



Analisis Tegangan Regangan dan Defleksi pada Sambungan Balok-Kolom Beton Bertulang Menggunakan Beban Statik

***Hakas Prayuda, Martyana Dwi Cahyati, Bagus Soebandono**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta
^{*)}hakasprayuda@umy.ac.id

Received: 29 Maret 2018 Revised: 17 Oktober 2018 Accepted: 19 Oktober 2018

Abstract

Reinforced concrete is commonly used in any infrastructures. In building, it can be applied for beam and column separately, but the joints between those elements in this type of structure might be vulnerable due to the strength compared to the element itself. In this study, some parameters namely ductility, stiffness, and energy dissipation of beam-column connection in precast concrete will be examined using finite element method. Six samples in this experiment are made considering some variations such as connection type in interior and exterior condition, round-shaped and rectangular-shaped of column, and T-shaped and rectangular-shaped of beam. Static loads were given in the middle of the beam and column so that the crack pattern can be obtained. From this experiment, it will be known the best and suitable joints by observing those three parameters.

Keywords: Numerical analysis, beam-column, connection, precast concrete, abaqus cae

Abstrak

Beton bertulang merupakan salah satu inovasi yang sudah banyak digunakan dalam membangun infrastruktur. Kelemahan dari penggunaan beton adalah terdapat kelemahan di antara sambungan setiap komponennya. Pada penelitian ini akan menganalisis nilai daktilitas, kekakuan dan disipasi energi dengan variasi sambungan balok kolom bangunan gedung menggunakan metode numerik. Benda uji dalam penelitian ini sebanyak enam sampel yang di analisis berupa tipe sambungan interior dan eksterior dengan kombinasi kolom persegi dan kolom lingkaran sedangkan balok yang digunakan adalah balok persegi dan balok T. Beban statik diletakkan pada tengah balok dan tengah kolom hingga memperoleh pola retaknya. Melalui penelitian ini ingin menghasilkan jenis sambungan yang memiliki nilai daktilitas, kekakuan dan disipasi energi yang baik.

Kata Kunci: Analisis numerik, balok-kolom, sambungan, beton pracetak, abaqus cae

Pendahuluan

Pada saat ini kemajuan di bidang teknologi sangat pesat. Begitu pula di bidang konstruksi juga berkembang mengikuti kemajuan teknologi tersebut demi memenuhi kebutuhan manusia. Seiring berkembangnya teknologi konstruksi setiap saat manusia dituntut untuk mengerjakan suatu bangunan dengan cepat dan praktis. Salah satunya adalah pembangunan gedung tingkat tinggi yang membutuhkan konstruksi yang kuat dan bisa dikerjakan dengan waktu cepat.

Bangunan-bangunan gedung dibangun semakin tinggi hal ini untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di lahan yang terbatas. Bangunan tingkat tinggi memiliki bagian-bagian yaitu struktur bawah yang terdiri dari pondasi dan *sloof*, struktur atas yang terdiri dari balok, kolom, plat lantai, dan dinding, dan atap yang terdiri dari balok ring, kuda-kuda, dan genteng. Bagian-bagian tersebut saling mendukung satu sama lain. Tipe balok dan tipe kolom yang diaplikasikan di lapangan pun cukup beragam. Berdasarkan di lapangan terdapat tipe balok persegi dan tipe balok-T, tidak hanya itu kolom persegi dan kolom

lingkaran pun juga saat ini juga sudah digunakan di lapangan.

Oleh karena itu, di dalam penelitian ini sambungan pada balok dan kolom dengan tipe berbeda tersebut sangat menarik untuk diteliti karena bagian tersebut sangat berbahaya bila tidak didesain dengan baik. Penelitian sebelumnya mengenai sambungan balok kolom antara lain tentang *Seismic performance* telah dilakukan oleh (Girgin *et al.*, 2017), (Adnan *et al.*, 2015) dan (Sagbas *et al.*, 2011). Penelitian dengan tema modifikasi jenis sambungan balok kolom dilakukan oleh (Tang *et al.*, 2016) dan (Tran *et al.*, 2018). Sedangkan Analisis Numerik menggunakan simulasi Non Linier Modelling pernah dilakukan oleh (Baji *et al.*, 2015), (Supaviriyakit & Pimanmas, 2007) serta dilakukan oleh (Omid & Behnamfar, 2015).

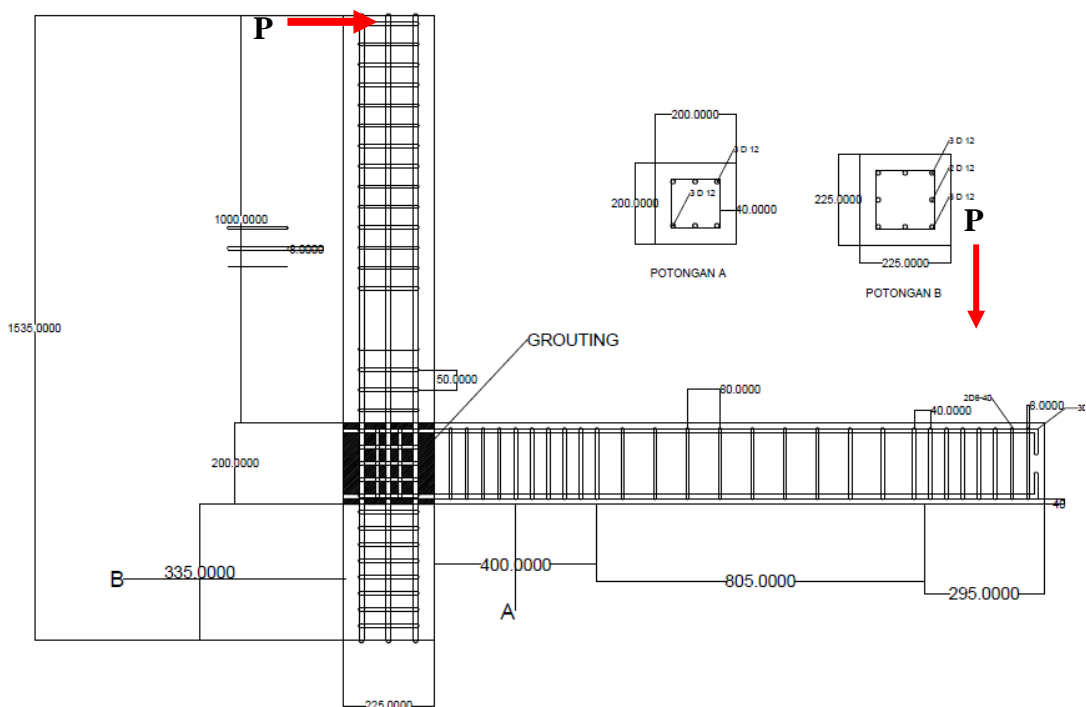
Selain itu, penelitian mengenai balok-kolom juga banyak dilakukan di laboratorium untuk menunjang teori dan analisis numerik yang diperoleh. Beberapa penelitian mengenai sambungan balok kolom dengan beton tambahan serat polimer dilakukan oleh (Antonopoulos dan Triantafillou, 2003) dan (Lee *et al.*, 2010). Penelitian mengenai analisis perbaikan komponen balok kolom dilakukan oleh (Mahini & Ronagh, 2010) dan (Singh, 2014). Analisis kekakuan dan kuat geser sambungan di laboratorium dilakukan oleh (Kim *et al.*, 2009), (Granata dan Parvin, 2001) dan (Trung *et al.*, 2010).

Pada penelitian ini akan membahas tentang sambungan balok kolom sebanyak enam model yang diberikan beban statik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model struktur balok-kolom eksterior dan interior yang paling efektif, menentukan nilai kekakuan, mengkaji hubungan tegangan-regangan dan mempelajari pola retakan yang terjadi pada setiap variasi model struktur balok-kolom. Perbedaan masing-masing sampel adalah jenis kolom yang terdiri dari kolom persegi dan kolom lingkaran, jenis beban dimana yang terkena beban di posisi balok dan posisi kolom serta posisi balok kolom di bagian eksterior dan interior.

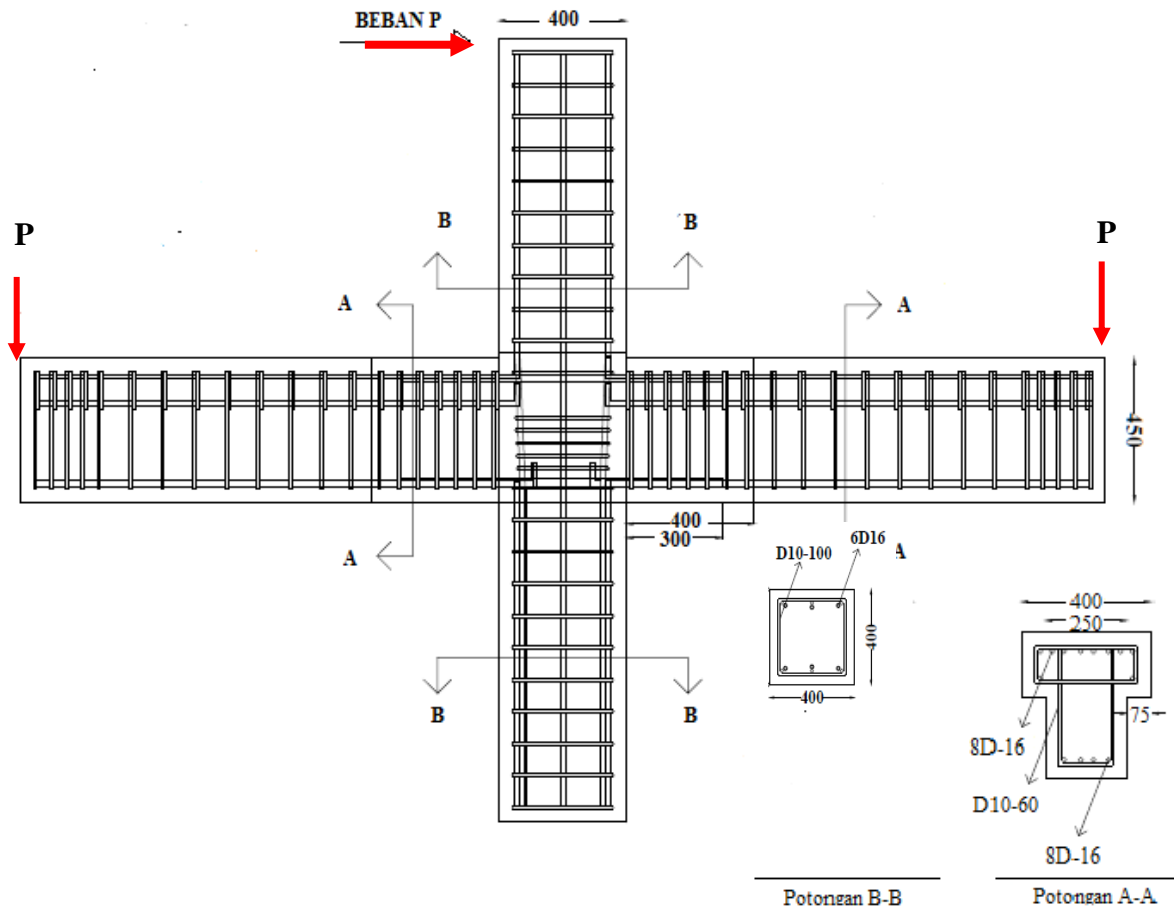
Melalui penelitian ini dihasilkan hubungan beban dan lendutan yang kemudian diperoleh kekakuan dari sambungan masing-masing tipe balok kolom, hasil lain penelitian ini berupa hubungan tegangan dan regangan. Dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13 diperoleh juga pola retak yang terjadi dengan diberikan beban secara bertahap sampai dengan beban maksimum.

Metodologi

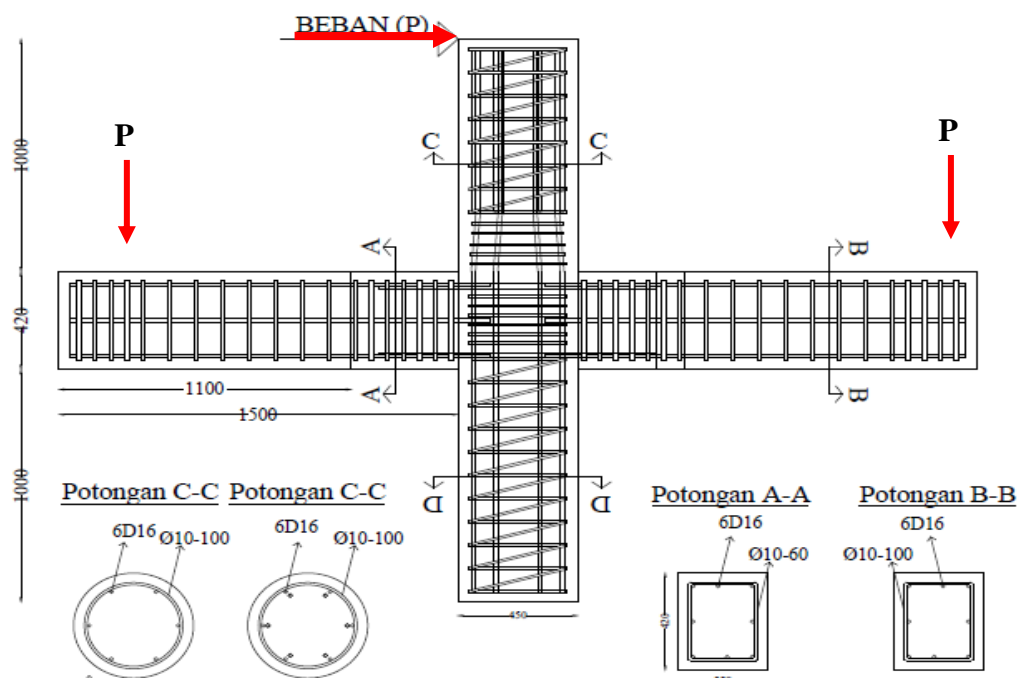
Pada penelitian ini menggunakan sebanyak enam tipe model yang di analisis menggunakan aplikasi Abaqus 6.13 dengan rencana model beton bertulang yang digunakan diberi kode PRC-1 sampai PRC-6. Adapun detail spesifikasi model yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1 sampai Gambar 5 dan Tabel 1.



Gambar 1. Detail model PRC-1



Gambar 4. Detail model PRC-5



Gambar 5. Detail model PRC-6

Tabel 1. Tipe model

Nama sampel	Tipe balok	Tipe kolom	Lokasi beban	Tipe balok-kolom
PRC-1	Persegi	Persegi	Lateral kolom	Eksterior
PRC-2	Persegi	Lingkaran	Lateral kolom	Eksterior
PRC-3	Persegi	Persegi	Lentur balok	Eksterior
PRC-4	Balok T	Persegi	Lentur balok	Eksterior
PRC-5	Persegi	Persegi	Lateral kolom	Interior
PRC-6	Persegi	Lingkaran	Lateral kolom	Interior

Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan *software* Abaqus 6.13. Penggunaan *software* diawali dengan memasukkan desain gambar di *module part* sesuai dengan spesifikasi pada Gambar 1 sampai 5. Kemudian dilanjutkan dengan memasukkan parameter material yang berupa beton dan baja pada menu *properties*.

Di ABAQUS memiliki tiga model retakan yang cocok untuk struktur beton bertulang diantaranya *smeared concrete model*, *brittle crack concrete model* dan *concrete damaged plasticity (CDP)*. Di dalam penelitian ini digunakan *concrete damaged plasticity model*. Hal ini dikarenakan CDP model dapat mempresentasikan perilaku material beton tidak hanya pada saat kondisi tekan (*compression*) namun juga pada saat kondisi tarik (*tensile*) dan juga dapat merepresentasikan perilaku kerusakan akibat kedua kondisi tersebut.

Untuk mensimulasikan perilaku tarik struktur beton bertulang secara lengkap pada model ABAQUS digunakan prinsip *Post Failure Stress-Strain Relationship* (Gambar 6) pada beton akibat gaya tarik dengan menghitung kekakuan tariknya (*tensile stiffening*), *strain stiffening*, dan *reinforcement interaction* pada beton (Wahalathatntri *et al.*, 2011). Dengan memasukkan parameter modulus elastisitas (E_0), tegangan tarik (σ_t), regangan retak (ε_c^{ck}) dan *damage parameter (dm)* digunakan untuk memasukkan pada kondisi tarik yang nilainya dapat dilihat pada Tabel 2. Regangan retak dapat dihitung berdasarkan regangan total yang dapat dilihat pada Persamaan (1) dan (2).

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ot}^{el} \quad (1)$$

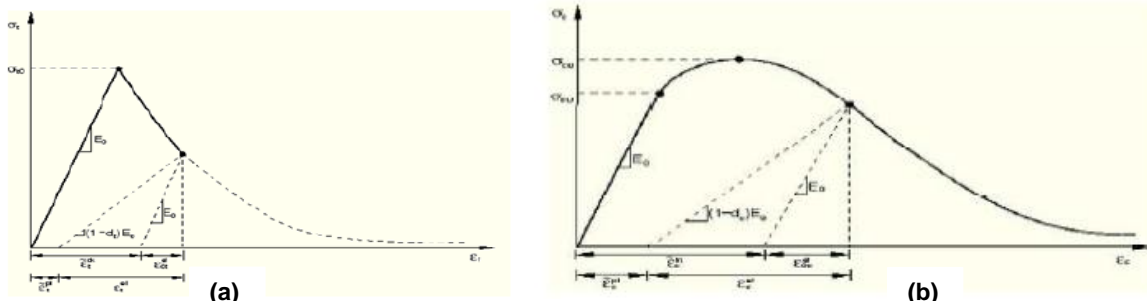
$$\varepsilon_{ot}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (2)$$

Untuk mensimulasikan perilaku tekan pada model biasanya dimasukkan beberapa parameter berupa kuat tekan (σ_c), *inelastic strain* (ε_c^{in}) dan *damage compression* (d_c). Oleh karena itu nilai regangan total (ε_c) harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi regangan elastik dengan menggunakan Persamaan (3) dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (3)$$

Pada material beton digunakan parameter *dilation angle* sebesar 30, *eccentricity* sebesar 0,1, $F_{b0}f_{c0}$ sebesar 1,16 dan 0,67, serta *viscosity* 0,005. Modulus elastisitas beton pada balok sebesar 24.870 MPa sedangkan pada kolom sebesar 26.587 MPa. *Poisson ratio* pada material beton sebesar 0,15. Pada material baja digunakan modulus elastisitas sebesar 200.000 MPa dan *poisson ratio* sebesar 0,3. Hubungan antara tegangan dan regangan baja yang dipakai pada penelitian ini dapat dilihat secara detail di Tabel 3.

Data ini digunakan untuk mengetahui karakteristik material yang digunakan sehingga diperoleh data *output* berupa tegangan, regangan, beban maksimal dan lendutan. Beban maksimal yang diberikan dalam penelitian ini bervariasi sesuai dengan kapasitas masing-masing beban secara bertahap hingga model di anggap mengalami kegagalan pada sambungan.



Gambar 6. Hubungan tegangan dan regangan pada kondisi tarik (a) dan pada kondisi tekan (b) (Abaqus,2013)

Tabel 2. Compressive and tensile behavior

Compressive				Tensile			
Yield stress (σ_c)	Inelastic strain (ϵ_c^{in})	Damage parameter (d_c)	Cracking strain (ϵ_c^{ck})	Yield stress (σ_t)	Inelastic strain (ϵ_t^{in})	Damaged parameter (d_t)	Cracking strain (ϵ_t^{ck})
11,47417	0	0	0	1,89742	0	0	0
17,67084	0,00039	0	0,00039	2,10825	8,00E-05	0	8,00E-05
21,01294	0,00061	0	0,00061	1,99877	0,00013	0,05	0,00013
26,05119	0,00109	0	0,00109	1,94403	0,00015	0,08	0,00015
28,47684	0,00159	0	0,00159	1,82213	0,00020	0,14	0,00020
28,68542	0,00179	0	0,00179	1,34192	0,00039	0,36	0,00039
28,22981	0,00209	0,02	0,00209	1,01349	0,00052	0,52	0,00052
25,53734	0,00259	0,11	0,00259	0,79454	0,00061	0,62	0,00061
14,34271	0,00354	0,50	0,00354	0	0,00093	0,99	0,00093
6,05362	0,00459	0,79	0,00459				
3,49047	0,00559	0,88	0,00559				
0,93815	0,00959	0,97	0,00959				

Beban yang dimasukkan tergantung dari jenis kolomnya. Hal ini dilakukan untuk menyamakan sesuai kondisi di lapangan. Tumpuan yang digunakan diberikan tumpuan jepit (*fixed*) di ujung balok. Tipe Mesh yang digunakan pada model abaqus yaitu elemen tetrahedral. Interaksi yang digunakan antara tulangan dan beton menggunakan *embedded function*. Sedangkan interaksi antara balok dan kolom digunakan *surface to surface*. Step yang digunakan bersifat *general static* dengan perilaku non linier.

Tabel 3. Stress dan strain result pada beton

Stress, σ_s (MPa)	Strain, ϵ_s
420	0
420	0,018
500	0,028
500	0,198

Hasil dan Pembahasan

Hubungan beban dan lendutan

Dari hasil analisis diperoleh nilai beban maksimal dan nilai lendutan nya yang dapat dilihat pada Tabel 4. Model PRC-1 retak pertama kali pada saat beban 3,11 kN dengan nilai simpangan lateral sebesar 0,62 mm, lalu mengalami leleh pada tulangan disambungan pada saat beban 7,53 kN dengan simpangan lateral 4,23 mm dan model ini mengalami rusak pada sambungan pada saat beban lateral sebesar 15,5 kN dengan nilai lendutan sebesar 33,86 mm. Dibandingkan dengan model PRC-2 dimana proses pembebanan yang sama dengan model PRC-1, model ini mengalami retak pada saat beban 1,50 kN dengan defleksi sebesar 1,54 mm sedangkan beban maksimal yang bisa

diterima jenis kolom ini sama dengan PRC-1 dan lendutan yang dihasilkan lebih kecil 7,17% dibandingkan dengan model PRC-1, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis kolom mempengaruhi respon lendutan yang terjadi walaupun selisihnya sangat kecil. Jika kedua model PRC-1 dan model PRC-2 dibandingkan maka berarti bahwa penggunaan tipe kolom lingkaran memiliki kekakuan yang lebih besar dibandingkan kolom persegi.

Model PRC-3 dan PRC-4 merupakan jenis balok-kolom interior yang sama memiliki kolom tipe persegi. Namun yang membedakan kedua model tersebut adalah tipe balok yang dimodelkan pada model PRC-3 menggunakan tipe balok persegi sedangkan pada model PRC-4 menggunakan tipe balok T. Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa pada kondisi *ultimite model* PRC-4 mampu menahan beban yang lebih besar 1,5% dibandingkan dengan model PRC-3 dan respon lendutan pada mmodel PRC-4 lebih kecil dibandingkan dengan 10,93% dibandingkan model PRC-4. Hal ini berarti ketika struktur balok-kolom interior menggunakan balok T mampu menahan beban yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan menggunakan balok persegi.

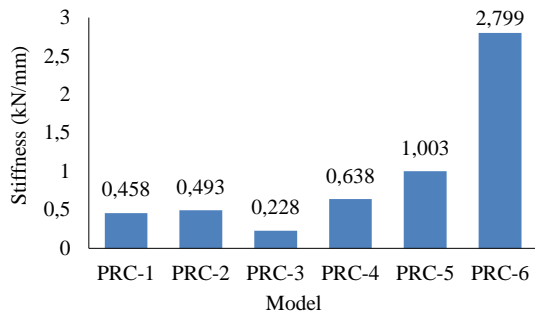
Pada model PRC-5 dan model PRC-6 merupakan jenis balok-kolom interior yang sama-sama dimodelkan dengan menggunakan balok T namun tipe kolom yang digunakan berbeda. Model PRC-5 digunakan kolom persegi sedangkan model PRC-6 digunakan kolom lingkaran. Berdasarkan hasil analisis yang dapat dilihat pada Tabel 4 dapat dinyatakan bahwa pada saat *ultimite model* PRC-6 mampu menahan beban yang lebih tinggi 1,5% dan respon lendutan lebih rendah dari model PRC-5.

Hal ini berarti bahwa dengan pada struktur balok-kolom *eksterior* dengan penggunaan tipe balok T
Tabel 4. Beban dan lendutan pada setiap sampel

Model	Crack		Yield		Ultimit	
	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Beban (kN)	Lendutan (mm)
PRC-1	3,11	0,62	7,53	4,23	15,5	33,860
PRC-2	1,50	1,54	8,10	11,95	15,5	31,430
PRC-3	19,32	19,83	29,29	63,66	40,0	175,441
PRC-4	44,89	26,72	84,44	83,23	100,0	156,771
PRC-5					300,0	299,240
PRC-6					450,0	160,760

dan kolom lingkaran mampu menahan beban yang lebih tinggi dibandingkan pada struktur balok-kolom eksterior dengan penggunaan tipe balok T dan kolom persegi.

Gambar 7 menjelaskan nilai kekakuan sambungan pada masing masing model dengan jenis pembebanan dan jenis konstruksi yang berbeda. Hasil kekakuan pada setiap model PRC-1; PRC-2; PRC-3; PRC-4; PRC-5 dan PRC-6 adalah 0,458; 0,493; 0,228; 0,638; 1,003 dan 2,799 yang disimpulkan bahwa kekakuan tertinggi diperoleh jenis balok-kolom sampel PRC-6 dan kekakuan terkecil pada jenis PRC-3.

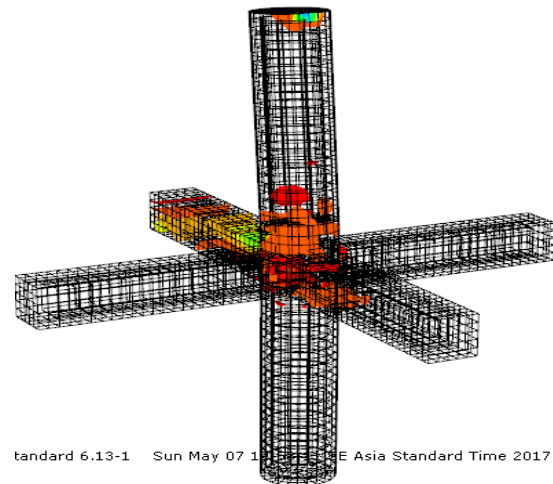


Gambar 7. Hasil kekakuan setiap model sambungan

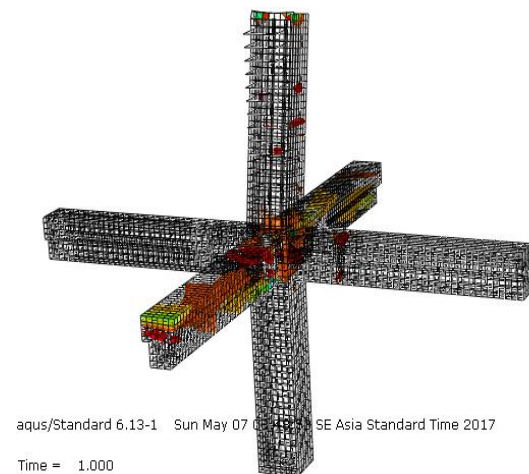
Hubungan tegangan dan regangan

Hasil dari penelitian memperlihatkan nilai tegangan dan regangan maksimal yang didapat pada model PRC-1 sebesar 13,91 MPa dan regangan yang terjadi yaitu 0,01799 sedangkan untuk model PRC-2 didapat tegangan maksimal 2,88 MPa dan regangan 0,00227. Dari kedua model bisa dikatakan nilai tegangan dan regangan yang didapat model satu lebih besar karena keduanya memiliki perbedaan pada dimensi, variasi kolom, beban, dan *meshing*. Pada model PRC-4 didapatkan hasil tegangan ultimite yang lebih tinggi dibanding model PRC-3 yaitu sebesar 30,78 MPa dengan nilai regangan sebesar 0,01864. Hasil Tegangan dan regangan dapat dilihat pada Tabel 5. Distribusi tegangan terjadi pada saat kondisi ultimite dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9. Pada Gambar 8 untuk model PRC-5 dapat dilihat bahwa

distribusi tegangan hanya terpusat dari sambungan balok-kolom menuju ke arah balok sedangkan pada Gambar 9 distribusi tegangan terjadi pada pusat sambungan balok-kolom menuju ke arah balok dan kolomnya. Pada model PRC-6 mengalami tegangan maksimal pada pusat sambungan ke kolom sedangkan pada model PRC-5 mengalami tegangan maksimal di sekitar sambungan mengarah ke balok.



Gambar 8. Tegangan yang terjadi pada model PRC-5



Gambar 9. Tegangan yang terjadi pada model PRC-6

Tabel 5. Tegangan dan regangan maksimum pada model sambungan

Model	Tegangan maksimal	Regangan maksimal
PRC-1	13,91	0,01799
PRC-2	2,88	0,02270
PRC-3		
PRC-4	30,78	0,01860
PRC-5		
PRC-6		

Pola retak

Pada Gambar 10 dapat dilihat pola retak pada setiap modelnya. Pola retak pada model PRC-1 dan PRC-2 sama-sama terjadi retakan pada pusat sambungan. Namun, pada model PRC-3 dan benda uji PRC-4 tidak hanya terjadi pada sambungan namun terjadi retakan pada balok. Pada model PRC-4 yang paling parah adalah pada balok. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya distribusi warna merah yang terletak pada balok pada Gambar 10 (d).

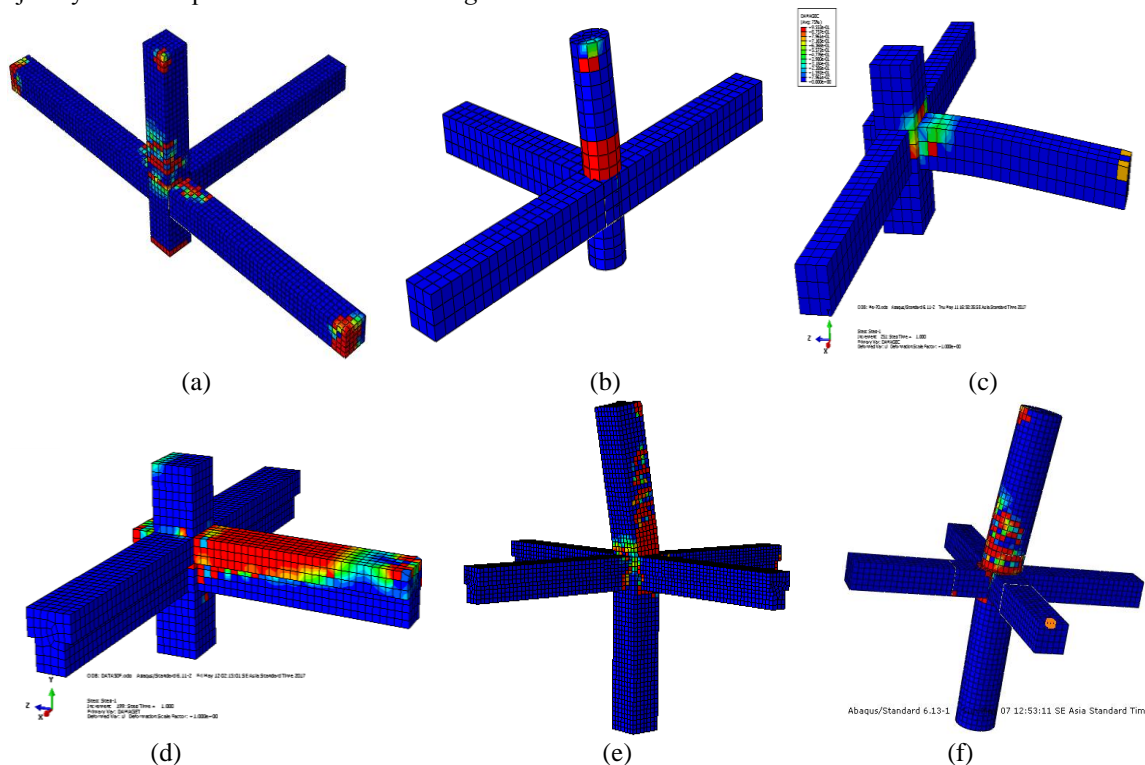
Pada model PRC-5 dan PRC-6 sama-sama terjadi retakan tidak hanya di kolom namun juga terjadi retakan pada kolom juga. Tapi, pada model PRC-5 retakan pada kolom lebih banyak dibandingkan pada model PRC-6. Hal ini berarti penggunaan kolom lingkaran dapat mengurangi risiko terjadinya retakan pada kolom. Warna *orange* dan

merah menunjukkan bahwa tegangan sudah melampaui batas tegangan maksimal dari bahannya sehingganya menyebabkan keretakan yang cukup parah di daerah tersebut, sedangkan warna hijau dan kuning terjadi retakan ringan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* Abaqus 6.13, dari seluruh model dapat disimpulkan bahwa pada pemodelan struktur balok-kolom eksterior dan interior dengan menggunakan model PRC-6 dan PRC-4 merupakan salah satu model yang paling efektif dibandingkan model struktur lainnya. Hal ini dikarenakan model tersebut mampu menahan beban ultimate lebih tinggi dibanding model yang lainnya. Dari hubungan beban dan lendutan diperoleh nilai kekakuan dimana PRC-6 memiliki nilai kekakuan terbesar yaitu sebesar 2,79 kN/m sedangkan kekakuan terkecil terdapat pada model PRC-3 dengan nilai 0,28 kN/m.

Hubungan tegangan dengan regangan juga dihasilkan dengan nilai yang berbeda-beda untuk setiap model nya dimana PRC-6 merupakan model yang memiliki nilai tegangan terbesar. Pola retak secara keseluruhan terjadi pada sambungan balok kolom dimana pertama kali terjadi kerusakan pada bagian tersebut baik pada pembebanan di kolom secara lateral maupun pada balok secara aksial.



Gambar 10. Pola retak pada setiap sampel (a) PRC-1; (b) PRC-2; (c) PRC-3; (d) PRC-4; (e) PRC-5; (f) PRC-6

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Angga Adhitya Firmansyah, Qurratu Ayanin Wahyu Romadhani, Eka Riyadini Weningtyas dan Robi'al Rollyas Syandy yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini. Serta seluruh staf Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Daftar Pustaka

Abaqus Analysis User Manual – Abaqus Version 6.13. (2013).

Adnan, M. A., Tahir, M. M., Sam, A. R. B. M., & Razak, S. M. B. S. A. (2015). Seismic Performance of Ductility Classes Medium RC Beam-Column Connections with Continuous Rectangular Spiral Transverse Reinforcements. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12, 787-807.

Antonopoulos, C. P., & Triantafillou, R. C. (2003). Experimental Investigation of Fiber Reinforce Polymers Strengthened Reinforced Concrete Beam Column Joints. *Journal of Composites for Construction*, 7, 39-49.

Baji, A., Eslami, & Ronagh, H. R. (2015). Development of a Nonlinear FE Modelling Approach for FRP-Strengthened RC Beam-Column Connections. *Structures*, 3, 272-281.

Girgin, S. C., Misir, I. S., & Kahraman, S. (2017). Seismic Performance Factors for Precast Buildings with Hybrid Beam-Coumn Connections. *Procedia Engineering*, 199, 3540-3545.

Granata, P. J., & Parvin, A. (2001). An Experimental Study on Kevlar Strengthening of Beam-Column Connections. *Composite Structures*, 53, 163-171.

Kim, J., LaFave, J. M., & Song, J. (2009). Joint Shear Behaviour of Reinforced Concrete Beam-Column Connections. *Magazine of Concrete Research*, 61, 119-132.

Lee, W. T., Chiou, Y. J., & Shih, M. H. (2010). Reinforced Concrete Beam-Column Joint Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Composite Structures*, 92, 46-60.

Mahini, S. S., & Ronagh, H. R. (2010). Strength and Ductility of FRP Web-Bonded RC Beams for The Assesment of Retrofitted Beam-column Joints. *Composites Structures*, 92, 1325-1332.

Omidi, M., & Behnamfar, F. (2015). A Numerical Model for Simulation of Reinforce Concrete Beam-Column Connections. *Engineering Structures*, 88, 51-73.

Sagbas, G., Vecchio, F. J., & Christopoulos, C. (2011). Computational Modeling of the Seismic Performance of Beam-Column Subassemblies. *Journal of Earthquake Engineering*, 15, 640-663.

Singh, V., Bansal, P. P., Kumar, M., & Kaushik, S. K. (2014). Experimental Studies on Strength and Ductility of CFRP Jacketed Reinforced Concrete Beam-Column Joints. *Construction and Building Materials*, 55, 194-201.

Supaviriyakit, T., & Pimanmas, A. (2007). Nonlinear Finite Element Analysis of Non-Seismically Detailed Interios RC Beam-Column Connection Under Reversed Cyclic Load. *Asean Journal on Science and Technology for Develompent*, 24, 369-386.

Tang, X. L., Cai, J., Chen, Q. J., Liu, X., & He, A., (2016). Seismic Behaviour of Through-Beam Connection Between Square CFST Columns and RC Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 151-166.

Tran, M. T., Bui, Q. B., Sentosa, B., Nguyen, N. T. T. H., Duong, T. H., & Ple, O. (2018). Sustainable RC Beam-Column Connections with Headed Bars: A Formula for Shear Strength Evaluatuin. *Sustainability*, 10, 1-14.

Trung, K. L., Lee, K., Lee, J., Lee, D. H., & Woo, S. (2010). Experimental Study of RC Beam-Column Joints Strengthened using CFRP Composites. *Composites: Part B*, 41, 76-85.

Wahalathantri, B. L., Thambiratnam, D. P., Chan, T. HT., & Fawzia, S. (2011). *A Material Model For Flexural Crack Simulation In Reinforced Concrete Elements Using Abaqus*. Paper presented at the First Internasional Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Enviromwnt for Sustainable Wellbeing, Queensland Univerity of Technology, Brisbane, PP. 260-264.