

PENGARUH PENGGUNAAN *PALM OIL FUEL ASH* SEBAGAI SUBSTITUSI *SILICA FUME* PADA *REACTIVE POWDER CONCRETE*

Widodo Kushartomo¹ dan Stanley Jourdan Saputra^{1*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
*stanleyjour23@gmail.com

Masuk: 07-12-2024, revisi: 18-12-2024, diterima untuk diterbitkan: 24-04-2025

ABSTRACT

Concrete is an essential component in building and infrastructure construction, used for both structural and non-structural purposes. The innovation of using palm oil fuel ash (POFA) in reactive powder concrete (RPC) is expected to enhance the compressive and flexural strength of RPC as well as its workability. This research includes five types of RPC mixtures: 100% silica fume & 0% POFA, 75% silica fume & 25% POFA, 50% silica fume & 50% POFA, 25% silica fume & 75% POFA, and 0% silica fume & 100% POFA. The POFA used is pre-burned at 1000°C and sieved using a no.200 sieve. The tests conducted in this study include compressive strength tests, flexural strength tests, and slump tests. The results indicate that the use of POFA leads to a decrease in the compressive strength of RPC by 56.93% and flexural strength by 34.8%, while the workability increases with the higher amount of POFA in the RPC mixture.

Keywords: Palm oil fuel ash; reactive powder concrete; silica fume

ABSTRAK

Beton adalah komponen penting dalam konstruksi bangunan dan infrastruktur, digunakan baik untuk keperluan struktural maupun non-struktural. Inovasi penggunaan *palm oil fuel ash* (POFA) pada *reactive powder concrete* (RPC) diharapkan dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur pada RPC serta meningkatkan workabilitasnya. Pada penelitian ini terdapat 5 jenis campuran RPC yaitu 100% *silica fume* & 0% POFA, 75% *silica fume* & 25% POFA, 50% *silica fume* & 50% POFA, 25% *silica fume* & 75% POFA, dan 0% *silica fume* & 100% POFA. POFA yang akan digunakan dibakar terlebih dahulu pada suhu 1000°C dan disaring menggunakan saringan no.200. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengujian kuat tekan, pengujian kuat lentur, dan *slump test*. Hasil pengujian yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa penggunaan POFA mengakibatkan penurunan kekuatan tekan RPC sebesar 56,93% dan lentur RPC sebesar 34,8%, sedangkan pada workabilitas terjadi peningkatan seiring bertambahnya POFA yang digunakan dalam campuran RPC.

Kata kunci: *Palm oil fuel ash*; *reactive powder concrete*; *silica fume*

1. PENDAHULUAN

Reactive powder concrete (RPC) adalah material konstruksi dengan kekuatan sangat tinggi yang pertama kali dikembangkan oleh Richard dan Cheyrezy di Laboratorium Bouygues, Prancis, pada tahun 1990. RPC memiliki struktur halus yang dipadatkan dan distandarisasi berkat penggunaan rasio air terhadap semen (W/C) yang rendah serta pengaturan partikel yang dioptimalkan. Penggunaan bahan-bahan dengan luas permukaan yang besar, seperti *silica fume* dan bubuk kuarsa, menciptakan struktur mikro yang homogen. Kebutuhan akan material konstruksi berkekuatan tinggi terus meningkat seiring dengan pesatnya urbanisasi. Material berkekuatan sangat tinggi seperti RPC ini secara signifikan dapat menghemat biaya konstruksi dengan mengurangi ukuran elemen struktural dan meningkatkan kemudahan dalam perawatan (Kushartomo & Tory, 2024).

RPC juga dikenal sebagai *ultra high performance concrete* (UHPC) atau *ultra high strength concrete* (UHSC) adalah material dengan kepadatan tinggi dan kekuatan tekan hingga 800 MPa. Kekuatan ini dicapai melalui penggunaan faktor air-semen (fas) yang sangat rendah (0,15 – 0,26) dan optimasi mikrostruktur beton menggunakan material berukuran nano, yang mengurangi rongga antar partikel dan menghasilkan matriks beton ultra padat. Proses perencanaan gradasi material untuk mencapai kepadatan optimal disebut *packing density*. Fas yang sangat rendah membuat penggunaan *superplasticizer* penting untuk menjaga kecacakan RPC. Selain itu, RPC mengandung *silica fume* dalam jumlah besar (23 – 25% dari berat semen), yang meningkatkan kekuatan beton melalui reaksi kimia. Berbeda dengan beton konvensional, RPC tidak menggunakan agregat kasar dan hanya terdiri dari partikel berukuran nanometer (Alkhaly, 2013).

Silica fume adalah bahan penting dalam pembuatan RPC karena merupakan pengganti semen yang ramah lingkungan. Keunggulan utama *silica fume* adalah peningkatan kerapatan mikrostruktur matriks dan pengurangan porositas beton, yang disebabkan oleh penurunan Ca(OH)_2 dan peningkatan gel C-S-H. Ini juga memperbaiki zona antarmuka jika serat baja digunakan, menghasilkan efek sinergis antara serat baja dan *silica fume*. Dengan penambahan *silica fume*, sifat mekanis beton RPC meningkat secara signifikan, dan kepadatan pengemasan serta zona antarmuka antara agregat dan pasta juga diperbaiki (Šoukal et al., 2023).

Penelitian mengenai campuran RPC yang memanfaatkan bahan-bahan lokal di Indonesia masih terbatas, sehingga belum sepenuhnya mencerminkan karakteristik material lokal secara menyeluruh. Pada tahun 2009, Indonesia berhasil mengembangkan RPC yang menggunakan bahan-bahan lokal. Melalui penelitian lebih lanjut, Indonesia memiliki potensi besar untuk terus meningkatkan dan mengoptimalkan penggunaan bahan lokal dalam pembuatan RPC (Kushartomo et al., 2021).

Beberapa peneliti juga sudah melakukan penilitan mengenai kandungan POFA untuk mengurangi penggunaan semen Portland dalam memproduksi beton ramah lingkungan. Negara di Asia Tenggara juga sudah menuntut adanya peningkatan produksi POFA karena dapat mengurangi volume racun dan tingkat CO_2 yang dihasilkan oleh pembuatan semen portland. POFA memiliki kandungan SiO_2 yang tinggi sehingga dapat memenuhi kriteria sifat pozzolan. Sudah ada peneliti yang menyatakan bahwa penggunaan POFA dalam beton normal, beton berkekuatan tinggi, dan beton ringan yang termasuk beton busa (Amran et al., 2021).

Palm oil fuel ash (POFA) adalah abu yang berasal dari pembakaran cangkang dan serabut kelapa sawit. POFA memiliki potensi besar sebagai pengganti semen karena sifat pozzolanik yang dikandungnya, berkat kehadiran silika dan alumina. Sifat pozzolanik ini memungkinkan POFA untuk tidak hanya menjadi alternatif pengganti semen dalam campuran beton, tetapi juga meningkatkan kekuatan tekan dan daya tahan beton (Putri et al., 2021).

Rumusan masalah

1. Apakah penggunaan POFA berpengaruh terhadap nilai kuat tekan dan kuat lentur RPC?
2. Apakah penggunaan POFA pada RPC berpengaruh pada *workability*?

Tujuan penelitian

1. Untuk mempelajari karakteristik penggunaan POFA terhadap kuat tekan dan kuat lentur RPC.
2. Untuk mempelajari penggunaan POFA terhadap *workability* RPC.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian eksperimental, dimana dilakukan pengujian terhadap penggunaan POFA sebagai pengganti *silica fume* pada sifat mekanis dan *workability* RPC. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara. Penelitian ini dimulai pada 30 September 2024. Bentuk sampel yang digunakan pada pengujian terbagi menjadi dua yaitu silinder yang berdiameter 10 cm dengan tinggi 20 cm dan balok yang berukuran 10 cm x 10 cm x 40 cm. Jumlah sampel yang dibuat berjumlah 35 silinder dan 15 balok dengan kandungan 100% *silica fume* & 0% POFA, 75% *silica fume* & 25% POFA, 50% *silica fume* & 50% POFA, 25% *silica fume* & 75% POFA, dan 0% *silica fume* & 100% POFA (Tabel 1-2). POFA akan dibakar menggunakan oven selama ± 1 jam pada suhu 1000°C dan disaring menggunakan saringan no.200. POFA yang sudah disaring akan dibawa ke Laboratorium SUCOFINDO untuk diuji kadar SiO_2 yang terkandung di dalamnya. Pada saat pengecoran diuji juga untuk *workability*-nya. Setelah 28 hari perawatan, RPC diuji kekuatan tekan dan kekuatan lenturnya.

Tabel 1. *Mix design*

Bahan	Perbandingan	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
Semen (kg)	1	22,77	22,77	22,77	22,77	22,77
Pasir (kg)	1,1	25,04	25,04	25,04	25,04	25,04
Air (kg)	0,25	5,69	5,69	5,69	5,69	5,69
<i>Superplasticizer</i> (kg)	0,025	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
<i>Silica Fume</i> (kg)	0,25	5,69	4,27	2,85	1,42	0,00
POFA (kg)	0	0,00	1,42	2,85	4,27	5,69

Keterangan:
 Mix 1: 100% *Silica Fume* & 0% POFA
 Mix 2: 75% *Silica Fume* & 25% POFA
 Mix 3: 50% *Silica Fume* & 50% POFA
 Mix 4: 25% *Silica Fume* & 75% POFA
 Mix 5: 0% *Silica Fume* & 100% POFA

Tabel 2. Jumlah sampel yang dibuat

Jenis Sampel	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
Silinder	7	7	7	7	7
Balok	3	3	3	3	3

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar SiO₂ pada POFA

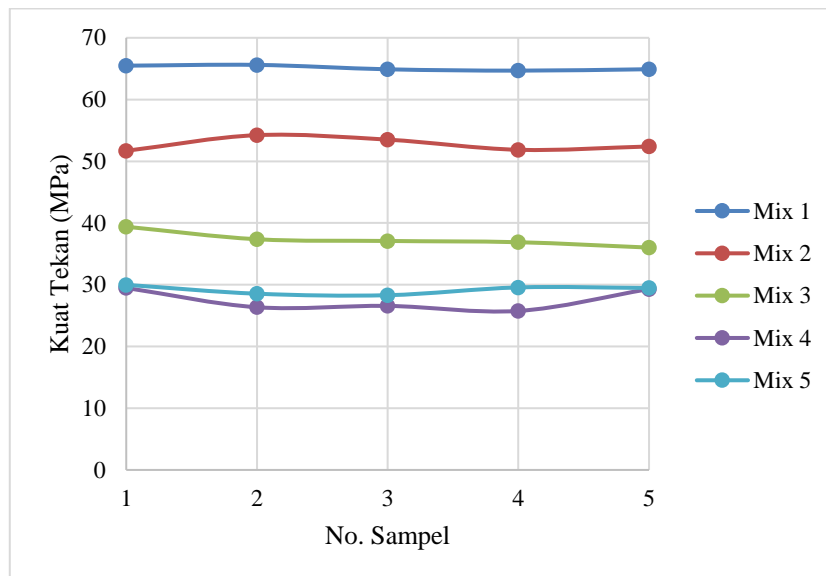
POFA yang belum dibakar dan sudah dibakar pada suhu 1000°C diuji di Laboratorium SUCOFINDO dengan metode ASTM D 6349-13 yang dimana menghasilkan kadar SiO₂ yang sangat tinggi melebihi 99% seperti pada Tabel 3. Angka ini menandakan penggunaan POFA memungkinkan terjadinya reaksi *pozzolanic* yaitu reaksi antara produk hidrasi dengan SiO₂ dari POFA (Kushartomo & Tory, 2024).

Tabel 3. Hasil pengujian kadar SiO₂ pada POFA

Code	Parameter	Unit	Results	Method
POFA - BB	Silicon Dioxide (SiO ₂)	%	99,50	ASTM D 6349-13
POFA - AB	Silicon Dioxide (SiO ₂)	%	99,90	ASTM D 6349-14

Kuat tekan beton

Berdasarkan hasil pengujian (Gambar 1 dan Tabel 4) menunjukkan bahwa hasil pengujian menunjukkan bahwa sampel beton dengan kapasitas maksimum ditemukan pada *mix* 1, yang terdiri dari 100% *silica fume* dan 0% POFA. Pada *mix* 2 hingga *mix* 4, terjadi penurunan kekuatan tekan beton. Kekuatan tekan beton pada *mix* 4 dan *mix* 5 relatif mirip, dengan *mix* 5 menggunakan 100% POFA dan 0% *silica fume*, dan *mix* 4 menggunakan 75% POFA dan 25% *silica fume*. Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa 5,69 kg POFA dapat menggantikan 1,42 kg *silica fume*. *Mix* 5 memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 29,18 MPa, sedangkan *mix* 4 memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 27,49 MPa.

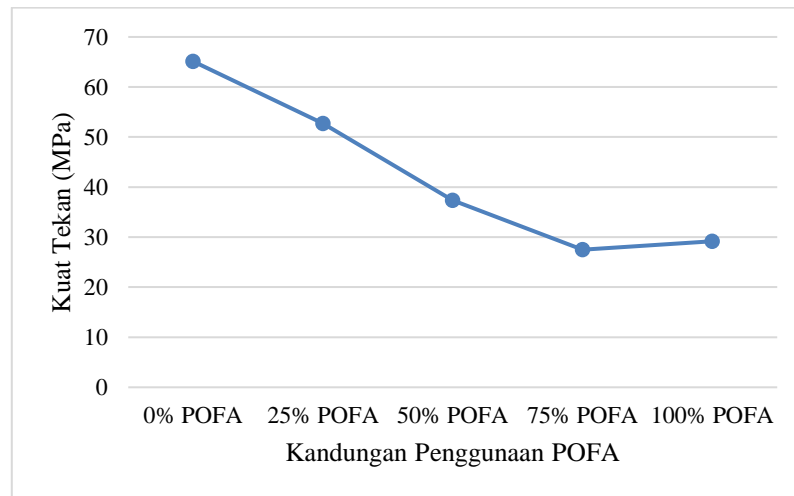


Gambar 1. Grafik Hasil uji kuat tekan beton

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan beton

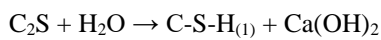
No.	Kuat Tekan Sampel (MPa)				
	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5
1	65,48	51,69	39,39	29,48	29,98
2	65,61	54,23	37,37	26,36	28,55
3	64,90	53,50	37,09	26,57	28,30
4	64,68	51,86	36,89	25,76	29,56
5	64,91	52,39	36,02	29,30	29,48

Gambar 2 juga menunjukkan bahwa penambahan POFA pada campuran RPC mengakibatkan penurunan terhadap nilai kuat tekan RPC sebesar 56,93%. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Amran et al. (2021), sehingga tidak disarankan menggunakan POFA sebagai material dalam campuran RPC. Peningkatan kekuatan yang terjadi disebabkan oleh keberadaan *silica fume* yang mengandung SiO_2 .



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Rata-rata

Silika (SiO_2) yang terdapat dalam *silica fume* dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang terbentuk dari hasil reaksi hidrasi antara semen dan air. Proses hidrasi ini menghasilkan produk sebagai berikut (Kushartomo & Supiono, 2014):



Kalsium hidroksida yang terbentuk kemudian bereaksi dengan silika (SiO_2), didukung oleh panas yang dihasilkan selama proses hidrasi. Reaksi ini memicu reaksi pozzolanik pada beton RPC, yang meningkatkan kekuatan beton tersebut dibandingkan beton konvensional, karena jumlah C-S-H yang terbentuk semakin banyak. Reaksi pozzolanik ini dapat dituliskan sebagai berikut (Kushartomo & Tory, 2024):



Reaksi ini serupa dengan yang terjadi pada silika di dalam *silica fume*, karena *silica fume* bersifat amorf, memiliki karakteristik yang sama (Kushartomo & Supiono, 2014).

Kuat lentur beton

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5 dan Gambar 3, *mix 1* menunjukkan kuat lentur tertinggi. *Mix 2* hingga *mix 4* mengalami penurunan kekuatan lentur beton. Kekuatan lentur pada *mix 4* dan *mix 5* relatif mirip, di mana *mix 5* menggunakan 100% POFA dan 0% *silica fume*, sedangkan *mix 4* menggunakan 75% POFA dan 25% *silica fume*. Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur tersebut, dapat disimpulkan bahwa 5,69 kg POFA dapat menggantikan 1,42 kg *silica fume*. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa penambahan POFA pada campuran RPC mengakibatkan penurunan terhadap nilai kuat lentur RPC sebesar 34,8%.

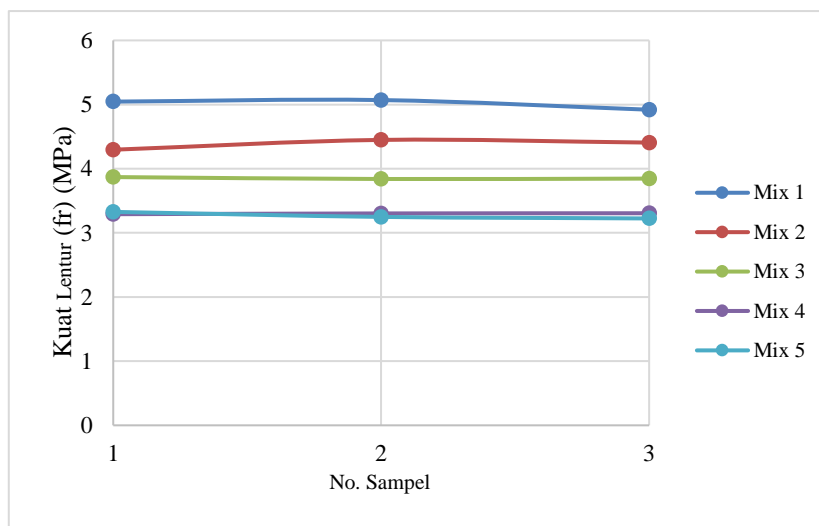
Untuk menemukan nilai korelasi antara kuat lentur dan kuat tekan beton, kita bisa menggunakan rumus korelasi *product moment* atau *pearson*. Dalam penelitian ini, kuat tekan beton diplot pada sumbu x, sedangkan kuat lentur beton diplot pada sumbu y. Dengan pendekatan ini, kita dapat memperoleh nilai koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur beton. Hasil pengujian dan analisis ini dapat dilihat pada Tabel 6.

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa korelasi antara kuat lentur dan kuat tekan beton memiliki hubungan yang sangat kuat. Hal ini disebabkan oleh nilai koefisien korelasi yang berada di antara 0,80 hingga 1,00. Grafik yang menunjukkan pendekatan hubungan antara kuat lentur dan kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 5. Diperoleh persamaan hubungan antara kuat lentur dan kuat tekan beton dengan menggunakan analisis regresi linear sederhana sebagai berikut:

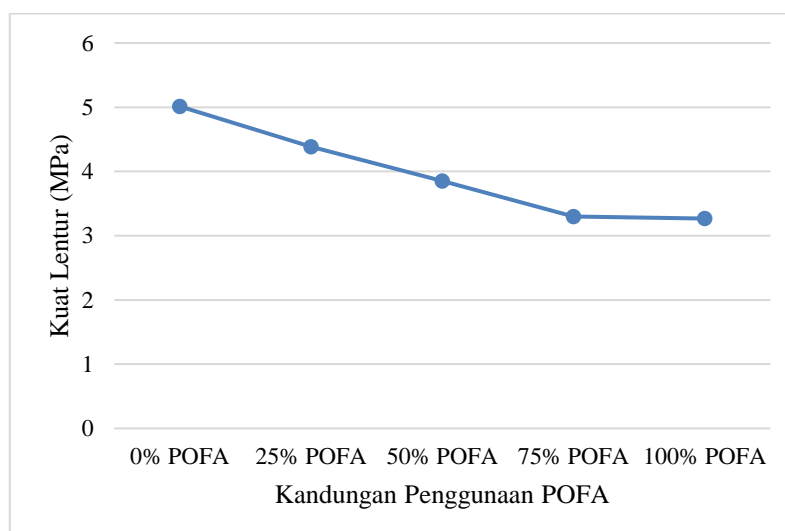
$$y = 0,0459x + 2,0214 ; R^2 = 0,9889$$

Tabel 5. Hasil pengujian kuat lentur beton

No.	Beban Max (kN)	Kuat Lentur (fr) (MPa)	Rata-Rata (MPa)
I-A	16,82	5,05	5,01
I-B	16,9	5,07	
I-C	16,4	4,92	
II-A	14,32	4,30	4,38
II-B	14,83	4,45	
II-C	14,69	4,41	
III-A	12,9	3,87	3,85
III-B	12,8	3,84	
III-C	12,82	3,85	
IV-A	10,97	3,29	3,30
IV-B	11,01	3,30	
IV-C	11,02	3,31	
V-A	11,09	3,33	3,27
V-B	10,83	3,25	
V-C	10,75	3,23	



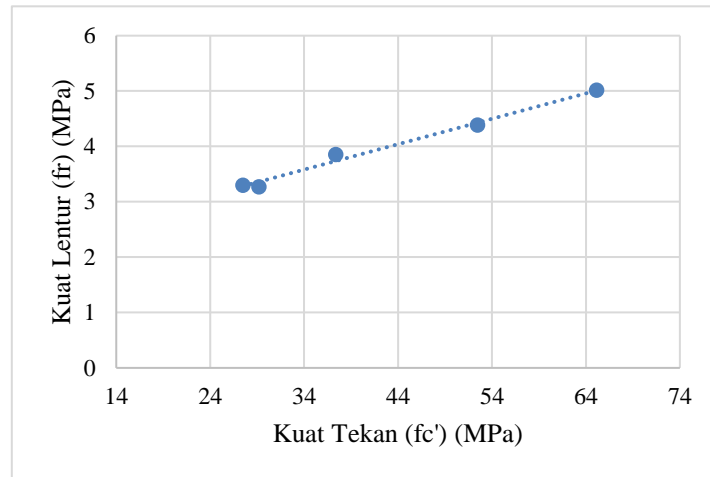
Gambar 3. Grafik hasil pengujian kuat lentur beton



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Kuat Lentur Rata-rata

Tabel 6. Koefisien korelasi kuat lentur beton dengan kuat tekan beton

Jenis	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur (MPa)	Korelasi ke Kuat Lentur
Mix 1	65,12	5,01	0,9944
Mix 2	52,47	4,38	
Mix 3	37,35	3,85	
Mix 4	27,49	3,30	
Mix 5	29,18	3,27	



Gambar 5. Grafik hubungan antara kuat tekan dengan kuat lentur beton

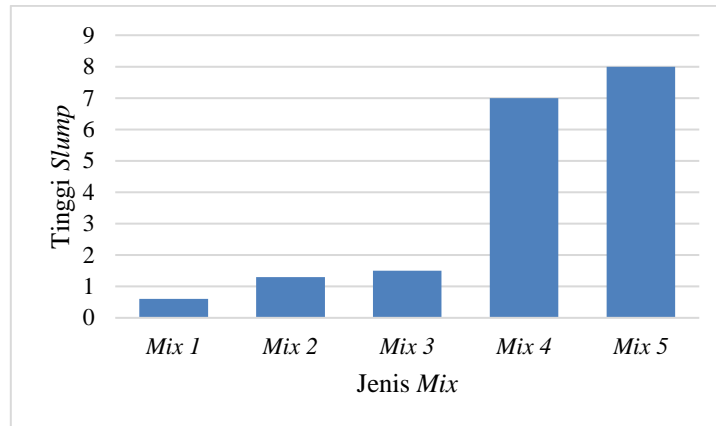
Persamaan ini menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kuat lentur (y) dan kuat tekan beton (x) dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9889, yang mengindikasikan bahwa model regresi ini sangat baik dalam menjelaskan variabilitas data.

Workability beton

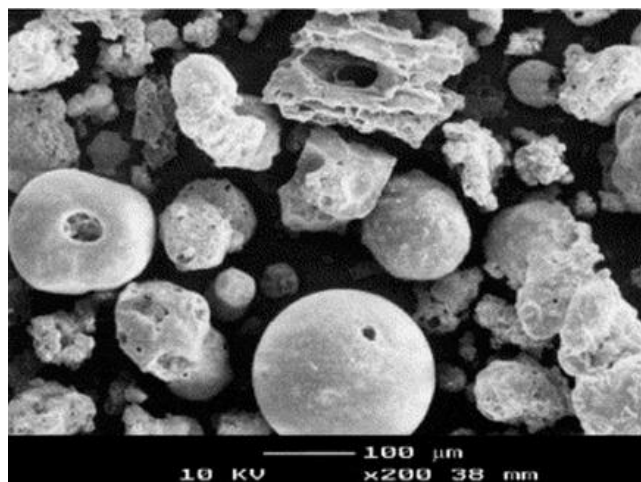
Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7, penambahan POFA kadar POFA pada RPC dapat meningkatkan *workability* dari RPC itu sendiri. Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa ada peningkatan tinggi *slump* yang diukur pada saat melakukan *slump test*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa POFA dapat meningkatkan *workability* beton dikarenakan berdasarkan bentuk partikel yang tidak bersudut seperti pada Gambar 7, dikarenakan bentuk POFA yang tidak bersudut atau berbentuk bulat (*spherical*) dapat menurunkan daya ikat antar partikel.

Tabel 7. Hasil *slump test*

Jenis	Tinggi <i>Slump</i> (cm)
Mix 1	0,6
Mix 2	1,3
Mix 3	1,5
Mix 4	7
Mix 5	8



Gambar 6. Grafik hasil slump test



Gambar 7. POFA under microscope (Amran et al., 2021)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan *palm oil fuel ash* (POFA) pada RPC mengakibatkan penurunan dalam kekuatan tekan RPC dikarenakan terjadi penurunan kuat tekan RPC dari *mix 1* (*silica fume* 100% dan POFA 0%) hingga *mix 5* (*silica fume* 0% dan POFA 100%).
2. Penggunaan *palm oil fuel ash* (POFA) pada RPC mengakibatkan penurunan dalam kekuatan lentur RPC yang dimana terjadi pada *mix 1* (*silica fume* 100% dan POFA 0%) hingga *mix 5* (*silica fume* 0% dan POFA 100%). Pengujian ini menghasilkan nilai korelasi antara kuat lentur dan kuat tekan beton yang berhubungan sangat erat dikarenakan nilai koefisien korelasi berada di antara 0,80 hingga 1,00. Persamaan hubungan dari kuat lentur dan kuat tekan beton dengan analisis regresi linear sederhana $y = 0,0459x + 2,0214$; $R^2 = 0,9889$.
3. Penggunaan *palm oil fuel ash* (POFA) pada RPC dapat meningkatkan *workability*, yang dimana pada pengujian ini terjadi peningkatan nilai *slump* setiap peningkatan kadar POFA yang digunakan pada RPC. *Workability* pada campuran RPC meningkat dikarenakan POFA memiliki partikel berbentuk bulat (*spherical*) yang dapat menurunkan daya ikat antar partikel.

DAFTAR PUSTAKA

- Alkhaly, Y. R. (2013). Reactive powder concrete dengan sumber silika dari limbah bahan organik. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 3(2), 157-166. <https://doi.org/10.29103/tj.v3i2.41>
- Amran, M., Murali, G., Fediuk, R., Vatin, N., & Vasilev, Y. (2021). Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete: A critical review of the short-term properties. *Materials*, 14(2), 332. <https://doi.org/10.3390/ma14020332>
- Kushartomo, W., & Supiono, C. W. (2014). Pengaruh copper slag terhadap sifat mekanis reactive powder concrete. *Jurnal Kajian Teknologi*, 10(3), 175-182.

- Kushartomo, W., & Tory, J. (2024). Analisis penggunaan poliamida pada RPC untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(2), 643-650. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i2.28036>
- Kushartomo, W., Wiyanto, H., & Christianto, D. (2021). Effect of cement–water ratio on the mechanical properties of reactive powder concrete with marble powder as constituent materials. *Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials: ICCIM 2021, Indonesia*, 216, 177-185. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7949-0_16
- Putri, W. R., Utama, P. S., & Olivia, M. (2021). Kuat tekan beton POFA (palm oil fuel ash) dengan bahan tambah silica fume. *Jom FTEKNIK*, 8(1).
- Šoukal, F., Bocian, L., Novotný, R., Dlabajová, L., Šuleková, N., Hajzler, J., Koutný, O., & Drdlová, M. (2023). the effects of silica fume and superplasticizer type on the properties and microstructure of reactive powder concrete. *Materials*, 16(20), 6670. <https://doi.org/10.3390/ma16206670>