

KAJIAN KUAT LENTUR DAN LENDUTAN PADA VARIASI RASIO BENTANG PANJANG – PENDEK PELAT BETON BUBUK REAKTIF DENGAN SILICA FUME 15% DAN PASIR KUARSA 30%

Wibowo^{1*}, Endah Safitri¹, Ilyas Gilang Ramadhan¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta
Jl. Ir. Sutami 36 A, Ketingan Surakarta, Jawa Tengah 57126. Telp: 0271-634524.

*Corresponding author : wibowo68@staff.uns.ac.id

Abstract

The rapid development of technology that occurs in the world of building construction requires researchers to develop various ways, one of which is several innovations and can also be experimental studies that compare facts in the field with the results of calculation analysis. Therefore, the flexural strength of a concrete slab is tested to determine the ability of the slab to withstand loads that induce bending moments in the concrete slab. The flexural strength of a concrete slab is the ability of concrete to withstand a force that is perpendicular to the axis of the test object until the fracture of the test object occurs. Generally, slabs have a relatively thin thickness when compared to the length of the span so that the rigidity of the slab is very small which results in too much deflection. The purpose of this study is to determine the impact of the following ratios long and short spans of the slab on the flexural strength, deflection, and maximum capacity of the slab with reactive powder concrete slab innovation using 15% silica fume and 30% quartz sand. This research also uses additional materials in the form of steel fiber 17.5% and superplasticizer 1.9% of the concrete. The test results obtained for plates with a smaller ratio of long to short spans resulted in greater maximum load capacity, smaller deflection, and smaller flexural strength.

Keywords: deflection, flexural strength, reactive powder concrete slab, silica fume, quartz sand.

Abstrak

Perkembangan teknologi yang pesat dalam dunia konstruksi bangunan mengharuskan para peneliti untuk mengembangkan berbagai metodologi, termasuk beberapa inovasi, berupa studi eksperimental yang membandingkan fakta di lapangan dengan hasil analisis yang diperhitungkan. Pelat adalah suatu struktur tipis dengan permukaan horizontal dan beban tegak lurus terhadap permukaan struktur. Pelat beton didesain mampu menahan beban lentur akibat momen lentur yang ditimbulkan oleh beban tersebut. Oleh karena itu, dilakukan uji kuat lentur pada pelat beton untuk memahami kinerja pelat tersebut dalam menahan beban yang mengakibatkan adanya momen lentur pada pelat beton. Kuat lentur pelat adalah kemampuan pelat dalam menahan gaya yang arahnya bersilang tegak terhadap sumbu benda uji hingga terjadinya patah pada pelat tersebut. Umumnya ketebalan pelat lebih tipis dibandingkan dengan bentang, sehingga pelat menjadi sangat kaku dan terlalu banyak menyimpang. Oleh karena itu pelat ini menggunakan inovasi pelat beton bubuk reaktif tanpa tulangan pada pelat dengan harapan bisa sebagai inovasi ke depannya. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh rasio bentang panjang dan pendek pelat terhadap kuat lentur, lendutan, dan kapasitas maksimum pelat dengan inovasi pelat beton inovasi bubuk reaktif menggunakan *silica fume* dan pasir kuarsa masing-masing 15% dan 30%. Penelitian ini juga menggunakan bahan tambah berupa *steel fiber* 17,5% dan *superplasticizer* 1,9% dari berat binder. Hasil pengujian diperoleh pelat dengan rasio bentang panjang dan pendek lebih kecil menghasilkan kapasitas beban maksimum lebih besar, lendutan yang lebih kecil, dan kekuatan lentur yang lebih kecil.

Kata Kunci : kuat lentur, lendutan, pelat beton bubuk reaktif, pasir kuarsa, *silica fume*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat khususnya dalam dunia konstruksi bangunan menuntut para peneliti untuk mengembangkan berbagai metode yang ada. Satunya berupa inovasi dan yang satu lagi berupa penelitian eksperimental yang membandingkan fakta di lapangan dan hasilnya adalah analisis yang diperhitungkan. Pada bidang produksi pembangunan struktur, beton merupakan bahan yang paling umum digunakan di Indonesia. Penggunaan beton memiliki banyak keunggulan, termasuk kemudahan dalam pengolahan (*workability*), kekuatan, dan daya tahan. Salah satu inovasi teknologi material beton yang sekarang ini marak dikembangkan yaitu beton bubuk reaktif atau *Reactive Powder Concrete* (RPC). Beton RPC memiliki banyak keuntungan, terutama karena beton ini memiliki standar mutu yang lebih tinggi daripada beton biasa, menggunakan volume dan dimensi yang lebih sedikit daripada beton konvensional.

RPC merupakan terobosan terbaru dalam teknologi beton yang ditemukan pada tahun 1994 melalui M. Cheyrezy dan P. Richard di wilayah Prancis. Beton ini bertujuan untuk mencapai homogenitas campuran dengan mengganti agregat kasar dengan agregat halus dengan tidak ada unsur agregat kasar yang dipertahankan, dengan demikian menghasilkan beton dengan impermeabilitas dan mutu yang tinggi. Keunggulan RPC dibandingkan beton normal dan beton *fiber* lainnya adalah lebih awet, ulet, dan kuat (Sarika S & Dr. Elson John, 2015). Keunggulan ini berarti RPC dapat digunakan dalam banyak aplikasi konstruksi seperti gedung bertingkat, struktur jembatan, struktur kelautan, bangunan pengolahan limbah, dan aplikasi pracetak. (Mayhoub et al., 2021).

Komposisi beton pada RPC ini antara lain terdiri dari pasir alam (Alifyya, 2021), pasir kuarsa (Abadi & Kazemi, 2014), semen OPC tipe 1 (Raza et al., 2020), air (Noaman, 2021), *silica fume* (Kushartomo et al., 2016), *superplasticizer* (Mostofinejad et al., 2016), dan *steel fibers* (Wibowo, Santoso, et al., 2022). Pengaplikasian faktor air semen (FAS) yang rendah pada RPC mengurangi jumlah ruang kecil di antara partikel, meningkatkan kepadatan, serta memberikan daya tahan dan kekuatan beton yang tinggi. (Alkhaly, 2017). Penambahan *silica fume* dalam proporsi tinggi ke RPC meningkatkan kemampuan kerja campuran, menurunkan suhu selama proses hidrasi, memperbaiki struktur mikro pasta beton, dan meningkatkan kuat tekan. (Kushartomo & Christianto, 2015). Penambahan *silica fume* pada komposisi RPC pada kadar 15% berat binder memberikan nilai *modulus of rupture* tertinggi sebesar 7,30 MPa pada umur beton 28 hari. (Wibowo, Basuki, et al., 2022). Pasir kuarsa dapat meningkatkan homogenitas RPC sehingga berperan dalam meningkatkan nilai kuat tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur beton. Pengaplikasian kadar pasir kuarsa berukuran 30% dari bobot seluruh agregat halus pada beton RPC dapat memaksimalkan kuat lentur beton sebesar 7,0428 MPa saat beton berumur 28 hari (Wibowo, Safitri, et al., 2023). Beton ini memiliki faktor air semen (FAS) yang rendah, sehingga penggunaan *superplasticizer* meningkatkan durabilitas RPC. Oleh karena itu, kemampuan proses RPC menurun tanpa adanya zat pereduksi air. *Superplasticizer* juga dapat meningkatkan homogenitas campuran beton RPC dengan meningkatkan *flowability* beton dan memungkinkan pencampuran campuran beton secara menyeluruh (Ahmad et al., 2015). Peningkatan sifat mekanik beton juga dapat dicapai melalui penggunaan serat baja. Dengan serat baja, nilai kuat lentur RPC 350% lebih tinggi dibandingkan RPC tanpa serat baja. Pada saat yang sama, kuat tekannya meningkat 10% dibandingkan RPC tanpa serat. (Kushartomo & Christianto, 2015).

Penambahan bahan aditif dan penggantian agregat kasar dengan pasir kuarsa mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap kuat lentur beton. Salah satu elemen struktur dalam perencanaan struktur beton adalah pelat beton. Pelat beton merupakan struktur tipis yang memiliki permukaan mendatar dan menopang beban secara vertikal yang tegak lurus terhadap permukaannya. Munculnya RPC sebagai salah satu inovasi beton yang memiliki kinerja dan durabilitas yang tinggi serta ramah lingkungan maka RPC dinilai berpotensi ketika diaplikasikan sebagai pelat beton. Pelat beton dirancang khusus untuk menanggung beban lentur yang timbul dari momen lentur yang diberikan oleh suatu beban. Kuat lentur adalah parameter mekanis suatu struktur. Kuat lentur merupakan nilai kuat tarik tidak langsung suatu balok beton pada dua konfigurasi yang memegang benda uji secara vertikal hingga benda uji tersebut mengalami kerusakan. Alternatifnya, biasanya didefinisikan sebagai momen lentur dibagi momen inersia balok. Pada penelitian ini digunakan metode *one point loading* untuk menentukan nilai lendutan. Pengujian lendutan dilakukan dengan menguji pelat mengacu pada (ASTM C293/C293M) berdimensi sesuai dengan rasio bentang panjang – pendek pelat yang diteliti. Pelat beton ini dibebani pada satu titik di bagian tengah bentang (ASTM C293/C293M). Pengujian ini berguna untuk memodelkan gaya-gaya luar yang bekerja terhadap struktur yang menyebabkan elemen struktur mengalami perubahan bentuk. Apabila gaya luar yang dikerjakan terhadap struktur terus meningkat, maka dapat mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentang sampai batas maksimalnya yang dapat menjadikan elemen struktur tersebut runtuh (Dady & et al, 2015). Tujuan pada penelitian ini yaitu mengkaji pengaruh rasio bentang panjang – pendek pelat beton dengan inovasi beton RPC terhadap nilai kuat lentur, lendutan, dan kapasitas pelat beton tersebut. Pada penelitian yang dilakukan ini menggunakan pelat dengan rasio bentang panjang – pendek pelat beton sebesar 2,5; 2,7; 2,9; 3,1 dengan bentang panjang 70 cm dan bentang pendek 22 cm, 24 cm, 26 cm, dan 28 cm sebanyak masing – masing 1 sampel.

METODE

Teknik yang diterapkan dalam studi ini adalah metode eksperimental. Studi tersebut diawali dengan pengujian agregat halus. Pertama-tama, pengujian agregat halus dilakukan sampai mencapai standar yang ditetapkan. Setelah itu, pembuatan benda uji berupa pelat dimensi panjang 70 cm dengan variasi rasio bentang panjang-pendek 2,5; 2,7; 2,9; 3,1 dengan panjang bentang pendeknya masing masing 22 cm, 24 cm, 26 cm, 28 cm dengan ketebalan masing-masing 5 cm, benda uji berbentuk silinder dengan dimensi 10 cm x 20 cm, serta objek uji berbentuk balok

berukuran 40 cm x 10 cm x 10 cm. Sebelum campuran adukan beton dituang ke bekisting masing-masing benda uji, dilakukan pengujian *slump flow*. Selanjutnya, dilakukan metode perawatan beton berupa *curing* beton di dalam kolam air. Pengujian beton keras yang berupa uji kuat lentur dan kuat tekan dikerjakan saat umur beton 28 hari. Kode dan jumlah data mengenai kekuatan lentur pelat dapat diidentifikasi dalam **Tabel 1**, uji kuat tekan silinder dapat diidentifikasi dalam **Tabel 2**, dan uji kuat lentur balok dapat diidentifikasi pada **Tabel 3**.

Tabel 1. Kode dan jumlah kebutuhan benda uji kuat lentur dan lendutan pelat

No.	Ukuran P x L (cm)	Rasio Ly/Lx	Ketebalan (cm)	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Benda Uji
1	70 x 22	3,1	5	RPC-PLT-1	28	1
2	70 x 24	2,9	5	RPC-PLT-2	28	1
3	70 x 26	2,7	5	RPC-PLT-3	28	1
4	70 x 28	2,5	5	RPC-PLT-4	28	1
Jumlah						4

Tabel 2. Kode dan jumlah kebutuhan benda uji kuat tekan

No.	Dimensi Benda Uji	Kadar Silica Fume	Kadar Pasir Kuarsa	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Benda Uji
1	10 cm x 20 cm	15%	30%	RPC-SLDR-1	28	1
2	10 cm x 20 cm	15%	30%	RPC-SLDR-2	28	1
3	10 cm x 20 cm	15%	30%	RPC-SLDR-3	28	1
Jumlah						3

Tabel 3. Kode dan jumlah kebutuhan benda uji kuat lentur balok

No.	Dimensi Benda Uji	Kadar Silica Fume	Kadar Pasir Kuarsa	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Benda Uji
1	40 cm x 10 cm x 10 cm	15%	30%	RPC-BLK-1	28	1
2	40 cm x 10 cm x 10 cm	15%	30%	RPC-BLK-2	28	1
3	40 cm x 10 cm x 10 cm	15%	30%	RPC-BLK-3	28	1
Jumlah						3

Mix Design Reactive Powder Concrete

Mix design ini masih belum ada standar yang jelas. Oleh karena itu, standar penelitian ini mengacu pada standar RPC yang sebelumnya diterapkan oleh M. Cheyrezy dan P. Richard di tahun 1995, dimana kandungan *silica fume* adalah sebesar 15% dari keseluruhan berat binder. faktor air semen yang dipakai sebanyak 0,19, semen yang digunakan adalah OPC tipe 1, *superplasticizer* yang digunakan adalah ViscoCrete 1003 dengan proporsi berat binder 0,019, dan serat baja yang digunakan adalah kait berbahan Dramix 3D dengan diameter sebesar 0,75 mm, panjang 60 mm, rasio aspek 80 adalah 0,175 dari total berat binder. *Mix design* yang digunakan dalam RPC ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi *Mix design Reactive Powder Concrete*

Kode Benda Uji	Semen (kg)	Silica Fume (kg)	Pasir Halus (kg)	Pasir Kuarsa (kg)	Steel Fiber (kg)	Superplasticizer (lt)	Air (lt)
RPC-PLT-1	5,47	0,97	8,45	3,52	0,09	0,06	1,22
RPC-PLT-2	5,71	1,01	8,81	3,68	0,10	0,07	1,28
RPC-PLT-3	6,19	1,09	9,55	3,98	0,11	0,07	1,38
RPC-PLT-4	6,66	1,18	10,28	4,30	0,11	0,08	1,49
RPC-BLK-1	8,16	1,44	12,59	5,25	0,14	0,09	1,82
RPC-BLK-2	8,16	1,44	12,59	5,25	0,14	0,09	1,82
RPC-BLK-3	8,16	1,44	12,59	5,25	0,14	0,09	1,82
RPC-SLDR-1	1,35	0,24	2,09	0,87	0,02	0,02	0,30
RPC-SLDR-2	1,35	0,24	2,09	0,87	0,02	0,02	0,30
RPC-SLDR-3	1,35	0,24	2,09	0,87	0,02	0,02	0,30

Pengujian Material Penyusun RPC

Pengujian agregat halus pada beton RPC didasarkan pada ASTM dan SNI untuk pemeriksaan lumpur, pemeriksaan kandungan organik, pemeriksaan densitas, pemeriksaan distribusi ukuran butir, serta pengujian kehalusan modulus. Komponen beton lainnya, terutama *silica fume*, diuji menggunakan X-ray fluorescence (XRF).

Pengujian Slump Flow RPC

Uji *slump flow* dimaksudkan untuk mengetahui *workability* yaitu seberapa mudah beton RPC dapat dikerjakan di lapangan. Standar *slump flow* mengacu pada ASTM C1611. Untuk uji *slump flow*, letakkan kerucut Abrams pada papan aliran. Selanjutnya tuang beton segar di atas kerucut Abrams hingga terisi penuh, kemudian tarik perlahan ke atas untuk menentukan diameter maksimum beton baru dan durasi yang dibutuhkan untuk memperoleh diameter maksimum tersebut. Setelah pengetesan, hasilnya dicatat dan dianalisis menggunakan Microsoft Excel. Nilai slump flow pada beton RPC berkisar 340-360 mm (Alkhaly, et al., 2022).

Pengujian Kuat Lentur dan Lendutan Pelat Beton RPC

Uji kekuatan lentur dikerjakan pada saat pelat RPC berumur 28 hari. Uji ketahanan lentur pelat beton dilakukan melalui uji langsung pada pelat tersebut mengacu pada (SNI 4154:2014) berdimensi 70 cm pada bentang panjangnya dan berdimensi masing – masing 22 cm, 24 cm, 26 cm, 28 cm pada bentang pendeknya dengan rasio 2,5; 2,7; 2,9; 3,1. Pengujian dilakukan dengan meletakkan pelat di atas dua tumpuan di kedua sisi tiap ujung pelat dengan pembebanan di tengah bentang (SNI 4154:2014 Metode Uji Kekuatan Lentur Beton (Menggunakan Balok Sederhana Dengan Beban Terpusat Di Tengah Bentang), 2014) seperti pada Gambar 1. Dial gauge diletakkan di bawah benda uji untuk mengetahui besarnya lendutan. Pengujian kuat lentur dan lendutan dihitung menggunakan Persamaan [1] dan Persamaan [2].

$$\sigma_f = \frac{Mx \times Y}{I} \dots\dots\dots [1]$$

$$\Delta = \frac{P \times L^3}{48 \times EI} + \frac{5 \times q \times L}{384 \times EI} \dots\dots\dots [2]$$

keterangan:

- σ_f = Kuat lentur (N/mm²)
- Mx = Beban maksimum = $\frac{1}{4} \times PL + \frac{1}{8} \times qL^2$ (N.mm)
- Y = Jarak ke sumbu netral = $\frac{1}{2} \times h$ (mm)
- I = Momen inersia = $\frac{1}{12} \times bh^3$ (mm⁴)
- Δ = Lendutan (mm)
- P = Beban maksimum (N)
- L = panjang bentang (mm)
- q = berat sendiri pelat (N/mm)
- E = modulus elastisitas = $0,0043 \times W_c^{1,5} \times \sqrt{f'c}$ (N/mm²)

Pengujian Kuat Tekan Silinder

Pengujian kekuatan tekan beton dilaksanakan pada silinder berukuran 10 cm x 20 cm dan melakukan perawatan selama 28 hari. Uji kekuatan tekan beton mengacu pada SNI 2847-2013. Hasil uji kekuatan tekan yang diperoleh memakai alat CTM adalah beban maksimum dalam satuan kN dibagi luas permukaan silinder. Kemudian dikalikan dengan koefisien korelasi berdasarkan ukuran silinder berdasarkan SNI 1974-2011. Pengujian kuat lentur dilakukan penghitungan menggunakan Persamaan [3].

$$f'c = \frac{P}{A} \times 1,04 \dots\dots\dots [3]$$

keterangan:

- P = Beban maksimum (N)
- A = Luas permukaan beton (mm²)
- $f'c$ = Kuat tekan (N/mm²)

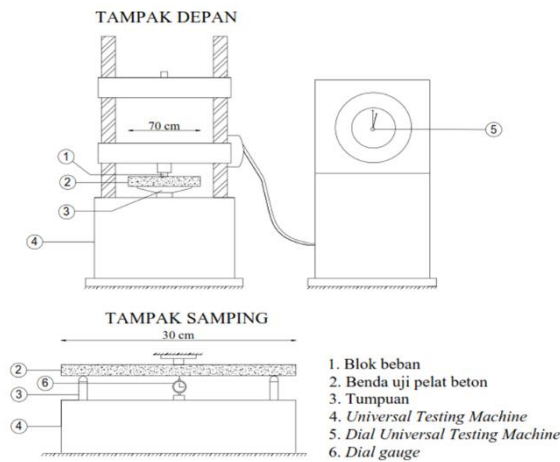
Pengujian MOR (Modulus of Rupture)

Uji modulus patah dilakukan pada balok berumur 28 hari dengan dimensi 40 cm x 10 cm x 10 cm. Tes modulus keruntuhan digunakan untuk menentukan kuat lentur beton. Standar pengujian terdapat pada SNI 4154:2014. Modulus elastisitas uji pecah dihitung menggunakan Persamaan [4]. Gambar set up pengujian kuat lentur pelat beton terdapat pada Gambar 1.

$$R = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \dots \dots \dots [4]$$

keterangan:

- L = Panjang bentang (mm)
- b = Lebar benda uji (mm)
- R = Modulus of rupture (MPa)
- d = Tinggi benda uji (mm)
- P = Beban maksimum (N)



Gambar 1. *Set up* pengujian kuat lentur pelat beton

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton

Parameter uji agregat halus yang diuji pada penelitian ini adalah melakukan pengujian terhadap jumlah lumpur, kandungan bahan organik, berat jenis, gradasi dan modulus ukuran halus. Informasi mengenai hasil pengujian agregat halus dapat ditemukan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Pasir Kuarsa	Pasir Alam	Standar	Kesimpulan
Kandungan Lumpur	0,7%	2,30%	<5% PBI 1971, ASTM C.117	Mencapai Standar
Kandungan Zat Organik	Kuning Muda	Kuning Kemerahan	PBI 1971, ASTM C.40	Mencapai Standar
Modulus Kehalusan	3,43	2,54	1,5<MH<3,8 SII-0052-80	Mencapai Standar
Bulk Specific Gravity	2,50	2,44	-	-
Absorsion	4,71%	4,49%	-	-
Bulk Specific Gravity SSD	2,62	2,55	2,5 – 2,7 SNI 03-2834-2000	Mencapai Standar
Apparent Specific Gravity	2,84	2,74	-	-

Uji *silica fume* berdasarkan ASTM C-1240 dengan kandungan SiO₂ minimal 85%. Uji *silica fume* yang dilakukan menggunakan XRF menunjukkan kandungan SiO₂ sebesar 85,76% memenuhi standar yang dipersyaratkan.

Hasil *Slump Flow Test* RPC

Nilai *slump flow* RPC cenderung rendah. Laju aliran yang rendah ini sebanding dengan rasio air semen yang rendah. Nilai *slump test* diukur sebesar 340 mm. Akibatnya untuk *workability* dalam pencampuran rendah dikarenakan nilai *slump* tersebut, oleh karena itu pada penelitian ini menggunakan *superplasticizer* untuk meningkatkan *workability* pada pencampuran beton ini.

Hasil Pengujian Kuat Lentur Pelat Beton RPC

Hasil dari uji kekuatan lentur beton RPC dengan kadar *silica fume* 15% dan kadar pasir kuarsa 30% dengan variasi rasio bentang panjang – pendek pelat beton 2,5; 2,7; 2,9; 3,1 atau dengan panjang bentang pendeknya 22 cm, 24 cm, 26 cm, 28 cm dengan beban terpusat di tengah bentang bentang tertera dalam Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian kuat lentur pelat beton RPC

No.	Kode Benda Uji	Berat Pelat (N/mm)	Mmax (Nmm)	Beban Maksimum (N)	Kuat Lentur (MPa)
1	RPC-PLT-1	0,25	1129438,10	7455,60	12,32
2	RPC-PLT-2	0,27	1218737,02	8044,20	12,19
3	RPC-PLT-3	0,29	1278605,94	8436,60	11,80
4	RPC-PLT-4	0,31	1338474,86	8829,00	11,47
Rata - rata					11,95

Tabel 6 menunjukkan bahwa rasio bentang panjang-pendek berpengaruh terhadap beban maksimum yang dapat diterima oleh pelat beton. Besarnya beban maksimum yang dipengaruhi oleh rasio bentang panjang-pendek dikarenakan semakin kecil rasio bentang panjang-pendek pelat tersebut, maka semakin meningkatkan kekakuan pelat tersebut. Hal ini bisa dilihat pada persamaan stiffness didefinisikan sebagai hasil antara beban maksimum dengan lendutan dari uji kuat lentur (Budynas & Nisbett, 2011). Dari persamaan tersebut, terlihat bahwa nilai kekakuan sebanding dengan beban maksimum. Berdasarkan Tabel 6 juga dapat dilihat besarnya nilai kuat lentur pada pelat. Dari keempat benda uji dihasilkan nilai rerata kuat lentur sebesar 11,95 MPa.

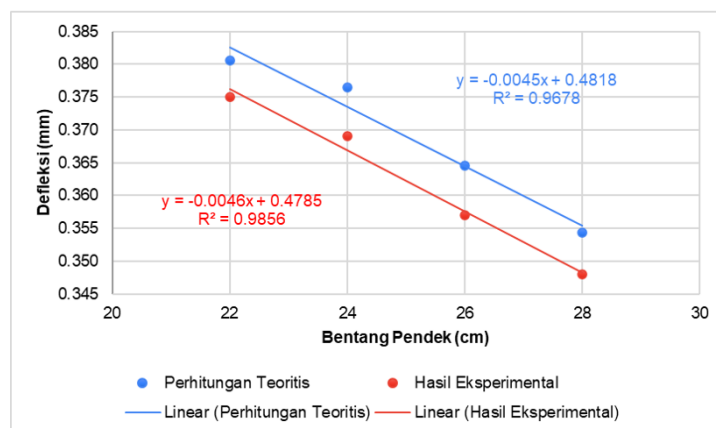
Hasil Pengujian Lendutan Pelat

Besarnya lendutan maksimum dari pengujian lendutan pada pelat RPC tertera dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian dan perhitungan teoritis lendutan

No.	Kode Benda Uji	Perhitungan (mm)	Eksperimental (mm)	Selisih (%)
1	RPC-PLT-1	0,38	0,38	1,48
2	RPC-PLT-2	0,38	0,37	2,01
3	RPC-PLT-3	0,37	0,36	2,12
4	RPC-PLT-4	0,36	0,35	1,84

Dari hasil pengujian lendutan secara eksperimen dan perhitungan lendutan secara teoritis dapat ditarik kesimpulan bahwa lendutan yang terjadi pada pelat RPC-PLT-4 (rasio bentang panjang-pendek 2,5 atau lebar 28 cm) lebih kecil dari pelat RPC-PLT-3 (rasio bentang panjang-pendek 2,7 atau lebar 26 cm), pelat RPC-PLT-3 (rasio bentang panjang-pendek 2,7 atau lebar 26 cm) lebih kecil dari pelat RPC-PLT-2 (rasio bentang panjang-pendek 2,9 atau lebar 24 cm), dan pelat RPC-PLT2 (rasio bentang panjang-pendek 2,9 atau lebar 24 cm) lebih kecil dari pelat RPC-PLT-1 (rasio bentang panjang-pendek 2,9 atau lebar 22 cm). Hal tersebut dipengaruhi oleh bentang pendek atau lebar pelat yang semakin meningkat sehingga mampu menahan beban yang lebih besar. Selain itu, momen inersia juga berpengaruh pada hubungan antara lendutan dan bentang pendek atau lebar pelat. Momen inersia lebih besar pada pelat yang lebih lebar atau lebih besar bentang pendeknya karena memiliki massa yang lebih besar.



Gambar 2. Perbandingan lendutan hasil perhitungan teoritis dengan eksperimental

Gambar 2. di atas menunjukkan bahwa besarnya lendutan hasil pengujian eksperimental pada RPC-PLT-1, RPC-PLT-2, RPC-PLT-3, dan RPC-PLT-4 tidak jauh berbeda dengan lendutan hasil perhitungan teoritis. Hasil pengujian eksperimental lebih besar daripada hasil perhitungan teoritis membuktikan bahwa pelat beton bubuk reaktif sudah memenuhi kriteria dari perhitungan secara teoritis. Hal ini juga menunjukkan bahwa terdapat variabilitas dalam eksperimental, seperti beberapa pelat yang ukurannya tidak simetris karena kesalahan penuangan campuran beton pada bekisting dan permukaan penyimpanan bekisting yang tidak rata menyebabkan pula permukaan atas pelat yang tidak rata. Selain itu, nilai R^2 dari hasil analisis regresi linear mendekati 100%. Angka tersebut menunjukkan bentang pendek pelat (X) memberikan pengaruh terhadap lendutan (Y), semakin besar bentang pendek atau lebar pelat, maka semakin kecil lendutan yang terjadi.

Hasil Pengujian Kuat Tekan RPC

Informasi mengenai hasil pengujian kuat tekan silinder dengan dimensi 10 cm x 20 cm yang telah berumur 28 hari dapat disimak dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hasil pengujian kuat tekan beton RPC

No.	Kode Benda Uji	P (kN)	Faktor Korelasi	f_c (MPa)
1	RPC-SLDR-1	520,00	1,04	68,86
2	RPC-SLDR-2	515,00	1,04	68,19
3	RPC-SLDR-3	522,00	1,04	69,12
Rata-rata f_c				68,72

Berdasarkan Tabel 8, didapatkan rata-rata kekuatan tekan beton yang dihasilkan sebanyak 68,72 MPa. Hasil kuat tekan tersebut tidak memenuhi rencana mutu beton awal, yakni 85 MPa. Hal ini disebabkan oleh metode curing yang diaplikasikan adalah normal curing. Metode steam curing menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan metode normal curing pada beton RPC umur 28 hari (Edwin et al., 2023). Reaksi hidrasi pada beton dapat dipercepat dengan metode *steam curing* dengan meningkatkan pembentukan gel CSH (Helmi et al., 2019). Gel CSH ini mampu meningkatkan kekuatan tekan beton yang lebih tinggi dibandingkan normal curing karena kemampuan menutup pori-pori pada beton.

Hasil Pengujian *Modulus of Rupture*

Hasil uji MOR dengan benda uji balok tersebut tertera di Tabel 9.

Tabel 9. Hasil pengujian MOR balok beton RPC

No.	Kode Benda Uji	P (N)	P (kgf)	Nilai MOR (MPa)
1	RPC-BLK-1	17063,57	1740	7,68
2	RPC-BLK-2	16965,51	1730	7,63
3	RPC-BLK-3	17161,64	1750	7,72
Rata-rata MOR				7,68

Tabel 10. Hubungan antara MOR dengan kuat tekan beton RPC

No.	Kode Benda Uji	f_c (MPa)	R (MPa)	$R/f_c \times 100\%$
1	RPC-BLK-1	68,86	7,68	11,15
2	RPC-BLK-2	68,19	7,63	11,20
3	RPC-BLK-3	69,12	7,72	11,17

Berdasarkan Tabel 10 dapat dilihat bahwa nilai MOR sebesar 11% dari nilai kuat tekan (f_c). Nilai ini sudah sesuai dengan SNI 2847-2019 yakni nilai modulus runtuh berkisar 10-15% dari nilai kuat tekan beton.

KESIMPULAN

Menurut hasil riset diatas, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil nilai MOR beton RPC sebesar 11% dari kuat tekan beton. Nilai MOR sudah memenuhi SNI 2847-2019 yang berkisar 10-15% dari nilai kuat tekan beton.
- Semakin besar bentang pendek pelat, semakin besar beban maksimum yang dapat diterima. Hal ini dibuktikan dari hasil RPC-PLT-1 mendapatkan beban maksimum sebesar 7455,60 N, RPC-PLT-2 mendapatkan nilai beban maksimum sebesar 8044,20 N, RPC-PLT-3 mendapatkan beban maksimum sebesar 8436,60 N, dan RPC-PLT-4 mendapatkan beban maksimum sebesar 8829,00 N.
- Pelat dengan rasio bentang panjang-pendek 3,1 atau lebar 22 cm (RPC-PLT-1) menghasilkan nilai kuat lentur terbesar, yakni 12,32 MPa. Pada RPC-PLT-2 menghasilkan kuat lentur sebesar 12,19 MPa, RPC-PLT-3 menghasilkan nilai kuat lentur sebesar 11,80 MPa, dan RPC-PLT-4 menghasilkan kuat lentur terkecil sebesar 11,47 MPa. Dari keempat pelat beton RPC menghasilkan rerata kuat lentur sebesar 11,95 MPa.

- Semakin besar bentang pendek pelat, semakin kecil lendutan pada pelat. Dari hasil penelitian didapatkan selisih yang kecil antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil eksperimental lendutan. Lendutan pelat RPC-PLT-1 memiliki selisih sebesar 1,48%, pelat RPC-PLT-2 memiliki selisih sebesar 2,01%, pelat RPC-PLT-3 memiliki selisih sebesar 2,12%, dan pelat RPC-PLT-4 memiliki selisih sebesar 1,84% dari hasil pengujian eksperimen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada seluruh dosen, mahasiswa, dan laboran di Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- Aisyah, S. T. (2018). ANALISIS MIKROSTRUKTUR REACTIVE POWDER CONCRETE (RPC) DENGAN VARIASI TEMPERATUR PERAWATAN. Sriwijaya University.
- Alkhaly, Y. R., 2017, "Reactive Powder Concrete Dengan Sumber Silika Dari Limbah Bahan Organik", *Teras Jurnal*, 3(2), 157.
- Alkhaly, Y. R., Abdullah, Husaini, & Hasan, M. (2022). Characteristics of reactive powder concrete comprising synthesized rice husk ash and quartzite powder. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134154. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134154>
- Arsanto, B. D. (2023). Kajian Kuat Lentur, Flexural Toughness, dan Stiffness pada Beton Bubuk Reaktif dengan Silica Fume 15% dan Variasi Pasir Kuarsa. Universitas Sebelas Maret.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). Shigley's mechanical engineering design (Vol. 9). McGraw-Hill
- Dwiamirta, T. D., & Saelan, P. (2022). Studi mengenai Prediksi Kuat Tekan Reactive Powder Concrete (RPC) menggunakan Formulasi Dreux Gorisse. Institut Teknologi Nasional.
- Edwin, R. S., Ningsih, S. H., & Rizal, M. (2023). PENGARUH TREATMENT PANAS (STEAM CURING) SUHU 90 °C SELAMA 24 JAM TERHADAP NILAI KUAT TEKAN DAN LENTUR BETON RPC (KANDUNGAN SLAG NIKEL DAN FLY ASH). *STABILITA || Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.55679/jts.v11i1.39843>
- Faqihuddin, A., Hermansyah, & Kurniati, E. (2021). INJAUAN CAMPURAN BETON NORMAL DENGAN PENGGUNAAN SUPERPLASTICIZER SEBAGAI BAHAN PENGGANTI AIR SEBESAR 0%; 0,3%; 0;5% DAN 0,7% BERDASARKAN BERAT SEMEN. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 2(1), 34–45
- Fikri, M., Muhtar, & Manggala, A. S. (2023). Studi Ekperimental Pengaruh Tebal Terhadap Kapasitas Dan Kekakuan Pelat Satu Arah Beton Bertulang Tunggal. *Jurnal Smart Teknologi*, 4, 566–5
- Gunawan, P., Wibowo, & Munandar, A. (2015). PENGARUH PENAMBAHAN SERAT NYLON PADA BETON RINGAN DENGAN TEKNOLOGI GAS TERHADAP KUAT TEKAN, KUAT TARIK BELAH, DAN MODULUS ELASTISITAS. *Jurnal Teknik Sipil*, 750–758.
- Helmi, M., Widyawati, R., Irianti, L., & Annisa, M. A. (2019). Sifat Mekanik Beton Reaktif yang Menggunakan Abu Sekam Padi sebagai Pengganti Sebagian Semen dan Perlakuan Perawatan Panas (Heat Curing). 78–83
- Johannes, D., Mangundap, K., Sugiharto, H., & Wijaya, G. B. (2017). PENGARUH PENAMBAHAN SERAT BAJA 4D DRAMIX TERHADAP KUAT TEKAN, TARIK BELAH, DAN LENTUR PADA BETON. *Teknik Sipil*, 6, 40–47.
- Kushartomo, W., & Christianto, D., 2015, "Pengaruh Serat Lokal Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Reactive Powder Concrete dengan Teknik Perawatan Penguapan", *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 22(1), 31–36.
- Sarika S, & Dr. Elson John., 2015, "A Study on Properties of Reactive Powder Concrete", *International Journal of Engineering Research And*, V4(11), 110–113.
- SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. (2019). Badan Standardisasi Nasional
- SNI 4154:2014 Metode uji kekuatan lentur beton (menggunakan balok sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang). (2014). Badan Standardisasi Nasional.
- Syahland, S. J. (2017). PERHITUNGAN PLAT LANTAI STRUKTUR EXISTING PADA GEDUNG PUSKESMAS GANJAR AGUNG KOTA METRO. *TAPAK*, 6(2).
- Wibowo, Safitri, & Azizah, T. (2023). KAJIAN KUAT TEKAN BETON BUBUK REAKTIF MUTU TINGGI DENGAN SILICA FUME 15% DAN VARIASI PASIR KUARSA. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 11(1), 56–63.