

Kajian Kuat Tarik Belah Pada Beton Bubuk Reaktif Dengan Pasir Kuarsa 30% dan Variasi *Fly Ash* sebagai Substitusi Parsial Semen

Dhimas Widya Taruna Wijaya*, Endah Safitri, Wibowo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Abstrak: Inovasi dalam teknologi beton telah mengalami perkembangan yang pesat dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu contoh perkembangan teknologi pada beton adalah menggunakan *fly ash* pada beton bubuk reaktif atau *Reactive Powder Concrete* (RPC). Penggunaan *fly ash* dalam campuran beton berperan sebagai substitusi parsial semen dan dalam upaya pemanfaatan limbah dari batu bara. Pada penelitian ini, komposisi beton bubuk reaktif menggunakan pasir kuarsa sebesar 30% dari berat agregat halus dan variasi komposisi *fly ash* sebesar 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; dan 25% dari berat semen dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh dari penggunaan *fly ash* pada setiap variasi terhadap nilai dari kekuatan tarik belah beton bubuk reaktif. Pada pembuatan beton bubuk reaktif menghilangkan penggunaan agregat kasar dan menggantinya dengan menggunakan agregat halus dengan tujuan untuk meningkatkan homogenitas pada campuran beton dan menghasilkan beton mutu tinggi. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan menggunakan 18 sampel benda uji. Benda uji yang digunakan untuk mendapatkan nilai kuat tarik belah berbentuk silinder dengan diameter 15 cm, dan tinggi 30 cm yang sudah mencapai umur beton 28 hari, dan pengujian dilakukan menggunakan mesin *compression testing machine* (CTM). Pada pengujian kuat tarik belah dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen didapatkan nilai berturut-turut sebesar 4,76 MPa; 4,90 MPa; 5,47 MPa; 5,19 MPa; 5,05 MPa; dan 4,36 MPa.

Kata Kunci: Beton Bubuk Reaktif, *Fly Ash*, Kuat Tarik Belah

DOI:

<https://doi.org/10.47134/scbmej.v1i2.2964>

*Correspondence: Dhimas Widya

Taruna Wijaya

Email: dhimastaruna38@gmail.com

Received: 01-02-2024

Accepted: 15-03-2024

Published: 30-04-2024



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Innovation in concrete technology has experienced rapid development in recent decades. One example of technological development in concrete is the use of fly ash in Reactive Powder Concrete (RPC). The use of fly ash in concrete mixtures acts as a partial substitution of cement and in an effort to utilize waste from coal. In this study, the composition of reactive powder concrete uses quartz sand at 30% of the weight of fine aggregate and variations in fly ash composition of 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; and 25% of the weight of cement with the aim of analyzing the effect of the use of fly ash in each variation on the value of the split tensile strength of reactive powder concrete. In the manufacture of reactive powder concrete, it eliminates the use of coarse aggregate and replaces it by using fine aggregate with the aim of increasing homogeneity in the concrete mixture and producing high quality concrete. This research uses an experimental method using 18 samples of test objects. The test specimens used to obtain the split tensile strength value are cylinders with a diameter of 15 cm, and a height of 30 cm that have reached the age of 28 days of concrete, and the test is carried out using a compression testing machine (CTM). In the split tensile strength test with 30% quartz sand and variations in the composition of fly ash as a partial substitution of cement obtained consecutive values of 4.76 MPa; 4.90 MPa; 5.47 MPa; 5.19 MPa; 5.05 MPa; and 4.36 MPa.

Kata Kunci: Reactive Powder Concrete, Fly Ash, Split Tensile Strength

Pendahuluan

Perkembangan teknologi dalam kehidupan beberapa dekade terakhir semakin maju dan modern. Dalam dunia konstruksi juga mengalami perkembangan, salah satunya dalam teknologi pembuatan beton (Karim, 2024; Singh, 2023; Tejas, 2023). Pembangunan infrastruktur didukung dengan adanya perkembangannya teknologi pada beton sebagai bentuk upaya memperbaiki indeks logistik, peningkatan konektivitas antar daerah, dan mendorong pemerataan pembangunan (Fode, 2023; Hakeem, 2023; Pratap, 2023). Dalam dunia konstruksi beton yang digunakan mengutamakan aspek kekuatan yang tinggi, kekakuan, dan durabilitas yang tinggi untuk mendapatkan konstruksi dengan kualitas yang baik dan memiliki daya tahan yang baik (Laxmi, 2023; Mahdi, 2022; Wang, 2022).

Beton bubuk reaktif atau *reactive powder concrete* (RPC) merupakan salah satu jenis beton mutu tinggi yang pertama kali dikembangkan oleh P. Richard dan M. Cheyrezy di Perancis pada tahun 1990. Beton bubuk reaktif dibuat dengan menghilangkan penggunaan agregat kasar dan menggantinya dengan menggunakan agregat halus dan menggunakan bahan penyusun berukuran nanometer seperti *portland cement*, pasir kuarsa, air, *superplasticizer* dan *steel fiber* (opsional) (Bheel, 2022; Chen, 2022; Yang, 2022).

Pada beton bubuk reaktif menghilangkan penggunaan agregat kasar dan menggantinya dengan menggunakan agregat halus yang berukuran nanometer memiliki tujuan untuk meningkatkan homogenitas antar partikel bahan material penyusun sehingga menghasilkan beton yang padat dan kualitas yang tinggi (Jain, 2022; Manikandan, 2022; P, 2022). Penggunaan faktor air semen (FAS) yang rendah dan tingkat gradasi antar partikel penyusun yang baik pada beton bubuk reaktif memiliki peran yang sangat penting untuk mendapatkan kualitas dan kekuatan beton yang tinggi.

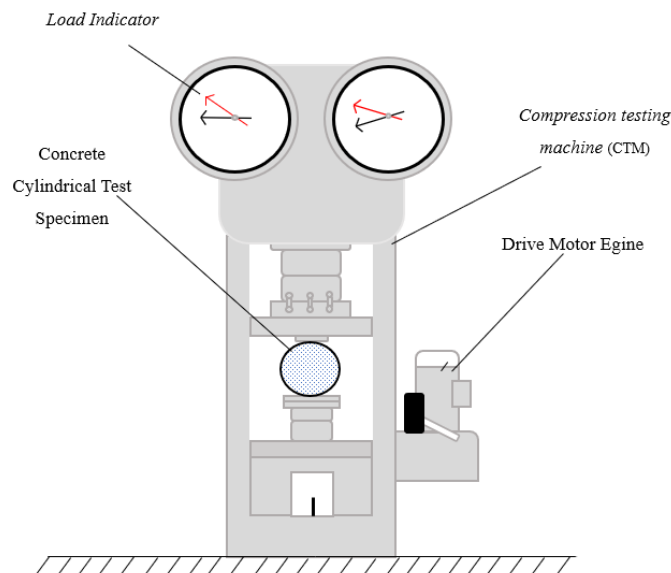
Pasir kuarsa (SiO_2) merupakan mineral alami yang terbentuk dari proses pengikisan batuan oleh udara dan air. Pasir kuarsa berbentuk heksagonal serta memiliki kemampuan untuk mengikat material adanya bahan pengikat lain. Komposisi pasir kuarsa SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , dan K_2O . Pasir kuarsa memiliki struktur kristal heksagonal yang terbuat dari silika trigonal terkrystalisasi (silikon dioksida, SiO_2), dengan skala kekerasan Mohs 7 dan densitas $2,65 \text{ g/cm}^3$ (Gayuh, 2018).

Fly ash merupakan limbah dari pembakaran batu bara dan memiliki sifat pozzolanik yang memungkinkan digunakan sebagai substitusi parsial semen dalam beton. *Fly ash* memiliki ukuran yang kecil sehingga dapat dijadikan sebagai *filler* dan mengurangi porositas pada beton. Proses pengikatan yang terjadi antara *fly ash* dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang merupakan produk dari hidrasi semen dan interaksi ini menghasilkan senyawa CSH baru yang berperan dalam peningkatan kekuatan beton dalam jangka panjang.

Serat baja yang digunakan pada bahan penyusun beton bubuk reaktif berfungsi sebagai tulangan mikro pengikat beton sehingga dapat meningkatkan kekuatan pada beton

bubuk reaktif. Serat baja pada campuran beton dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan tarik yang dimana pada dasarnya beton lemah akan kuat tarik, dengan penggunaan serat baja dapat meminimalisir kekurangan kuat tarik pada beton. Hal ini dikarenakan dalam perkembangan konstruksi yang menggunakan beton kekuatan tarik beton merupakan suatu aspek yang sangat penting.

Nilai kuat tarik belah beton merupakan nilai kuat tarik yang diperoleh tak langsung berasal dari benda uji beton yang berbentuk silinder dilakukan pengujian menggunakan *compression testing machine* dan diletakkan secara horizontal pada alat uji tekan. Pengujian kuat tarik belah beton dan kuat tekan beton memiliki perbedaan pada perletakan posisi benda uji pada alat uji tekan (Dewi,2010).



Gambar 1. Set Up Pengujian Kuat Tarik Belah

Perhitungan guna mendapatkan nilai kuat tarik belah pada beton diperoleh dengan menggunakan rumus berikut:

$$f'_t = \frac{2P}{\pi L D}$$

dengan,

f'_t = Kuat Tarik Belah Beton (MPa)

P = Beban Maksimum dari Alat uji (N)

L = Panjang/Tinggi Silinder (mm)

D = Diameter Silinder (mm)

Metode

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Pengujian kuat tarik belah *reactive powder concrete* (RPC) dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* yang digunakan dalam pembuatan benda uji antara lain 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari

komposisi total berat semen, dan nilai FAS 0,19 dengan kadar *superplasticizer* 1,9%. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm yang berjumlah 18 buah dan pada setiap variasi menggunakan 3 buah sampel benda uji. Pengujian pada benda uji dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari dan dilakukan pengujian menggunakan *compression testing machine* (CTM) di Laboratorium Bahan dan Struktur Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.

Pengujian Bahan Penyusun Beton Bubuk Reaktif Pasir Kuarsa 30% dan Variasi Komposisi Fly Ash

Pengujian pada bahan-bahan penyusun beton bubuk reaktif dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui mengenai bahan yang digunakan sudah sesuai dengan standar yang telah ditentukan, pengujian yang perlu dilakukan pengujian terhadap pasir alam, pasir kuarsa, *fly ash*, yang merupakan bahan penyusun beton bubuk reaktif. Pasir kuarsa dan pasir alam memiliki pengujian yang sama yaitu; pengujian kandungan zat organik, *specific gravity*, kandungan lumpur, modulus kehalusan yang dilakukan pengujian di Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi S1 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, sementara untuk pengujian *fly ash* bertujuan untuk mengetahui komposisi zat kimia yang terkandung pada *fly ash* berupa pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) yang dilakukan di Laboratorium Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Diponegoro.

Pengujian Beton Segar

Beton bubuk reaktif yang masih segar perlu dilakukan pengujian berupa *slump flow* yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton bubuk reaktif segar dalam mengalir dan mengisi ruang (*filling ability*).

Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Pengujian ini menggunakan acuan SNI 2491-2014. Kuat tarik belah beton merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan kekuatan tarik tidak langsung pada beton. Pengujian ini dilakukan dengan cara meletakkan benda uji secara mendatar horizontal atau sejajar dengan pelat penekan dari alat *compression testing machine* yang kemudian plat akan menekan dan memberi beban ke benda uji yang berbentuk silinder hingga terbelah menjadi 2 bagian. Setelah benda uji terbelah menunjukkan beban yang dapat ditahan oleh benda uji dan selanjutnya mencatat angka yang ditunjukkan pada jarum *load indicator*.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton Bubuk Reaktif Pasir Kuarsa 30% dan Variasi Komposisi *Fly Ash*

Dalam pembuatan beton bubuk reaktif ini menggunakan agregat halus berupa pasir kuarsa dan pasir alam kemudian dilakukan pengujian modulus kehalusan, kandungan zat organik, *specific gravity* yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Pasir Alam dan Pasir Kuarsa

Jenis Pengujian	Pasir Alam	Pasir Kuarsa	Standar	Hasil
Absorbsion	4,34%	1,97%	-	-
Apparent Specific Gravity	2,89	2,66	-	-
Bulk Specific Gravity	2,57	2,53	-	-
Bulk Specific Gravity SSD	2,58	1,10%	2,5 – 2,7 (ASTM C. 128-79)	Syarat Terpenuhi
Sludge Content	1,70%	1,10%	< 5% (PBI 1971, ASTM C. 117)	Syarat Terpenuhi
Organic Content	Dark Yellow	Light Yellow	Reddish Yellow (PBI 1971, ASTM C.40)	Syarat Terpenuhi
Modulus of Smoothness	2,54	3,42	1,5 < MH < 3,8 (SII 0052 – 80)	Syarat Terpenuhi

Pada pengujian *fly ash* melalui uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) diperoleh hasil yang terkandung zat kimia berupa CaO sebesar 7,33%. Menurut pedoman dari ASTM C-618-96, *fly ash* yang digunakan sebagai bahan penyusun beton bubuk reaktif ini dikategorikan *fly ash* tipe F dikarenakan kadar senyawa CaO di bawah 10%.

Rancang Campur RPC

Pembuatan beton bubuk reaktif dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen menggunakan rancang campur (*mix design*) yang mengacu kepada rancang campur penelitian Richard dan Cheyrezy (1995). Beton bubuk reaktif pada penelitian ini menggunakan variasi komposisi *fly ash* yang digunakan dalam pembuatan benda uji antara lain 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari komposisi total berat semen, dan nilai FAS 0,19 dengan kadar superplasticizer 1,9%. *Mix design* beton bubuk reaktif yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. *Mix Design*

Variasi <i>Fly Ash</i>	Pasir Alam (kg/m ³)	Pasir Kuarsa (kg/m ³)	<i>Steel Fiber</i> (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	<i>Fly Ash</i> (kg/m ³)	Superplasticizer (lt/m ³)	Air (lt)
0%	920,93	394,70	10,66	123,93	0	7,26	141,00
5%	920,93	394,70	10,66	117,73	6,19	7,26	141,00
10%	920,93	394,70	10,66	111,53	14,09	7,26	141,00
15%	920,93	394,70	10,66	105,34	18,58	7,26	141,00
20%	920,93	394,70	10,66	99,14	24,78	7,26	141,00
25%	920,93	394,70	10,66	92,94	30,98	7,26	141,00

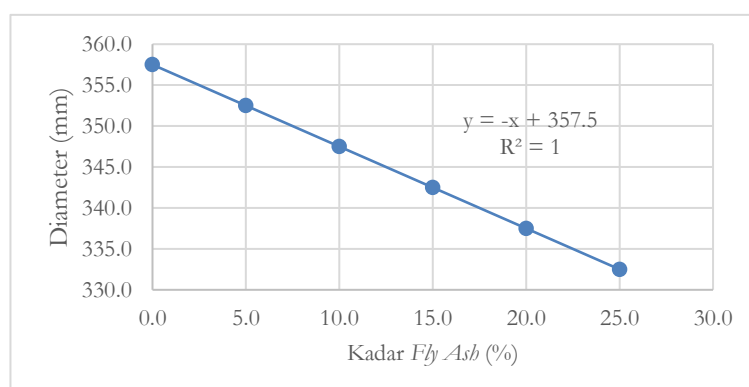
Hasil Uji Beton Segar

Beton RPC segar dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen perlu dilakukan pengujian berupa *slump flow* yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton bubuk reaktif segar dalam mengalir dan mengisi ruang (*filling ability*). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Beton Segar pada Beton Bubuk Reaktif dengan pasir kuarsa 30% dan variasi *fly ash*

Variasi <i>Fly Ash</i>	<i>Slump Flow Test</i>			
	D1 (mm)	D2 (mm)	D rata-rata (mm)	T rata-rata (detik)
0%	360,00	355,00	357,50	15,00
5%	355,00	350,00	352,00	14,80
10%	350,00	345,00	347,50	14,60
15%	345,00	340,00	342,50	14,30
20%	340,00	335,00	337,50	14,10
25%	335,00	330,00	332,50	13,80

Berdasarkan dari Tabel 3, dapat digambarkan dalam grafik hubungan dari pengujian *slump flow* dengan variasi komposisi *fly ash* dapat dilihat pada Gambar 2

Gambar 2. Grafik hubungan antara hasil pengujian *slump flow* dengan variasi komposisi *fly ash*

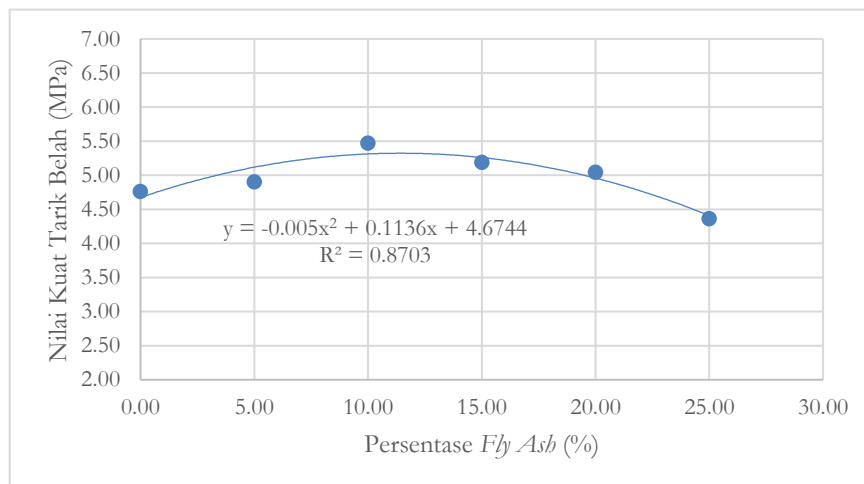
Berdasarkan Gambar 2 dapat ditarik kesimpulan bahwasannya dengan penambahan kadar *fly ash* pada campuran beton RPC dengan pasir kuarsa 30% menyebabkan penurunan diameter dan waktu alir dari hasil *slump flow test*. Penurunan disebabkan karena *fly ash* memiliki sifat menyerap air lebih banyak dibandingkan dengan semen sehingga terjadi penurunan *workability*. Penurunan diameter masih dalam rentang kontrol antara 290 mm sampai dengan 400 mm. Pada penelitian ini didasari dengan penelitian yang dilakukan oleh azizah dkk pada tahun 2022.

Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Bubuk Reaktif dengan Pasir Kuarsa 30% dan Variasi Komposisi Fly Ash Sebagai Substitusi Parsial Semen

Pengujian dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai kuat tarik pada setiap variasi komposisi *fly ash*. Nilai kuat tarik belah didapatkan dengan menggunakan mesin *compression testing machine* dengan benda uji berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm dan dengan benda uji yang telah berumur 28 hari. Hasil dari pengujian kuat tarik belah beton bubuk reaktif dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 4, sementara untuk grafik dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton RPC dengan Pasir Kuarsa 30% dan Variasi Fly Ash

Variasi Fly Ash	Kode	P (N)	f'ct (MPa)	f'ct rata-rata (MPa)	Perubahan Nilai
0%	I	340000	4,81	4,76	-
	II	330000	4,67		
	III	340000	4,81		
5%	I	350000	4,95	4,90	2,97
	II	355000	4,88		
	III	345000	4,88		
10%	I	390000	5,52	5,47	14,85
	II	390000	5,52		
	III	380000	5,38		
15%	I	370000	5,23	5,19	8,91
	II	365000	5,16		
	III	370000	5,16		
20%	I	360000	5,09	5,05	5,94
	II	355000	5,02		
	III	360000	5,02		
25%	I	300000	4,39	4,36	-8,42
	II	310000	4,39		
	III	320000	4,31		



Gambar 3. Grafik hubungan variasi komposisi *fly ash* pada beton RPC dengan pasir kuarsa 30% terhadap kuat tarik belah beton

Berdasarkan Tabel 4 dan grafik pada Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa beton bubuk reaktif dengan pasir kuarsa 30% dengan bahan tambah *fly ash* sebagai substitusi parsial semen dengan variasi kadar 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen mengalami kenaikan kekuatan tarik belah sampai pada variasi 10% kemudian pada variasi 15%, 20%, dan 25% mengalami penurunan kuat tarik belah. Nilai dari kuat tarik belah secara berurutan sebesar 4,76 MPa, 4,90 MPa, 5,59 MPa, 5,19 MPa, 5,05 MPa, dan 4,36 MPa. Perubahan nilai terhadap variasi fly ash 0% pada setiap kenaikan kadar fly ash mengalami kenaikan dan penurunan berturut turut sebesar 2,97%; 14,85%; 8,91%; 5,94%; dan -8,42%.

Dari hasil pengujian didapatkan nilai kuat tarik belah pada beton yang menggunakan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen dapat meningkatkan nilai kuat tarik belah beton dibandingkan dengan beton yang tidak menggunakan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen. Hal ini ditunjukkan dengan adanya persentase kenaikan dan penurunan dari nilai kuat tarik belah beton secara berurutan dengan ditunjukkan bahwa nilai tertinggi pada pengujian ini didapatkan pada variasi persentase *fly ash* pada 10%.

Simpulan

Berdasarkan pada hasil pengujian, pengolahan data, dan evaluasi yang telah dilakukan pada kajian kuat tarik belah dan *modulus of rupture* pada beton bubuk reaktif dengan pasir kuarsa 30% dan variasi komposisi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen, dimana benda uji yang digunakan yaitu benda uji silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm dan pengujian pada benda uji balok dengan panjang 40 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm yang dilakukan pengujian setelah benda uji mencapai umur 28 hari, didapatkan kesimpulan bahwasanya variasi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen berdampak pada adanya kenaikan nilai kuat tarik belah pada kadar *fly ash* 5% dan 10%

kemudian mengalami penurunan nilai pada kadar 15%, 20%, dan 25%. Pengujian nilai kuat tarik belah beton RPC dengan pasir kuarsa 30% dan variasi kadar *fly ash* 0%; 5%; 10%; 15%; 20%; dan 25% dari semen berturut-turut adalah 4,76 MPa, 4,90 MPa, 5,47 MPa, 5,19 MPa, 5,05 MPa, dan 4,36 MPa. Pada pengujian kuat tarik belah beton RPC variasi *fly ash* terdapat nilai maksimal yaitu pada variasi *fly ash* 10%.

Rekomendasi yang diberikan adalah melakukan penelitian dengan menambah variasi umur benda uji lebih dari 28 hari guna mengetahui kekuatan maksimum dari beton RPC dengan pasir kuarsa 30% dan variasi *fly ash* sebagai substitusi parsial semen dikarenakan *fly ash* memiliki sifat *setting time* yang lebih lama dibanding dengan beton konvensional. Menambah jumlah dari benda uji pada setiap variasi *fly ash* pada pengujian agar data yang didapat lebih akurat.

Daftar Pustaka

- 201, A. C. (2008). Aci Manual Of Concrete Practice 2008 Part 1. ACI 201.1R-92. Guide for making a condition survey of concrete in service.
- ASTM.C.150. (2002). Standart Specifications for Portland Cement.
- ASTM.C. 494. (2019). Standart Specifications for Chemical Admixtures for Concrete.
- Azizah, Tarisa., (2022). Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Bubuk Reaktif Mutu Tinggi dengan Silica Fume 15% dan Variasi Pasir Kuarsa, Skripsi, S1 Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.
- Badan Standarisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Bheel, N. (2022). Experimental study on fresh, mechanical properties and embodied carbon of concrete blended with sugarcane bagasse ash, metakaolin, and millet husk ash as ternary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4), 5224–5239. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15954-4>
- Chen, Y. (2022). Mechanical anisotropy evolution of 3D-printed alkali-activated materials with different GGBFS/FA combinations. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104126>
- Dewi. R ,T. (2010). Kajian Kuat Tarik Belah dan Modulus of Rupture Beton Normal dengan Bahan Tambah Metakaolin dan Serat Alumunium, Skripsi, Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.
- Fadhil, B.D., 2024. Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Bubuk Reaktif Mutu Tinggi dengan Pasir Kuarsa 30% dan Komposisi Variasi *Fly Ash* sebagai Subtitusi Parsial Semen, Skripsi, S1 Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.
- Fode, T. A. (2023). Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite – Comprehensive review. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17924>
- Gayuh. B ,R. (2018). Pengaruh Penggunaan Pasir Kuarsa Pada Laston AC-WC Sebagai Pengganti Agregat Halus

- Hakeem, I. Y. (2023). Properties of sustainable high-strength concrete containing large quantities of industrial wastes, nanosilica and recycled aggregates. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 7444–7461. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.050>
- Jain, A. (2022). Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste. *Construction and Building Materials*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125480>
- Karim, R. (2024). Synergistic effects of supplementary cementitious materials and compressive strength prediction of concrete using machine learning algorithms with SHAP and PDP analyses. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02828>
- Laxmi, G. (2023). Effect of hooked end steel fibers on strength and durability properties of ambient cured geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02122>
- Mahdi, S. N. (2022). Strength and durability properties of geopolymer paver blocks made with fly ash and brick kiln rice husk ash. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00800>
- Manikandan, P. (2022). Influence of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Precursor in Synthesizing Ternary Blended Alkali-Activated Binder. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01533-2>
- P, J. (2022). Effect of nano titanium di oxide on mechanical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag based geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105235>
- Pratap, B. (2023). Exploring the potential of neural network in assessing mechanical properties of geopolymer concrete incorporating fly ash and phosphogypsum in pavement applications. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(8), 3575–3589. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00735-w>
- Richard, P., and Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 25. No.7. pp. 1501-151.
- Singh, R. P. (2023). Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131168>
- Tejas, S. (2023). Assessment of mechanical and durability properties of composite cement-based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131620>
- Wang, Y. (2022). Experimental study on static and dynamic properties of fly ash-slag based strain hardening geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104481>
- Yang, D. (2022). Potential use of waste eggshells in cement-based materials: A bibliographic analysis and review of the material properties. *Construction and Building Materials*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128143>