

Perilaku Histeretik *Subassemblage* Balok-Kolom Interior Prategang Parsial Reactive Powder Concrete dalam Pemodelan *Finite Element*

Siti Aisyah Nurjannah

Program Studi Pascasarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung, E-mail: sanurjannah@gmail.com

Bambang Budiono

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung
E-mail : b.budiono1995@gmail.com

Iswandi Imran

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung
E-mail: iswandiimran@gmail.com

Saptahari Sugiri

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung
E-mail: saptahari@si.itb.ac.id

Abstrak

Penelitian mengenai beton di beberapa negara telah menghasilkan suatu jenis beton Ultra High Performance Concrete (UHPC) yang memiliki kekuatan, daktilitas, modulus elastisitas, dan durabilitas tinggi, yang disebut Reactive Powder Concrete (RPC). Penelitian struktur yang menggunakan material RPC di berbagai negara telah memperlihatkan kinerja yang lebih baik daripada struktur yang terbuat dari Normal Concrete (NC) ataupun High Performance Concrete (HPC) dalam menahan beban baik monotonik maupun siklik. Hasil penelitian struktur bermaterial RPC yang menahan beban siklik memperlihatkan bahwa perilaku histeretik struktur cukup baik. Dalam penelitian ini, dilakukan penelitian material RPC dan pemodelan struktur dengan metode finite element non-linier (MFE-NL). Hasil pengujian material merupakan bagian dari input pemodelan struktur subassemblage balok-kolom interior prategang parsial (S-RPC) dengan MFE-NL Sebagai pembandingan, terdapat model subassemblage balok-kolom interior prategang parsial yang menggunakan material NC (S-NC). Untuk menganalisis perilaku histeretik model, terdapat beberapa model S-RPC dan S-NC dengan variasi nilai Partial Prestressed Ratio (PPR). Analisis hasil pemodelan memperlihatkan keunggulan kinerja dan perilaku histeretik semua model S-RPC dibandingkan dengan model S-NC dalam hal daktilitas, disipasi energi, kekakuan, dan kekuatan. Dari hasil pemodelan, terdapat nilai PPR optimum untuk model S-RPC yang berkisar antara 21,39% sampai dengan 37,34%. Sedangkan, nilai PPR optimum untuk model S-NC adalah 34,15%.

Kata kunci: *Reactive Powder Concrete, Partial Prestressed Ratio, Daktilitas, Disipasi energi.*

Abstract

Research on concrete in some countries has produced a concrete type of Ultra High Performance Concrete (UHPC) which has the strength, ductility, modulus of elasticity, and high durability, namely Reactive Powder Concrete (RPC). Research on structural engineering using RPC material in various countries have shown better performance than structures made of Normal Concrete (NC) or High Performance Concrete (HPC) in resisting both monotonic and cyclic loads. Research showed that structures using RPC that resisted cyclic loading had an appropriate hysteretic performance. In this study, research was conducted using RPC material and structure modeling with non-linear finite element method (NL-FEM). The material test results were used as parts of the input of the interior partial prestressed beam-column subassemblage structures (S-RPC) modelled using the NL-FEM. As a comparison, there were models of interior partial prestressed beam-column subassemblage used NC materials (S-NC). To analyze the hysteretic behavior of the models, there were variations of Partial Prestressed Ratio (PPR) values of S-RPC and S-NC models. Analysis of modeling results showed superior performance and better hysteretic behavior of all S-RPC models compared with the S-NC models in terms of ductility, energy dissipation, stiffness, and strength. From the modeling results, there were optimum PPR values of the S-RPC models which ranged between 21.39% and 37.34%. Meanwhile, the optimum PPR value of S-NC model was 34.15%.

Keywords: *Reactive Powder Concrete, Partial Prestressed Ratio, Ductility, Energy dissipation.*

1. Pendahuluan

Saat ini, diperlukan bangunan-bangunan gedung yang semakin tinggi untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di lahan yang terbatas. Untuk memperluas ruang pada gedung tertentu, diperlukan adanya sistem struktur prategang parsial. Sistem prategang parsial telah secara umum diaplikasikan pada balok yang terhubung dengan kolom dan diharapkan tetap bersifat daktail serta mampu mendisipasi energi gempa melalui mekanisme pembentukan sendi plastis pada balok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem prategang parsial mampu mendisipasi energi lebih baik daripada sistem prategang penuh (Gilbert dan Mickleborough, 1990).

Struktur gedung tinggi memerlukan material berkinerja lebih baik dari material struktur pada umumnya. Pada tahun 1990-an, penelitian di Bouygues, Perancis menghasilkan suatu komposisi beton yang memiliki kekuatan tekan, daktilitas, dan durabilitas tinggi sehingga dikategorikan sebagai *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) dan disebut sebagai *Reactive Powder Concrete* (RPC). RPC disusun dengan cara mengganti agregat kasar dengan material pasir silika berukuran mikro serta menggunakan *silica fume* dan *superplasticizer*. Untuk mempercepat proses hidrasi di awal umur dan menaikkan kuat tekan, RPC direndam air panas bersuhu bersuhu 90° Celcius (Richard dan Cheyrezy, 1995) selama tiga hari. Cara perawatan lain adalah dengan cara meletakkan material RPC di dalam ruangan beruap dengan suhu 90° Celcius pada tekanan normal (Bonneau, dkk., 1997) selama tiga hari. Dalam kondisi ideal di dalam laboratorium, kekuatan tekan RPC bisa mencapai 170-230 MPa dan silinder RPC yang dikekang dengan selongsong baja bisa mencapai kuat tekan 490-680 MPa (Richard dan Cheyrezy, 1994).

Dalam penelitian ini, hasil pengujian material RPC memperlihatkan sifat mekanik yang jauh lebih baik daripada *Normal Concrete* (NC) dari segi kekuatan tekan, kekuatan tarik, kekuatan lentur, dan modulus elastisitas. Pemodelan struktur *subassemblage* balok-kolom prategang parsial dengan program *finite element* non-linier memperlihatkan bahwa struktur *subassemblage* yang menggunakan material RPC memiliki daktilitas, disipasi energi, kekakuan, dan kekuatan yang lebih tinggi daripada struktur *subassemblage* yang menggunakan material NC.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja dan perilaku histeretik model *subassemblage* balok-kolom interior prategang parsial yang menggunakan material RPC dibandingkan dengan model *subassemblage* balok-kolom interior prategang parsial yang menggunakan material NC. Diharapkan, analisis tersebut dapat memberikan informasi yang

diperlukan untuk melakukan penelitian perilaku histeretik *prototype subassemblage* balok-kolom RPC prategang parsial dalam program eksperimen di laboratorium.

2. Sistem Prategang Parsial dan *Reactive Powder Concrete*

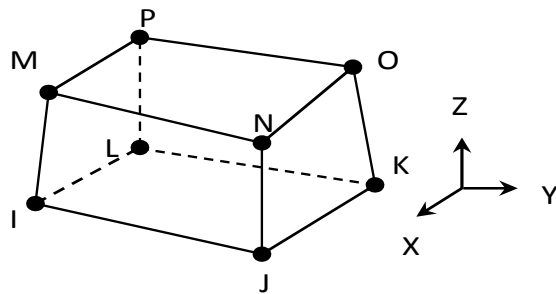
Sistem prategang parsial telah umum digunakan pada bangunan gedung untuk mengurangi dimensi elemen struktur dan memperluas ruang. Umumnya, *strand* prategang dikombinasikan dengan baja tulangan untuk menjamin daktilitas yang diperlukan dapat tercapai dan mendisipasi energi cukup baik. Nilai *Partially Prestressed Ratio* (PPR) yang diatur di dalam SNI 03-2847-2013 (2013) adalah maksimum sebesar 25% dan dipasang secara *unbonded* di daerah sendi plastis. Pada struktur *subassemblage* balok-kolom yang menggunakan tulangan prategang parsial pada balok, disipasi energinya lebih besar daripada yang dicapai oleh *subassemblage* balok-kolom prategang penuh pada balok (Thompson dan Park, 1980). Pada *subassemblage* balok-kolom yang kolomnya diberi baja tulangan tulangan dan baloknya diberi tulangan prategang parsial, efek kekakuan akibat adanya *strand* prategang bisa dikurangi, sehingga disipasi energinya cukup besar. Baja tulangan nonprategang dapat memperbesar daktilitas struktur dengan berperan sebagai tulangan tekan.

Priestley, dkk. (1999) melakukan penelitian perilaku *precast subassemblage* balok-kolom berdasarkan *Precast Concrete Seismic Structural Systems* (PRESSS). *Strand* prategang pada balok dipasang secara *unbonded* di sepanjang bentang balok dan zona join. Hasil penelitian memperlihatkan kemampuan tulangan prategang parsial dan efisiensi sambungan daktail *dry-jointed* untuk mengurangi kerusakan saat menahan beban siklik besar. Penggunaan sistem *dry-jointed* tersebut memungkinkan sistem struktur berperilaku *self-centering* saat terjadi *unloading* sehingga kurva histeretik membentuk *flag-shape* (NZCS, 2010).

Penelitian mengenai komposisi RPC telah banyak dilakukan oleh para peneliti, baik dengan menggunakan serat baja maupun serat sintesis *polypropylene*, dan dengan menggunakan maupun tanpa air atau uap panas di awal proses hidrasi. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Richard dan Cheyrezy (1994) menghasilkan RPC dengan kuat tekan beton berkisar antara 170-230 MPa, kuat lentur antara 25-60 MPa, kelecakan, daktilitas dan energi absorpsi yang tinggi. Menefy (2007) menggunakan campuran RPC yang dikembangkan oleh Gowripalan (2003). Kekuatan tekan RPC yang dihasilkan oleh Menefy adalah 127-154 MPa. Graybeal (2007) dan Malik (2007) masing-masing menghasilkan RPC dengan kekuatan tekan antara 125-194 MPa dan 140-155. Modulus elastisitas adalah antara 39921-43365 MPa (Graybeal, 2007).

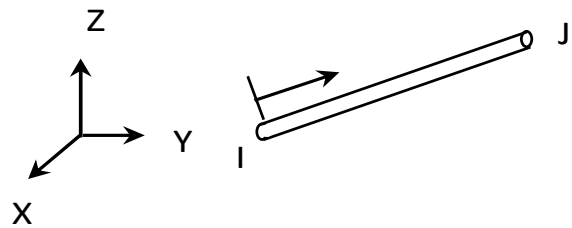
Dalam penelitian ini, komposisi campuran *Reactive Powder Concrete* (RPC) mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Naibaho, dkk. (2014) serta Kurniawan, dkk. (2011) seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 1**. Kekuatan tekan beton yang dihasilkan adalah 135 MPa. Dalam penelitian ini, terdapat perbedaan jenis semen, *superplasticizer*, dan fraksi volume serat *polypropylene* yang digunakan, seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 2**. Pada *Trial Mix* (TM)-1, TM-2, dan TM-3 terdapat variasi massa serat *polypropylene* berturut-turut sebesar 0,60 kg (0,07% fraksi volume), 0,75 kg (0,08% fraksi volume), dan 0,90 kg (0,10% fraksi volume) per 1 m³ RPC. Proses pencampuran RPC menggunakan *plan mixer-dual blade* berkapasitas 0,6 m³.

Dalam penelitian ini, struktur bermaterial RPC dianalisis menggunakan model elemen diskrit tiga dimensi dengan program elemen hingga. Pemodelan elemen hingga beton bertulang dilakukan dengan



Gambar 1. Pemodelan elemen beton
Sumber: Software ANSYS

menjadikan beton, baja tulangan, dan *strand* prategang sebagai elemen diskrit yang terpisah. Analisis elemen hingga dilakukan dengan program ANSYS. Elemen beton dimodelkan sebagai elemen SOLID65 yang merupakan elemen tiga dimensi dan memiliki 8 nodal (*8-node brick element*). Setiap nodal memiliki tiga derajat kebebasan translasi ke arah sumbu X, Y, dan Z seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 1**. Elemen SOLID65 dapat dimodelkan sebagai elemen yang mengalami retak akibat tegangan tarik, kehancuran (*crushing*) akibat tegangan tekan, deformasi plastis, dan rangkak. Model elemen baja tulangan longitudinal dan transversal serta elemen *strand* prategang longitudinal menggunakan elemen LINK8. Gaya bekerja pada elemen adalah gaya aksial pada ujung-ujung batang LINK8 seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2**. Pada model tersebut, elemen dibentuk melalui dua titik di ujung-ujung batang dalam sistem koordinat Cartesian X,Y,Z. Setiap titik memiliki tiga derajat kebebasan dalam bentuk translasi ke arah sumbu X, Y, dan Z.



Gambar 2. Pemodelan elemen baja dan strand prategang
Sumber: Software ANSYS

Tabel 1. Komposisi campuran RPC-1

Material	Deskripsi	Massa per m ³ (kg)
Semen Portland	Type II	950
Silicafume	Amorphous SiO ₂ = 85 to 95%	114
Superplasticizer	Modified polycarboxylate polymer	27,1
Pasir Silica	Diameter maks. 600 mm	1064
Silica Flour	Diameter maks. 0.5 - 75 mm	66,2
Air	Air bersih	208,5
Serat polypropylene	Panjang = 12 mm; diameter = 18 mm	0,6
Berat Total:		2430,4

Tabel 2. Komposisi campuran RPC-2

Material	Deskripsi	Massa per m ³ (kg)
Semen Portland	Type I	950
Silicafume	Amorphous SiO ₂ = 85 to 95%	114
Superplasticizer	Modified polycarboxylate polymer	27,1
Pasir Silica	Diameter maks. 600 mm	1064
Silica Flour	Diameter maks. 0,50 mm	66,2
Air	Air bersih	208,5
Serat polypropylene	Panjang = 12 mm; diameter = 18 mm	0,6; 0,75; 0,9
Berat Total:		2430,4 s.d. 2430,7

Pada bidang struktur, persamaan kesetimbangan untuk sistem linier dinyatakan sebagai:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} \quad (1)$$

dengan:

$[K]$: matriks kekakuan struktur

$\{u\}$: vektor derajat kebebasan

$\{F^a\}$: vektor beban yang bekerja

Dalam menangani kasus nonlinier, **Persamaan (1)** tidak dapat langsung digunakan. Proses iterasi diperlukan untuk mendapatkan solusi persamaan tersebut. Pada program ANSYS, terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperoleh solusi yang konvergen, di antaranya adalah metode Newton-Raphson. Metode ini merupakan proses iterasi dalam menyelesaikan persamaan nonlinier berupa persamaan berikut.

$$[K_i^T]\{\Delta u_i\} = \{F^a\} - \{F_i^{nr}\} \quad (2)$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\} \quad (3)$$

dengan:

K_i^T : matriks kekakuan struktur

$\{u_i\}$: vektor derajat kebebasan

$\{F_i^{nr}\}$: vektor beban yang bekerja

Dalam penelitian ini, metode yang dipilih pada program ANSYS adalah *Full Newton-Raphson* di mana matriks kekakuan diperbarui pada setiap iterasi.

3. Kinerja Material RPC, Baja Tulangan, dan Strand Prategang

Pembuatan benda uji silinder dan balok untuk keperluan pengujian sifat mekanik material dilakukan di pabrik PT Wijaya Karya Beton di Cileungsi, Bogor. Dalam pembuatan benda uji tersebut, terdapat tiga macam campuran yang bervariasi pada kandungan serat *polypropylene* seperti yang tertera pada **Tabel 2**.

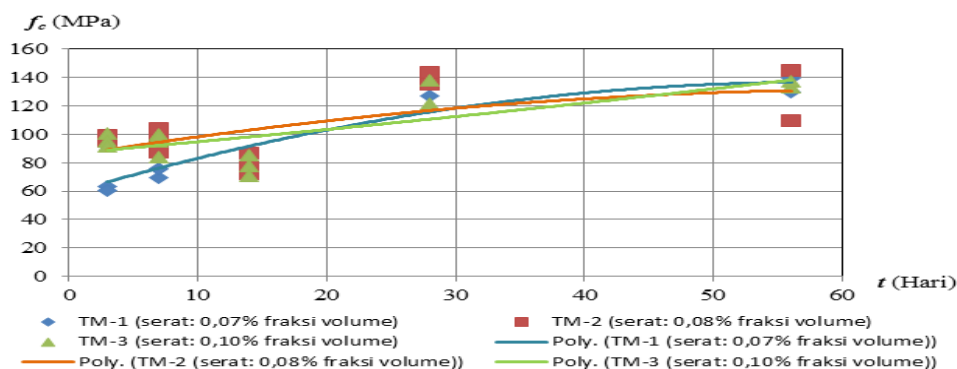
Pengujian material dilakukan dengan alat *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 300 ton di Laboratorium P.T. Wijaya Karya Beton, Cileungsi, Bogor dan alat UTM berkapasitas 200 ton di Balai Jembatan dan Pelengkap Jalan, Pusat Penelitian dan

Pengembangan Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum, Bandung. Benda uji untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah adalah silinder 10/20, benda uji modulus elastistas adalah silinder 15/30, dan benda uji kuat lentur adalah balok berukuran $10 \times 10 \times 35 \text{ cm}^3$.

3.1 Pengujian kekuatan tekan

Hasil uji kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari diplot pada **Gambar 3**. Pada umur 3 hari, TM-1 memiliki kekuatan tekan yang lebih kecil daripada TM-2 dan TM-3. Pada umur 3 hari, kekuatan tekan TM-2 dan TM-3 hampir sama. TM-1, TM-2, dan TM-3 mengalami peningkatan kekuatan sampai dengan umur 56 hari. Pada **Tabel 3**, terlihat bahwa kuat tekan beton paling tinggi pada umur 28 hari dan 56 hari dicapai pada silinder yang dibuat dengan menggunakan komposisi campuran TM-2 yang menggunakan serat *polypropylene* sebanyak 0,08 % fraksi volume.

Hasil pengujian kuat tekan memperlihatkan bahwa RPC yang menggunakan serat *polypropylene* sebanyak 0,08% fraksi volume (TM-2) memiliki regangan batas yang lebih tinggi daripada RPC yang menggunakan serat *polypropylene* sebanyak 0,10 % fraksi volume (TM-3). Dari hasil uji kuat tekan silinder yang dipasang *strain gage* dengan sistem *Wheatsone full bridge*, pada umur 28 hari, saat terjadi tegangan puncak nilai regangan silinder TM-2 dan TM-3 berturut-turut adalah $9,23 \times 10^{-3}$ dan $7,54 \times 10^{-3}$. Nilai regangan saat tegangan puncak tersebut sekaligus merupakan nilai regangan batas yang dapat dibaca oleh *strain gage*. Perbedaan regangan pada silinder dengan *trial mix* yang berbeda disebabkan serat sebanyak 0,08 % fraksi volume pada TM-2 dapat terdispersi secara merata saat proses pencampuran bahan RPC sehingga memberikan tambahan kemampuan beton untuk mencapai regangan maksimum. Sedangkan, serat sebanyak 0,10 % fraksi volume mengalami kesulitan saat proses pencampuran bahan beton, di mana diperlukan pengadukan secara manual untuk membantu *blade* di dalam *plan mixer*. Kuat tekan RPC campuran TM-2 dan TM-3 pada nilai regangan tersebut berturut-turut adalah 143,77 MPa dan 121,17 MPa.



Gambar 3. Hasil pengujian kekuatan tekan

Tabel 3. Hasil pengujian kekuatan tekan

Kode Trial	Umur	Beban	Diameter	Tinggi	Berat	Massa Jenis	f_c	f_c Rata ²
Mix (TM)	(hari)	(kN)	(mm)	(mm)	(gr)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)
TM-1	3	498	100	196	3670	2384	63,41	71,60
	3	472	100	196	3640	2365	60,10	
	3	717	100	198	3720	2392	91,29	
TM-2	3	780	100	198	3700	2379	99,31	97,45
	3	744	100	196	3660	2378	94,73	
	3	772	100	196	3640	2365	98,29	
TM-3	3	793	100	196	3670	2384	100,97	95,79
	3	746	100	197	3710	2398	94,98	
	3	718	100	198	3700	2379	91,42	
TM-1	7	723	100	196	3630	2358	92,06	78,18
	7	596	100	195	3590	2344	75,89	
	7	544	100	195	3550	2318	69,26	
	7	593	100	196	3610	2345	75,50	
TM-2	7	791	100	196	3640	2365	100,71	96,89
	7	686	100	198	3710	2386	87,34	
	7	815	100	196	3650	2371	103,77	
	7	752	100	198	3720	2392	95,75	
TM-3	7	786	100	195	3560	2324	100,08	94,41
	7	744	100	196	3650	2371	94,73	
	7	660	100	196	3600	2339	84,03	
	7	776	100	198	3730	2399	98,80	
TM-1	14	632	100	196	3630	2358	80,47	79,55
	14	669	100	196	3650	2371	85,18	
	14	637	100	197	3710	2398	81,11	
	14	561	100	195	3520	2298	71,43	
TM-2	14	679	100	198	3710	2386	86,45	78,47
	14	604	100	198	3700	2379	76,90	
	14	566	100	197	3620	2340	72,07	
TM-3	14	608	100	195	3530	2305	77,41	77,67
	14	554	100	195	3590	2344	70,54	
	14	668	100	195	3570	2331	85,05	
TM-1	28	1061	100	198	3710	2386	134,40	130,66
	28	1002	100	198	3680	2366	126,92	
TM-2	28	1135	100	198	3740	2405	143,77	139,69
	28	1070	100	198	3680	2366	135,61	
TM-3	28	956	100	198	3770	2424	121,17	129,70
	28	1091	100	198	3720	2392	138,24	
TM-1	56	1022	100	198	3710	2386	129,45	134,40
	56	1100	100	196	3680	2391	139,35	
TM-2	56	864	100	195	3580	2338	109,50	127,27
	56	1145	100	196	3700	2404	145,03	
TM-3	56	1050	100	196	3650	2371	133,04	135,35
	56	1087	100	196	3640	2365	137,66	

3.2 Pengujian kekuatan tarik

Hasil pengujian kuat tarik diperlihatkan pada **Tabel 4**. Pada tabel tersebut, terlihat bahwa silinder yang dibuat menggunakan campuran TM-1 yang menggunakan serat 0,07% fraksi volume memiliki kekuatan tarik (f_t) paling tinggi, diikuti oleh TM-2 dan TM-3 yang memiliki serat 0,08% dan 0,10% fraksi volume.

3.3 Pengujian modulus elastisitas dan Poisson's Ratio

Hasil pengujian modulus elastisitas (E_c) dan Poisson's Ratio (ν) diperlihatkan pada **Tabel 5**. Pada tabel tersebut, terlihat bahwa silinder yang dibuat menggunakan campuran TM-2 dengan serat 0,08% fraksi volume memiliki nilai modulus elastisitas dan Poisson's ratio paling tinggi. Penentuan nilai modulus elastisitas dan Poisson's ratio mengacu pada ASTM C469 (1994).

Tabel 5. Hasil pengujian modulus elastisitas dan Poisson's Ratio

No.	Kode Campuran	f_t (MPa)	f_t rata-rata (MPa)
1	TM-1	10,07	
2	TM-1	10,36	9,99
3	TM-1	9,54	
4	TM-2	8,43	
5	TM-2	8,68	8,27
6	TM-2	7,68	
7	TM-3	7,77	
8	TM-3	6,37	6,71
9	TM-3	5,98	

3.4 Pengujian kekuatan lentur

Hasil pengujian kuat lentur berdasarkan ASTM C78-02 (2002) diperlihatkan pada **Tabel 6**. Pada tabel tersebut, terlihat bahwa balok yang dibuat menggunakan campuran TM-2 dengan serat 0,08% fraksi volume memiliki kekuatan lentur (f_t) paling tinggi.

Tabel 6. Hasil pengujian kekuatan lentur

No.	Kode Campuran	f_t (MPa)	f_t rata-rata (MPa)	SD (MPa)
1	TM-1	14,37		
2	TM-1	13,68	13,99	0,35
3	TM-1	13,90		
4	TM-2	14,02		
5	TM-2	14,77	14,47	0,40
6	TM-2	14,62		
7	TM-3	14,13		
8	TM-3	13,92	13,42	1,05
9	TM-3	12,22		

Tabel 7. Hasil pengujian tarik baja tulangan

No.	Diameter (mm)	L (mm)	m (kg/m)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (MPa)	f_u/f_y
1	13	990	0,990	453,51	606,48	0,242	187770	1,34
2	13	993	0,997	425,45	593,99	0,235	181300	1,40
3	13	998	0,992	424,38	595,89	0,253	167800	1,40
4	13	985	0,995	398,12	585,14	0,218	182444	1,47
1	22	1007	2,989	517,14	689,26	0,195	264880	1,33
2	22	1007	2,979	450,76	601,11	0,182	248032	1,33
3	22	1007	2,979	524,09	700,65	0,182	287602	1,34
4	22	1005	2,985	492,00	654,29	0,175	281219	1,33

Tabel 8. Hasil pengujian tarik strand prategang

No.	Diameter (mm)	L (mm)	m (kg/m)	F_y (kN)	F_u (kN)	f_{py} (MPa)	f_{pu} (MPa)
1	12,7	1000	0,78	169,40	191,92	1716,12	1944,30
2	12,7	1000	0,78	171,76	193,48	1740,08	1960,05
3	12,7	1000	0,78	172,20	194,66	1744,48	1972,03
1	9,5	1000	0,45	90,69	108,67	1648,03	1974,80
2	9,5	1000	0,46	97,97	109,42	1780,31	1988,35
3	9,5	1000	0,46	95,79	110,48	1740,74	2007,58
4	9,5	1000	0,45	99,90	112,41	1815,36	2042,63

Dari hasil pengujian material beton, kinerja campuran TM-2 paling baik dalam nilai kuat tekan, modulus elastisitas, Poisson's ratio, dan kuat lentur. Sedangkan, TM-1 memiliki nilai kuat tarik yang paling tinggi. Dalam proses pembuatan, campuran TM-2 memiliki sifat *flow* dan kelecakan yang cukup sehingga mudah untuk dibuat di lapangan.

3.5 Pengujian tarik baja tulangan

Pengujian tarik baja tulangan dilakukan berdasarkan SNI 07-2529-1991 (1991). Baja tulangan yang diuji adalah tipe baja ulir (*deformed bar*) dengan diameter 13 mm untuk tulangan transversal dan diameter 22 mm untuk tulangan longitudinal. Hasil pengujian tarik baja adalah seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 7**.

3.6 Pengujian tarik strand prategang

Luas penampang *strand* yang berdiameter 12,7 mm dan 9,5 mm berturut-turut adalah 98,71 mm² dan 55,03 mm². Hasil pengujian tarik *strand* prategang diperlihatkan pada **Tabel 8**. Dari hasil pengujian tersebut, semua *strand* prategang yang diuji memenuhi syarat ASTM A416 (2006) tipe 270k ($f_{pu} = 1860$ MPa).

4. Detil Model Subassemblage Balok-Kolom Interior

Detil dimensi dan tulangan model *subassemblage* balok-kolom interior RPC dan NC adalah seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 4**. Balok diberi baja tulangan longitudinal ulir D22 masing-masing sebanyak tiga batang di sisi atas dan bawah serta *strand prategang*, sehingga disebut balok dengan tulangan prategang parsial. Kolom diperkuat dengan 12 baja tulangan ulir longitudinal D22. Nilai *Partial Prestressed Ratio* (PPR) divariasikan sesuai luas

strand prategang yang direkomendasikan di dalam ASTM A416/A416 M (2006). Untuk menahan gaya geser pada balok dan kolom serta memberikan *confinement* pada kolom, terdapat tulangan transversal ulir D13 dengan spasi 100 mm.

5. Pemodelan Struktur *Subassemblage* Balok-Kolom Prategang Parsial dengan Program *Finite Element* Non-Linier

Dalam penelitian ini, model *subassemblage* balok-kolom dibuat dengan program *finite element* non-linier dengan nilai *Partial Prestressed Ratio* (PPR) divariasikan di bawah dan di atas 25%, sedangkan material beton model struktur adalah RPC dan NC. PPR sebesar 25% merupakan nilai maksimum yang diijinkan di dalam SNI 03-2847-2013, Pasal 21.5.2.5 (c) (2013). Pada daerah sendi plastis, *strand* prategang dipasang secara *unbonded* sesuai dengan rekomendasi di dalam SNI 03-2847-2013, Pasal 21.5.2.5 (b) (2013). *Input* program di antaranya adalah dimensi dan detail struktur, baja tulangan, dan *strand* prategang, serta kurva hubungan regangan-tegangan setiap material yang merupakan bagian model struktur tersebut. Nilai kuat tekan RPC adalah 140 MPa (dari hasil TM-2), dan nilai kuat tekan NC ditetapkan sebesar 45 MPa. Dengan nilai kekuatan tekan tersebut, maka kekuatan tarik dan modulus elastisitas NC dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan-persamaan yang terdapat di dalam SNI 03-2847-2013 (2013) sebagai berikut:

$$f_t = 0,62 \sqrt{f_c} \quad (\text{Kelas T}) \quad (4)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c} \quad (5)$$

Keterangan:

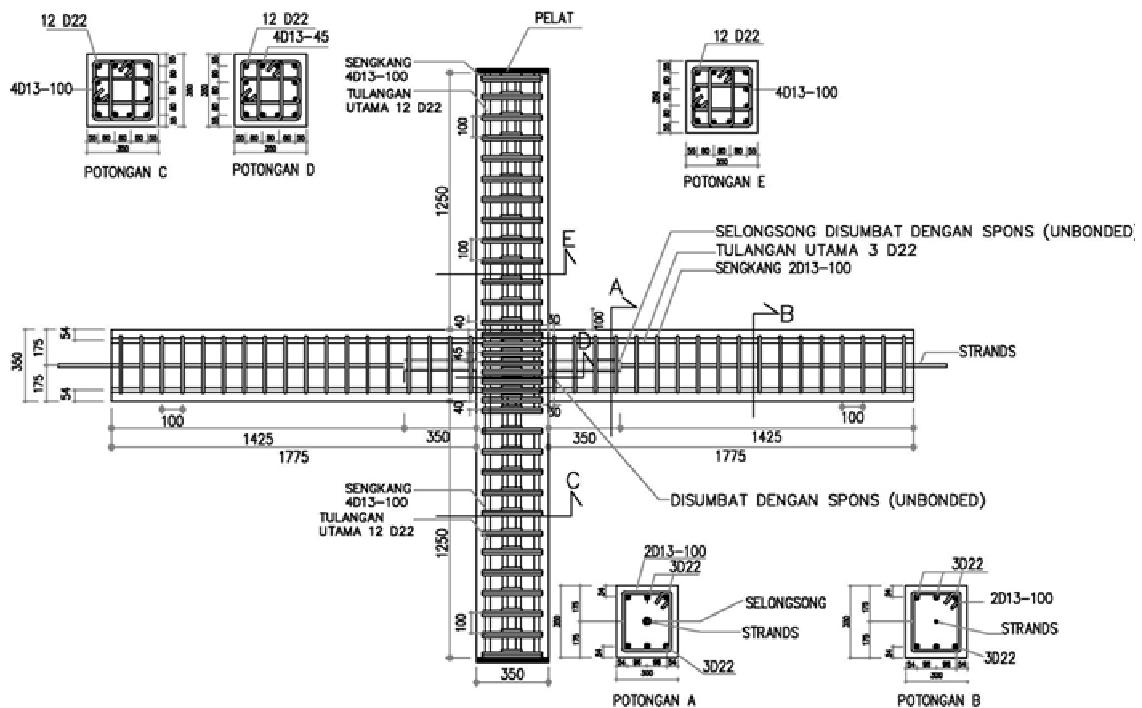
f_c : kekuatan tekan beton (MPa)

f_t : kekuatan tarik beton (MPa)

E_c : modulus elastisitas beton (MPa)

Maka, diperoleh nilai kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kekuatan lentur NC berturut-turut sebesar 4,16 MPa, dan 31528 MPa. Dalam pemodelan struktur dengan program *finite element* non-linier, terdapat variasi luas *strand* dan PPR seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 9**. Luas *strand* tersebut mengacu pada ASTM A416 (2006). Nilai kekuatan nominal balok yang diberi tulangan prategang parsial berupa momen nominal (M_n) bervariasi sesuai PPR.

Input pembebanan berupa kombinasi beban aksial tekan konstan sebesar $0,1 f_c' A_g$ dan beban lateral siklik di ujung atas kolom yang diatur dengan *displacement control* (ACI 374.1-05, 2005) yang dimodifikasi sebagai input program seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 5**. Pada ACI 374.1-05, pada setiap *drift ratio* terdapat tiga siklus pembebanan dan di antara *drift ratio* yang berbeda, terdapat siklus relaksasi. Karena pada suatu *drift ratio* tertentu *output* kurva histeretik program *finite element* non-linier siklus ke-1, 2, dan 3 berimpit, maka pemodelan disederhanakan dengan hanya melakukan satu siklus pembebanan untuk setiap *drift ratio* dan tidak terdapat siklus relaksasi. Berdasarkan ACI 374.1-05 (2005), siklus pembebanan ke arah lateral kolom dimulai dari *drift ratio* 0,20%, kemudian terus ditingkatkan sampai



Gambar 4. Detil dimensi dan tulangan model *subassemblage* balok-kolom interior

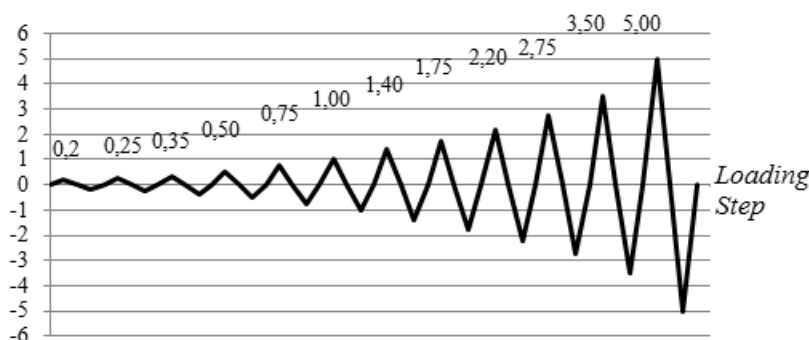
Tabel 9. Variasi *strand* prategang

Luas <i>Strand</i>	Luas <i>Strand</i>	Jenis Beton	Partial Prestressed Ratio	Kode Model	Kekuatan Nominal Balok
A_p	A_p		PPR		M_n Balok
	(mm ²)		(%)		(kN.m)
1D12.7	98,71	RPC	21,39	S-RPC-21.39	140,19
3D9.5	164,52	RPC	31,72	S-RPC-31.72	154,87
1D12.7+2D9					
.5	208,39	RPC	37,34	S-RPC-37.34	164,42
3D12.7	296,13	RPC	46,29	S-RPC-46.29	182,60
2D9.5	109,68	NC	21,09	S-NC-21.09	152,39
2D12.7	197,42	NC	32,02	S-NC-32.02	171,22
4D9.5	219,35	NC	34,15	S-NC-34.15	175,66
4D12.7	394,84	NC	45,38	S-NC-45.38	206,97

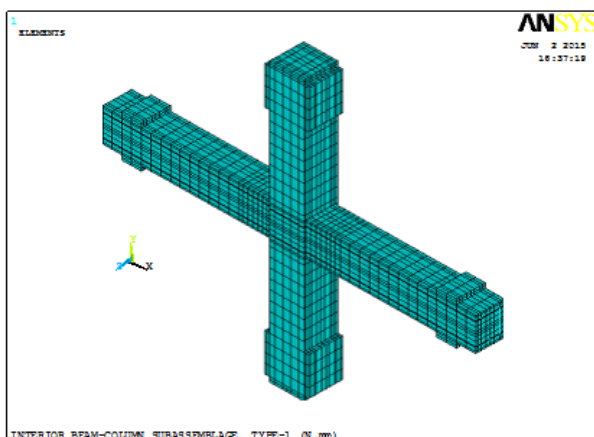
dengan *drift ratio* 3,50%. Apabila memungkinkan, pembebanan diteruskan sampai *drift ratio* 5,50%. Pada pemodelan dengan program *finite element* non-linier, *drift ratio* awal adalah 0,05%, dilanjutkan dengan *drift ratio* 1,00%, dan 0,20%, dan selanjutnya sesuai dengan ACI 374.1-05 (2005). Penambahan *drift ratio* kecil pada awal pembebanan adalah untuk memastikan bahwa struktur mendapat beban awal yang tidak melampaui beban leleh.

Set up perletakan dan pembebanan model struktur *subassemblage* balok-kolom interior dibuat dengan

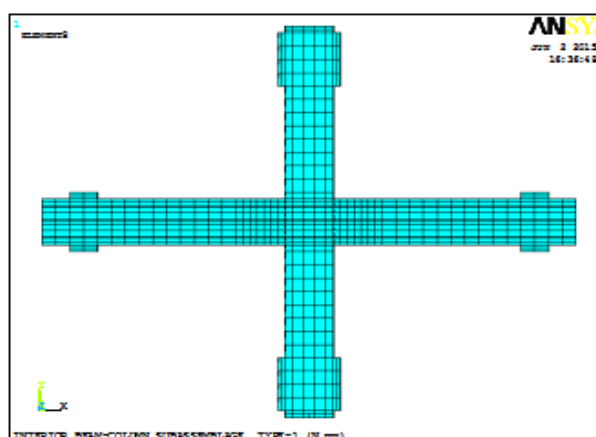
mengacu pada *set up* yang digunakan di Laboratorium Struktur dan Konstruksi Bangunan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum. Pada *set up* tersebut, *prototype* diletakkan pada *loading frame* dan terdapat pelat-pelat pada ujung kolom dan balok yang digunakan sebagai perletakan dan tempat transfer beban dari *load cell* ke *prototype*. Maka, pemodelan S-RPC dan S-NC adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.a. Kombinasi beban aksial tekan konstan dan lateral siklik di ujung atas kolom dan perletakannya adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.b.



Gambar 5. Siklus pembebanan lateral



a. Tampak Tiga Dimensi Elemen Model *Subassemblage* Balok-Kolom dan Pelat pada *Loading Frame*



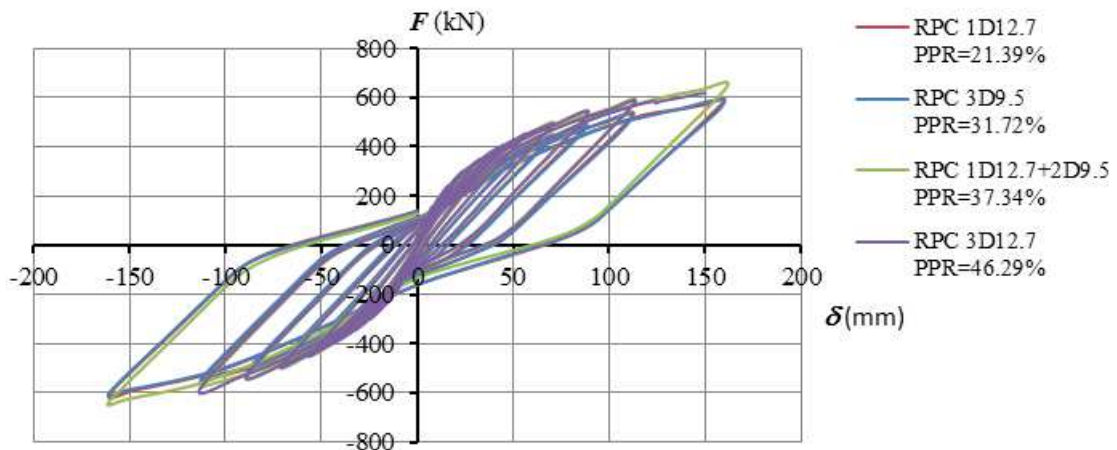
b. Tampak Depan Model *Subassemblage*, Perletakan, Beban Aksial Konstan, dan Beban Siklik di Ujung Atas Kolom

Gambar 6. Model struktur *subassemblage* balok-kolom interior

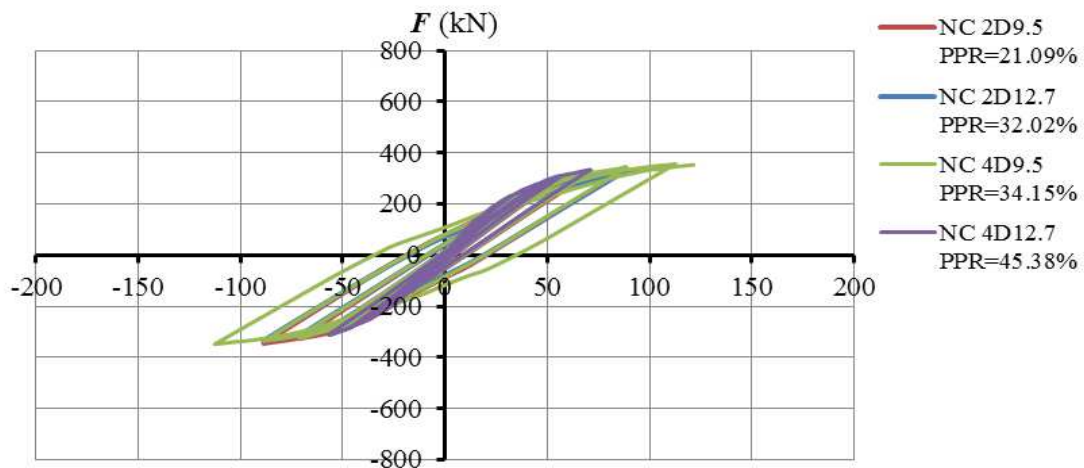
6. Analisis Output Program Finite Element Non-Linier

Analisis *output* program *finite element* non-linier memperlihatkan bahwa semua model *subassemblage* yang menggunakan material *Reactive Powder Concrete* (RPC) memiliki kekuatan (F) dan deformasi lateral (δ) yang jauh lebih besar daripada model *subassemblage* yang menggunakan material *Normal Concrete* (NC) seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Dari nilai deformasi lateral yang dicapai, dapat diketahui bahwa tiga model *subassemblage* yang menggunakan material RPC dan PPR sebesar 21,39% s.d. 37,34% mampu mencapai *drift ratio* 5,00 %, sehingga melebihi *drift ratio* minimum yang harus dicapai menurut ACI 374.1-05 (2005), yaitu 3,50%. Model ke-4 dengan nilai PPR terbesar

yaitu 46,29% tidak mencapai *drift ratio* 5,00% disebabkan sifat model terlalu getas. Di sisi lain, semua model *subassemblage* dengan material NC tidak ada yang mencapai *drift ratio* 5,00 % karena terjadi *crushing* pada material NC yang lebih cepat terjadi daripada model *subassemblage* RPC. Model *subassemblage* NC ke-3 dengan PPR sebesar 34,15% mencapai *drift ratio* 3,50%, dan seiring dengan berkurangnya nilai PPR, *drift ratio* maksimum yang dapat dicapai menurun seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 10**. Pada model ke-4 yang memiliki PPR sebesar 45,38%, *drift ratio* yang tercapai hanya 2,20% diakibatkan sifat model terlalu getas. Dari semua model tersebut, untuk model *subassemblage* RPC dan NC, nilai PPR yang terbaik untuk meningkatkan daktilitas berturut-turut adalah 37,34% dan 34,15%.



Gambar 7. Kurva histeretik model S-RPC



Gambar 8. Kurva histeretik model S-NC

Tabel 10. Hubungan jenis material beton, PPR, dan Drift Ratio tercapai

Luas Strand A_p	Luas Strand A_p (mm ²)	Jenis Beton	PPR		Drift Ratio Tercapai		
			(%)	(%)	Dorong	(%)	Tarik
1D12.7	98,71	RPC	21,39	5,00	(+)	5,00	(-)
3D9.5	164,52	RPC	31,72	5,00	(+)	5,00	(-)
1D12.7+2D9.5	208,39	RPC	37,34	5,00	(+)	5,00	(-)
3D12.7	296,13	RPC	46,29	5,00	(+)	3,50	(-)
2D9.5	109,68	NC	21,09	3,50	(+)	2,75	(-)
2D12.7	197,42	NC	32,02	3,50	(+)	2,75	(-)
4D9.5	219,35	NC	34,15	5,00	(+)	3,50	(-)
4D12.7	394,84	NC	45,38	2,20	(+)	1,75	(-)

6.1 Daktilitas

Daktilitas perpindahan adalah perbandingan antara perpindahan struktur maksimum (δ_{maks}) terhadap perpindahan struktur pada saat leleh (δ_y) (Paulay dan Priestly, 1992). Penentuan deformasi leleh dilakukan dengan cara FEMA 356 (2000) di mana beban leleh (F_y) ditentukan dari garis perpotongan yang membentuk dua area sama luas. Garis pertama ditarik dari titik (0,0) ke titik di mana diasumsikan terjadi $0,6 F_y$. Garis kedua dihubungkan oleh titik saat terjadi F_{maks} dengan titik asumsi saat terjadi F_y . Penarikan garis dicoba-coba sampai luas kedua area di bawah kurva menjadi sama. Perpindahan saat leleh (δ_y) adalah perpindahan saat terjadi beban leleh (F_y). Nilai daktilitas semua model subassemblage balok-kolom RPC dan NC diperlihatkan pada Tabel 11.

Drift ratio maksimum yang dicapai oleh setiap model subassemblage balok-kolom RPC dan NC mempengaruhi besarnya daktilitas. Dari tiga model subassemblage balok-kolom RPC yang mencapai drift ratio 5,00% pada kondisi pembebanan dorong dan tarik, model S-RPC-37,34 mencapai beban dan deformasi lateral maksimum yang lebih besar daripada model subassemblage balok-kolom RPC lain. Sehingga, daktilitas model S-RPC-37,34 pada pembebanan dorong dan tarik berturut-turut sebesar 6,68 dan 6,65, sedangkan model S-RPC-21,39, S-RPC-31,72, dan S-RPC-46,29 memiliki daktilitas berturut-turut sebesar

98,93%, 99,01%, dan 92,83% dari daktilitas model S-RPC-37,34 pada kondisi pembebanan dorong serta 99,62%, 99,63%, dan 70,09% pada kondisi pembebanan tarik. Hal ini disebabkan model S-RPC-37,34 memiliki kekuatan nominal balok yang lebih tinggi daripada model lain dan tetap bersifat daktail sehingga memiliki kinerja terbaik. Seiring dengan meningkatnya PPR, maka kekuatan nominal balok meningkat dan bersifat semakin getas. Maka, model S-RPC-46,29 yang memiliki PPR tertinggi memiliki daktilitas yang lebih kecil daripada model S-RPC-37,34.

Dengan analisis yang sama, model S-NC-34,15 memiliki kekuatan nominal balok yang lebih tinggi daripada model lain dan tetap bersifat daktail sehingga memiliki daktilitas tertinggi. Pada model subassemblage NC, perbedaan PPR mempengaruhi nilai daktilitas secara lebih signifikan. Model S-NC-34,15 memiliki daktilitas tertinggi berturut-turut sebesar 5,01 dan 4,64 pada kondisi pembebanan dorong dan tarik. Sedangkan model S-NC-21,09, S-NC-32,02, dan S-NC-45,38 memiliki nilai daktilitas berturut-turut sebesar 85,92%, 77,63%, dan 58,29% dari daktilitas model S-NC-34,15 dalam kondisi pembebanan dorong serta 78,61%, 78,57%, dan 50,19% dari daktilitas model S-NC-34,15 dalam kondisi pembebanan tarik. Hal ini disebabkan kekuatan nominal balok NC yang jauh lebih kecil daripada RPC, sehingga seiring dengan pengurangan PPR, penurunan daktilitas terpengaruh secara signifikan.

Tabel 11. Hubungan jenis material beton, PPR, dan daktilitas

Jenis Beton	Partial Prestressed Ratio (PPR)	Deformasi Maksimum		Deformasi Leleh		Daktilitas		Daktilitas/Daktilitas Maksimum	
		δ_{maks}	δ_{maks}	δ_y	δ_y	μ	μ	μ/μ_{maks}	μ/μ_{maks}
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
	(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)				
RPC	21,39	159,80	-160,55	24,19	-24,25	6,61	6,62	98,93%	99,62%
RPC	31,72	159,98	-160,57	24,19	-24,25	6,61	6,62	99,01%	99,63%
RPC	37,34	161,68	-161,10	24,21	-24,24	6,68	6,65	100,00%	100,00%
RPC	46,29	150,06	-112,91	24,20	-24,24	6,20	4,66	92,83%	70,09%
NC	21,09	104,47	-88,48	24,26	-24,27	4,31	3,65	85,92%	78,61%
NC	32,02	94,39	-88,45	24,26	-24,27	3,89	3,64	77,63%	78,57%
NC	34,15	121,60	-112,58	24,26	-24,28	5,01	4,64	100,00%	100,00%
NC	45,38	70,90	-56,53	24,27	-24,29	2,92	2,33	58,29%	50,19%

6.2 Disipasi energi

Disipasi energi adalah kemampuan struktur untuk memancarkan energi melalui proses leleh pada daerah sendi plastis. Pembentukan sendi plastis terjadi akibat adanya retak dan *crushing* beton, serta leleh baja tulangan atau *strand* prategang. Dalam desain *subassemblage* balok-kolom, sendi plastis terletak pada ujung balok di dekat kolom agar terjadi mekanisme kolom-kuat balok-lemah. Dalam kurva histeretik hubungan beban-perpindahan, disipasi energi pada suatu *drift ratio* merupakan luas bagian dalam kurva yang dapat dihitung sebagai satu *loop cycle* (ACI 374.1-05, 2005).

Nilai disipasi energi dan input energi setiap model *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC diperlihatkan pada **Tabel 12**. Karena model S-RPC-37,34 memiliki kekuatan nominal balok lebih tinggi daripada model *subassemblage* RPC lain dan tetap bersifat daktail, maka disipasi energi yang dicapai lebih besar daripada model *subassemblage* RPC yang lain. Disipasi energi model S-RPC-21,39 dan S-RPC-31,72 adalah 95,39% dan 94,09%. Model S-RPC-46,29 mencapai 80,72% dari disipasi energi model S-RPC-37,34 karena walaupun memiliki kekuatan nominal tertinggi, sifat getas dari *strand* prategang mengakibatkan model tidak dapat berdeformasi cukup besar sehingga mengurangi daktilitas.

Demikian pula dengan model S-NC-34,15 yang memiliki kekuatan nominal balok lebih tinggi daripada model *subassemblage* NC lain dan tetap bersifat daktail, maka disipasi energi yang dicapai lebih besar daripada model *subassemblage* NC yang lain. Pada model *subassemblage* balok-kolom NC, perbedaan PPR mempengaruhi disipasi energi secara signifikan. Hal ini disebabkan kekuatan nominal balok NC yang jauh lebih kecil daripada RPC, sehingga seiring dengan pengurangan PPR, penurunan disipasi energi terpengaruh secara signifikan. Model S-NC-21,09 dan S-NC-32,02 mencapai disipasi energi sebesar 66,13% dan 48,74% dari disipasi energi yang dicapai oleh model S-NC-34,15. Hal ini disebabkan karena kedua model tersebut memiliki kekuatan nominal balok yang

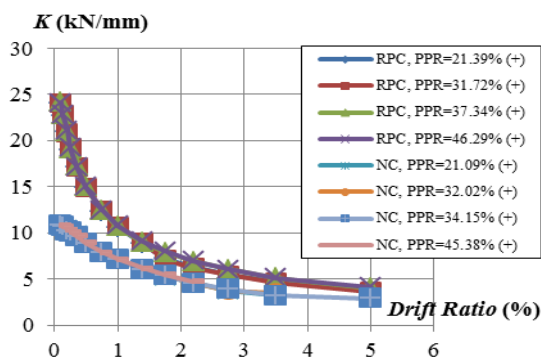
lebih kecil seiring dengan menurunnya PPR. Model S-NC-45,38 mencapai disipasi energi sebesar 13,82% dari disipasi energi model S-NC-34,15 karena walaupun memiliki kekuatan nominal yang tinggi, model tersebut bersifat getas sehingga tidak cukup daktail untuk mendisipasi energi dengan lebih baik.

6.3 Kekakuan dan degradasi kekakuan

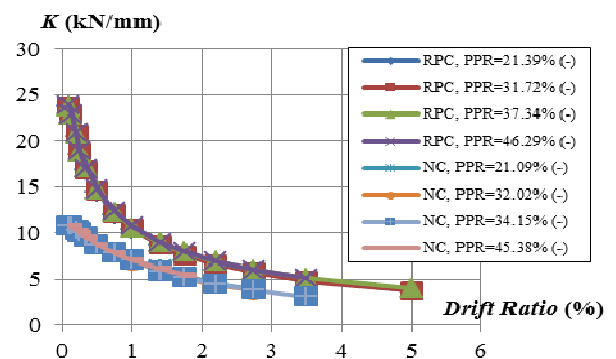
Penentuan nilai kekakuan (*K*) pada suatu *drift ratio* adalah perbandingan antara kekuatan (*F*) maksimum terhadap deformasi lateral (δ) di ujung atas kolom pada dua arah pembebanan lateral. Degradasi kekakuan adalah rasio kekakuan pada suatu *drift ratio* terhadap kekakuan pada *drift ratio* sebelumnya. Degradasi kekakuan terjadi karena perlemahan elemen struktur akibat menahan beban siklik. Hubungan kekakuan dan *drift ratio* empat model *subassemblage* RPC dan empat *subassemblage* NC dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik diperlihatkan pada **Gambar 9.a** dan **9.b**. Sedangkan, hubungan degradasi kekakuan dan *drift ratio* empat model *subassemblage* RPC dan empat *subassemblage* NC dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik diperlihatkan pada **Gambar 10.a** dan **10.b**. Untuk memudahkan perbandingan, setiap kekakuan dan degradasi kekakuan pada suatu *drift ratio* dibandingkan dengan kekakuan saat leleh signifikan kondisi pembebanan dorong dan tarik.

Tabel 12. Hubungan jenis material beton, PPR, dan disipasi energi

Jenis Beton	Partial Prestressed Ratio	Disipasi Energi	$E_d/E_{d maks}$
	PPR (%)	W_{tot} (kN.m)	$W_{tot}/W_{tot maks.}$
RPC	21,39	169,07	95,39%
RPC	31,72	166,77	94,09%
RPC	37,34	177,24	100,00%
RPC	46,29	143,07	80,72%
NC	21,09	49,40	66,13%
NC	32,02	36,41	48,74%
NC	34,15	74,71	100,00%
NC	45,38	10,33	13,82%

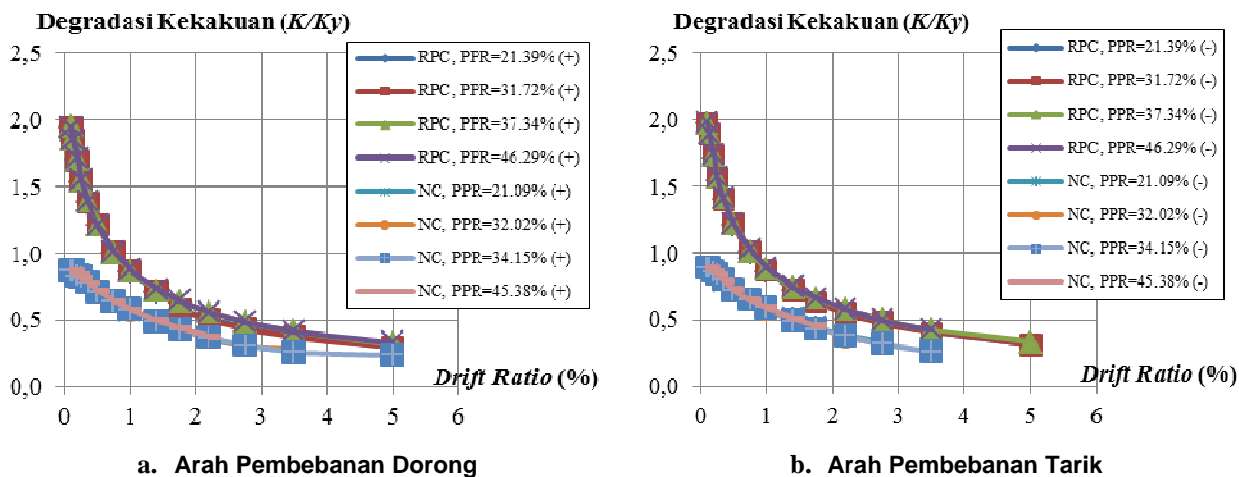


a. Arah Pembebanan Dorong



b. Arah Pembebanan Tarik

Gambar 9. Kurva hubungan *Drift Ratio* dan kekakuan model S-RPC dan S-NC



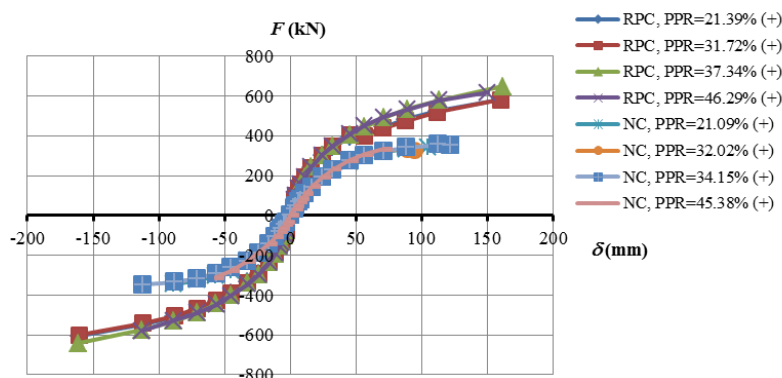
Gambar 10. Kurva hubungan *Drift Ratio* dan degradasi kekakuan model S-RPC dan S-NC

Kekakuan model *subassemblage* balok-kolom RPC jauh lebih tinggi daripada model *subassemblage* balok-kolom NC karena material RPC memiliki kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas (kekakuan), dan kekuatan lentur yang jauh lebih tinggi daripada NC. Pada model *subassemblage* balok-kolom RPC, penurunan nilai kekakuan dan degradasi kekakuan terjadi lebih cepat daripada *subassemblage* balok-kolom NC. Pada *drift ratio* 0,10% sampai dengan 0,75% (saat leleh), model *subassemblage* RPC mengalami penurunan nilai kekakuan dan degradasi kekakuan yang semakin besar. Pada *drift ratio* selanjutnya, yaitu 1,0% sampai dengan 5,00%, penurunan nilai kekakuan dan degradasi kekakuan terjadi lebih lambat. Untuk model *subassemblage* NC, penurunan nilai kekakuan dan degradasi kekakuan semakin besar pada *drift ratio* 0,10% sampai dengan 0,75% (saat leleh), tetapi tidak secepat yang dialami model *subassemblage* RPC. Demikian pula, saat *drift ratio* selanjutnya, yaitu 1,0% sampai dengan 5,00% atau 3,50% (akhir pembebanan), penurunan nilai kekakuan dan degradasi kekakuan model *subassemblage* NC menurun, tetapi tidak secepat yang terjadi pada model *subassemblage* RPC. Perbedaan kecepatan degradasi kekakuan antara model *subassemblage* balok-kolom RPC dengan model *subassemblage* balok-kolom NC adalah karena RPC bersifat lebih getas. Hal ini disebabkan RPC

terdiri dari material berukuran mikro dan lebih padat daripada NC. Sehingga, saat suatu elemen model *subassemblage* RPC mengalami retak dan *crushing*, terjadi penurunan kekakuan dan degradasi kekakuan yang lebih cepat daripada model *subassemblage* NC.

6.4 Kekuatan dan degradasi kekuatan

Kekuatan (F) adalah nilai reaksi lateral saat terjadi deformasi lateral (δ) maksimum pada suatu *drift ratio*. Kekuatan dan deformasi lateral maksimum setiap *drift ratio* membentuk kurva *backbone*. Kurva *backbone* semua model S-RPC dan S-NC pada Gambar 11 memperlihatkan bahwa semua model S-RPC memiliki kekuatan jauh lebih tinggi daripada model S-NC. Menurut ACI 374.1-05 (2005), *drift ratio* minimum yang harus dicapai adalah 3,50%. Dari Tabel 10, terlihat bahwa terdapat tiga model S-RPC yang mencapai *drift ratio* 5,00% dan satu model S-RPC mencapai *drift ratio* 3,50% pada kondisi pembebanan dorong dan tarik. Sedangkan, hanya terdapat satu model S-NC yang mencapai kondisi *drift ratio* 3,50% pada kondisi pembebanan dorong dan tarik, yaitu model S-NC-34,15. Pada *drift ratio* 3,50%, perbandingan kekuatan model S-NC-34,15 terhadap model empat S-RPC pada kondisi pembebanan dorong dan tarik adalah seperti yang diperlihatkan pada Tabel 13.



Gambar 11. Kurva *backbone* model S-RPC dan S-NC

Tabel 13. Hubungan jenis material beton, PPR, dan kekuatan

A_p (mm ²)	Jenis Beton	PPR (%)	F (+) (kN)	F_{S-RPC}/F_{S-NC} (+)	F (-) (kN)	F_{S-RPC}/F_{S-NC} (-)
98,71	RPC	21,39	523,55	147,02%	-549,20	157,58%
164,52	RPC	31,72	519,12	145,77%	-540,71	155,15%
208,39	RPC	37,34	579,66	162,78%	-575,56	165,15%
296,13	RPC	46,29	577,71	162,23%	-579,35	166,23%
219,35	NC	34,15	356,11	100,00%	-348,52	100,00%

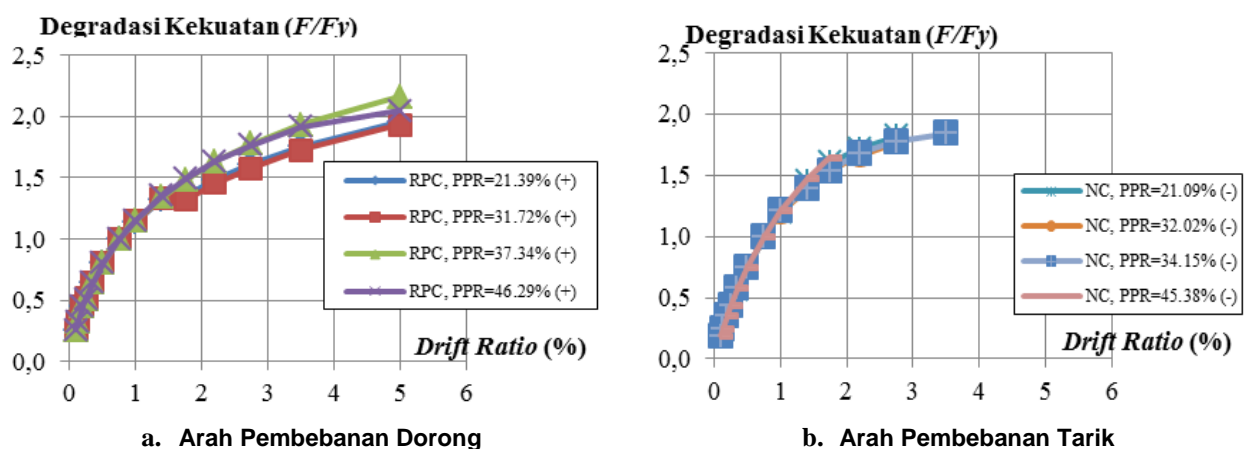
Degradasi kekuatan akibat beban siklik pada suatu *drift ratio* didefinisikan sebagai kapasitas beban pada suatu *drift ratio* terhadap kapasitas beban *drift ratio* sebelumnya (ATC, 2005). Hubungan degradasi kekuatan dan *drift ratio* empat model *subassemblage* RPC dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik diperlihatkan pada Gambar 12.a dan 12.b. Sedangkan, hubungan degradasi kekuatan dan *drift ratio* empat model *subassemblage* NC dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik diperlihatkan pada Gambar 13.a dan 13.b. Untuk memudahkan perbandingan, setiap beban pada puncak kurva dibandingkan dengan beban saat leleh signifikan kondisi pembebanan dorong dan tarik. Model *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC relatif mengalami degradasi kekuatan yang hampir sama sejak *drift ratio* 0,10% sampai dengan akhir pembebanan.

Pada model *subassemblage* balok-kolom RPC, model S-RPC-37,34 dan S-RPC-46,29 mengalami degradasi kekuatan lebih lambat daripada model S-RPC-21,39 dan S-RPC-31,72 sejak *drift ratio* 1,75% baik dalam kondisi pembebanan dorong maupun tarik. Hal ini disebabkan *strand* prategang pada model dengan PPR tinggi (37,34% dan 46,29%) memberikan sumbangan kekuatan yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan model dengan PPR lebih rendah (21,39% dan 31,72%) pada pembebanan dengan *drift ratio* 1,75% dan selanjutnya.

Pada model *subassemblage* balok-kolom NC, degradasi kekuatan relatif sama pada semua model dengan PPR yang bervariasi sampai dengan *drift ratio* 3,50% pada kondisi pembebanan dorong dan pada *drift ratio* 2,75% pada kondisi pembebanan tarik. Pengecualian terjadi pada model S-NC-32,02 *drift ratio* 3,50% kondisi pembebanan dorong, dimana degradasi kekuatan terjadi lebih lambat daripada model S-NC-34,15. Hal ini disebabkan kekuatan nominal model S-NC-32,02 lebih rendah daripada model S-NC-34,15 pada *drift ratio* 2,75%.

7. Kesimpulan

Hasil percobaan material telah memperlihatkan bahwa *Reactive Powder Concrete* (RPC) yang menggunakan komposisi material berukuran mikro, *superplastisizer* dan *silica fume*, perbandingan air terhadap semen rendah, serta mendapat perawatan dengan uap panas bersuhu 90 derajat Celcius selama tiga hari dapat mencapai kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kuat lentur yang lebih tinggi daripada *Normal Concrete* (NC). Hasil analisis dengan program *finite element* non-linier model *subassemblage* balok-kolom prategang parsial bermaterial RPC (S-RPC) memperlihatkan keunggulan kinerja dibandingkan dengan model *subassemblage* balok-kolom prategang parsial bermaterial NC (S-NC). Analisis *output* pemodelan *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:



Gambar 13. Kurva hubungan *drift ratio* dan degradasi kekuatan Model S-NC

1. Model S-RPC-21,39, S-RPC-31,72, dan S-RPC-37,34 dapat mencapai *drift story* 5,00% dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik. Sedangkan, model S-RPC-46,29 bersifat lebih getas sehingga mencapai *drift ratio* 5,00% hanya pada kondisi pembebanan dorong. Model S-NC-21,09 dan S-NC-32,02 dapat mencapai *drift story* berturut-turut sebesar 3,50% dan 2,75% dalam kondisi pembebanan dorong dan tarik. Model S-NC-34,15 memiliki kekuatan nominal balok lebih tinggi daripada model S-NC-21,09 dan S-NC-32,02 yang PPR-nya lebih rendah, sehingga dapat mencapai *drift ratio* berturut-turut sebesar 5,00% dan 3,50% pada kondisi pembebanan dorong dan tarik. Model S-NC-45,38 memiliki kekuatan nominal balok tertinggi tetapi bersifat lebih getas sehingga hanya mencapai *drift ratio* berturut-turut sebesar 2,20% dan 1,75% pada kondisi pembebanan dorong dan tarik.
2. *Drift ratio* maksimum yang dicapai oleh setiap model *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC mempengaruhi besarnya daktilitas. Model S-RPC-37,34 mencapai beban dan deformasi maksimum yang lebih besar daripada model *subassemblage* balok-kolom RPC lain. Hal ini disebabkan model S-RPC-37,34 memiliki kekuatan nominal yang lebih tinggi daripada model lain dan tetap bersifat daktil sehingga memiliki daktilitas tertinggi. Model S-RPC-46,29 memiliki kekuatan nominal tertinggi tetapi bersifat lebih getas sehingga mencapai *drift ratio* maksimum yang lebih rendah daripada model S-RPC-37,34.
3. PPR sebesar 37,34% pada model S-RPC-37,34 adalah optimum untuk memberikan kekuatan nominal yang tinggi sekaligus tetap bersifat daktil dibandingkan dengan model *subassemblage* RPC lain. Model S-RPC-46,29 mencapai 80,72% dari disipasi energi model S-RPC-37,34 karena walaupun memiliki kekuatan nominal tertinggi, sifat getas dari *strand* prategang mengakibatkan model tidak dapat berdeformasi cukup besar sehingga mengurangi daktilitas.
4. Pada model *subassemblage* balok-kolom NC, model S-NC-34,15 memiliki kekuatan nominal balok lebih tinggi daripada model *subassemblage* NC lain dan tetap bersifat daktil. Maka, disipasi energi yang dicapai lebih besar daripada model *subassemblage* NC yang lain. Pada model *subassemblage* balok-kolom NC, perbedaan PPR mempengaruhi disipasi energi secara signifikan.
5. Kekakuan model *subassemblage* balok-kolom RPC jauh lebih tinggi daripada model *subassemblage* balok-kolom NC karena material RPC memiliki kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas (kekakuan), dan kekuatan lentur yang jauh lebih

tinggi daripada NC. RPC bersifat lebih getas daripada NC karena terdiri dari material berukuran mikro dan lebih padat daripada NC. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan dan degradasi kekakuan yang lebih cepat pada model *subassemblage* RPC daripada model *subassemblage* NC, saat suatu elemen RPC mengalami retak atau *crushing*.

6. Model *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC yang memiliki PPR berturut-turut sebesar 37,34% dan 34,15% memperlihatkan kinerja yang lebih baik daripada model *subassemblage* balok-kolom RPC dan NC dengan PPR maksimum 25% seperti yang direkomendasikan di dalam SNI 03-2847-2013, Pasal 21.5.2.5 (c) (2013) dalam hal daktilitas, disipasi energi, kekakuan, dan kekuatan. Sehingga, kekuatan nominal balok dapat ditingkatkan dengan memberikan PPR di atas 25% dengan tetap memperhatikan aspek daktilitas dan disipasi energi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Wijaya Karya Beton yang telah memberikan dukungan dana penelitian melalui kerja sama penelitian dengan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung dengan nomor kontrak perjanjian KU.09.09/OA.WB.191 /2014 dan 167/I1.C09/DN/2014.

Daftar Pustaka

- ACI Committee, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*, ACI 374.1-05, USA: Farmington Hills.
- American Society of Testing Materials (ASTM) International, 2006, ASTM A416/A416 M. *Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete*, United States.
- American Society of Testing Materials (ASTM) International, 2002, ASTM C78 – 02, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, United States.
- American Society of Testing Materials (ASTM) International, 1994, ASTM C469 – 94, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, United States.

- Applied Technology Council (ATC), 2005, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Washington, DC.: FEMA 440 Report, Federal Emergency Management Agency, pp.392.
- Badan Standardisasi Nasional, 1991, SNI 07-2529-1991 *Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton*. Jakarta, Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional, 2013, SNI 03-2847-2013 *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, Jakarta, Indonesia.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., dan Aitcin, P.C., 1997, *Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concrete*, ACI Materials Journal, July-August 1997, p. 286-290.
- Federal Emergency Management Agency, 2000, FEMA 356 *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, pp. 3-19 to 3-20.
- Gilbert, R.I. and Mickleborough, N.C., 1990, *Design of Prestressed Concrete*, London: Unwin Hyman.
- Graybeal, B.A., 2007, Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 2 March-April 2007.
- Gowripalan, N., Watters, R., Gilbert, R.I, and Cavill, B.. 2003, *Reactive Powder Concrete for Precast Structural Concrete-Research and Development in Australia*, 21st Biennial Conference of The Concrete Institut of Australia, Brisbane, Australia, p. 99-108.
- Kurniawan, R., Budiono, B., Surono, A., dan Pane, I., 2011, *Peningkatan Tahanan Punching Shear pada Struktur Flat Slab dengan Reactive Powder Concrete*, Bandung: Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS), Institut Teknologi Bandung.
- Malik, A.R., 2007, *An Investigation into The Behaviour of Reactive Powder Concrete Columns*, The University of New South Wales, Sydney, Australia: *a dissertation in School of Civil and Environmental Engineering*.
- Menefy, L., 2007, *Investigation of Reactive Powder Concrete and Its Damping Characteristics When Utilized in Beam Elements*. Griffith University, Gold Coast Campus, Australia: Thesis of Doctor Philosophy, Griffith School of Engineering.
- Naibaho, P.R., Budiono, B., Surono, A., Pane, I., 2014, *Studi Eksperimental Penambahan Tulangan pada Sambungan Balok-Kolom Eksterior Menggunakan Bubuk Reaktif dengan Beban Siklik*, Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung.
- New Zealand Concrete Society (NZCS), 2010, New Zealand: PRESS Design Handbook.
- Paulay, T. and Priestly, M.J.N., 1992, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Willey & Sons.
- Priestley, M. J. N., Sritaharan, S., Conley, J.R., dan Pampanin, S., 1999, Preliminary Result and Conclusions From the PRESS Five-Story Precast Concrete Test Building, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, November-December 1999, pp. 42-67.
- Richard, P. dan Cheyrezy, M. 1994, *Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200–800 MPa Compressive Strength*, Proc. of V. Mohan Malhotra Symposium Concrete Technology Past, Present, and Future, ACI SP-144, P.K. Mehta, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, March 1994, pp. 507–518.
- Richard, P., dan Cheyrezy, M., 1995, *Composition of Reactive Powder Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.7, pp. 1501 – 1511.
- Thompson, K.J. dan Park, R., 1980, Ductility of Prestressed and Partially Prestressed Concrete Beam Sections, *Precast/Prestressed Concrete Institute Journal*, March-April 1980, pp. 46-70.

