

EVALUASI PERMODELAN *NON-DUCTILE BEAM-COLUMN JOINT*

Vanessa Octaviani¹, Patricia Chiaulina Kurniawan², Jimmy Chandra³, Joko Purwono⁴

ABSTRAK : *Joint* merupakan penyumbang *displacement* terbesar saat terjadi gempa. Karena itu respons *joint* perlu diperhitungkan. Salah satu caranya adalah dengan simulasi permodelan *joint*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi keakuratan respons *load-displacement* dari permodelan *joint* oleh Eom *et al* (2015). Simulasi ini dilakukan dengan memberikan pembebanan *cyclic* pada 13 model spesimen *joint non-ductile* (6 spesimen interior dan 7 spesimen eksterior) dengan program SAP2000. Pembebanan dilakukan dengan metode non-linier statik *push-pullover*. Hasil dari simulasi ini berupa grafik *load-displacement* yang akan dibandingkan dengan grafik hasil eksperimen yang terdapat pada literatur. Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa permodelan *joint* dapat disimulasikan pada program SAP2000. Permodelan ini akurat untuk spesimen yang kegagalannya diawali oleh *beam yielding* dan pada kasus yang memiliki kapasitas angkur yang tidak memadai, momen *yield* yang digunakan untuk permodelan *joint* perlu dimodifikasikan terlebih dahulu.

KATA KUNCI : *joint, non-ductile, SAP2000, cyclic*

1. PENDAHULUAN

Kondisi geografis Indonesia yang berada pada wilayah cincin api membuat Indonesia menjadi negara yang rawan gempa. Dalam pelaksanaan konstruksi bangunan yang dihitung dengan menggunakan peraturan gempa, sebagian besar orang lebih memperhatikan elemen-elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat. Akan tetapi, ada satu elemen struktur lagi yang seharusnya juga perlu diperhatikan, yaitu hubungan balok-kolom atau yang disebut *joint*. Pada perhitungan struktur beton terhadap gempa, pada umumnya *joint* diasumsikan *rigid*, di mana *joint core* akan tetap elastis ketika menerima beban gempa meski balok dan kolom mengalami kerusakan. Namun, beberapa penelitian telah membuktikan bahwa *joint* tidak selalu *rigid*, salah satunya penelitian dari Walker (2001) yang membuktikan bahwa *shear cracking* dan *bond slip* memiliki kontribusi yang cukup besar pada pergoyangan akibat beban seismik. Dari pembuktian tersebut peneliti mulai melakukan penelitian-penelitian mengenai kekuatan *joint*. Alath dan Kunnath (1995) memodelkan *joint* sebagai *rotational hinge*. Saat ini, model *rotational hinge* masih terus dikembangkan. Salah satunya oleh Birely *et al.* (2012), di mana model diberi 2 *rotational spring* pada bagian *beam-joint*. Kemudian, model dari Birely *et al.* (2012) ini dikembangkan lagi oleh Eom *et al.* (2015), di mana model diberi *plastic rotational spring element* pada bagian *beam-joint*. *Plastic rotational spring element* tersebut terdiri dari 1 *hinge* yang merupakan gabungan dari *bond slip, joint shear, dan beam spring*.

2. LANDASAN TEORI

Eom *et al.* (2015) menggunakan permodelan *lumped plasticity model* yang terdapat pada **Gambar 1**. Dengan perhitungan *energy-based models* yang menyederhanakan *bond slip, joint shear, dan beam spring* menjadi 1 *spring*. Selain itu, Eom *et al.* (2015) juga memodifikasikan kurva *cyclic* dengan

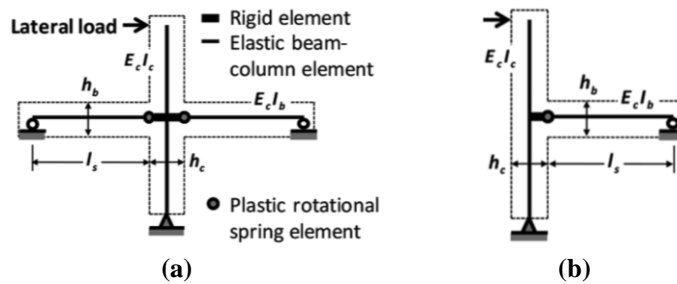
¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21414085@john.petra.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21414172@john.petra.ac.id

³Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, chandra.jimmy@petra.ac.id

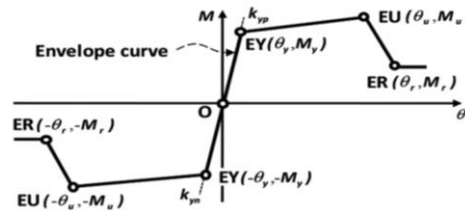
⁴Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, jpurnomo@petra.ac.id

cyclic strength degradation ($\gamma_s \neq 0$).



Gambar 1. Permodelan Joint dari Eom et al. (2015) (a) Interior; (b) Eksterior

Gambar 2 menunjukkan envelope curve yang merupakan grafik dari moment-plastic deformation angle dengan pembebanan monotonic yang didapatkan dari modifikasi backbone curve dari ASCE/SEI 41-06. Jika pada tulangan negatif dan tulangan positif berbeda, envelope curve dapat ditentukan dengan masing-masing (negatif dan positif). Dari Gambar 2, EY merupakan titik yield, EU merupakan titik ultimate, dan ER merupakan titik residual states.



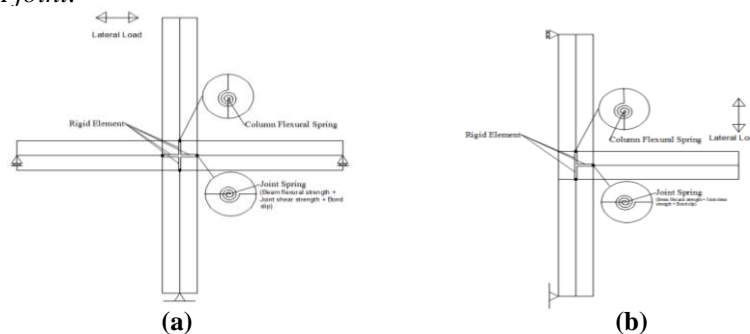
Gambar 2. Envelope Curve untuk Elemen Joint Spring [dari Eom et al., 2015]

3. METODOLOGI PENELITIAN

Spesimen-spesimen yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 1 untuk spesimen interior dan eksterior.

3.1. Pengajuan Model Joint

Joint yang diajukan merupakan permodelan joint oleh Eom et al. (2015), yaitu lumped plasticity model seperti yang terdapat pada Gambar 3. Model ini terdiri dari 1 joint rotational spring untuk mewakili perilaku non-linear joint, bond-slip, dan kelenturan balok yang terletak di pertemuan joint-balok, 1 rotational spring pada tiap hubungan dengan kolom untuk mewakili column flexural, dan rigid element untuk kekakuan joint.



Gambar 3. Permodelan Sistem untuk Tipe Joint (a) Interior Joint dan (b) Eksterior Tee-Joint

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Interior Joint

Model PEER 2250

Gambar 4 menunjukkan bahwa permodelan dapat digunakan untuk mensimulasikan mode kegagalan kombinasi shear failure dan bond-slip setelah terjadi beam yielding. Permodelan ini dikembangkan dalam lingkup spesimen yang relatif tidak memiliki beban aksial kolom, sehingga pengaruh dari beban aksial ini belum diperhitungkan. Selain pada drift, ada penyimpangan pada kapasitas geser pada kondisi

reverse loading. Hal ini dikarenakan terjadinya *joint crack* pada *drift* 0.5%. Ketika *reverse loading* retakan ini terbuka sehingga kapasitas geser *joint* berkurang hingga 13%, namun pada saat *loading* retakan menutup sehingga tidak memberi pengaruh yang signifikan pada kapasitas.

Tabel 1. Data-Data Eksperimen *Joint* Interior dan Eksterior.

Spesi men	Hwang <i>et al.</i> (2011)			Alire (2002) dan Walker (2001)			Clyde <i>et al.</i> (2000)			Pantelid es <i>et al.</i> (2002)		Kuang dan Wong (2008)	
	S1	S2	S3	PEE R 0850	PEE R 2250	PEE R 4150	2	5	6	#1	#2	BS- L-300	BS- L-450
f _c (MPa)	32	32	32	34.9 7	38.4 04	32.9 9	46. 2	37	40. 1	33. 1	30. 2	34.1	30.9
f _y (MPa)	440	710	710	462	527. 449	541. 239	45 4	45 4	45 4	45 9	45 9	520	520
p=P/A g.f _c	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2 5	0.1	0.1	0.2 5	0.1	0.1
Dime nsi balok (mm)	350 x 500	350 x 500	350 x 500	406. 4 x 508	406. 4 x 508	406. 4 x 508	40 6.4 x 40 6.4	40 6.4 x 40 6.4	40 6.4 x 40 6.4	40 6.4 x 40 6.4	40 6.4 x 40 6.4	260 x 300	250 x 450
Tulan gan atas balok (ρ, mm ²)	5- D25 +2- D19 3021 .43	5- D22 1900 .66	5- D22 1900 .66	2-#7 774. 192	4- #7+ 2-#7 2327 .69	6-#9 3868 .03	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	3-T20 942.4 78	3-T20 942.4 78
Tulan gan bawah balok (ρ, mm ²)	4- D22 1520 .53	3- D22 1140 .4	3- D22 1140 .4	2-#7 774. 192	4-#7 1551 .79	6-#9 3868 .03	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	4- #9 25 80	2-T20 942.4 78	2-T20 942.4 78
Sengk ang balok	2- D10	2- D10	2- D10	2-#4	2-#4	2-#5	2- #3	2- #3	2- #3	4- #3	4- #3	2-T10	2-T10

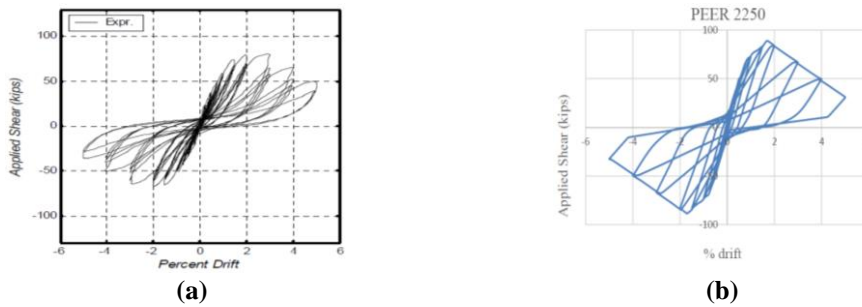
Model PEER 0850

Dari eksperimen seperti yang terlihat pada **Gambar 5(a)**, didapatkan bahwa terjadi *yield* tulangan balok pada *drift* 0.5%. Untuk kegagalan *joint* karena kegagalan lentur balok, model dapat mensimulasikan deformasi dengan cukup akurat. Jika dibandingkan, grafik hasil simulasi permodelan yang terlihat pada **Gambar 5(b)** mengalami *yield* sedikit lebih awal dibandingkan dengan eksperimen. Sama dengan pada PEER 2250, hal ini dikarenakan ada beban aksial kolom eksperimen sebesar 0.1Ag.f_c yang menambah kapasitas deformasi dari *joint*. Pembebanan pada kolom memperkuat kapasitas deformasi dari sebuah *joint* yang daktilitasnya rendah (Fu, 2000).

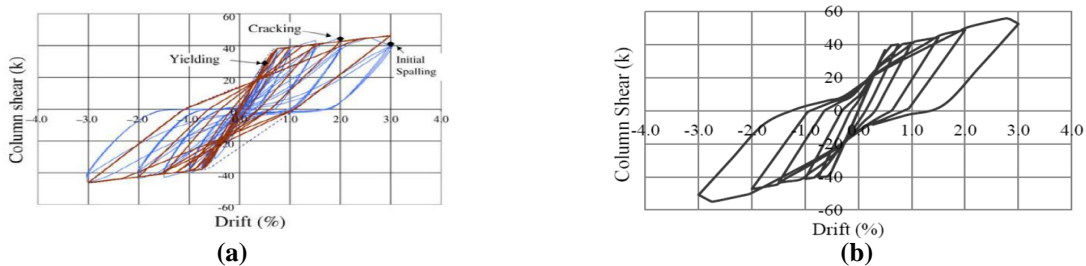
Model PEER 4150

Spesimen ini mengalami kegagalan *joint shear* tanpa adanya *beam yielding*. Maksimum beban geser yang dapat diaplikasikan pada kolom adalah sebesar 122,3 kips pada *drift* 2%. Dapat dilihat pada **Gambar 6**, simulasi memberikan hasil yang jauh lebih besar dari eksperimen. Hal ini dikarenakan

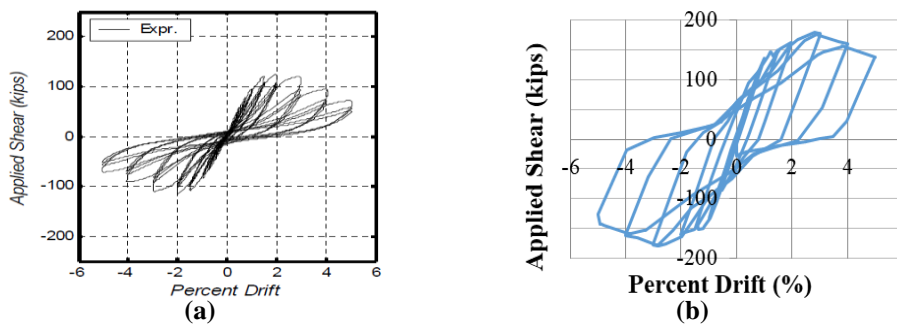
permodelan *joint* tidak dapat menyimulasikan spesimen dengan kegagalan yang terjadi sebelum adanya *beam yielding*. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik perlu adanya modifikasi pada momen dan kapasitas deformasi pada grafik *envelope*. Untuk penelitian saat ini belum ada modifikasi yang dapat diajukan.



Gambar 4. Grafik Hasil dari Spesimen PEER 2250
(a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



Gambar 5. Grafik Hasil dari Spesimen PEER 0850
(a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



Gambar 6. Grafik Hasil dari Spesimen PEER 4150
(a) Hasil Eksperimen dan (b) Hasil Simulasi Tanpa Modifikasi

Model S1

Pada spesimen, terdapat *yielding* pada balok diikuti dengan perkuatan pada *joint* ketika *drift* sebesar 25 sampai 50 mm seperti yang terdapat pada **Gambar 7(a)**. Setelah *yield*, *joint* mengalami *strain hardening* kemudian mengalami pelemahan, sehingga gaya geser yang dapat diterima *joint* berkurang. Siklus pembebanan dilanjutkan hingga *drift* mencapai 100 mm dan spesimen mengalami kegagalan *bond-slip*. Simulasi dengan permodelan *joint* menunjukkan hasil yang cukup akurat, membuktikan bahwa permodelan ini dapat dipakai untuk spesimen dengan mode kegagalan *bond-slip* yang didahului oleh *beam yielding*.

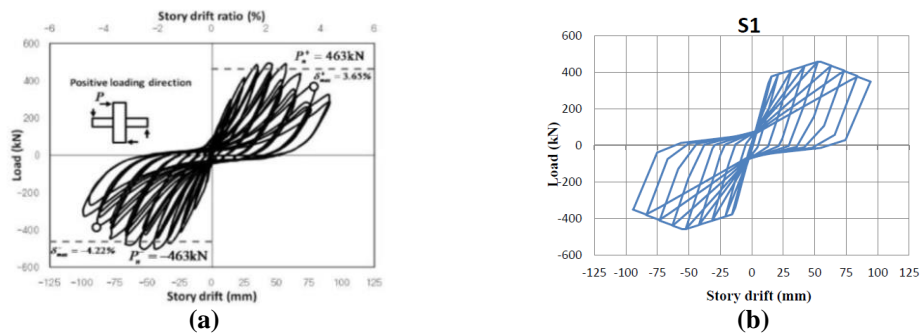
Model S2

Sama seperti spesimen S1, spesimen ini juga mengalami kegagalan *bond-slip* yang diawali oleh *beam yielding*. Hasil eksperimen dan hasil simulasi spesimen S2, dapat dilihat pada **Gambar 8**. Jika dibandingkan, terlihat bahwa permodelan *joint* dapat dengan akurat menyimulasikan *drift*.

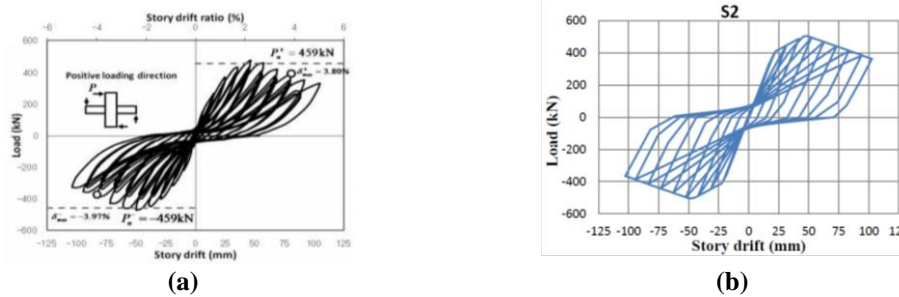
Model S3

Gaya geser maksimum yang dapat diberikan pada kolom sebesar 448 kN untuk *loading* dan 406 kN untuk *reverse loading* seperti yang terdapat pada **Gambar 9**, sehingga *yield*, perkuatan dan pelemahan

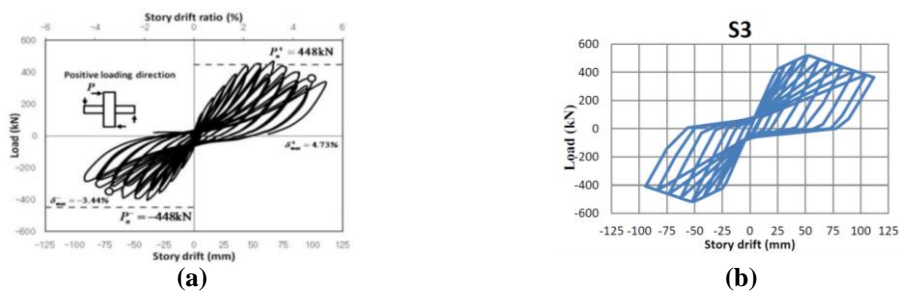
dari *joint* pada saat *reverse loading* terjadi lebih cepat. Seperti pada PEER 2250, hal ini dikarenakan adanya *crack* pada saat *reverse loading* yang menyebabkan kapasitas geser terutama ketika *reverse loading* menjadi berkurang kurang lebih 10 %.



Gambar 7. Grafik Hasil dari Spesimen S1
(a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



Gambar 8. Grafik Hasil dari Spesimen S2
(a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



Gambar 9. Grafik Hasil dari Spesimen S3
(a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi

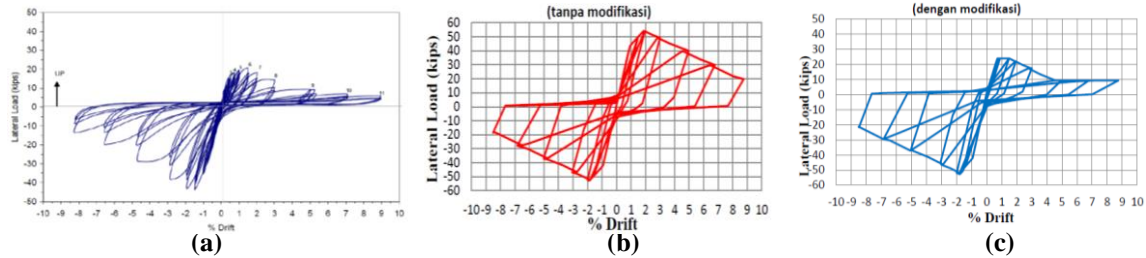
4.2 Eksterior Joint

Model Pantelides #1

Pembebanan maksimum yang mengarah ke atas dan yang mengarah ke bawah yang dapat diterima spesimen terjadi pada *drift* 1.5%. Spesimen mengalami kegagalan *bond-slip* pada tulangan bawah balok di awal eksperimen karena kurangnya angkur. Dari **Gambar 10(b)** dapat dilihat simulasi permodelan *joint* tanpa ada modifikasi apapun. Untuk mendapatkan kurva yang akurat dilakukan modifikasi pada momen. Momen yang digunakan adalah momen *bond-stress* sesuai dengan penelitian *stress-slip* dari Eligenhausen *et al* (1982). Dengan modifikasi momen, permodelan dapat digunakan untuk menyimulasikan kapasitas deformasi dari spesimen yang mengalami kegagalan sebelum *yield* seperti yang terlihat pada **Gambar 10(c)**. Namun pada pembebanan ke arah bawah, kapasitas geser yang disimulasikan lebih tinggi dari yang terjadi pada eksperimen. Perbedaan ini dapat dikarenakan tidak tersimulasikannya kerusakan *joint* yang ditimbulkan saat pembebanan ke arah atas yang seharusnya memperkecil kapasitas geser *joint* ketika pembebanan arah bawah.

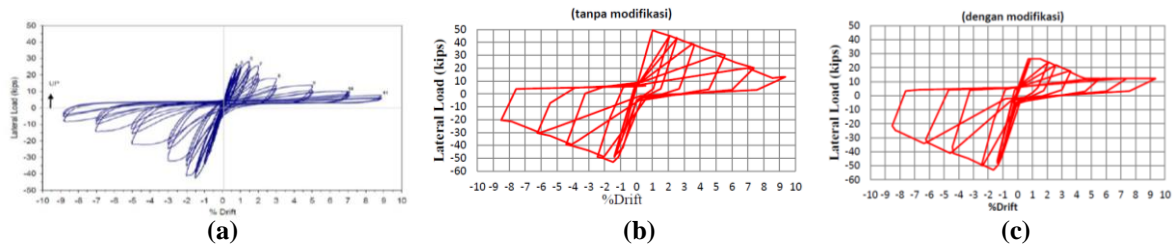
Model Pantelides #2

Spesimen ini mengalami kegagalan *bond-slip* pada tulangan bawah. Dari **Gambar 11(b)** dapat dilihat permodelan *joint* tanpa ada modifikasi apapun. Untuk mendapatkan kurva yang akurat, dilakukan modifikasi pada momen dapat dilihat pada **Gambar 11(c)**. Dengan modifikasi momen, permodelan dapat digunakan untuk menyimulasikan kapasitas deformasi dari spesimen yang mengalami kegagalan sebelum *yield*.



Gambar 10. Grafik Hasil dari Spesimen #1

(a) Hasil Eksperimen, (b) Hasil Simulasi Tanpa Modifikasi, dan (c) Hasil Simulasi dengan Modifikasi

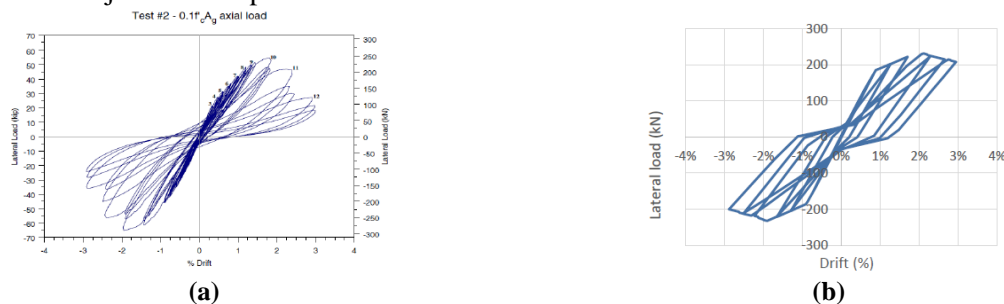


Gambar 11. Grafik Hasil dari Spesimen #2

(a) Hasil Eksperimen, (b) Hasil Simulasi Tanpa Modifikasi, dan (c) Hasil Simulasi dengan Modifikasi

Model Clyde #2

Dapat dilihat pada **Gambar 12**, bahwa simulasi permodelan *joint* menghasilkan prediksi kekuatan dan deformasi yang akurat pada saat terjadi *yield* di balok dan terjadi perkuatan pada *joint*. Akan tetapi pada pelemahan *joint*, kapasitas geser yang disimulasikan tidak menurun secara drastis seperti pada eksperimen. Hal ini kemungkinan besar dikarenakan retakan-retakan yang muncul, sehingga membuat detoriasi *joint* menjadi lebih cepat.



Gambar 12. Grafik Hasil dari Spesimen 2 dari (a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi Model Clyde #5

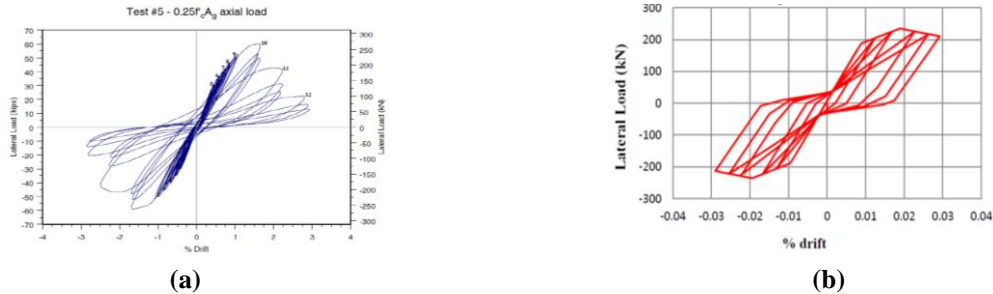
Setelah *yielding*, muncul retakan pada *joint*. Retakan ini dengan cepat membesar dan membuat bagian belakang *joint* hancur kemudian diikuti oleh *bond-slip*. Sama seperti spesimen sebelumnya, spesimen dapat dengan akurat memprediksi kapasitas geser *joint* pada saat *yield* balok dan perkuatan *joint* seperti yang terdapat pada **Gambar 13**. beban aksial yang terlalu besar pada beton yang tidak diberi sengkang mengakibatkan kerusakan *joint* dapat terjadi lebih awal.

Model Clyde #6

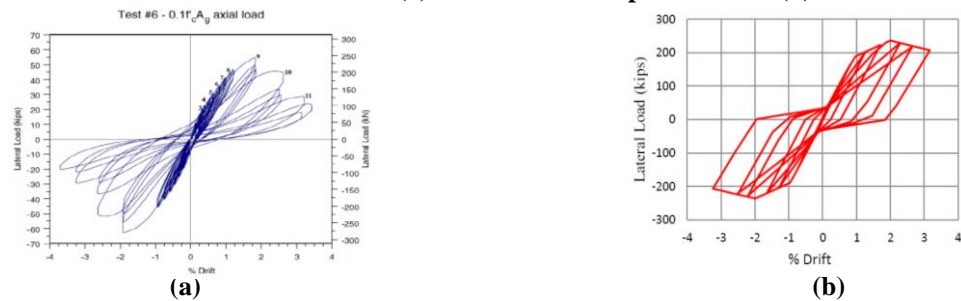
Sama seperti pada spesimen dari Clyde *et al.* lainnya seperti yang terdapat pada **Gambar 14**, permodelan *joint* untuk spesimen ini menunjukkan akurasi dalam memprediksi kekuatan dan deformasi pada saat *yield* balok dan pada saat perkuatan dari *joint* akan tetapi, kurang akurat dalam memprediksi pelemahan dari *joint*.

Model BS-L-300

Pada spesimen ketika mencapai *displacement* 15 mm terjadi *yielding* balok, disertai dengan perkuatan *displacement* pada *displacement* 20 mm lalu pada *displacement* 45 mm *joint* mengalami pelemahan. Pada akhir eksperimen spesimen *joint* mengalami kegagalan kombinasi, yaitu kegagalan *joint shear* dan *bond-slip*. Seperti yang terlihat pada **Gambar 15**, permodelan *joint* dapat dengan baik menyimulasikan kegagalan *joint* kombinasi yang terjadi setelah *yielding*.



Gambar 13. Grafik Hasil dari Spesimen 5 (a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



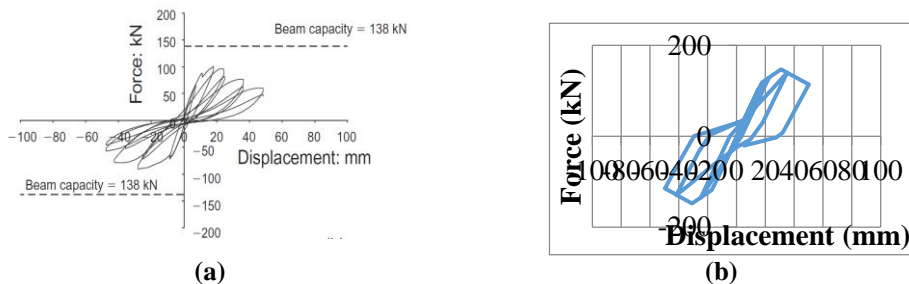
Gambar 14. Grafik Hasil dari Spesimen 6 (a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi



Gambar 15. Grafik Hasil dari Spesimen BS-L-300 (a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi

Model BS-L-450

Eksperimen menunjukkan bahwa spesimen mengalami kegagalan geser pada *joint* sebelum adanya *beam yielding*. Dapat dilihat pada **Gambar 16(b)**, simulasi memberikan hasil yang lebih besar dibandingkan dengan eksperimen. Hal ini dikarenakan kegagalan terjadi sebelum adanya *beam yielding*. Permodelan tidak dapat dengan baik menyimulasikan kasus tersebut. Perlu adanya modifikasi lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 16. Grafik Hasil dari Spesimen BS-L-450 (a) Grafik Hasil Eksperimen dan (b) Grafik Hasil Simulasi

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan penelitian sebagai berikut:

1. SAP2000 v.19 dapat digunakan untuk menyimulasikan permodelan *joint non-linear* dengan pembebanan *cyclic* dengan menggunakan *hinge* tetapi, tidak dapat menyimulasikan *strength degradation*.
2. Permodelan *joint* dapat dipakai untuk spesimen yang mode kegagalannya didahului oleh *beam yielding*.
3. Dalam menyimulasi kegagalan akibat pengangkuruan yang tidak memadai dan tidak diawali oleh *beam yielding* diperlukan modifikasi.
4. Pada beberapa spesimen kapasitas geser secara analisis lebih tinggi dibandingkan dengan yang terjadi pada eksperimen. Hal ini terjadi karena pada eksperimen terjadi keretakan atau kerusakan pada *joint* sehingga kapasitas geser *joint* mengalami reduksi. Permodelan tidak memperhitungkan reduksi akibat kerusakan atau keretakan.
5. Permodelan *envelope* dari *joint* dari Eom *et al.* (2015) tidak memperhitungkan *hc/db*, di mana rasio ini mempengaruhi kekuatan *bond-stress* dari *joint*.

5.2. Saran

Permodelan *joint* ini perlu dikembangkan lagi dengan evaluasi terhadap spesimen lain seperti *knee joint*, *joint ductile*, bentuk penampang kolom yang lain, dan kegagalan *joint shear* tanpa didahului oleh *beam yielding*.

6. DAFTAR REFERENSI

- Alath, S., Kunnath, S. K., (1995). "Modeling Inelastic Shear Deformation in RC Beam-Column Joints." *ASCE*. Vol. 2, 822–825.
- Alire, D.A. (2002). *Seismic Evaluation of Existing Unconfined Reinforced concrete Beam-Column Joints*, Dept. of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington.
- Birely, A. C., Lowes, L. N., & Lehman, D. E. (2012). "A Model for the Practical Nonlinear Analysis of Reinforced-Concrete Frames Including Joint Flexibility." *Engineering Structures*. Vol. 34, 455-465.
- Clyde C, Pantelides CP, Reaveley LD. (2000). "Performance-Based Evaluation of Exterior Reinforced Concrete Building Joints for Seismic Excitation." *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. No. PEER 2000/05.
- Eligehausen, R., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (1982). *Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations*, University of California, Berkeley, California.
- Eom, T. S., Hwang, H. J., & Park, H. G. (2015). "Energy-Based Hysteresis Model for Reinforced Concrete Beam-Column Connections." *ACI Structural Journal*. Vol. 112, No.2, 157-166.
- Fu, J., Chen, T., Wang, Z., & Bai, S. (2000). "Effect of Axial Load Ratio on Seismic Behavior of Interior Beam-Column Joints." *Earthquake Engineering*. Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand, January 30 - February 4, Article no.2707.
- Hwang Hyeon-Jong, Park Hong-Gun, Choi Won-Seok, Chung Lan, & Kim Jin-Keun. (2011). "Seismic Performance of Beam-Column Connections for Special Moment Frame Using 600 MPa Flexural Reinforcement." *Jurnal of the Korea Concrete Institute*. Vol.23, 591-601.
- Pantelides CP, Hansen J, Nadauld J, Reaveley LD. (2002). "Assessment of Reinforced Concrete Building Exterior Joints with Substandard Details." *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. No. PEER 2002/18.
- Walker, S. G., (2001). *Seismic Performance of Existing Reinforced Concrete Beam-Column Joints*, Dept. of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington.
- Wong, H. F., & Kuang, J. S. (2008). "Effects of Beam-Column Depth Ratio on Joint Seismic Behavior". *Institution of Civil Engineers*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, Hong Kong, February 1.