

KALIBRASI MODEL ELEMEN HINGGA SAMBUNGAN PELAT-UJUNG DIPERPANJANG

Sonatha Christianto, S.T.¹✉, Dr. Djoni Simanta²

^{1,2}Mahasiswa, Dosen, Pascasarjana Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

✉ e-mail : sonatha.christianto@gmail.com

Abstract

End-plate moment connection usage initiated by the failure of fully welded connection. The improvement in finite element method bring through connection test conducted using finite element analysis. Finite element analysis can reduce time and cost, compared to experimental test. Finite element analysis shall use calibrated model, in order to capture the true phenomenon. The calibration is referring to experimental test conducted by Shi Gang (2006). The calibration was done by modifying actuator geometry and nut-plate contact type. Actuator geometry need to be modified, because the actuator on experiment test didn't act like pure hinge. Nut-plate contact was changed from frictional to bonded in order to eliminate convergence problems and reduced computational cost. Finite element model with mentioned calibration parameter have cyclic peak-to-peak stiffness almost similar (<1%) with experimental test model. Thus, the calibration can be considered finished.,

Keywords : end-plate connections, finite element method, & calibration.

Abstrak

Penggunaan sambungan pelat-ujung diinisiasi akibat banyaknya kegagalan tidak terduga sambungan las seluruhnya. Perkembangan metode elemen hingga memungkinkan pengujian sambungan dilakukan dengan analisis elemen hingga. Analisis elemen hingga mampu menghemat waktu dan biaya dibandingkan uji eksperimen. Analisis elemen hingga yang dilakukan perlu menggunakan model terkalibrasi, agar analisis mampu menggambarkan fenomena sesungguhnya. Kalibrasi dilakukan dengan mengacu kepada uji eksperimen oleh Shi Gang (2006). Kalibrasi yang dilakukan adalah dengan merubah bentuk actuator dan juga pemodelan kontak mur dengan pelat. Geometri actuator perlu dirubah, karena actuator uji eksperimen tidak bersifat seperti sendi murni. Kontak mur dengan pelat dirubah dari frictional menjadi bonded untuk menghilangkan masalah konvergensi dan mengurangi biaya komputasi. Model elemen hingga dengan parameter kalibrasi tersebut, memiliki kekakuan peak-to-peak siklus yang hampir sama (<1%) dengan model uji eksperimen. Sehingga, kalibrasi dapat dinyatakan selesai.

Kata kunci : sambungan pelat-ujung, metode elemen hingga, & kalibrasi.

Pendahuluan

Rangka baja pemikul momen populer digunakan sebagai sistem struktur untuk bangunan tinggi menengah dikarenakan keuntungan arsitektural [1]. Penggunaan sambungan pelat-ujung diinisiasi akibat banyaknya kegagalan tidak terduga pada *fully welded connections*' sambungan las seluruhnya' saat terjadi gempa Northridge, dan California, 1994 [2].

Selama bertahun-tahun banyak peneliti sudah melakukan banyak pengujian eksperimental sambungan *pelat-ujung*, khususnya berasal dari *American Institute of Steel Construciton (AISC)*

bersama dengan *Virginia Tech* dan *University of Oklahoma* [3, 4, 5, 6, 2, 7, 8, 9, 10, 11]. Penelitian tersebut menggunakan biaya yang besar [9]. Sehingga analisis elemen hingga mampu menghemat waktu dan biaya sebagai alternatif pengujian sambungan [2].

Analisis elemen hingga yang dilakukan perlu menggunakan model terkalibrasi, agar analisis elemen hingga dapat mencerminkan hasil yang sesuai dengan model uji eksperimen. Dengan model elemen hingga terkalibrasi, dapat dikembangkan penelitian sambungan pelat-ujung kemudian.

Metode Penelitian

Kalibrasi dilakukan dengan mengacu kepada uji eksperimen oleh Shi Gang (2006) [3]. Kalibrasi model elemen hingga dilakukan dengan program ANSYS. Kalibrasi yang dilakukan mencakup pemodelan material, elemen, mesh, kontak, kondisi batas, kontrol solusi, dan solusi permasalahan. Parameter kalibrasi adalah kekakuan *peak-to-peak* dari kurva histeresis.

Hasil dan Pembahasan

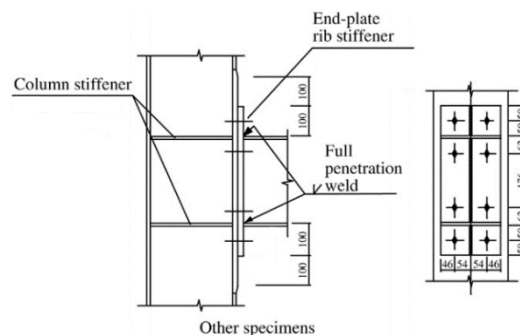
1. Pemodelan Fisik Sambungan

Analisis elemen hingga dilakukan menggunakan Program ANSYS Workbench. Struktur dimodelkan secara 3 dimensi seluruhnya. Analisis yang dilakukan adalah analisis statik, tanpa memperhitungkan adanya pengaruh efek dinamik pada struktur. Non-linieritas yang digunakan adalah non-linier material, kontak, dan geometri.

Uji eksperimen yang dijadikan acuan adalah uji eksperimental oleh Gang Shi yang dipublikasi pada jurnal berjudul *Behaviour of End-Plate Moment Connections Under Earthquake Loading* [3]. Spesimen yang digunakan adalah model JD3, yaitu model pelat-ujung diperpanjang dengan 4 baut pada setiap flens. Terdapat penebalan flens kolom yang berhubungan langsung dengan pelat-ujung. Data geometri sambungan ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Geometri Sambungan

Geometri	Detail
Kolom	WF 300x250x8x12 L : 2.00m
Balok	WF 300x200x8x12 L : 1.20m
Pelat-ujung	t : 20mm
Baut	dia : 20mm pitch : 50mm



Gambar 1. Detail sambungan JD3

Material yang digunakan adalah baja mutu Q345 dan baut mutu 10.9. Pengujian kupon tarik kali ini tidak menyediakan regangan ultimit material. Sehingga, digunakan data sekunder untuk mendapatkan regangan ultimit material. Regangan ultimit material Q345 [4] dan baut 10.9 [5] berturut-turut adalah 21.0% dan 13.8%.

Model plastisitas material yang digunakan adalah *Bilinear Kinematic Hardening* (BKIN). Model plastisitas BKIN mampu menggambarkan efek *Bauschinger* dan memiliki perumusan yang mudah namun akurat [6]. Masukan untuk plastisitas ini ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Masukan material BKIN

Material	F_y (MPa)	E (MPa)	E_{tan} (MPa)
$t \leq 16\text{mm}$	409.0	195542	536.6
$t > 16\text{mm}$	372.6	188671	537.0
Baut 10.9	995.0	206000	1160.0

2. Pemodelan Kontak

Kontak adalah kondisi saat dua permukaan bersentuhan. Secara harafiah kedua permukaan tidak bisa saling menembus, dapat mentransfer gaya normal tekan dan friksi tangensial, pada umumnya tidak dapat mentransfer gaya tarik [7].

Program sudah menyediakan beberapa penyederhaanaan mengenai perilaku fisik kontak, diantaranya *bonded*,

frictional, frictionless, rough, dan no separation. Pada kalibrasi ini, hubungan antara pelat-ujung dan flens-kolom dimodelkan *frictional*, dengan koefisien gesek 0.44 [3]. Hubungan antara baut dengan lubang dimodelkan *frictionless*. Hubungan kepala baut dengan pelat dimodelkan *bonded*.

Perilaku dan formulasi elemen kontak yang digunakan perlu disesuaikan dengan tipe kontak. Untuk permasalahan kontak *frictionless* dan *frictional* yang disertai *large-deformations*, direkomendasikan menggunakan formulasi *Augmented-Lagrange* agar menghemat biaya komputasi. *Normal stiffness* dari formulasi ini dapat diatur untuk menyesuaikan kemudahan konvergensi. Pada kali ini *Normal Stiffness* sebesar 0.1. Namun kemudahan konvergensi berbanding terbalik dengan akurasi [7].

Tabel 3. Pemilihan elemen kontak

Permasalahan	Tipe Kontak	Tipe Kontak
Pelat Ujung	Flens - Kolom	Frictional (0.44)
Baut	Lubang	Frictionless (0.00)
Mur	Flens - Kolom	Bonded
Mur	Pelat Ujung	Bonded

Tabel 4. Formulasi Elemen Kontak

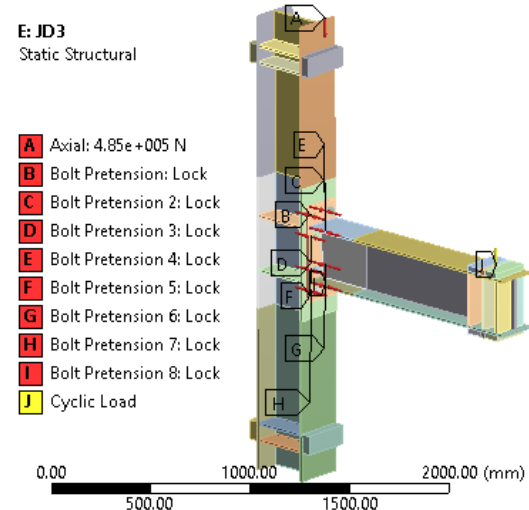
Tipe Kontak	Perilaku	Formulasi
Bonded	Simetris	Pure Penalty
Frictional	Auto-asymmetric	Augmented Lagrange
Frictionless	Auto-asymmetric	Augmented Lagrange

Program ANSYS menyediakan tambahan perilaku formulasi baru yaitu *Small Sliding*. Formulasi ini merubah proses penyusunan matriks kekakuan

untuk menghemat biaya komputasi. Dasar pemikiran dibalik ini adalah *small sliding* mampu menyelesaikan model kontak kompleks pada kualitas geometri dan mesh yang rendah. Formulasi ini mampu meningkatkan kekokohan dan efisiensi solusi.

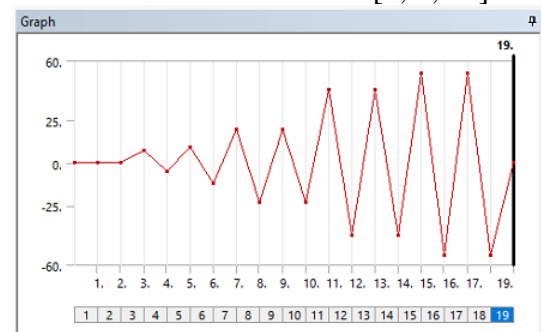
3. Model Kondisi Batas

Tumpuan diberikan pada pelat ganjal pada kolom. Pada dasar kolom digunakan tumpuan rol. Diberikan tumpuan lateral keluar bidang pada setiap pelat pengganjal dan *actuator*. Diberikan gaya aksial kolom sebesar 485kN. Gaya pratarik baut diberikan sebesar 199kN. Pembebanan benda uji ditunjukkan oleh Gambar 2.

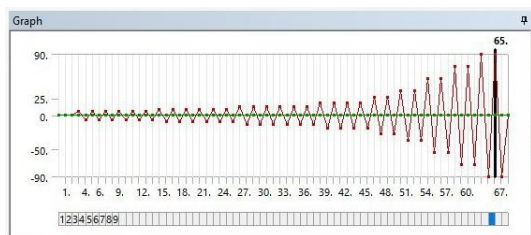


Gambar 2. Pembebanan benda uji

Pembebanan siklik diberikan pada ujung balok. Pembebanan yang diberikan adalah *displacement control*. Beban siklik yang digunakan adalah protokol dari pengujian eksperimen dan juga beban siklik dari AISC 341 [8, 9, 10].



Gambar 3. Beban siklik Gang Shi (2006)

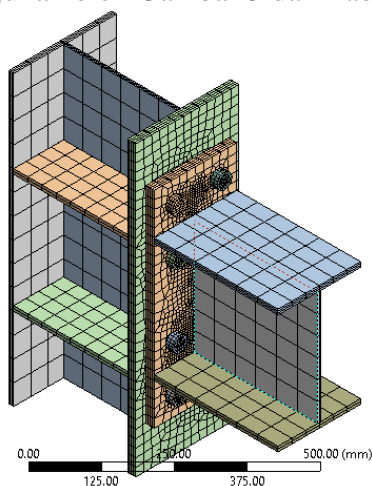


Gambar 4. Beban siklik AISC 341-16

4. Model Mesh

Agar hasil perilaku sambungan lebih akurat, *mesh* dipusatkan ke area sambungan dan *panel zone*. Digunakan model elemen SOLID186 20-Node orde tinggi yang mampu menangkap perilaku peralihan kuadratik [6].

Rangkuman dan detail *mesh* sambungan ditunjukkan oleh Gambar 5 dan Tabel 5.



Gambar 5 Mesh spesimen JD3

Tabel 5. Pemilihan elemen kontak

Badan	Pengaturan Mesh	
	tebal	: 4 elemen
Pelat-ujung	<i>edge</i>	: 10 mm
flens-kolom	<i>face</i>	: 10 mm
	lubang	: 26 elemen
Badan baut	<i>face</i>	: 3.5 mm
Mur	<i>face</i>	: 3.5 mm
Panel Zone	tebal	: 3 elemen
Plastic Hinge	panjang	: 50 mm
	lebar	: 6 elemen
	tebal	: 2 elemen
Web & Flens	panjang	: 10 elemen
	lebar	: 6 elemen
Actuator	tebal	: 2 elemen
	lebar	: otomatis

5. Kontrol Solusi

Untuk menghemat biaya komputasi digunakan *direct solver*. *Direct solver* merupakan *solver* yang kokoh, namun menggunakan lebih banyak *memory* dan *core*. Sesuai dengan namanya, *Direct solver*, langsung melakukan faktorisasi matriks dari model elemen hingga.

Keunggulannya adalah *direct solver* adalah lebih cepat dari *iterative solver* dalam mencari solusi permasalahan. Pada kali ini, rasio antara DOF dan *hardware* masih lebih rendah dibandingkan dengan yang disarankan (< 300.000 dof : 10 s.d. 20 GB memori) [6]. Selain itu, *hardware* hanya difokuskan untuk melakukan komputasi masalah tanpa melakukan kegiatan lain. Dari kedua hal tersebut, sangatlah cocok jika menggunakan *direct solver* untuk melakukan solusi persoalan.

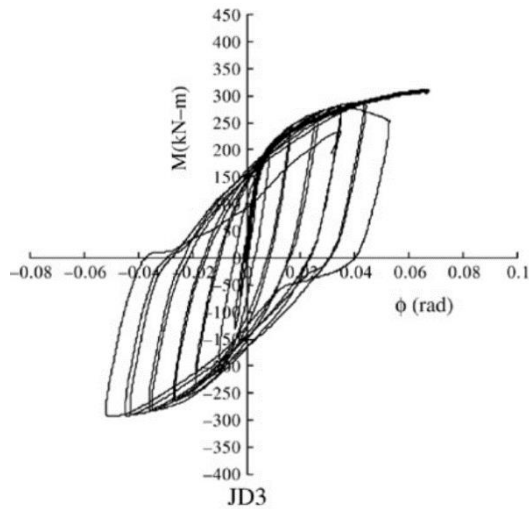
Untuk mendapatkan nonlinieritas geometri, program sudah menyediakan pilihan *Large Deflection*. Dengan mengaktifkan pilihan ini, maka *p-delta* dapat diperhitungkan.

6. Hasil Uji Eksperimen JD3

Berdasarkan hasil uji eksperimen, didapatkan kurva histeresis untuk sambungan JD3. Tidak terjadi penurunan kapasitas momen saat pembebanan hingga rotasi 0.04 rad. Dari kurva tersebut tergambar bahwa kapasitas sambungan dibebani siklik hingga rotasi 0.44 rad hingga 2 siklus. Setelah itu, dicoba beban siklik dengan rotasi 0.53 rad. Namun pada sambungan dinyatakan hancur, karena tidak sanggup menahan beban 1 siklus tanpa mengalami pengurangan kapasitas momen kurang dari 15%.

Kurva histeresis hasil uji eksperimental menunjukkan perilaku yang baik. Pada rotasi 0.53rad kurva histeresis

menunjukkan terjadi efek *pinching*, hal ini dikarenakan terjadi tekuk pada balok. Namun tekuk yang terjadi balok menyebabkan adanya pengurangan luas kurva histeresis. Kurva histeresis sambungan uji eksperimen ditunjukkan oleh



Gambar 6 Kurva histeresis eksperimen JD3

7. Kalibrasi Model

Pembahasan kalibrasi untuk masing-masing penjabaran diatas adalah sebagai berikut:

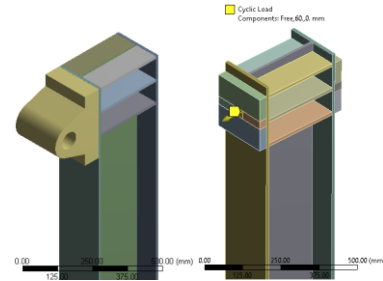
7.1. Pemodelan Fisik

Pada uji eksperimen, tumpuan dan pembebanan diberikan menggunakan penjepit. Namun untuk mengurangi permasalahan kontak, pada uji numerik model penjepit disederhanakan menggunakan pelat dengan lekatan sempurna. Penyederhanaan inilah yang membuat perilaku struktur menjadi berbeda.

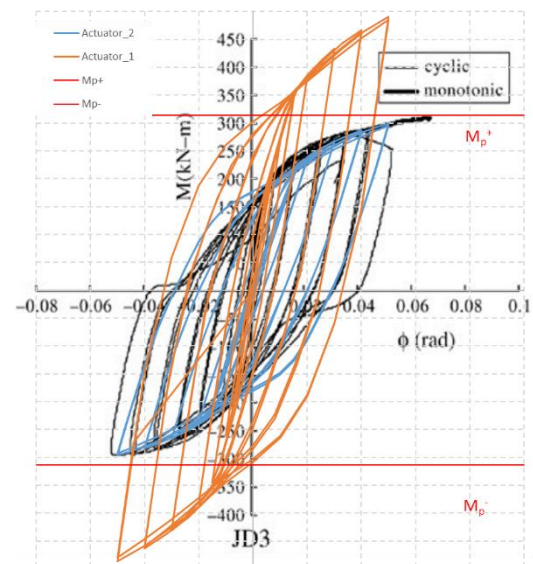
Desain awal (*Actuator_1*) dan perubahan dari penjepit ditunjukkan oleh Gambar 7. Dengan bentuk seperti ini, kurva histeresis menjadi lebih besar 64% dari uji eksperimen. Untuk itu, dilakukan kalibrasi dari dengan merubah peletakan beban siklik pada kotak 30x30mm ditengah *actuator* (*Actuator_2*).

Perubahan bentuk *actuator* ini disebabkan oleh bentuk dan sifat *actuator*

yang tidak mampu memodelkan sendi secara sempurna. *Actuator* memiliki tahanan pada arah longitudinal balok dan rotasi, sehingga kekakuan sistem berubah mendekati jepit-rol.



Gambar 7 (a) desain awal, (b) hasil kalibrasi



Gambar 8. Kurva histeresis perbandingan Aktuator

Model material yang digunakan *Bilinear Kinematic Hardening* (BKIN) lebih baik dari model *Bilinear Isotropic Hardening* (BISO). Model BKIN memiliki konvergensi yang lebih baik daripada BISO, karena BKIN mampu menyelesaikan analisis lebih cepat dan tanpa galat. Namun dari segi teknis BKIN dan BISO memiliki perbedaan kurva energi disipasi <5%.

7.2. Pemodelan Kontak

Pada awal kalibrasi, kontak antara mur dan pelat menggunakan tipe kontak friksi. Hal ini bertujuan, agar model elemen hingga bekerja seperti model sungguhan.

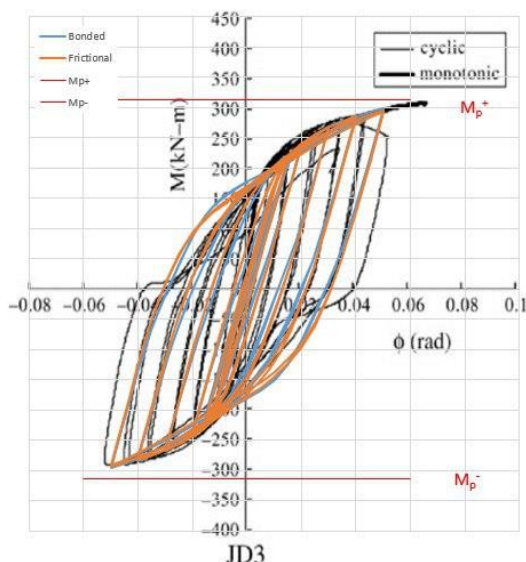
Namun muncul permasalahan konvergensi pada saat model dibebani dengan pembebanan AISC 341.

Permasalahan konvergensi pada model disebabkan oleh kontak antara lubang dan baut memiliki perubahan tiba-tiba. Beberapa penyebab masalah konvergensi adalah sebagai berikut:

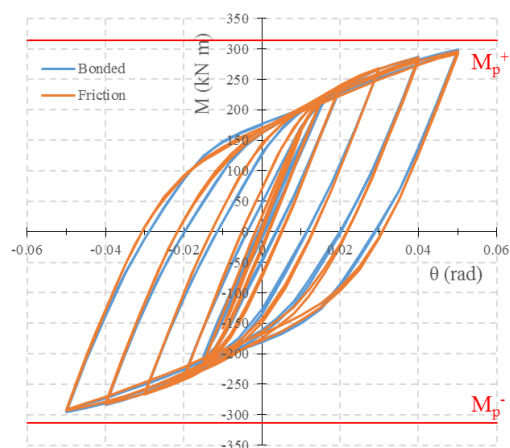
1. Penggunaan protokol pembebanan AISC 341-16. Protokol ini memiliki 64 langkah. Hal sensitif yang menyebabkan kegagalan adalah jumlah pembebanan, bukan dari besar rotasi. Berdasarkan hasil analisis, model tidak mengalami kegagalan jikalau hanya diberikan beberapa siklus pembebanan rotasi besar.
2. Tingkat intensitas *mesh* sekitar lubang dan pelat ujung mempengaruhi tingkat konvergensi. Intensitas *mesh* perlu ditingkatkan pada daerah sekitar lubang dan flens. *Edge mesh* yang sesuai untuk lubang baut adalah berkisar antara 18 s.d. 26 potongan.

Berdasarkan penjabaran diatas, maka kontak antara mur dengan pelat dimodelkan sebagai *bonded*. Hal ini dikarenakan, hasil kurva histeresis dari sambungan dengan kontak *bonded* atau *frictional* tidak berbeda jauh. Perbedaan kekakuan *peak-to-peak* setiap siklus kurang dari 1%. *Superimposed* kurva histeresis dari sambungan ditunjukkan oleh Gambar 9 dan Gambar 10.

Penggunaan tipe kontak *bonded* antara mur dengan pelat juga memberikan biaya komputasi yang rendah. Jikalau menggunakan tipe kontak *frictional*, waktu komputasi berkisar antara 36 s.d. 48jam. Sedangkan jikalau menggunakan tipe kontak *bonded* waktu komputasi menjadi 18 s.d. 24 jam.



Gambar 9. *Superimposed* kurva histeresis eksperimen dan analisis elemen hingga

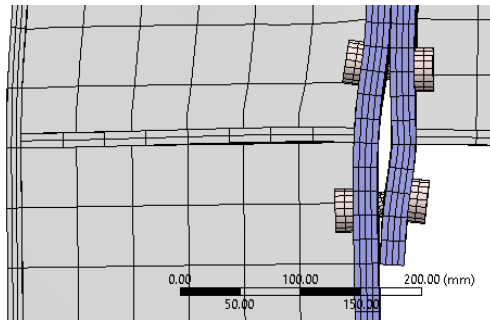


Gambar 10 perbandingan kurva histeresis *bonded* dan *frictional*

Intensitas *mesh* perlu diperhitungkan untuk menghasilkan ukuran model yang optimum. Rasio antara DOF dengan sumberdaya komputer perlu diperhitungkan pada kondisi optimum. Hal ini dapat ditandai dengan memantau status faktorisasi matriks berada pada *in-core memory*. Pada kali ini, intensitas *mesh* diatur sehingga seluruh faktorisasi matriks berada pada *in-core memory*, namun masalah konvergensi tetap dapat dihindari.

Pada model kalibrasi, hubungan antara pelat-ujung dan flens-kolom menggunakan tipe kontak *frictional*. Dengan kontak ini, maka dapat

memodelkan bukaan pada area kontak tersebut. Berikut ditunjukkan defleksi bukaan (diperbesar 5x) model pada pelat-ujung.



Gambar 11 Model bukaan pelat ujung (diperbesar 5x)

7.3. Pemodelan Kondisi Batas

Berdasarkan hasil kalibrasi, model kondisi batas yang paling menentukan adalah model bentuk aktuator. Untuk kondisi batas lain selain aktuator tidak memberikan perbedaan terhadap output.

7.4. Pemodelan Mesh

Berdasarkan hasil kalibrasi, penggunaan *mesh* yang paling optimum adalah

dengan SOLID186 20-Node orde tinggi yang mampu menangkap perilaku peralihan kuadratik. Ketebalan dari pelat *end-plate* dan *panel zone* paling baik minimum 3 lapis elemen. Hal ini bertujuan agar dapat meningkatkan kovergensi dan menangkap perilaku bukaan dengan baik. Jikalau menggunakan hanya 1 elemen ketebalan, masalah konvergensi muncul dan tidak dapat menyelesaikan seluruh protokol pembebanan.

7.5. Kontrol Solusi

Kontrol solusi antara *direct solver* dan *iterative solver* keduanya menghasilkan keluaran yang sama. Namun *direct solver* menawarkan proses yang lebih cepat dan akurat. Konsekuensi penggunaan *direct solver* adalah memori seluruhnya digunakan untuk melakukan faktorisasi matriks. Sehingga, perangkat tidak dapat lagi digunakan selama pemecahan masalah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kalibrasi, terdapat perubahan pada peletakan *actuator* beban siklik. *Actuator* perlu dimodifikasi menjadi area 30x30mm untuk menyesuaikan kekakuan *peak-to-peak* [11] setiap siklus. Hal ini dikarenakan kenyataan dari *actuator* tidak berlaku sendi murni ataupun jepit murni.

Kontak antara mur dan pelat dapat disederhanakan semula *frictional* menjadi *bonded*. Pertimbangan penyederhanaan ini adalah perbedaan kekakuan *peak-to-peak* yang kurang dari 1%, namun mampu menghemat biaya komputasi yang signifikan

Daftar Pustaka

- [1] C. M. C. V. D. D. C. N. Aurel Stratan, "Prequalification Tests on Bolted Beam-To-Column Joints with Haunches," in *Proceedings of the Eighth International Workshop*, Chicago, Illinois, 2016.
- [2] E. A. Sumner, *Unified Design of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading*, Blackburg, Virginia: Thesis (Doctoral). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

- [3] D. E. Bond, Analytical and Experimental Investigation of a Flush Moment End-Plate Connection with Six Bolts at the Tension Flange, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989.
- [4] J. T. Borgsmiller, Simplified Method for Design of Moment End-Plate Connections, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
- [5] A. R. Kukreti, Finite Element Analysis of Two Tension Bolt Flush End-Plate Connection, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984.
- [6] E. A. Sumner, Experimental Investigation of the Multiple Row Extended 1/2 End-Plate Moment Connection, Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [7] S. E. Blumenbaum, Response of Cyclically Loaded Extended End-Plate Moment Connections When Used with Welded Built-Up Sections, Blacksburg, Virginia: Thesis (Doctoral). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [8] T. A. Szabo, Development and Validation of A Twelve Bolt Extended Stiffened End-Plate Moment Connection, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2017.
- [9] V. M. Italiano, Behavior of Diagonal Knee Moment End-Plate Connections, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [10] J. John C. Ryan, Evaluation of Extended End-Plate Moment Connections Under Seismic Loading, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [11] N. Jain, Developing and Validating New Bolted End-Plate Moment Connection Configurations, Blacksburg, Virginia: Thesis (Master). Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015.
- [12] M. G. J. K. Vahid Zeinoddini-Meimand, "Finite Element Analysis of Flush End Plate Moment Connections Under Cyclic Loading," *World Academy of Science, Engineering & Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 96-104, 2014.
- [13] M. R. B. Archibald N. Sherbourne, "3D Simulation of End-Plate Bolted Connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, pp. 3122-3136, 1994.
- [14] Y. S. Y. W. Gang Shi, "Behaviour of End-Plate Moment Connections Under Earthquake Loading," *ScienceDirect*, vol. Engineering Structures 29, pp. 703-716, 2006.
- [15] W. S. J. L. Junling Chen, "Constitutive Model of Q345 Steel at Different Intermediate Strain Rates," *Springer*, vol. International Journal of Steel Structures 17, pp. 127-137, 2017.
- [16] M. Wang, "Numerical Study On Seismic Behaviors of Steel Frame End-Plate Connections," *Elsevier*, vol. Journal of Constructional Steel Research 90, pp. 140-152, 2013.
- [17] ANSYS Documentation, Ansys Product Documentation Set,

- Canonsburg, Pennsylvania:
ANSYS, 2013.
- [18] ANSYS Documentation,
Introduction to Contact,
Canonsburg, Pennsylvania:
ANSYS, 2009.
- [19] AISC 360-16, Specification for
Structural Steel Buildings,
Chicago, Illinois: American
Institute of Steel Construction,
2016.
- [20] AISC 341-16, Seismic Provisions
for Structural Steel Buildings,
Chicago, Illinois: American
Institute of Steel Construction,
2016.
- [21] AISC 358-16, Prequalified
Connections for Special and
Intermediate Steel Moment
Frames for Seismic Applications,
Chicago, Illinois: American
Institute of Steel Construction,
2016.
- [22] C. A. Blandon, Equivalent
Viscous Damping Equations for
Direct Displacement Based
Design, Pavia, Italy: Thesis
(Master). ROSE School. European
School of Advanced Studies in
Reduction of Seismic Risk., 2004.