

KAJIAN KUAT TEKAN BETON BUBUK REAKTIF MUTU TINGGI DENGAN SILICA FUME 15% DAN VARIASI PASIR KUARSA

Wibowo^{1)*}, Endah Safitri²⁾, Tarisa Azizah³⁾

^{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 36A, Kentingan, Surakarta 57126, Telp (0271)647069, Fax 662118

Email: wibowotsipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

Concrete is required to have high compressive strength, good performance, resistance in all conditions, environmentally friendly, and efficient. Reactive powder concrete is one of the concrete innovations that does not use coarse aggregate as its constituent component. Coarse aggregate is replaced by fine aggregate which can increase the homogeneity of the mixture, the density of the concrete, and produce high strength concrete. This research purposed to determine the effect of variations of the quartz sand on the compressive strength on high strength reactive powder concrete. Experimental is the method used in this study. The mixed design used quartz sand variation 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; and 40%. The samples are cylindrical concrete with a diameter of 7,5 cm and a height of 15 cm. Compressive strength test using a Compression Testing Machine. The test was carried out when the samples was 28 days old. The samples qualified as high strength concrete because the compressive strength of concrete exceeds 41,4 MPa. The result of compressive strength of reactive powder concrete with variations of quartz sand 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; and 40% each of 69,18 MPa; 75,18 MPa; 76,78 MPa; 79,98 MPa; 85,58 MPa; 82,78 MPa; and 77,98 MPa. The maximum value of compressive strength of reactive powder concrete was obtained at 30% quartz sand content of the aggregate weight.

Keywords: compressive strength, high strength concrete, modulus of elasticity, quartz sand, reactive powder concrete

Abstrak

Beton dituntut untuk mempunyai kuat tekan yang tinggi dan kinerja yang baik, tahan dalam segala kondisi, ramah lingkungan, dan efisien. Beton bubuk reaktif merupakan salah satu inovasi beton yang tidak menggunakan agregat kasar sebagai komponen penyusunnya. Agregat kasar digantikan oleh agregat halus yang dapat meningkatkan homogenitas campuran, kepadatan beton, dan menghasilkan beton mutu tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi pasir kuarsa terhadap nilai kuat tekan beton bubuk reaktif mutu tinggi. Eksperimental merupakan metode pada penelitian ini. Rancangan campuran beton menggunakan variasi pasir kuarsa 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; dan 40%. Benda uji adalah silinder diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Uji kuat tekan beton menggunakan *Compression Testing Machine*. Pengujian dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari. Benda uji memenuhi syarat sebagai beton mutu tinggi karena hasil kuat tekannya melebihi 41,4 MPa. Hasil pengujian kuat tekan beton bubuk reaktif dengan variasi pasir kuarsa 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; dan 40% masing-masing sebesar 69,18 MPa; 75,18 MPa; 76,78 MPa; 79,98 MPa; 85,58 MPa; 82,78 MPa; dan 77,98 MPa. Nilai maksimum kuat tekan beton bubuk reaktif didapatkan pada kadar pasir kuarsa 30% dari berat agregat.

Kata Kunci: beton bubuk reaktif, beton mutu tinggi, kuat tekan, modulus elastisitas, pasir kuarsa

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia pada berbagai sektor sedang giat dilaksanakan. Terdapat banyak Proyek Strategis Nasional (PSN) yang pekerjaannya harus segera diselesaikan untuk menunjang mobilisasi antar daerah, antar kota, maupun antar provinsi dalam upaya peningkatan kesejahteraan masyarakat. Banyaknya konstruksi yang akan dibangun dan tuntutan untuk hasil konstruksi yang maksimal, maka dibutuhkan inovasi struktur yang akan menunjang konstruksi, salah satunya yaitu beton.

Beton banyak dipilih sebagai bahan konstruksi karena material penyusun mudah ditemukan, bisa dibentuk sesuai dengan keinginan dan kebutuhan, memiliki kuat tekan tinggi, serta mudah dalam perawatannya. Beton dituntut untuk mempunyai kuat tekan yang tinggi, memiliki kinerja yang baik, tahan dalam segala kondisi, bahan material yang ramah lingkungan, serta efisien.

Salah satu inovasi beton adalah *Reactive Powder Concrete* (RPC). RPC tidak menggunakan agregat kasar sebagai komponen penyusunnya dan digantikan dengan penggunaan material berukuran nano (Tam dkk., 2018; Vigneshwari dkk, 2018). Bahan penyusun dalam beton RPC adalah agregat halus, pasir kuarsa, air, *silica fume*, serat baja, *superplasticizer*, dan semen (Abuodeh dkk., 2020). Penghilangan agregat kasar dalam matriks beton akan membuat matriks beton bersifat homogen dan padat, sehingga hasil kuat tekan beton meningkat. Perbandingan kadar air

semen atau *w/c ratio* dalam campuran beton merupakan salah satu faktor penentu nilai kuat tekan beton akhir. Faktor yang mempengaruhi tingginya nilai kuat tekan beton adalah *w/c ratio* rendah dan gradasi agregat halus berukuran nano yang dapat meminimalkan rongga antara partikel sehingga terbentuk beton yang sangat padat (Alkhaly, 2013; Zhang dkk, 2019).

Kuat tekan beton merupakan kekuatan yang dimiliki beton untuk menahan beban yang diberikan hingga beton mengalami retak dan hancur. Nilai kuat tekan beton menjadi parameter utama beton untuk dapat mencapai kestabilan dan mutu yang diharapkan. Beton RPC merupakan jenis beton yang dapat menghasilkan beton mutu ultra tinggi yang cocok digunakan sebagai bahan konstruksi pada masa kini (Peng dkk, 2015; Mostofinejad dkk, 2016).

LANDASAN TEORI

Beton merupakan campuran semen *portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan. Berdasarkan SNI 03-6468-2000, beton mutu tinggi (*high strength concrete*) adalah beton yang mempunyai nilai kuat tekan lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

Reactive Powder Concrete (RPC) adalah beton yang menggunakan material berukuran mikro seperti pasir kuarsa dan menghilangkan agregat kasar agar dapat mengisi pori pada beton, sehingga syarat beton mutu tinggi terpenuhi. Pengurangan *w/c* hingga $< 0,25$ dan penambahan *superplasticizer* dapat meningkatkan kuat lentur dan kuat tekan beton RPC (Kannan dkk., 2020).

Beton RPC termasuk *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) yang menghasilkan beton mutu tinggi dan memperbaiki daktilitas dengan teknik perbaikan mikrostruktur. Kuat tekan beton bubuk reaktif dapat mencapai 150 MPa hingga 230 MPa (Ahmed dkk., 2021).

Beberapa teknik yang dapat dilakukan agar mencapai sifat mekanikal yang baik dalam penyusunan beton bubuk reaktif antara lain (Sarika and John, 2015):

1. Menghilangkan agregat kasar untuk meningkatkan homogenitas beton.
2. *Metal fibre* atau *steel tube* digunakan untuk meningkatkan daktilitas campuran.
3. *Superplasticizer* bermutu tinggi dan *silica fume* halus dalam jumlah banyak, serta penambahan pasir kuarsa untuk mencapai rasio air yang rendah untuk mengurangi porositas dan meningkatkan kuat tekan beton.
4. Tekanan dapat dilakukan sebelum dan selama pengujian untuk meningkatkan kekompakan beton.
5. Mikro-*silica* dengan bahan aktif yang tinggi dan atau *silica* yang diendapkan dapat dicampur ke dalam *cementitious* untuk mempercepat hidrasi semen dan mengkatalisis efek reaksi dari pozzolan yang kuat.
6. *Steam curing* dapat dilakukan untuk mendapatkan kuat tekan yang lebih tinggi.

Beton bubuk reaktif menggunakan agregat berukuran antara 150 mm – 600 mm untuk dapat mencapai kekompakan dan homogenitas yang baik, serta meminimalkan pori. Salah satu agregat yang dapat digunakan adalah pasir kuarsa yang dapat mengurangi porositas campuran dan dapat meningkatkan kuat tekan beton akhir (Mayhoub dkk., 2021) .

METODE PENELITIAN

Eksperimental merupakan metode yang digunakan pada penelitian ini. Benda uji adalah silinder diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm berjumlah 21 buah. Uji kuat tekan beton dilakukan saat umur beton 28 hari. Pengujian bertempat di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta. Langkah penelitian ini adalah pengujian bahan penyusun beton, pembuatan benda uji, *curing*, dan pengujian kuat tekan beton bubuk reaktif. Proses *curing* beton pada penelitian ini adalah merendam beton dalam bak air setelah beton mulai mengeras. Benda uji tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Benda uji kuat tekan beton RPC

No.	Silica Fume (%)	Pasir Kuarsa (%)	Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah Benda Uji
1	15	0	RPC – PK0% – KT	28	3
2	15	15	RPC – PK15% – KT	28	3
3	15	20	RPC – PK20% – KT	28	3
4	15	25	RPC – PK25% – KT	28	3
5	15	30	RPC – PK30% – KT	28	3
6	15	35	RPC – PK35% – KT	28	3
7	15	40	RPC – PK40% – KT	28	3
Jumlah					21

*Catatan: Kadar *silica fume* dibandingkan dari berat sementitus. Kadar pasir kuarsa dibandingkan dari total berat agregat.

Pengujian Bahan Penyusun Beton

Pengujian yang dilakukan untuk pasir dan pasir kuarsa adalah uji gradasi, uji kadar zat organik, uji kandungan lumpur, dan uji *specific gravity*. *Silica fume* dianalisis menggunakan teknik *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kandungan senyawa pada *silica fume*.

Pengujian Beton Segar

Pengujian pada beton segar adalah uji *flow table*. Pengujian bertujuan untuk mengetahui tingkat kemudahan pengerjaan dan parameter *filling ability* pada beton bubuk reaktif. Parameter *filling ability* berpengaruh terhadap *workability* campuran beton, yaitu kemudahan dalam proses pengadukan, pengangkatan, penuangan, dan pemadatan (Lai dkk, 2018; Shreenath dkk, 2022; Ge dkk, 2023).

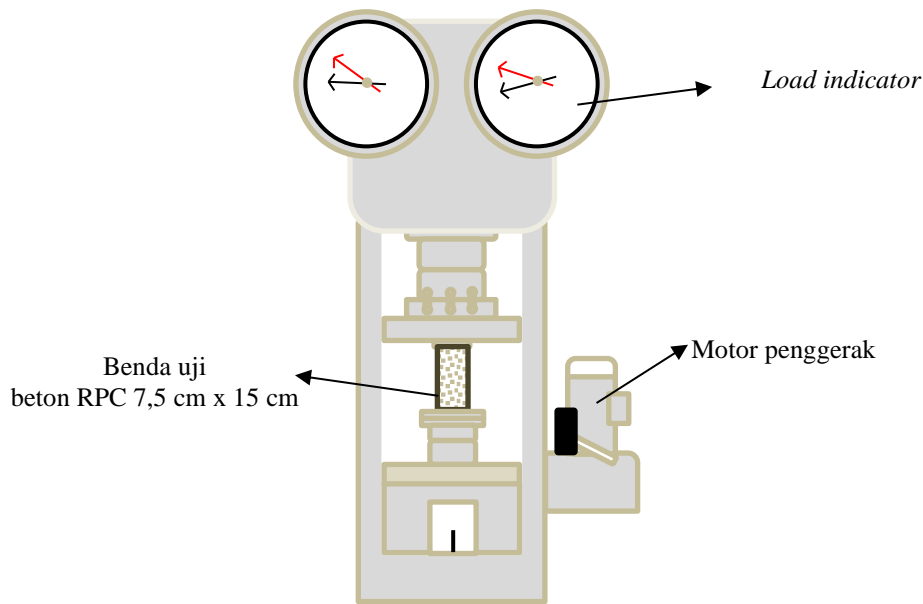
Pengujian Kuat Tekan Beton Bubuk Reaktif

Standar pengujian terdapat pada SNI 1974-2011 BAB 6 halaman 7. Alat untuk uji kuat tekan beton bubuk reaktif adalah *Compression Testing Machine* (CTM) saat umur 28 hari. Beton dikeluarkan dari bak *curing* 2 hari sebelum dilakukan pengujian. Meletakkan beton yang tidak *di capping* pada alat CTM dan di atasnya diberikan pelat baja agar beban dapat terdistribusi secara merata. Kecepatan yang digunakan pada CTM sebesar 1,5 mm/s. Hasil yang didapatkan dari pengujian kuat tekan beton adalah luas penampang dan gaya tekan yang dipikul beton bubuk reaktif. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk mendapatkan kuat tekan maksimum beton bubuk reaktif.

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

Keterangan:

- $f'c$ = kuat tekan beton (MPa)
- P = gaya tekan aksial (N)
- A = Luas penampang (mm²)



Gambar 1. *Set up* pengujian kuat tekan beton RPC

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton

Pengujian gradasi, kadar zat organik, kandungan lumpur, dan *specific gravity* merupakan pengujian yang dilakukan untuk pasir dan pasir kuarsa. Hasil dari pengujian pasir dan pasir kuarsa dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian pasir dan pasir kuarsa

Jenis Pengujian	Pasir	Pasir Kuarsa	Standar	Hasil
<i>Absorbion</i>	3,46%	2,19%	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,79	2,65	-	-
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,54	2,50	-	-
<i>Bulk Specific Gravity SSD</i>	2,63	2,56	2,5 – 2,7 ASTM C. 128-79	Memenuhi Syarat
Kandungan Lumpur	2,30%	0,70%	< 5% PBI 1971, ASTM C. 117	Memenuhi Syarat
Kandungan Zat Organik	Kuning Kemerahan	Kuning Muda	PBI 1971, ASTM C. 40	Memenuhi Syarat
Modulus Kehalusan	2,54	3,43	2,3 – 3,1 ASTM C. 33-97	Memenuhi Syarat

Syarat kandungan SiO₂ pada *silica fume* sesuai dengan ASTM C-1240 adalah > 85%. Kandungan SiO₂ pada *silica fume* untuk bahan penyusun beton didapatkan nilai 85,76%. Sehingga, *silica fume* sudah memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton.

Mix Design Reactive Powder Concrete

Mix design RPC *silica fume* 15% dengan varisasi pasir kuarsa dibuat berdasarkan penelitian P. Richard dan M. Cheyrezy (1995). FAS yang digunakan adalah 19% dan *superplasticizer* sebesar 1,9% dari berat *binder*. *Mix design* RPC terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. *Mix design* RPC 1 m³ beton

Benda Uji	Semen (kg/m ³)	<i>Silica Fume</i> (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Pasir Kuarsa (kg/m ³)	<i>Steel Fiber</i> (kg/m ³)	<i>Superplasticizer</i> (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
RPC – PK0% – KT	680	120	1430,40	0	11,60	7,79	152,00
RPC – PK15% – KT	680	120	1215,84	214,56	11,60	7,79	152,00
RPC – PK20% – KT	680	120	1144,32	286,08	11,60	7,79	152,00
RPC – PK25% – KT	680	120	1072,80	357,60	11,60	7,79	152,00
RPC – PK30% – KT	680	120	1001,28	429,12	11,60	7,79	152,00
RPC – PK35% – KT	680	120	929,76	500,64	11,60	7,79	152,00
RPC – PK40% – KT	680	120	858,24	572,16	11,60	7,79	152,00

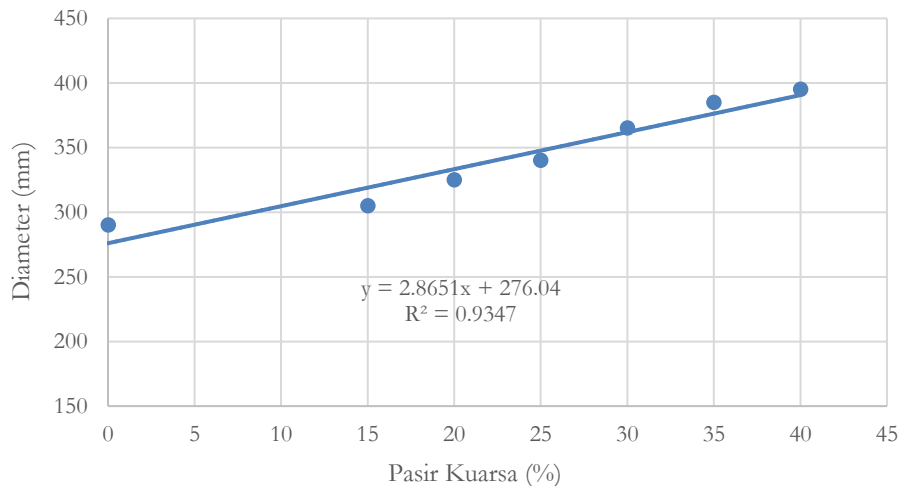
Hasil Pengujian Beton Segar

Hasil pengujian *flow table* beton bubuk reaktif dengan *silica fume* 15% dan variasi pasir kuarsa 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; dan 40% terdapat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian *flow table* beton RPC

Benda Uji	D1 (mm)	D2 (mm)	D _{rata-rata} (mm)	T _{rata-rata} (detik)
RPC – PK0% – KT	290	290	290	6,28
RPC – PK15% – KT	300	310	305	7,24
RPC – PK20% – KT	330	320	325	7,90
RPC – PK25% – KT	340	340	340	8,89
RPC – PK30% – KT	360	370	365	9,12
RPC – PK35% – KT	380	390	385	9,50
RPC – PK40% – KT	400	390	395	10,11

Berdasarkan Tabel 4, dapat dibuat grafik hubungan variasi pasir kuarsa dengan diameter campuran yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik hubungan rata-rata diameter *flow table* beton RPC terhadap variasi pasir kuarsa

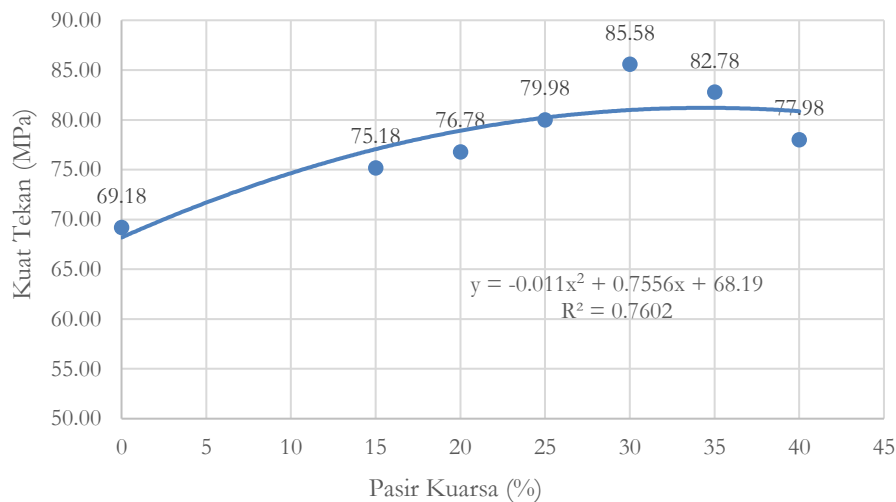
Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 2, hasil pengujian parameter beton segar, terlihat bahwa beton bubuk reaktif *silica fume* 15% dengan variasi pasir kuarsa pada penelitian ini memiliki nilai *slump flow* yang rendah. Selanjutnya, dari Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai dari *flow table test* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya prosentase penggantian pasir halus dengan pasir kuarsa. Peningkatan tingkat konsistensi ini disebabkan oleh kecilnya *water content* yang digunakan dalam campuran dan kemampuan campuran dalam menyerap air. Nilai *absorbsion* pasir halus lebih tinggi dibanding dengan pasir kuarsa, hal ini menyebabkan semakin besar kadar pasir kuarsa maka kemampuan campuran untuk menyerap air berkurang. Semakin besar prosentase pasir kuarsa, maka tingkat penyebaran *flow table* semakin besar. Pengujian *flow table* menunjukkan bahwa penggunaan variasi pasir kuarsa memengaruhi *workability* beton bubuk reaktif.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton bubuk reaktif dengan variasi pasir kuarsa 0%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; dan 40% terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton RPC

Benda Uji	Kode	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
RPC – PK0% – KT	A	69,58	69,18
	B	68,38	
	C	69,58	
RPC – PK0% – KT	A	75,58	75,18
	B	74,38	
	C	75,58	
RPC – PK0% – KT	A	76,78	76,78
	B	77,98	
	C	75,58	
RPC – PK0% – KT	A	79,18	79,98
	B	80,38	
	C	30,38	
RPC – PK0% – KT	A	86,38	85,58
	B	85,18	
	C	85,18	
RPC – PK0% – KT	A	81,58	82,78
	B	83,98	
	C	82,78	
RPC – PK0% – KT	A	79,18	77,98
	B	16,78	
	C	77,98	



Gambar 3. Grafik hubungan kuat tekan beton RPC dengan variasi pasir kuarsa

Berdasarkan Tabel 5 kuat tekan beton bubuk reaktif seluruh benda uji melebihi 41,4 MPa. Berdasarkan SNI 03-6468-2000, seluruh benda uji memenuhi syarat sebagai beton mutu tinggi. Nilai kuat tekan beton bubuk reaktif maksimum terjadi pada saat variasi pasir kuarsa 30% sebesar 85,58 MPa. Berdasarkan hasil analisis Gambar 3, terbentuk garis regresi polinomial dan dapat dihitung kuat tekan optimum beton RPC. Kuat tekan beton RPC optimum terjadi pada penambahan pasir kuarsa 34,35% sebesar 81,17 MPa. Pengaruh variasi pasir kuarsa terhadap kuat tekan beton bubuk reaktif terdapat pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengaruh variasi pasir kuarsa terhadap nilai kuat tekan beton RPC

Benda Uji	f _c (MPa)	Prosentase Perubahan f _c terhadap PK0% (%)
RPC – PK0% – KT	69,18	0,00
RPC – PK15% – KT	75,18	8,67
RPC – PK20% – KT	76,78	10,98
RPC – PK25% – KT	79,98	15,61
RPC – PK30% – KT	85,58	23,70
RPC – PK35% – KT	82,78	19,65
RPC – PK40% – KT	77,98	12,72

Penambahan kadar pasir kuarsa dalam beton bubuk reaktif dapat menyelimuti bagian permukaan agregat dalam campuran beton yang membantu memberikan *interfacial transition zone* yang sangat kompak tanpa pori yang terlihat jelas. Pasir kuarsa mengandung senyawa *silica* tinggi yang merupakan material pozzolan yang dapat mengurangi hidrasi antara semen dan air ketika proses pencampuran beton. Pasir kuarsa merupakan agregat yang baik untuk menggantikan pasir halus dalam campuran beton karena dapat mengisi antarmuka agregat yang dapat mengurangi porositas awal campuran yang menyebabkan pori-pori renggang dan menghasilkan permeabilitas yang rendah, sehingga dapat meningkatkan kuat tekan beton akhir.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan analisis data yang telah dilakukan pada beton bubuk reaktif dengan variasi pasir kuarsa, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Beton bubuk reaktif sudah memenuhi syarat sebagai *high strength concrete*, yaitu kuat tekan lebih dari 41,4 MPa.
2. Variasi pasir kuarsa terhadap berat agregat dapat meningkatkan nilai kuat tekan beton bubuk reaktif. Nilai kuat tekan beton dengan variasi pasir kuarsa 0%; 15%, 20%, 25%, 30%, 35%; dan 40% masing-masing adalah 69,18 MPa; 76,78 MPa; 79,98 MPa; 85,58 MPa; 82,78 MPa; dan 77,98 MPa.
3. Nilai kuat tekan beton bubuk reaktif maksimum terjadi pada saat kadar variasi pasir kuarsa 30% sebesar 85,58 MPa.
4. Penambahan kadar pasir kuarsa akan meningkatkan kuat tekan beton bubuk reaktif hingga 23,70% dari beton tanpa pasir kuarsa.

REKOMENDASI

Menindaklanjuti dari penelitian ini, perlu dilakukan beberapa perbaikan. Saran untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Menambah benda uji untuk setiap variasi agar didapatkan hasil yang lebih akurat dan minim penyimpangan data.
2. Menggunakan *steel fiber* pada campuran beton agar tidak terjadi ledakan saat pengujian berlangsung karena kuat tekan beton yang tinggi.
3. Memperhatikan besarnya tegangan yang diberikan pada benda uji saat pengujian agar mendapatkan hasil kuat tekan beton yang tepat.
4. Melakukan pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 21 hari agar bisa mendapatkan data dan dimanfaatkan dalam dunia konstruksi untuk percepatan pekerjaan konstruksi.
5. Mencantumkan biaya produksi beton bubuk reaktif dan membandingkannya dengan beton biasa agar bisa dijadikan acuan untuk pembuatan Rancangan Anggaran Biaya suatu proyek.

REFERENSI

- Abuodeh, O., Abdalla, J., & Hawileh, R., 2020, Assessment of compressive strength of Ultra-high Performance Concrete using deep machine learning techniques. *Appl. Soft Comput.*, 95, 106552. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106552>.
- Ahmed, Sara et al., 2021, "Impact of Using Different materials, Curing Regimes, and Mixing Procedures on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete – A Review", *Journal of Building Engineering* 44(June): 103238.
- Alkhalay, Yulius Rief, 2013, "Reactive Powder Concrete dengan Sumber Silika dari Limbah Bahan Organik", *Teras Jurnal* 3(2): 157.
- ASTM C.1240, 1995, "Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar".

- Ge, W., Wang, A., Zhang, Z., Ge, Y., Chen, Y., Li, W., Jiang, H., Shuai, H., Sun, C., Yao, S. and Qiu, L., 2023. Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, p.e01777.
- Kannan Rajkumar, P. R. et al., 2020, "Experimental Investigation of Reactive Powder Concrete Exposed to Elevated Temperatures", *Construction and Building Materials* 261.
- Lai, M., Hanžič, L., & Ho, J., 2018, Fillers to improve passing ability of concrete. *Structural Concrete*, 20, 185 - 197. <https://doi.org/10.1002/suco.201800047>.
- Mayhoub, Ola A. et al., 2021, "The Influence of Ingredients on The Properties of Reactive Powder Concrete: A Review", *Ain Shams Engineering Journal* 12(1): 145-58.
- Mostofinejad, D., Nikoo, M., & Hosseini, S., 2016, Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*, 123, 754-767. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.082>.
- Peng, Y., Zhang, J., Liu, J., Ke, J., & Wang, F., 2015, Properties and microstructure of reactive powder concrete having a high content of phosphorous slag powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 101, 482-487. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.046>.
- Richard, P., Cheyrezy, M., 1995, "Composition of Reactive Powder Concretes", *Cem. Concr. Res.* 25, 1501-1511.
- Sarika, S., and Elson John, 2015, "A Study on Properties of Reactive Powder Concrete", *International Journal of Engineering Research and Technology* 4.
- SNI 03-6468-2000, 2000, "Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang".
- SNI 1974-2011, 2011, "Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder".
- Sreenath, S., Mohan, K.S.R. and Murali, G., 2022. Fracture toughness of reactive powder fibrous concrete composites under pure and mixed modes (I/III). *Buildings*, 12(5), p.599.
- Tam, C., Tam, V., & Ng, K., 2012, Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 26, 79-89. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.05.006>.
- Vigneshwari, M., Arunachalam, K. and Angayarkanni, A., 2018. Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 188, pp.264-277.
- Zhang, Y., Wu, B., Wang, J., Liu, M. and Zhang, X., 2019. Reactive powder concrete mix ratio and steel fiber content optimization under different curing conditions. *Materials*, 12(21), p.3615.