dari alam dan serbuk kaca memiliki sifat pozzolan yang dapat meningkatkan kuat tekan beton [2].

Selain pasir, material penyusun beton yang memiliki peranan penting adalah semen. Menurut Malhotra yang dikutip dari Waani [3], semen dalam proses pembuatannya menghasilkan 7% dari produksi emisi gas CO₂ di alam. Semen merupakan material yang kurang ramah lingkungan. Berkaitan dengan hal tersebut, silica fume sebagai salah satu bahan pozzolan dapat digunakan sebagai pengganti sebagian untuk mengurangi penggunaan semen.

Silica fume merupakan bahan yang ramah lingkungan dan menghasilkan kekuatan beton yang lebih tinggi. Data yang dikutip dari U.S. Environmental Protection Agency (EPA) menunjukkan perbandingan yang dapat dilihat pada Tabel 1. Silica fume dapat meningkatkan kekuatan beton karena sifat pozzolan tersebut yang dapat membentuk seperti perekat layaknya akibat reaksi antara Silica Dioksida (SiO₂) dengan Calcium Hidroksida (Ca(OH₂)) dari hidrasi semen [4].

Tabel 1. Perbandingan Semen dan Silica Fume

Bahan	Emisi CO ₂ (kg/metric ton)	Efisiensi rasio kuat tekan @ 28 hari	Emisi CO ₂ yang dapat dihindar per lb menggantikan semen
Semen	959	100%	-
Silica fume	14	300%	2,1 lb

Sumber: EPA [5]

Dalam beberapa tahun terakhir, sudah dilakukan penelitian mengenai penggunaan serbuk kaca dan silica fume dalam campuran beton. Penelitian mengenai serbuk kaca sudah dilakukan oleh Kosim dan Hasan [6] serta Sejati & Gunawan [7]. Kosim dan Hasan [6] melakukan penelitian penggunaan serbuk kaca sebagai pengganti sebagian pasir. Hasil penelitian menunjukkan nilai kuat tekan beton yang menggunakan penambahan 25% serbuk kaca meningkat 12% dibandingkan dengan campuran normal. Sejati & Gunawan [7] melakukan penelitian penggunaan serbuk kaca pada beton dengan mutu rencana 20 MPa. Hasil penelitian menunjukkan nilai kuat tekan beton tertinggi terdapat pada beton dengan serbuk kaca 15% sebesar 27 MPa.

Sementara itu, penelitian mengenai penggunaan silica fume telah dilakukan oleh Simatupang, dkk. [8] dan Sudiby, dkk [9]. Simatupang, dkk. [8] melakukan penelitian pengaruh penggunaan silica fume terhadap kuat tekan *Reactive Powder Concrete*. Dalam penelitian tersebut didapatkan persentase optimum penggunaan silica fume pada kadar 26.28%. Sudiby, dkk [9] melakukan penelitian mengenai penggunaan silica fume sebagai pengganti sebagian semen pada beton dengan mutu rencana 25 MPa. Hasil penelitian menunjukkan nilai kuat tekan beton tertinggi terdapat pada beton dengan substitusi silica fume 10% sebesar 26,46 MPa.

Berdasarkan uraian di atas, dalam penelitian ini serbuk kaca dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian agregat halus dan silica fume dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen pada campuran beton. Harapannya, penggantian sebagian ini dapat mengatasi permasalahan yang sudah disebutkan dalam paragraf di atas. Adapun pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan modulus elastisitas beton

2. MATERIAL DAN METODE

Pelaksanaan penelitian dimulai dengan tahap persiapan bahan, material, dan alat. Selanjutnya yaitu tahap pelaksanaan pengujian material. Apabila material sudah sesuai dengan yang ditentukan, tahap selanjutnya yaitu merencanakan campuran beton (*mix design*). Perencanaan campuran beton menggunakan SNI 2834-2000 dengan 5 variasi, 12 benda uji berupa 9 silinder dan 3 balok seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Benda Uji

Kode	Benda Uji		Serbuk Kaca	Silica Fume
	Silinder	Balok		
BN	9	3	0%	0%
BSK5	9	3	5%	10%
BSK10	9	3	10%	10%
BSK15	9	3	15%	10%
BSK20	9	3	20%	10%

Setelah *mix design* sudah dihitung dan ditetapkan, langkah selanjutnya yaitu membuat campuran beton segar dan dilakukan pengujian *slump* apakah sesuai dengan yang disyaratkan atau tidak. Setelah itu, beton segar lalu dicetak ke dalam bekisting. Setelah mengeras, bekisting dilepas dan benda uji dilakukan perawatan dengan direndam (*curing*) selama 28 hari. Setelah direndam, benda uji dilakukan pengujian. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kuat tekan dengan acuan SNI 1974-2011, kuat tarik belah dengan acuan SNI 2491-2002, kuat lentur dengan pembebanan 2 (dua) titik sesuai acuan SNI 4431-2011, dan modulus elastisitas dengan pengujian secara langsung seperti yang tercantum dalam ASTM C-469 [10] dan Persamaan Nawy [11]. Rumus modulus elastisitas dari ASTM C-469 dan Nawy dapat dilihat pada persamaan (1) dan (2). Setelah dilakukan pengujian, dilakukan pengolahan hasil data sehingga dapat dibuat kesimpulan serta saran dari pengujian yang telah dilakukan.

$$E_c = \frac{0,4 \times f'c}{\varepsilon_{0,4}} \tag{1}$$

dengan:

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

$f'c$ = tegangan tekan maksimum (MPa)

$\varepsilon_{0,4}$ = regangan ketika tegangan tekan sudah mencapai nilai 0,4 dari tegangan tekan maksimumnya

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{2}$$

dengan:

S_1 = nilai tegangan ketika regangan sebesar 0,00005 (MPa)

S_2 = nilai tegangan ketika mencapai 40% dari tegangan batas (MPa)

$\varepsilon_{0,4}$ = regangan longitudinal akibat tegangan sebesar S_1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil pengujian material

Pengujian agregat halus dalam penelitian ini mendapatkan hasil gradasi pasir termasuk pada daerah II, berat jenis SSD sebesar 2,632, dan penyerapan air sebesar 0,91%. Sedangkan untuk pengujian agregat kasar mendapatkan hasil berat jenis SSD sebesar 2,69 dan gradasi kerikil termasuk dalam kurva

maksimum 20 mm. Sedangkan pemeriksaan serbuk kaca menunjukkan nilai berat jenis yang lebih kecil daripada agregat halus sebesar 2,364 dan penyerapan air yang lebih besar dibandingkan agregat halus sebesar 2,46%. Data hasil pengujian secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Agregat

Jenis Pengujian	Hasil			Satuan
	Agregat Halus	Agregat Kasar	Serbuk Kaca	
Berat jenis curah	2,608	2,647	2,307	
Berat jenis SSD	2,632	2,690	2,364	
Berat jenis semu	2,671	2,766	2,447	
Penyerapan air	0,91%	1,63%	2,46%	%
Gradasi	II (agak halus)	20 (maks 20 mm)	IV (halus)	-
Berat volume padat	1,608	1,598	1,031	gram/cm ³
Berat volume gembur	1,360	1,423	1,187	gram/cm ³
Kadar lumpur	1,40%	-	-	%

3.2 Hasil perencanaan campuran beton

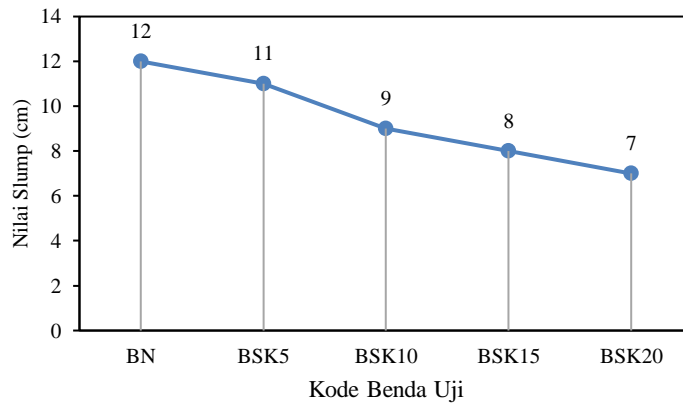
Perencanaan campuran beton pada penelitian ini merujuk pada SNI 2834-2000. Mutu beton yang direncanakan adalah 25 MPa pada usia beton 28 hari. Rekapitulasi proporsi campuran beton untuk 9 benda uji silinder dan 3 benda uji balok dalam 1 kali pencampuran dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4. Rekapitulasi Kebutuhan Material

Variasi	Serbuk Kaca	Silica Fume	Kebutuhan Material						
			Jumlah Sampel (buah)	Semen (kg)	Silica Fume (kg)	Air (kg)	Agregat Halus (kg)	Serbuk Kaca (kg)	Agregat Kasar (kg)
BN	0%	0%	12	43,40	0,00	21,7	77,63	0,00	109,38
BSK5	5%	10%	12	39,06	4,34	21,7	73,75	3,88	109,38
BSK10	10%	10%	12	39,06	4,34	21,7	69,86	7,76	109,38
BSK15	15%	10%	12	39,06	4,34	21,7	65,98	11,64	109,38
BSK20	20%	10%	12	39,06	4,34	21,7	62,10	15,52	109,38
Total untuk <i>mixing</i> 9 silinder dan 3 balok (kg)				199,64	17,36	108,51	349,32	38,81	546,92
Pembulatan (kg)				199,70	17,4	108,6	349,40	38,90	547,00

3.3 Hasil pengujian slump

Berdasarkan hasil pengujian nilai slump seiring dengan bertambahnya serbuk kaca dan penggunaan silica fume, slump semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh nilai penyerapan air pada serbuk kaca lebih tinggi dibandingkan dengan oleh agregat halus. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengujian laboratorium yang dilakukan dimana penyerapan air pada serbuk kaca memiliki nilai yang lebih tinggi sebesar 2,46% sedangkan penyerapan air pada pasir sebesar 0,91%. Adapun hasil pengujian slump dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai berikut.



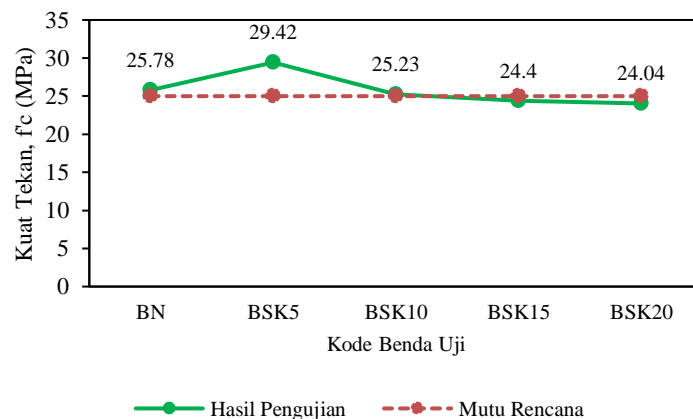
Gambar 1. Hasil Pengujian Slump

3.4 Hasil pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan ketika benda uji berumur 28 hari. Sebelum dilakukan pengujian mekanik di laboratorium, benda uji terlebih dahulu diberikan lapisan belerang pada bagian permukaan atas (*capping*) agar menjadi rata. Hasil pengujian kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 2 sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Kode Benda Uji	Beban Maksimum	Luas Penampang	Kuat Tekan	Kuat Tekan Rata-rata
	(N)	(mm ²)	(MPa)	
BN	461000	17813,11	25,88	25,78
	466000	17679,31	26,36	
	440000	17522,55	25,11	
BSK5	535000	18034,59	29,67	29,42
	530000	17868,35	29,66	
	540000	18666,84	28,93	
BSK10	432000	17593,01	24,56	25,23
	470000	17876,25	26,29	
	440000	17710,75	24,84	
BSK15	440000	17687,17	24,88	24,40
	435000	17750,09	24,51	
	420000	17640,06	23,81	
BSK20	430000	17718,61	24,27	24,04
	420000	17923,68	23,43	
	440000	18026,65	24,41	



Gambar 2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder

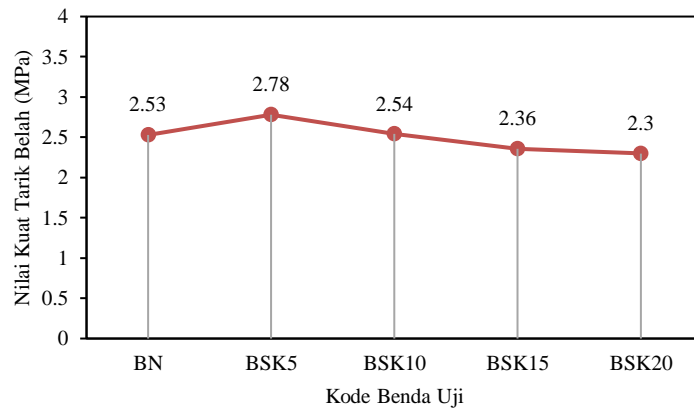
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh nilai kuat tekan beton normal sebesar 25,78 MPa, nilai kuat tekan tertinggi pada BSK5 sebesar 29,42 MPa, dan nilai kuat tekan terendah pada BSK 20 sebesar 24,04 MPa. Penurunan nilai kuat tekan beton ini disebabkan oleh penggunaan serbuk kaca dimana butirannya berukuran kecil (halus). Ukuran partikel yang terlalu kecil membutuhkan semen dan air yang lebih banyak untuk dapat terikat dengan baik satu dengan lainnya. Karena jumlah semen dan air yang digunakan pada semua campuran beton dalam penelitian ini adalah sama, maka sampel beton dengan persentase serbuk kaca yang lebih besar menjadi kekurangan pasta semen untuk mengikat agregat. Penelitian yang dilakukan oleh Sudjati dkk. [12] juga menghasilkan tren hasil yang serupa. Pada penelitian tersebut, nilai kuat tekan beton juga menurun seiring dengan bertambahnya persentase serbuk kaca yang digunakan. Berdasarkan grafik pada Gambar 2, dapat disimpulkan bahwa penggunaan serbuk kaca dan silica fume pada campuran beton dengan persentase tertentu dapat meningkatkan kekuatan beton. Dalam penelitian ini, persentase optimumnya ada pada benda uji BSK 5 dengan persentase serbuk kaca 5% dan silica fume 10%.

3.5 Hasil pengujian kuat tarik belah

Kuat tarik belah beton (*tensile strength*) adalah kemampuan beton untuk menahan gaya tarik sebelum pecah atau retak. Pengujian ini dilakukan saat benda uji berumur 28 hari berjumlah 15 silinder. Hasil pengujian kuat tarik belah beton pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4 dan Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Kode Benda Uji	Beban Maksimum (kN)	Luas Penampang (mm ²)	Kuat Tarik (MPa)	Kuat Tarik Rata-rata (MPa)	Persentase terhadap Kuat Tekan Rerata tiap variasi (%)
BN	180	142457,50	2,53	2,53	9,81
	185	142662,51	2,59		
	175	142046,19	2,46		
BSK5	200	143985,94	2,78	2,78	9,45
	196	144101,84	2,72		
	202	142175,53	2,84		
BSK10	179	143942,53	2,49	2,54	10,07
	183	144091,45	2,54		
	187	143989,94	2,60		
BSK15	166	145006,49	2,29	2,36	9,66
	173	143038,96	2,42		
	168	142056,52	2,37		
BSK20	169	144115,93	2,35	2,30	9,56
	168	145151,29	2,31		
	160	143145,85	2,24		



Gambar 4. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Berdasarkan pengujian laboratorium yang telah dilakukan, diperoleh nilai kuat tarik belah beton normal sebesar 2,53 MPa, nilai tertinggi pada BSK5 sebesar 2,78 MPa, dan nilai terendah pada BSK20 sebesar 2,30 MPa. Menurunnya nilai kuat tarik belah bisa jadi disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satu faktor tersebut yaitu ukuran butir serbuk kaca yang digunakan terlalu kecil dan halus. Pada saat beton terbelah (lihat Gambar 5), terlihat ikatan antar material kurang sempurna dimana serbuk kaca rontok dan tidak terikat dengan baik yang dapat disebabkan oleh kurangnya semen untuk mengikat antar partikel dan proses pemadatan yang kurang sempurna. Nilai kuat tarik belah beton pada umumnya sebesar 8 – 11.5 % dari nilai kuat tekannya [13]. Berdasarkan hal tersebut, nilai korelasi yang didapatkan dari hasil pengujian berada pada rentang 8 – 11.5%.



(a)

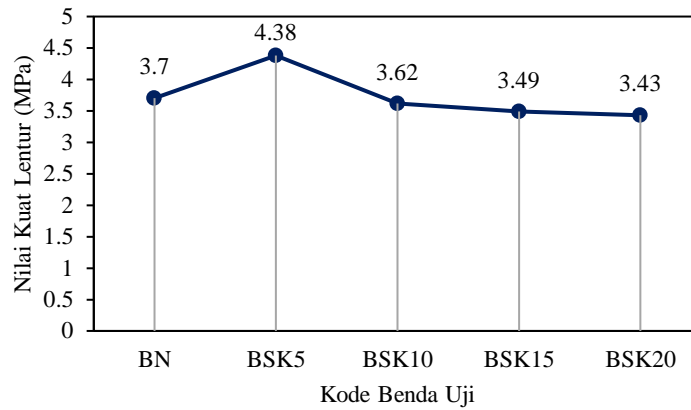


(b)

Gambar 5. Benda Uji Setelah Pengujian Kuat Tarik Belah

3.6 Hasil pengujian kuat lentur

Pengujian kuat lentur dilaksanakan ketika benda uji sudah berumur 28 hari. Pengujian dilakukan dengan dua titik pembebanan sesuai dengan SNI 4431-2011. Pembebanan dilakukan tegak lurus terhadap sumbu benda uji. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 7 berikut.



Gambar 6. Pengujian Kuat Lentur

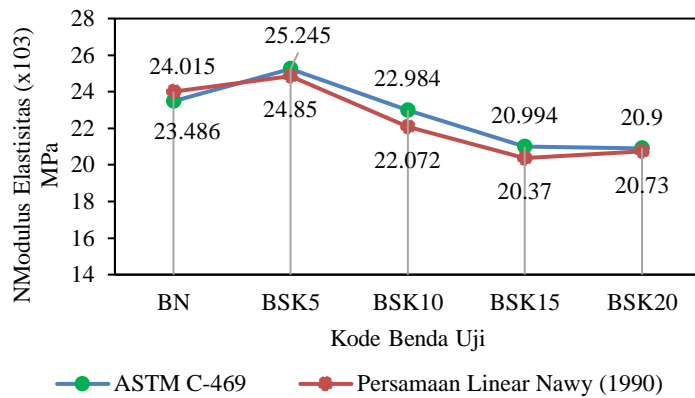
Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Lentur

Kuat Lentur Rata-rata	Beban Maksimum (kgf)	Kuat Lentur	Kuat Lentur Rata-rata (MPa)	Kuat Tekan rata-rata	Rasio Kuat Lentur/Kuat Tekan
BN	2650	3,69	3,70	25,78	0,728
	2590	3,64			
	2670	3,76			
BSK5	2900	4,13	4,38	29,42	0,808
	3270	4,64			
	3050	4,38			
BSK10	2620	3,64	3,62	25,23	0,720
	2570	3,58			
	2550	3,62			
BSK15	2510	3,52	3,49	24,40	0,706
	2520	3,50			
	2460	3,45			
BSK20	2420	3,47	3,43	24,04	0,700
	2430	3,37			
	2390	3,45			

Berdasarkan hasil pengujian, nilai kuat lentur beton normal sebesar 3,70 MPa. Hasil kuat lentur tertinggi terdapat pada BSK5 sebesar 4,38 MPa dan kuat lentur terendah terdapat pada BSK20 sebesar 3,43 MPa. Menurut SNI 2847-2019 [1], nilai korelasi antara kuat lentur dan kuat tekan sebesar 0,60. Berdasarkan hal tersebut, nilai korelasi antara kuat lentur dan kuat tekan yang diperoleh sudah lebih besar dibandingkan dengan SNI 2847-2019 yani pada rentang 0,7 – 0,808.

3.7 Hasil pengujian modulus elastisitas

Modulus elastisitas menyatakan seberapa besar suatu bahan dapat menahan tekanan atau regangan tanpa mengalami kerusakan permanen atau perubahan bentuk yang tidak dapat dikembalikan. Secara matematis, modulus elastisitas didefinisikan sebagai rasio antara tekanan yang diterapkan pada suatu bahan (atau gaya yang diberikan) dengan regangan yang dihasilkan oleh bahan tersebut. Hasil pengujian modulus elastisitas dapat dilihat pada Gambar 7 dan Tabel 8 sebagai berikut.



Gambar 7. Nilai Modulus Elastisitas Beton dari Beberapa Metode

Nilai modulus elastisitas menunjukkan bagaimana sifat beton tersebut dapat kembali ke bentuk awal atau tidak. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, maka beton tersebut dapat kembali ke bentuk awalnya dengan mudah. Apabila nilai modulus elastisitasnya rendah, beton tersebut bersifat getas. Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa antara metode ASTM C-469 dan Persamaan Nawy menunjukkan tren yang serupa meskipun dengan nilai yang tidak persis sama. Nilai optimum didapatkan pada variasi BSK5.

4 KESIMPULAN

Berikut adalah kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian yang telah dilaksanakan

1. Nilai kuat tekan beton normal sebagai beton kontrol diperoleh sebesar 25,78 MPa. Adapun nilai tertinggi terdapat pada beton dengan kode BSK5 sebesar 29,42 MPa dan nilai terendah pada beton dengan kode BSK20 sebesar 24,04 MPa.
2. Nilai kuat tarik belah beton normal sebagai beton kontrol diperoleh sebesar 2,53 MPa. Adapun nilai tertinggi terdapat pada beton dengan kode BSK5 sebesar 2,78 MPa dan nilai terendah terdapat pada beton dengan kode BSK20 sebesar 2,30 MPa.
3. Nilai kuat lentur beton normal sebagai beton kontrol diperoleh sebesar 3,70 MPa. Adapun nilai tertinggi terdapat pada beton dengan kode BSK5 sebesar 4,38 MPa dan nilai terendah terdapat pada beton dengan kode BSK20 sebesar 3,43 MPa.
4. Nilai optimum modulus elastisitas beton diperoleh pada variasi BSK5 dengan nilai sebesar 25224,36 MPa untuk metode ASTM C-469-94 dan 24849,55 MPa dengan metode persamaan Nawy.
5. Penggunaan silica fume sebagai bahan pengganti semen berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan beton pada persentase tertentu. Dalam penelitian ini nilai propertis mekanik optimum dijumpai pada sampel BSK5 (substitusi serbuk kaca terhadap agregat halus 5%; substitusi semen dengan silika fume 10%). Substitusi serbuk kaca melebihi persentase 5% menghasilkan tren penurunan nilai propertis mekanik. Hal ini disebabkan oleh ukuran agregat serbuk kaca yang kecil dan termasuk dalam kategori halus. Serbuk kaca yang ukurannya lebih kecil (halus) dari pasir tersebut tidak terikat dengan sempurna dengan material lain karena kekurangan pasta semen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019)," *Persyaratan Bet. Strukt. untuk Bangunan Gedung*, no. 8, p. 695, 2019.
- [2] E. Agusri and F. Efranda, "Pengaruh Penambahan Fly Ash Dan Serbuk

- Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton K-300,” *Bear. J. Penelit. dan Kaji. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 2, pp. 97–106, 2020, doi: 10.32502/jbearing.2831201962.
- [3] J. E. Waani and L. Elisabeth, “Substitusi Material Pozolan Terhadap Semen pada Kinerja Campuran Semen,” *J. Tek. Sipil*, vol. 24, no. 3, pp. 237–246, 2017, doi: 10.5614/jts.2017.24.3.7.
- [4] N. Hendrawati, E. D. Rahmayanti, and E. D. Priapnasar, “Study Pembuatan Durable Cement dengan Penambahan Pozzolan Silica Fume,” *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 2, no. 1, p. 31, 2018, doi: 10.33795/jtkl.v2i1.68.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), “Study on Increasing the Usage of Recovered Mineral Components in Federally Funded Projects Involving Procurement of Cement or Concrete to Address the Safe, Accountable, Flexible, Efficient Transportation Equity Act: A Legacy for Users,” Washington, DC, 2008. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03%0A/documents/report4-08.pdf>.
- [6] Kosim and A. Hasan, “Pemanfaatan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus Untuk Meningkatkan Kuat Tekan Beton,” *J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 2, pp. 170–178, 2014, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/55681-ID-pemanfaatan-serbuk-kaca-sebagai-substitu.pdf>.
- [7] S. S. Sejati and L. I. Gunawan, “Serbuk Kaca Sebagai Bahan Tambah Pembuatan Beton Normal Berdasarkan Gradasi Pasir Zona 3,” *Modul. Media Komun. Dunia Ilmu Sipil*, vol. 1, no. 1, p. 7, 2019, doi: 10.32585/modulus.v1i1.375.
- [8] K. G. Mite, P. H. Simatupang, and J. K. Nasjono, “Pengaruh Penambahan Silica Fume terhadap Kuat Tekan Reactive Powder Concrete,” *J. Tek. Sipil*, vol. VI, no. 2, pp. 219–230, 2017.
- [9] A. Sudiby, S. Alwi, and A. P. Indirwana, “Pengaruh Penggunaan Silica Fume Dengan Material Batu Laterit Sebagai Substitusi Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton,” *J. Inersia*, vol. 13, no. 1, pp. 1–5, 2021.
- [10] ASTM, *ASTM C469-94 2012: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression, Section 4*. US and Canada: Annual Book of ASTM Standards, 1996.
- [11] E. G. Nawy, *Reinforced Concrete A Fundamental Approach*. Pearson Prentice Hall, 2009.
- [12] J. J. Sudjati, T. Yulianti, and Rikardus, “Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus Terhadap Sifat Mekanik Beton,” *J. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, 2014, doi: 10.24002/jts.v13i1.639.
- [13] G. E. Untu, E. J. Kumaat, and R. S. Windah, “Pengujian Kuat Tarik Belah dengan Variasi Kuat Tekan Beton,” vol. 3, no. 10, pp. 703–708, 2015.