

KAJIAN KUAT DESAK DAN MODULUS ELASTISITAS BETON BUBUK REAKTIF MUTU TINGGI DENGAN VARIASI SILICA FUME

Wibowo¹⁾, Halwan Alfisa Saifullah²⁾, dan Ikhsan Nur Hidayat³⁾

¹⁾²⁾ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

³⁾ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36 A, Kentingan, Surakarta 57126, Telp (0271)647069, Fax 662118

Email: inhidayat3@student.uns.ac.id

Abstract

Reactive Powder Concrete is a type of ultra-high-performance concrete that implements microstructural improvement by eliminating coarse aggregate. Existing researches related to this type of concrete are still limited. Therefore, this study investigates the performance of compressive strength and elastic modulus of Reactive Powder Concrete with varying silica fume substitution (0%; 5%; 10%; 15%; 20%; and 25% of cement content). A total of 18 cylindrical specimens with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm were prepared and tested. At the age of 28 days, the compressive strength of concrete with variation of 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% were 65.68 MPa, 67.56 MPa, 68.32 MPa, 70.21 MPa, 69.45 MPa, and 68.70 MPa, respectively. On the other hand, the elastic modulus of concrete with variation of 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% were 34854.38 MPa; 36001.88 MPa, 36655.59 MPa; 36827.03 MPa; 34446.86 MPa; and 35079.62 MPa. Utilizing silica fume as a partial replacement for cement (until it reaches its optimal value) can increase the compressive strength and modulus of elasticity of Reactive Powder Concrete.

Keywords : Reactive powder concrete (RPC); Silica Fume; Compressive strenght; Modulus of elasticity

Abstrak

Beton bubuk reaktif adalah beton yang menghilangkan campuran agregat kasar. Kuat desak dan modulus elastisitas beton merupakan parameter utama untuk menentukan mutu beton, penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan metode teoritis dengan total benda uji 18 buah. Benda uji yang digunakan adalah beton silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. dengan variasi penggunaan silica fume adalah 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; dan 25%. Uji desak dan modulus elastisitas dilakukan pada umur 28 hari, pengujian kuat desak dan modulus elastisitas ini menggunakan mesin CTM (*compression testing machine*) dengan tambahan *dial* untuk mengukur penurunan benda uji, hasil pengujian dengan variasi *silica fume* 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; dan 25%, berturut-turut sebesar 65,68 MPa; 67,56 MPa; 68,32 MPa; 70,21 MPa; 69,45 MPa; dan 68,70 Mpa. Pada pengujian modulus elastisitas dengan variasi *silica fume* 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; dan 25%, berturut-turut sebesar 34854,38 MPa; 36001,88 MPa, 36655,59 MPa; 36827,03 MPa; 34446,86 MPa; dan 35079,62 MPa terhadap berat semen normal dapat meningkatkan kuat tekan beton dari 65,68 MPa menjadi 70,21 MPa.

Kata Kunci : Beton bubuk reaktif, *Silica fume*, Kuat desak, Modulus elastisitas

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur sangat penting untuk menunjang pembangunan suatu negara. Dalam kaitan ini, pembangunan infrastruktur terus berkembang pesat. Hal ini juga berdampak pada pesatnya perkembangan industri konstruksi pendukung, karena kebutuhan akan hasil konstruksi yang lebih baik, efisiensi dan kinerja yang lebih tinggi, serta kemampuan mengatasi segala kendala yang muncul.

Beton ialah salah satu bahan bangunan yang sangat banyak digunakan di Indonesia. Sampai saat ini, lebih dari 60% proyek konstruksi di Indonesia memakai beton selaku materialnya. Perihal ini disebabkan beton mempunyai banyak keunggulan dibanding dengan material lain, antara lain kuat tekan yang tinggi, mudah dicetak, tahan lama, tahan api, mudah beradaptasi dengan lingkungan, mudah perawatan, ekonomis, dan mudah mengakses komponen utama.

Pada data Badan Pusat Statistik tahun 2016, pekerjaan beton nasional menembus angka 137 ton dan diprediksi akan terus bertambah tiap tahunnya. Beton tersebut digunakan pada pondasi, kolom, balok, pelat lantai, bendung, gorong-gorong, dan sebagainya pada proyek pembangunan gedung, jembatan, bendungan, dan jalan tol. Oleh karena itu, teknologi beton di tuntut untuk selalu berkembang setiap tahunnya baik dalam segi material maupun metode konstruksi agar dapat memenuhi kebutuhan pembangunan infrastruktur dengan baik.

Sisi lain, beton mempunyai kuat tekan tinggi akan cenderung membutuhkan bahan pengikat (*binder*) yakni semen untuk campurannya. Tentunya hal tersebut mengakibatkan produksi semen akan meningkat. Menurut Databooks.co.id konsumsi semen di Indonesia pada tahun 2017 mencapai 66,3 juta ton dan diprediksi terus meningkat. Lebih lanjut tanpa disadari, keadaan tersebut akan memicu adanya eksploitasi industri semen yang tidak terkendali dan membawa dampak buruk terhadap lingkungan. Kegiatan industri semen menjadi salah satu penyumbang gas polutan pencemaran udara, seperti gas emisi CO₂ dan partikel debu. Menurut *International Energy Authority*, produsen semen menyumbang sekitar 7% dari keseluruhan gas emisi CO₂. Selain membutuhkan bahan pengikat yang tinggi, beton mutu tinggi biasanya memiliki faktor air semen (FAS) yang rendah untuk mengurangi porositas pada beton. Namun hal ini berdampak pada tingkat kinerja atau workabilitas beton menjadi berkurang.

Berdasarkan berbagai pertimbangan di atas, maksud dari penelitian ini guna meneliti kuat desak dan modulus elastisitas beton mutu tinggi menggunakan bahan pengganti semen dan *silica fume* pada kadar maksimum untuk benda uji silinder dengan diameter 15 cm tinggi 30 cm.

LANDASAN TEORI

Beton saat ini merupakan komponen utama dan paling banyak diaplikasikan dalam struktur bangunan. Beton sendiri merupakan campuran antara semen portland, air dan agregat, serta bahan tambah baik bahan tambah kimia ataupun bahan tambah mineral pada perbandingan tertentu. Setelah itu, campuran tersebut dituangkan dalam suatu cetakan sesuai kebutuhan, kemudian dидiamkan hingga mengeras seperti batuan. (Tjokrodimuljo, K., 1996).

Menurut Hardjasaputra (2008), salah satu bahan kimia tambahan yang dapat ditambahkan dalam campuran beton mutu tinggi merupakan *superplasticizer*. Superplasticizer ini sangat dibutuhkan sebab keadaan FAS pada beton mutu tinggi umumnya amat rendah untuk dapat memantau *workability* beton tersebut. Selain itu, penambahan *water-reducing agent* membuat partikel-partikel semen yg umumnya mudah terflokulasi tersebar merata, mengurangi jumlah air yg dibutuhkan, sebagai akibatnya mengurangi pori-pori pada beton dan menaikkan kekuatan beton.

Beton

Beton didefinisikan merupakan campuran dari agregat halus, agregat kasar, semen portland dan air. Definisi beton semakin luar seiring perkembangan teknologi, menurut Neville dan Brooks (1987) beton diartikan sebagai bahan yang berasal dari berbagai macam tipe semen, agregat dan juga bahan *pozzolan*, abu terbang, terak dapur tinggi, sulfur, serat dan lain-lain. Sementara itu, menurut SNI 03-2847-2019 beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan.

Semen Portland

Semen portland terbuat dari serbuk mineral kristalin dengan komposisi utama disebut mayor oksida, yaitu : kalsium atau batu kapur (CaCO₃), aluminium oksida (Al₂O₃), pasir silikat (SiO₂), dan biji besi (FeO₂). Selain itu terdapat minor oksida dengan jumlah sedikit, terdiri dari : MgO, SO₃, K₂O, dan NaO₂. Menurut SNI 15-2049-2004, semen portland digiling dengan cara menggiling terak semen semen portland yang terutama tersusun dari kalsium silikat hidrolik dan dengan penambahan satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan aditif lainnya.

Superplasticizer

Superplasticizer atau *high range water reducer* adalah bahan tambahan kimia yang digunakan untuk beton mutu tinggi dengan koefisien air semen yang sedikit. Menurut ASTM C494, *superplasticizer* adalah aditif kimia pereduksi air yang sangat efektif. Peredam air dapat mengurangi kelembaban dalam campuran awal hingga 40%.

Serat Baja (*Steel Fiber*)

Menurut Sudarmoko (Tjokrodimuljo, 1996), apabila modulus elastisitas serat yg dipakai lebih tinggi berdasarkan dalam beton, seperti dawai baja, maka bertenaga tekan, bertenaga tarik dan modulus elastisitas beton serat akan sedikit lebih tinggi dari pada beton serat. yang menurut beton biasa. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Suhendro (1990), terbukti bahwa kinerja beton yg tidak baik bisa ditingkatkan menggunakan menambahkan serat lokal yg terbuat berdasarkan dawai logam ke beton, yaitu kerapuhan, hampir tidak bisa menahan tegangan tarik dan ketahanan beban impak yg rendah. Selain itu, terbukti tingkat peningkatan yang diperoleh dengan menggunakan serat lokal nir jauh berbeda dengan output yang dilaporkan memakai serat baja pada luar negeri.

Silica Fume

Menurut ASTM C618, *silica fume* adalah bahan yang menyimpan silikon dioksida (SiO₂) lebih besar dari 85% dan merupakan bahan yang sangat halus berbentuk bulat dan berdiameter 1/100 diameter semen (Kusumo, 2013). Dengan diameter yang sangat kecil, *silica fume* mampu berperan dalam pengisi rongga-rongga antar partikel.

Silica fume merupakan material limbah industri yang dihasilkan oleh pembakaran kaolin pada suhu tinggi. *Silica fume* memiliki beberapa jenis yaitu *undenfisied silica fume*, *slurry*, dan *densified silica fume*. Ketiga jenis tersebut dibedakan berdasarkan tingkat kepadatannya di mana *densified silica fume* merupakan modifikasi dari *undenfisied* dengan meningkatkan tingkat kepadatannya (Adriansyah, 2012).

Kuat Tekan Beton

Pengujian ini dilakukan guna mengetahui mutu atau beban yang mampu diterima oleh beton. Pengujian yang dilakukan berpedoman pada SNI 2847-2019.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan :

- $f'c$ = Tegangan tekan (MPa)
- P = Gaya tekan (N)
- A = Luas penampang benda uji (mm²)

Modulus Elastisitas

Perhitungan modulus elastisitas dalam penelitian ini berdasarkan rekomendasi dari Eurocode 2-1992, ASTM C-469, ACI Committee 363, dan SNI 2874-2019 yang terdapat pada Persamaan 2 hingga Persamaan 5 Berikut :

Eurocode 2-1992

$$Ec = \frac{0,4 \cdot f'c}{\varepsilon(0,4 f'c)} \dots\dots\dots [2]$$

Keterangan :

- Ec = Modulus elastisitas (MPa)
- ε = Regangan aksial (mm/mm)
- f_c = Kuat tekan beton (MPa)

ASTM C469

$$Ec = \frac{0,4 \cdot f'c - \sigma_1}{\varepsilon(0,4 f'c) - \varepsilon_1} \dots\dots\dots [3]$$

Keterangan :

- Ec = Modulus elastisitas (MPa)
- ε_1 = Regangan aksial (0,00005)
- f_c = Kuat tekan beton (MPa)
- σ_1 = Tegangan yang berhubungan dengan ε_1 (MPa)

Acı Committe 363

$$Ec = 3320 \sqrt{f'c} + 6900 \dots\dots\dots [4]$$

Dimana :

- Ec = Modulus elastisitas (MPa)
- f_c = Kuat tekan beton (MPa)

SNI 2847-2019

$$E_c = 0,043wc^{1,5}\sqrt{f'c} \dots\dots\dots [5]$$

Dimana :

- Ec = Modulus elastisitas (MPa)
- f'c = Kuat tekan beton (MPa)
- wc = Berat volume beton (kg/m³)

METODE

Tahapan penelitian yang dilakukan seperti berikut:

1. Identifikasi masalah
 Mengidentifikasi masalah yang ada dan memperbanyak studi literatur mengenai beton mutu tinggi memadat sendiri dan material pendukung guna digunakan sebagai kajian pustaka dan dasar teori penelitian.
2. Persiapan
 Mempersiapkan peralatan dan bahan yang digunakan sebelum memulai pengujian.
3. Pengujian Bahan Dasar dan Uji Beton
 Mengumpulkan data penelitian dan melakukan percobaan. Pengujian terhadap bahan dasar penyusun beton seperti agregat halus.
 - a. Pengujian bahan dasar penyusun beton
 Pengujian dilakukan terhadap bahan dasar meliputi agregat, dan bahan tambah *silica fume*.
 - b. Pembuatan *trial mix design* RPC dan *mixing*.
 Membuat beberapa *mix design* RPC dengan variasi pada perbandingan kadar *silica fume* yang digunakan. Dengan hasil *mix design* yang telah memenuhi syarat standar maka dilanjutkan dengan pencampuran beton (*mixing concrete*) yang selanjutnya menjadi benda uji. Rancang campur beton bubuk reaktif dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Rancang campur beton bubuk reaktif.

Nama Benda Uji	Pasir Halus (kg/m ³)	Pasir Kuarsa (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Steel fiber (kg/m ³)	Superplasticizer (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
RPC-SF0%	1045	370,5	800	0	11,5	7,7	152
RPC-SF5%	1045	370,5	760	40	11,5	7,7	152
RPC-SF10%	1045	370,5	720	80	11,5	7,7	152
RPC-SF15%	1045	370,5	680	120	11,5	7,7	152
RPC-SF20%	1045	370,5	640	160	11,5	7,7	152
RPC-SF25%	1045	370,5	600	200	11,5	7,7	152

- c. Pengujian benda uji
 Pengujian *slump flow test*, dimaksud untuk menghitung *filling ability*, setelah beton setting selama 28 hari, melakukan pengetestan kuat tekan dan modulus elastisitas dengan *Compression Testing Machine* (CTM). Sesuai dengan SNI 2847-2019 tentang metode pengujian kuat tekan beton.
 - Menyiapkan benda uji,
 - Meletakkan benda uji serta *Compressometer Silinder* pada *Compression Testing Machine*,
 - Mengatur kecepatan pembebanan pada alat *Compression Testing Machine* (5 mm/s),
 - Melakukan proses pengujian,
 - Mencatat nilai kuat tekan dan penurunan *dial* yang terjadi.
4. Analisa data
 Menganalisis data hasil pengujian beton RPC, dan mendapatkan nilai hubungan antar variabel dalam penelitian ini.
5. Kesimpulan
 Hasil pengolahan data disimpulkan dengan menjawab tujuan penelitian yang sudah ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kuat Desak Beton

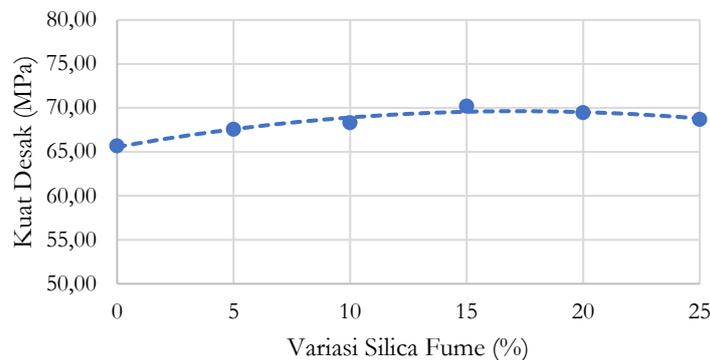
Hasil pengetesan kuat desak rata-rata beton bubuk reaktif untuk variasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Hasil pengujian kuat desak rata-rata beton bubuk reaktif dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini. dan grafik kuat desak rata-rata dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.

Tabel 2. Hasil pengujian kuat desak rata-rata beton bubuk reaktif

Nama Benda Uji	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
RPC-SF0%-KTMOE	65,68
RPC-SF5%-KTMOE	67,56
RPC-SF10%-KTMOE	68,32
RPC-SF15%-KTMOE	70,21
RPC-SF20%-KTMOE	69,45
RPC-SF25%-KTMOE	68,70

Hasil pengujian kuat desak rata-rata beton bubuk reaktif disajikan dalam bentuk grafik kuat desak rata-rata dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.

Gambar 1. Grafik kuat desak rata - rata



Penambahan variasi *silica fume* memberikan peningkatan pada kuat desak beton bubuk reaktif dengan kenaikan kuat desak beton paling tinggi terjadi pada kadar *silica fume* 15% sebesar 70,21 MPa. Nilai kuat desak beton bubuk reaktif semakin meningkat mulai dari kadar *silica fume* 5% hingga kadar *silica fume* 15%, kemudian turun kembali namun tetap lebih tinggi dari kuat desak bubuk reaktif tanpa *silica fume*.

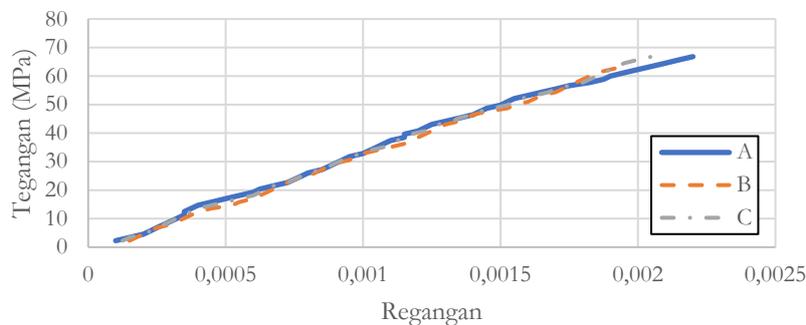
Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Hasil pengujian modulus elastisitas beton bubuk reaktif untuk variasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Sebagai hasil perhitungan diambil dari data benda uji sebagai berikut, maka untuk perhitungan menggunakan persamaan [2] sampai persamaan [5]. Rekapitulasi hasil modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah ini.

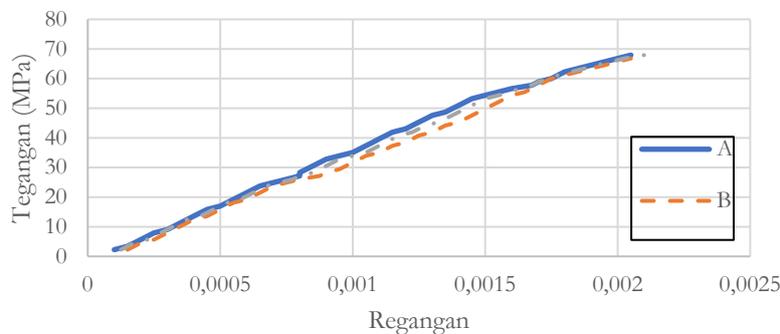
Tabel 3. Rekapitulasi hasil modulus elastisitas

Benda Uji	Kode	Eurocode 2-1992	ASTM C469	Aci Committe 363	SNI 2847-2019
RPC-SF0%-KTMOE	A	32196,73	33101,00	34036,45	39212,16
	B	31314,16	33867,60	33337,54	39516,25
	C	32196,73	33781,77	34036,45	41655,69
RPC-SF5%-KTMOE	A	33970,28	36103,96	34265,45	40952,06
	B	32196,73	35494,27	34036,45	38996,82
	C	33970,28	36623,16	34265,45	41147,69
RPC-SF10%-KTMOE	A	33970,28	38438,89	34265,45	39760,63
	B	33970,28	35772,29	34265,45	39325,91
	C	32697,23	35418,94	34492,55	41489,17
RPC-SF15%-KTMOE	A	35323,39	35223,21	34717,80	39243,08
	B	34246,46	37712,07	34717,80	38878,33
	C	35323,39	37112,54	34717,80	38708,50
RPC-SF20%-KTMOE	A	31757,65	35148,79	34492,55	39846,89
	B	30031,69	32478,11	34492,55	39167,14
	C	29874,57	31867,75	34717,80	39486,87
RPC-SF25%-KTMOE	A	33970,28	37600,96	34265,45	40813,68
	B	27355,60	31789,70	34492,55	40808,34
	C	30699,06	34544,13	34492,55	40123,13

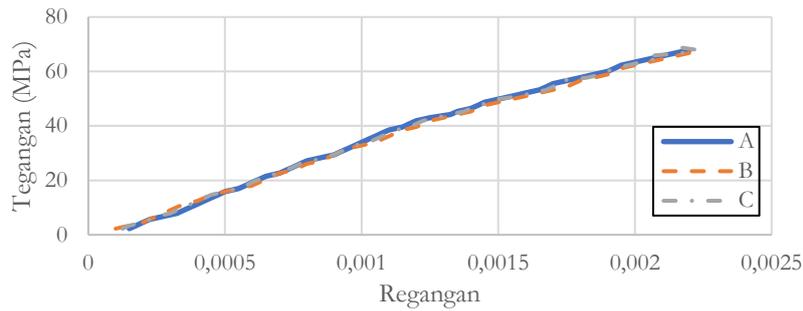
Hasil pengujian modulus elastisitas beton bubuk reaktif untuk variasi 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton bubuk reaktif untuk masing-masing variasi *silica fume* dapat dilihat pada Gambar 2 sampai Gambar 7 dibawah ini.



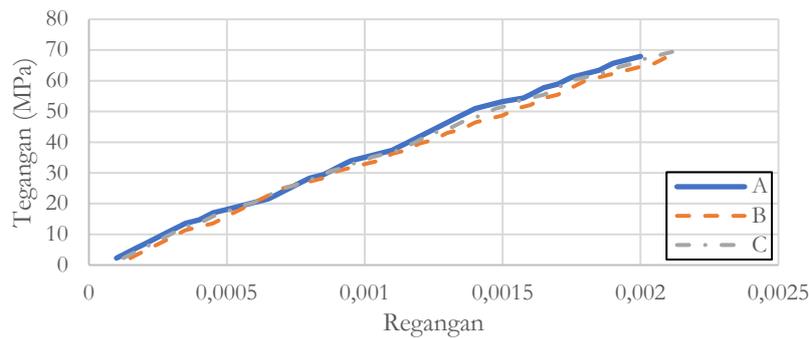
Gambar 2. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 0%



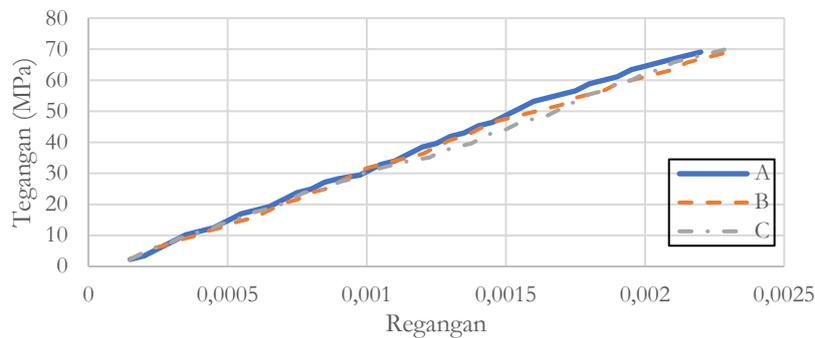
Gambar 3. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 5%



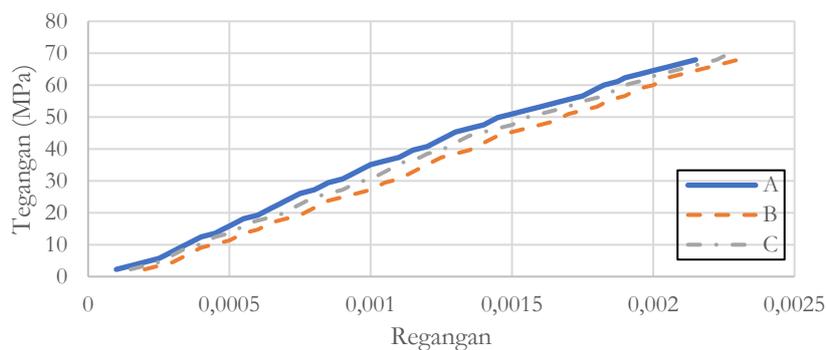
Gambar 4. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 10%



Gambar 5. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 15%



Gambar 6. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 20%



Gambar 7. Grafik hubungan antara tegangan-regangan beton variasi *Silica Fume* 25%

Modulus elastisitas merupakan suatu ukuran nilai yang menunjukkan kekakuan dan ketahanan beton untuk menahan deformasi (perubahan bentuk). Hal ini membantu untuk menganalisis perkembangan tegangan regangan pada elemen struktur yang sederhana dan untuk menentukan analisa tegangan-regangan, momen dan lendutan pada struktur yang lebih kompleks. Modulus elastisitas beton ditentukan dari hubungan antara tegangan-regangan beton pada daerah elastis. Penambahan *Silica Fume* secara efektif mampu menggantikan penggunaan semen pada kadar

tertentu. Sifat *Silica Fume* sebagai *pozzolan* dengan ukuran lebih kecil dari ukuran semen yang mampu mengisi rongga dalam beton, sehingga meningkatkan kerapatan dan mempengaruhi nilai modulus elastisitas.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan perhitungan data yang telah dilakukan pada beton bubuk reaktif mutu tinggi dan variasi silika fume untuk benda uji silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm, dengan pengujian saat beton berusia 28 hari, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi *silica fume* terhadap berat semen meningkatkan nilai kuat desak beton. Nilai kuat desak beton bubuk reaktif menggunakan variasi 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25% masing-masing adalah 65,68 MPa; 67,56 MPa; 68,32 MPa; 70,21 Mpa; 69,45 MPa dan 68,70 MPa, belum memenuhi syarat sebagai beton mutu sangat tinggi.
2. Peningkatan nilai kuat desak terjadi mulai variasi *silica fume* 5% hingga 15% kemudian turun pada *silica fume* 20%.
3. Variasi *silica fume* terhadap berat semen menaikkan nilai kuat desak beton. Nilai modulus elastisitas beton bubuk reaktif menggunakan variasi 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25% masing-masing adalah 34854,38 MPa; 36001,88 MPa; 36655,59 MPa; 36827,03 MPa; 34446,86 dan 35704,77 MPa.
4. Peningkatan nilai modulus elastisitas terjadi mulai variasi *silica fume* 10% dan 15% kemudian turun pada *silica fume* 20%. Nilai kuat desak optimum terjadi pada saat kadar *silica fume* 15% dengan nilai kuat desak sebesar 44487,68 MPa.

REKOMENDASI

Pada penelitian ini, diperlukan beberapa koreksi supaya penelitian selanjutnya dapat memperoleh output yang lebih baik. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Menambah jumlah benda uji pada setiap variasi *silica fume* agar data yang didapat semakin akurat.
2. Melakukan pengujian dalam umur beton yang lebih lama dari 28 hari, misalnya 56, 72, dan 90 hari untuk mendapatkan dampak penambahan *silica fume* terhadap kuat desak dan modulus elastisitas beton.
3. Melakukan penelitian lanjutan pada variasi penambahan kadar *silica fume* antara 15% dan 20% untuk mendapatkan nilai kuat desak dan modulus elastisitas optimum yang lebih tepat.
4. Mengatur pembacaan perubahan panjang (Δl) pada *dial* setiap kenaikan tekanan kurang dari 20 kN agar mendapat grafik tegangan-regangan yang lebih halus.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis ucapkan pada bapak pembimbing 1 (satu) dan 2 (dua) yaitu Wibowo, S.T., D.E.A. dan Dr. Eng. Halwan Alfisa Saifullah, S.T., M.T., serta orang tua dan sahabat-sahabat penulis yang telah mendukung pada penulisan skripsi ini dari awal hingga selesai tepat pada waktunya.

REFERENSI

- ASTM C. 1240, 1995, "Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar".
- ASTM C469, 2016, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center Point-loading)".
- ACI 363, 2002, "Report on fiber reinforced concrete".
- Kusumo, 2013, "Pengaruh Penggunaan Silica Fume, Fly Ash dan Superplasticizer pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri", *Jurnal Teknik Sipil*.
- Neville, A.M. dan Brooks, J.J., 1987, "Concrete Technology", Longman Scientific & Technical, New York.
- Partogi H. Simatupang, Judi K. Nasjono, Kresensia G. Mie, 2017, "Pengaruh Penambahan Silica Fume terhadap Kuat Tekan Reactive Powder Concrete", *Jurnal Teknik Sipil*.
- SNI 2847, 2019, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung".
- Tjokrodimuljo. K., 1996, "Teknologi Beton", Gajah Mada Press, Yogyakarta.