

Kajian Kuat Lekat pada Beton Bubuk Reaktif dengan Pasir Kuarsa 30% dan Variasi Fly Ash sebagai Substitusi Parsial Semen

Torianzyah Putra Bimandiri Sugiarto*, Endah, Wibowo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Abstrak: Infrastruktur memiliki peran penting dalam pertumbuhan ekonomi dan kemakmuran suatu negara, sehingga diperlukan konstruksi yang aman, kuat, kaku, dan stabil. Penggunaan bahan material dalam konstruksi sangat penting, terutama bahan seperti beton. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji dampak variasi kadar *fly ash* terhadap kekuatan lekat beton bubuk reaktif. Metode eksperimental digunakan dalam penelitian ini. Campuran beton dirancang dengan menggunakan 30% pasir kuarsa dan variasi kadar *fly ash* 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen. Benda uji yang digunakan adalah beton kubus dengan panjang sisi 20 cm. Kekuatan lekat beton diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dan *dial gauge*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekuatan lekat maksimum terjadi pada kadar *fly ash* 0%. Penambahan *fly ash* menyebabkan penurunan nilai kekuatan lekat. Nilai kekuatan lekat beton saat terjadi slip 0,25 mm pada kadar *fly ash* 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% berturut-turut adalah 14,35 MPa, 13,54 MPa, 12,10 MPa, 10,58 MPa, 8,60 MPa, dan 7,38 MPa. Sedangkan nilai kekuatan lekat beton pada beban maksimum pada kadar *fly ash* yang sama berturut-turut adalah 23,94 MPa, 23,79 MPa, 23,49 MPa, 23,31 MPa, 23,05 MPa, dan 22,92 MPa.

Kata Kunci: Beton Bubuk Reaktif, Fly Ash, Kuat Lekat

DOI:

<https://doi.org/10.47134/scbmej.v1i3.3008>

*Correspondence: Torianzyah Putra

Bimandiri Sugiarto

Email: torianzyahputra999@gmail.com

Received: 01-05-2024

Accepted: 15-06-2024

Published: 31-07-2024



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: Infrastructure has an important role in the economic growth and prosperity of a country, so it requires safe, strong, rigid, and stable construction. The use of materials in construction is very important, especially materials such as concrete. The purpose of this study was to examine the impact of varying fly ash content on the adhesive strength of reactive powder concrete. Experimental method was used in this study. The concrete mix was designed using 30% quartz sand and fly ash content variations of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% by weight of cement. The test specimens used were concrete cubes with a side length of 20 cm. The adhesive strength of concrete was tested using Universal Testing Machine (UTM) and dial gauge. The results showed that the maximum adhesive strength value occurred at 0% fly ash content. The addition of fly ash causes a decrease in the value of adhesive strength. The concrete adhesive strength values at 0.25 mm slip at 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% fly ash content were 14.35 MPa, 13.54 MPa, 12.10 MPa, 10.58 MPa, 8.60 MPa, and 7.38 MPa, respectively. While the concrete adhesive strength values at maximum load at the same fly ash content are 23.94 MPa, 23.79 MPa, 23.49 MPa, 23.31 MPa, 23.05 MPa, and 22.92 MPa, respectively.

Keywords: Reactive Powder Concrete, Fly Ash, Adhesion Strength

Pendahuluan

Berdasarkan standar SNI 2847-2013, beton merupakan campuran dari semen *portland* atau jenis semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, bisa juga dengan bahan tambahan seperti *admixture*. Beton memiliki sejumlah keunggulan, termasuk nilai kuat tekan yang tinggi, ketahanan terhadap api, ketersediaan bahan baku yang mudah, kemudahan dalam pembuatan sesuai kebutuhan, serta biaya dan perawatan yang relatif lebih terjangkau (Dinh, 2024; Ju, 2024).

Namun demikian, terdapat masalah lingkungan terkait dengan beton, seperti banyaknya limbah yang tidak didaur ulang, seperti *fly ash*. Untuk mengatasi hal ini dan mengurangi penggunaan semen, *fly ash* digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton (Li, 2024; Ralli, 2024). *Fly ash* dipilih karena memiliki sifat mirip semen sebagai *filler* dan *pozzolan*, serta penggunaannya dalam beton dapat membentuk CSH baru seiring berjalannya waktu, yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan beton (Gu, 2024; Yu, 2024).

Jadi, pemanfaatan *fly ash* dalam beton tidak hanya membantu mengurangi jejak karbon dari produksi beton tetapi juga mendaur ulang limbah industri untuk kegunaan yang lebih baik secara lingkungan (Akhnoukh, 2024; Ge, 2023a).

Seiring dengan kemajuan zaman, terdapat kebutuhan akan inovasi dalam pembuatan beton (Ge, 2023b; J. Xu, 2023). Salah satu inovasi yang berkembang adalah beton bubuk reaktif atau *Reactive Powder Concrete* (RPC) (Al-Jaberi, 2023; Nguyen, 2023). Penggunaan beton bubuk reaktif sebagai alternatif beton konvensional memiliki keuntungan dalam meningkatkan kekuatan tekan dan durabilitas beton (Al-Fadhli, 2023; Dvorkin, 2023; X. Xu, 2023). Bahan-bahan yang digunakan dalam beton bubuk reaktif tidak termasuk agregat halus seperti pasir halus, pasir kuarsa, semen, dan *fly ash*. Komposisi material yang sangat halus ini menghasilkan beton yang padat tanpa celah, sehingga porositasnya sangat rendah. Porositas adalah faktor penting yang memengaruhi kekuatan tekan beton. Semakin rendah porositas beton, semakin tinggi kekuatan tekan yang dapat dicapai.

Agregat kasar yang tidak digunakan dalam beton bubuk reaktif digantikan oleh serat baja. Serat baja ini bertujuan untuk meningkatkan daktilitas dan kekuatan tarik beton, serta meningkatkan daya tahan terhadap tumbukan dan keausan. Selain itu, serat baja juga membantu dalam mengatasi retak-retak mikro yang mungkin terjadi dalam beton.

Dengan demikian, beton bubuk reaktif menawarkan potensi untuk menghasilkan beton yang lebih kuat, lebih tahan lama, dan lebih tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan, dibandingkan dengan beton konvensional.

Pada konstruksi bangunan umumnya, struktur menggunakan beton bertulang karena kombinasi kekuatan beton dalam menahan gaya tekan dan baja tulangan yang mampu menahan gaya tarik. Baja tulangan secara khusus digunakan untuk menanggulangi momen

pada bagian penampang yang rentan terhadap retakan karena beton sendiri memiliki ketahanan tarik yang terbatas. Penggunaan baja tulangan tidak hanya meningkatkan daktilitas struktur tetapi juga memperkuat kemampuan beton dalam mendukung beban yang diberikan.

Salah satu aspek penting dalam beton bertulang adalah kuat lekat antara baja tulangan dan beton. Kuat lekat ini merupakan kemampuan dari interaksi antara baja tulangan dan lapisan beton yang melindunginya dalam menahan gaya eksternal atau faktor lain yang dapat mempengaruhi integritas struktur (Winter, 1993). Mutu beton memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat lekat ini, yang mempengaruhi berbagai aspek dalam perancangan struktur seperti diameter dan jenis baja tulangan yang digunakan.

Di sisi lain, dalam konteks beton bubuk reaktif, mutu beton direncanakan dengan teliti untuk mencapai kinerja yang optimal. Beton bubuk reaktif merupakan inovasi terbaru yang menjanjikan mutu beton yang sangat tinggi. Penelitian terkait kuat lekat pada beton bubuk reaktif menyoroti pengaruh variasi kadar *fly ash* terhadap mutu beton. Variasi ini dipilih berdasarkan hasil penelitian sebelumnya oleh Setiawati (2018), yang menemukan bahwa beton bubuk reaktif mencapai kekuatan tekan maksimum pada kadar *fly ash* 25% terhadap berat semen. Penambahan *fly ash* diharapkan dapat meningkatkan nilai kuat lekat beton, mengingat sifat mekanik beton bubuk reaktif dipengaruhi oleh faktor air semen dan bahan tambahan yang digunakan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menemukan nilai optimum kuat lekat pada beton bubuk reaktif dengan variasi *fly ash*, sebagai langkah penting dalam memastikan bahwa beton bertulang yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan struktural yang telah direncanakan dengan baik.

Metode

Metode penelitian eksperimental dilakukan dengan menambahkan beragam variasi persentase kadar *fly ash* ke dalam campuran beton bubuk reaktif. Penelitian dilaksanakan di Lab. Bahan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret. Penelitian ini dimulai dengan melakukan pemeriksaan material penyusun beton, pengujian beton segar, pembuatan benda uji, dan pengujian beton *setting*. Pengujian menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dan *dial gauge*. Pengujian untuk beton yang telah mengeras dapat dilakukan saat umur beton 28 hari. Pengujian kuat lekat dilakukan pada benda uji berbentuk kubus dengan panjang sisi 20 cm. Benda uji dibuat sebanyak 3 (tiga) buah untuk setiap kadar. Variabel bebas yang digunakan adalah variasi kadar *fly ash* yaitu 0%; 5%; 10%;15%;20% dan 25% terhadap berat semen. Kebutuhan benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan benda uji kuat lekat

No	Kadar Fly Ash	Kadar Pasir Kuarsa	Umur (hari)	Kadar FAS	Kadar Superplast icizer	Jumlah Benda Uji
1	0%	30%	28	0,19	1,90%	3
2	5%	30%	28	0,19	1,90%	3
3	10%	30%	28	0,19	1,90%	3
4	15%	30%	28	0,19	1,90%	3
5	20%	30%	28	0,19	1,90%	3
6	25%	30%	28	0,19	1,90%	3
Jumlah Benda Uji						18

Rancang Campur

Rancang campur pada beton dengan penggunaan, pasir kuarsa 30%, dan variasi kadar *fly ash* sebagai substitusi semen dibuat berdasarkan komposisi dari penelitian yang telah dilakukan oleh Richard dan Cheyrezy pada 1995. Penggunaan didasarkan pada penelitian yang dilakukan Aprisona (2021). Sedangkan penggunaan pasir kuarsa 30% didasarkan pada penelitian yang dilakukan Rizka (2022). Rekapitulasi rancang campur adukan beton dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi rancang campur adukan beton

Variasi Fly Ash	Pasir Alam (kg/m ³)	Pasir Kuarsa (kg/m ³)	Steel Fiber (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (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

Pengujian Bahan Penyusun Beton

Standar yang digunakan dalam pengujian bahan dasar penyusun beton bubuk reaktif mengacu pada SNI 2847-2019. Pengujian agregat halus meliputi uji absorpsi, berat jenis, kandungan lumpur, kandungan zat organik, dan modulus kehalusan. Pengujian X-Ray *Flouresence* (XRF) dilakukan pada *fly ash*.

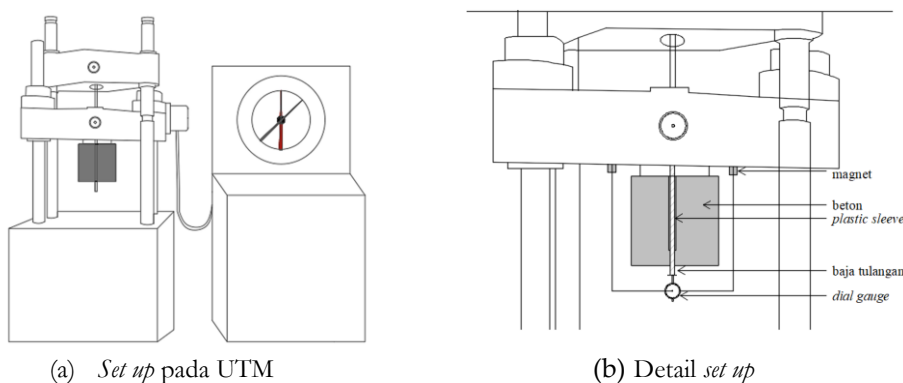
Pengujian Beton Segar

Beton segar berkaitan dengan *workability*. Salah satu cara mengetahui *workability* beton adalah dengan *slump flow test*. *Slump flow test* merupakan pengujian untuk mengukur

kemampuan campuran beton dalam mengalir dan mengisi ruang dengan mengandalkan berat sendiri (ASTM C1611).

Pengujian Kuat Lekat

Pengujian dilakukan dengan metode tarik dengan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengetahui nilai beban/load dan dial *gauge* untuk mengetahui besar slip/displacement. Pembacaan beban dimulai saat beban menunjukkan angka 0 kgf, dibaca terus menerus dengan interval 100 kgf sampai menunjukkan beban maksimum yaitu ketika beton tersebut pecah atau tercabutnya baja tulangan. Selain itu perlu dilakukan pembacaan UTM saat slip menunjukkan angka 0,25 mm. Slip 0,25 mm adalah nilai tegangan lekat kritis antara beton dengan baja tulangan (ASTM C-234-91a). *Set up pull out test* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Set up* pengujian

Hasil yang didapat pada pengujian diolah untuk perhitungan kuat lekat pada saat terjadi slip 0,25 mm dan saat terjadi beban maksimum menggunakan rumus RILEM (1983) pada Persamaan 1.

$$\mu = \frac{P}{\pi \phi L_d} \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

μ = kuat lekat (MPa)

P = beban (kN)

ϕ = diameter tulangan (mm)

L_d = panjang penjangkaran (mm)

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton

Hasil pengujian agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Hasil Pengujian agregat halus

No.	Jenis Pengujian	Pasir Halus	Pasir Kuarsa	Standar	Keterangan
1	<i>Absorbsion</i>	4,34%	1,97%	-	-
2	<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,89	2,66	-	-
3	<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,57	2,53	-	-
4	<i>Bulk Specific Grafity SSD</i>	2,68	2,58	2,57-2,7 (ASTM C 128 – 79)	Memenuhi
5	Kandungan Lumpur	1,7%	1,1%	<5% (PBI 1971, ASTM C117)	Memenuhi
6	Kandungan Zat Organik	Kuning Tua	Kuning Muda	(PBI 1971,ASTM C40)	Memenuhi
7	Modulus Kehalusan	2,54	3,42	(ASTM C 33-97)	Memenuhi

Pengujian *silica fume* dan *fly ash* dilakukan di Lab. MIPA Terpadu Universitas Sebelas Maret dan Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Hasil pengujian kandungan kimia menunjukkan kadar SiO₂ sebesar 85,76%. Menurut ASTM C-1249, persyaratan kadar minimum kandungan SiO₂ adalah 85% sehingga *silica fume* yang digunakan memenuhi persyaratan. Sedangkan untuk *fly ash*, berdasarkan ASTM C-618-96, *fly ash* yang digunakan termasuk ke dalam kelas F karena memiliki kadar CaO sebesar 7,33%. Syarat *fly ash* masuk ke dalam kelas F adalah memiliki kadar CaO kurang dari 10%.

Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Data hasil pengujian kuat tarik pada baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Uji kuat tarik baja tulangan

Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	P Leleh (kN)	P Maks (kN)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Leleh Rata-rata (MPa)
A	10,06	79,46	31,1	47,4	391,37	369,32
B	10,03	79,03	30,1	46,8	380,87	
C	10,13	80,53	29,2	46,7	362,59	
D	10,13	80,53	28,4	44,7	352,66	
E	10,05	79,36	28,5	45,2	359,13	

Hasil pengujian kuat tarik pada baja tulangan menunjukkan bahwa mutu baja ulir/sirip yang digunakan pada benda uji kuat lekat dengan diameter 10 mm dan tegangan leleh rata-rata 369,32 MPa termasuk ke dalam kategori BjTS 280 (SNI 2052-2017).

Hasil Pengujian Beton Segar

Nilai *slump flow test* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai *slump flow test*

No.	Kadar <i>Fly Ash</i>	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d rerata (mm)	T rerata (detik)
1	0%	360	370	365	14,4
2	5%	365	360	362,5	14
3	10%	350	355	352,5	13,8
4	15%	345	350	347,5	13,6
5	20%	350	340	345	13,1
6	25%	330	340	335	12,7

Syarat *slump flow* pada beton bubuk reaktif berkisar antara 340-360 mm. Oleh karena itu, beton segar yang digunakan memenuhi syarat untuk pembuatan benda uji. Hasil *slump flow test* menunjukkan penurunan nilai *slump flow* seiring dengan pertambahan kadar *fly ash* dalam campuran beton bubuk reaktif. Hal ini membuktikan bahwa *fly ash* dapat menyerap air dengan baik. Penurunan nilai *slump flow* berpengaruh pada kemampuan *workability* beton. Semakin kecil nilai *workability* maka semakin sulit pengerjaan beton karena semakin kental.

Tabel 6. Penambahan jumlah substitusi *fly ash*

Kadar <i>Fly Ash</i>	Kode Benda Uji	P saat Slip 0,25 mm (kN)	Kuat Lekat (MPa)	Rata-rata Kuat Lekat (MPa)
0%	A	22,0	14,01	14,60
	B	24,3	15,47	
	C	22,5	14,32	
5%	A	22,5	14,32	13,54
	B	21,0	13,37	
	C	20,3	12,92	
10%	A	18,0	11,46	12,10
	B	20,0	12,73	
	C	19,0	12,10	
15%	A	17,0	10,82	10,51
	B	15,8	10,06	
	C	16,8	10,66	
20%	A	13,2	8,40	8,64
	B	13,5	8,59	
	C	14,0	8,91	
25%	A	10,3	6,56	7,38
	B	13,0	8,28	
	C	11,5	7,32	

Tabel 6 menunjukkan bahwa penambahan jumlah substitusi *fly ash* terhadap berat semen menurunkan nilai kuat lekat beton. Nilai kuat lekat maksimum tercapai pada variasi kadar *fly ash* 0% yaitu sebesar 14,60 MPa. Selanjutnya pada variasi kadar *fly ash* .5%;.10%;.15%;.20%;.dan.25% terus mengalami penurunan dengan nilai kuat lekat 13,54 MPa; 12,10 MPa; 10,51 MPa; 8,64 MPa; dan 7,38 MPa.

Hasil perhitungan kuat lekat saat beban maksimum dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perhitungan kuat lekat saat beban maksimum

Benda Uji	Kode Benda Uji	P maks (kN)	Kuat Lekat (MPa)	Rata-rata Kuat Lekat (MPa)
0%	A	38,4	24,45	23,94
	B	36,8	23,43	
	C	37,6	23,94	
5%	A	36,4	23,17	23,77
	B	38,4	24,45	
	C	37,2	23,68	
10%	A	36,8	23,43	23,39
	B	36,4	23,17	
	C	37,0	23,55	
15%	A	36,4	23,17	23,30
	B	36,6	23,30	
	C	36,8	23,43	
20%	A	36,4	23,17	23,00
	B	36,0	22,92	
	C	36,0	22,92	
25%	A	35,4	22,54	22,92
	B	36,0	22,92	
	C	36,6	23,30	

Tabel 7 menunjukkan bahwa penambahan jumlah substitusi fly ash terhadap berat semen menurunkan nilai kuat lekat. Nilai kuat lekat maksimum tercapai pada variasi kadar fly ash 0% yaitu sebesar 23,94 MPa. Selanjutnya pada variasi kadar fly ash 5%;10%;15%;20%;dan.25% terus mengalami penurunan.

Berdasarkan hasil pengujian, nilai kuat lekat beton mengalami penurunan seiring dengan penambahan kadar fly ash. Hal ini dikarenakan semakin banyak penggunaan fly ash maka semakin sedikit semen yang digunakan karena pada penelitian ini fly ash berperan sebagai substitusi parsial semen. Semen memiliki kemampuan pengikatan yang baik, sedangkan fly ash tidak bisa mengikat secara langsung seperti semen. Namun, dengan adanya campuran air dan ukuran partikel fly ash halus, unsur SiO₂ yang terkandung dalam fly ash akan bereaksi dengan Ca(OH)₂ hasil reaksi hidrasi semen. Kemudian menghasilkan unsur baru yang dapat mengikat yaitu CSH (Kalsium Silika Hidrat).

Simpulan

Kesimpulan dari penelitian dengan komposisi pasir kuarsa 30% dan variasi kadar *fly ash* bahwa penggunaan *fly ash* pada beton bubuk reaktif berpengaruh terhadap nilai kuat lekat. Semakin banyak penggunaan *fly ash* maka akan semakin menurun nilai kuat lekat beton saat slip 0,25 mm pada kadar *fly ash* 0% sampai dengan 25% masing-masing bernilai 14,60% MPa; 13,50 MPa; 12,10 MPa; 10,50 MPa; 8,60 MPa; dan 7,35 MPa. Nilai kuat lekat

beton saat beban maksimum pada kadar *fly ash* 0% sampai dengan 25% masing-masing bernilai 23,90 MPa; 23,74 MPa; 23,32 MPa; 23,29 Mpa; 23,00 Mpa; dan 22,91 MPa. Penggunaan *fly ash* masih dapat diaplikasikan pada beton bubuk reaktif sampai kadar *fly ash* 5%. Sehingga biaya yang digunakan untuk membuat beton dapat lebih murah dan lebih ramah lingkungan karena berkurangnya penggunaan semen.

Daftar Pustaka

- Akhnoukh, A. (2024). The Future of Ultra-High-Performance Concrete in Infrastructure Projects in the United States. *Advances in Science, Technology and Innovation*, 73–77. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47612-9_8
- Al-Fadhli, S. K. (2023). Nonlinear-finite-element analysis of reactive powder concrete columns subjected to eccentric compressive load. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1). <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0267>
- Al-Jaberi, L. A. (2023). Workability and Compressive Strength Properties of Fly Ash-Metakaolin based Flowable Geopolymer Mortar. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 23(4). <https://doi.org/10.56748/ejse.23436>
- American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C 1611C 1611M1 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. January, 1–6.
- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C 234-91a. 150 mm, 3–7.
- Aprisona, E. (2021). *Kajian Kuat Lekat dan Kapasitas Penjangkaran Tulangan Pada Beton Bubuk Reaktif Dengan Variasi Komposisi Silica Fume*.
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia. (2017). SNI2052:2017 Baja tulangan beton. *Badan Standarisasi Nasional*, 15. www.bsn.go.id
- Badan Standarisasi Nasional Indonesia. (2019). SNI 2847-2019 : Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Standar Nasional Indonesia*, 8, 720.
- Dinh, H. L. (2024). Influence of Si/Al molar ratio and ca content on the performance of fly ash-based geopolymer incorporating waste glass and GGBFS. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134741>
- Dvorkin, L. (2023). COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF REACTIVE POWDER CONCRETES USING FLY ASH AND MICROSILICA. *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, 53(4), 306–315.
- Ge, W. (2023a). Hydration characteristics, hydration products and microstructure of reactive powder concrete. *Journal of Building Engineering*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106306>
- Ge, W. (2023b). Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01777>
- Gu, X. (2024). Elucidating the reaction of seashell powder within fly ash cement: A focus on hydration products. *Construction and Building Materials*, 428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136331>
- Ju, Y. (2024). Effect of mineral admixtures on the resistance to sulfate attack of reactive

- powder concrete. *Journal of Cleaner Production*, 440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140769>
- Li, Q. (2024). Improving sulfate and chloride resistance in eco-friendly marine concrete: Alkali-activated slag system with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134333>
- Nguyen, V. D. (2023). Incorporation of high loss-on-ignition fly ash into high-strength mortar: Influence on short-term engineering properties. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.531>
- Ralli, Z. G. (2024). Development and Characterization of Tension-Hardening Quarry Waste-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 121(3), 53–67. <https://doi.org/10.14359/51740704>
- Richard, P., and Cheyrezy, M., 1995, Composition of Reactive Powder Concretes, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.7, pp. 1501-1511
- RILEM. (1994). *Rilem Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*.
- Rizka, M. N. (2022). KAJIAN KUAT LEKAT PADA BETON BUBUK REAKTIF DENGAN SILICA FUME 15 % DAN VARIASI PASIR KUARSA. 10(4), 367–374.
- Setiawati, M. (2018). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 17, 1–8. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/3556>
- Winter, G. & Nilson, A, H. 1993. Perencanaan Struktur Beton Bertulang, Pradnya Paramita, Jakarta
- Xu, J. (2023). The Influence of CO₂-Cured Incinerated Waste Fly Ash on the Performance of Reactive Powder Concrete. *Coatings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/coatings13040709>
- Xu, X. (2023). Preparation of low-cost reactive powder concrete using waste steel fibres recycled from scrap tires. *Road Materials and Pavement Design*, 24(5), 1254–1272. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2067073>
- Yu, X. (2024). Chloride Ion Penetration Resistance of Reactive Powder Concrete with Mineral Admixtures. *Medziagotyra*, 30(2), 233–238. <https://doi.org/10.5755/j02.ms.34962>