

Studi Analisis Sambungan Semi Rigid Balok – Kolom Baja Dengan Modifikasi Friction Damper Dengan Metode Elemen Hingga

Susanto Hari Asmoro^{1,*}, Budi Suswanto¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: susantohariasmoro.sha@gmail.com

Info Artikel	Abstract
Diajukan 28 Juli 2019 Diperbaiki 2 Agustus 2019 Disetujui 7 Agustus 2019	<p><i>Beam and column connections are one of the elements in steel frame structure that are important in the design of earthquake resistant building construction. The semi-rigid connection regulated in the regulation allows connection of the structure to experience a slight rotation. Selection of the right connection is very necessary to ensure the occurrence of plastic joints in the beam area. This study discusses the behavior of T-Stub joint type steel connections equipped with friction dampers when given cyclic loads using software based on ABAQUS 6.14. This study will do modeling which then results will be compared from moment - rotation, rotational stiffness value and failure mode using software based on ABAQUS 6.14. The modeling used I-Shaped welded plate for beam dimensions $135 \times 270 \times 6.6 \times 10.2$ mm and column dimensions $260 \times 200 \times 9 \times 15$ mm, and column stiffness thickness 10.2 mm. The modelling was made in four types. Two type modelling for verification of previous research and the other two modelling are another modified connection. results of the modeling above when compared with the results of the experiments used do not have a significant difference ductility, Modelling with Hauch and Ribs more ductile better than modelling no Hauch and Ribs in connection. The most effective connection modelling was connection with equipped stiffener like Hauch and Ribs. It is expected that all beam-column joint modeling with equipped friction damper can be used in earthquake resistant structures</i></p> <p>Abstrak Sambungan balok dan kolom merupakan salah satu elemen dalam struktur rangka baja yang penting dalam desain konstruksi bangunan tahan gempa. Sambungan semi rigid yang diatur dalam peraturan memperbolehkan sambungan struktur untuk mengalami sedikit rotasi. Pemodelan yang digunakan welded plate I-Shaped untuk dimensi balok $135 \times 270 \times 6.6 \times 10.2$ mm dan dimensi kolom $260 \times 200 \times 9 \times 15$ mm, ketebalan pengaku kolom 10.2 mm. Variasi spesimen dibuat sebanyak empat jenis. Dua untuk verifikasi penelitian sebelumnya dan dua lainnya merupakan sambungan modifikasi. Hasil dari studi spesimen dan pemodelan memiliki selisih yang tidak terlalu signifikan. Ditinjau dari nilai daktilitasnya sambungan dengan tambahan hauch dan ribs lebih daktil bila dibandingkan dengan dua model lainnya. Dari semua variasi pemodelan sambungan, sambungan yang dilengkapi dengan <i>Hauch dan Ribs</i> memiliki performa lebih baik. Dari semua pemodelan sambungan balok - kolom yang dilengkapi dengan <i>friction damper</i> diharapkan dapat digunakan pada struktur yang tahan gempa.</p>

Keywords: friction damper, cyclic loading, T-stub, finite element method, steel connection

Kata kunci: friction damper, pembebanan siklik, T-stub, finite element method, sambungan baja

1. Pendahuluan

Kebutuhan akan bangunan tahan gempa saat ini semakin tinggi khususnya pada daerah dengan tingkat resiko gempa yang tinggi seperti wilayah di Indonesia. Indonesia merupakan negara dengan aktivitas kegempaan yang sangat tinggi. Menurut United States Geological Survey - National Earthquake Information Center (USGS - NEIC), tercatat untuk wilayah Kepulauan Indonesia dalam rentang waktu antara tahun 1973 – 2009 terjadi 8.260 kejadian gempa dengan magnituda $M > 5,0$ SR[1].

Pada Struktur baja sambungan merupakan titik kritis akan terjadinya awal kegagalan struktur akibat gempa. Kegagalan desain sambungan serta besarnya ketidakcocokan antara

perilaku yang dianalisis dan perilaku aktual, akan membuat sambungan memiliki keterbatasan kemampuan dalam menerima beban[2]. Sambungan balok dan kolom juga merupakan area yang dapat direncanakan untuk dapat semaksimal mungkin dapat mendisipasi energi gempa. Pada perencanaan sambungan balok dan kolom *Full Strength* pada umumnya direncanakan untuk terjadi leleh pada ujung balok tanpa mempertimbangkan efisiensi penggunaan bahan[3]. Pada saat ini, Banyak penelitian berbasis angka tentang penggunaan sambungan baja *Partial Strength* berdasarkan karakteristik perilaku sambungan monotonic yang diberi beban siklik, baik secara teoritis maupun numerik. Meskipun sudah banyak penelitian dilakukan tetapi masih ada beberapa

masalah yang perlu dilakukan penelitian lanjutan, seperti karakterisasi disipasi energi yang dihasilkan oleh sambungan, penelitian tentang pengembangan jenis sambungan baru yang dapat mendisipasi energi, atau studi kelayakan tentang penggantian sambungan setelah peristiwa seismik[4].

Dari latar belakang yang dirangkum secara singkat di atas, dalam rangka mengatasi kelemahan desain konvensional khususnya yang sering terjadi pada sambungan balok dan kolom maka penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan strategi desain sambungan *Partial Strength* dengan menggunakan *T-Stub* yang dilengkapi dengan *friction damping*. Penelitian yang dilakukan Piluso, dkk, yang bertujuan untuk membuat pemodelan sambungan yang dilengkapi dengan redaman berupa gesekan antar pelat dan diaplikasikan pada struktur baja agar mampu bertahan saat terjadi peristiwa seismik, tanpa adanya kerusakan struktur yang ditimbulkan khususnya pada kejadian gempa bumi yang langka sekalipun dengan bantuan program ABAQUS 6.14.

Penelitian ini nantinya juga mempertimbangkan adanya penggunaan tambahan *stiffner*, *supplementary web*, *Ribs* serta *haunch* pada variasi pemodelannya disetiap sambungan balok dan kolom. Untuk parameter lain dari tambahan *stiffner*, *supplementary web*, *Ribs* serta *haunch* pada variasi pemodelannya disetiap sambungan balok dan kolom sesuai dengan experiment yang dilakukan oleh Piluso, dkk. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat mengetahui konfigurasi mode variasi pemodelan sambungan balok-kolom baja semi rigid/*partial strength* tertentu yang dapat menghasilkan performa struktur baja tahan gempa yang paling baik dan memenuhi syarat baik kuat maupun daktilitas pada bangunan untuk daerah gempa kuat.

2. Tinjauan Pustaka

Fungsi sambungan adalah mengalihkan gaya momen internal dari satu komponen struktur ke komponen lain sehingga pembebanan dapat diteruskan ke pondasi[5]. Menurut LRFD-A.2.2 jenis sambungan yang dipakai pada konstruksi baja dibedakan menjadi 3 (tiga) tipe:

1. Tipe terkekang penuh (fully restrained / FR)

Sambungan yang memiliki kontinuitas penuh sehingga sudut pertemuan antara batang-batang tidak berubah, yakni pengekangan rotasi sekitar 90 % atau lebih dari yang diperlukan untuk mencegah perubahan sudut.

2. Tipe rangka sederhana (partially restrained / PR)

Keadaan ini terjadi jika kekangan rotasi pada ujung-ujung batang dibuat sekecil mungkin. Biasanya rangka sederhana dianggap terjadi jika sudut awal antara batang-batang yang berpotongan dapat berubah sampai 80%

atau lebih dari jumlah perubahan sudut yang secara teoritis jika digunakan sambungan berengsel bebas.

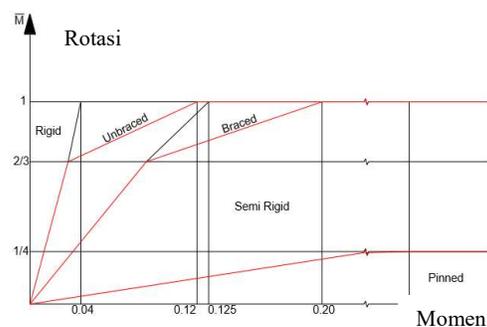
3. Tipe Rangka Setengah Kaku

Rangka setengah kaku terjadi jika kekangan rotasi kira-kira antara 20% hingga 90% dari yang diperlukan untuk mencegah perubahan sudut relatif.

Pada umumnya, kurva momen-rotasi dari sebuah sambungan dapat memberikan beberapa sifat atau karakteristik seperti kekakuan dari sebuah sambungan diidentifikasi dari kemiringan kurva, perilaku sambungan pada umumnya adalah non-linier, dimana kekakuan menurun sedangkan rotasi meningkat. Secara teori, kekakuan awal mempunyai angka yang sama dengan kekakuan setelah dibebani, kekakuan dari titik kumpul adalah indikasi dari nilai momen kapasitas yang dapat diambil dari nilai tertinggi pada kurva momen-rotasi. Pada **Gambar 1**, daktilitas meningkat seiring meningkatnya rotasi. Daktilitas dari sambungan adalah indikasi dari kapasitas rotasi yang didapat dari titik kumpul sebelum terjadi kehilangan kekuatan secara signifikan. Sebuah sambungan dapat dinyatakan ductile (elastis) jika memenuhi syarat bahwa rotasi yang terjadi lebih besar dari 0.03 radians. Pada **Tabel 1** juga dimodelkan beberapa tipe sambungan yang meliputi, simple connection, rigid dan semi-rigid.

T-Stub pada sambungan kolom dan balok

T-Stub terbentuk dari potongan setengah profil baja I. Bagian sayap dari *T-Stub* di baut dan bagian badan dari *T-Stub* dikenakan kekuatan Tarik atau tekan (gambar 2). Ada dua mekanisme kegagalan dari *T-Stub*, yaitu kegagalan akibat dari ketebalan *T-stub* dan kegagalan dari sayap[6]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Piluso, dkk, (*T-stub* yang terletak pada sayap bagian atas pada balok dapat dijadikan sebagai pusat rotasi yang bertujuan untuk mencegah kerusakan elemen sambungan lain dan ketika bagian sayap bawah pada balok dipasang *friction damper* dengan tumpuannya terletak pada *T-Stub*, menghasilkan kapasitas rotasi dan disipasi energi pada sambungan tersebut.



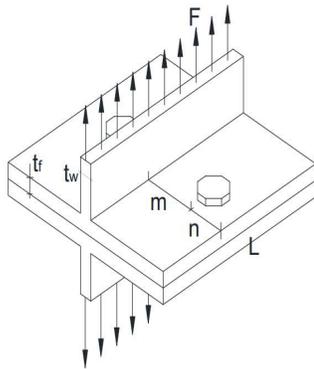
Gambar 1. Kurva momen – rotasi (M-Ø)

Tabel 1. Tipe Model Sambungan

Momen of global analysis	Classification of joint		
Elastic	Nominally pinned	rigid	semi-rigid
rigid-plastic	Nominally pinned	full-strength	partial-strength
elastic-plastic	Nominally pinned	rigid and full-strength	semi rigid and partial strength rigid and partial strength
Type of joint model	simple	continuous	semi-continuous

Sumber: Latour, Piluso, et al, 2018[15]

Terdapat beberapa macam kegagalan pada baut dengan sistem sambungan *T-Stub* (Gambar 2)[7]. Pada mekanisme kegagalan yang pertama yakni kegagalan yang timbul dengan terdapat empat sendi plastis.



Gambar 2. *T-Stub* Pada Sambungan Balok-Kolom

Dua terletak pada ujung baut, yang disebabkan oleh bending momen akibat dari gaya Tarik/force (F) (persamaan 1). Pada sisi sambungan sayap dan badan tetap dalam keadaan plastis. Pada mekanisme kegagalan yang kedua adalah terdapat dua sendi plastis yang terletak pada sambungan sayap dan badan serta rusaknya dari baut sebagai pengikat sambungan (persamaan 2). Pada mekanisme kegagalan yang ketiga yakni adanya kegagalan pada sambungan baut. Sehingga pada mekanisme ini tidak terdapat kekuatan Tarik/force (F), sehingga sambungan plat benar dalam keadaan terlepas (persamaan 3)[8].

$$F_{1.Rd} = \frac{4M_{f.Rd}}{m} \tag{1}$$

$$F_{2.Rd} = \frac{2M_{f.Rd} + 2B_{Rd}n}{m + n} \tag{2}$$

$$F_{3.Rd} = 2B_{Rd} \tag{3}$$

Pengaruh Sistem *Friction dampers* Terhadap Beban Siklik

Redaman adalah suatu proses dimana sistem struktur mendisipasi dan menyerap energi yang masuk ke dalam bangunan dari eksitasi eksternal. Karena itu peredam (damper) mengurangi penambahan energi regangan dan respon dari sistem, terutama kondisi dimana mendekati resonansi dimana peredam mengontrol respon. Besarnya nilai redaman tergantung dari beberapa faktor seperti amplitudo getaran, material konstruksi, periode getaran, *mode shapes*, dan konfigurasi struktur[9].

Ada beberapa jenis perangkat kontrol pasif dan peredam. *Friction dampers* pasif menggunakan gesekan Coulomb untuk mendisipasi energi yang masuk akibat gempa. Alat redaman ini telah digunakan secara luas dalam berbagai proyek perkuatan di seluruh dunia, karena biayanya yang rendah dan kinerja yang baik. Selain itu, *Passive dampers* adalah bentuk yang paling lama dan umum digunakan. *Passive dampers* biasanya ditempatkan pada *cross bracing* diantara dua lantai yang berdekatan. *Passive dampers* menggunakan perpindahan dari lantai untuk menghasilkan gaya redaman pada bangunan.

Tidak seperti perangkat aktif dan semi-aktif, perangkat pasif tidak dapat merubah sifat redamannya berdasarkan respon dari struktur dan karena itu tidak memerlukan sumber energi listrik atau kontrol algoritma untuk beroperasi. Tanpa peralatan sensor atau komputasi, perangkat pasif umumnya yang paling ekonomis dan paling banyak digunakan. Sejak awal tahun 1970 berbagai jenis perangkat disipasi telah diuji dan digunakan. Perangkat ini dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori: peredam viskos dan viskoelastik (*viscous and viscoelastic dampers*), peredam metalik (*metallic dampers*), dan peredam gesekan (*friction dampers*)[10].

Dengan menggunakan *bracing* maka defleksi bangunan berkurang seiring dengan meningkatnya kekakuan tetapi sebaliknya gaya geser dasar menjadi lebih besar karena kekakuan bangunan yang meningkat[11]. Selain itu dengan adanya penempatan *friction damper* pada sambungan – sambungan balok dan kolom rangka baja baik desain *Momen Resisting Frames* dapat mendisipasi energi gempa lebih besar serta mengurangi kerusakan dari elemen–elemen sendi plastis pada struktur baja khususnya pada balok, sehingga *retrofit* akibat dari gempa yang berulang tidak banyak diperlukan. Permukaan pelat bantalan gesekan juga merupakan faktor penting dalam mendisipasi energi gempa terutama yang mempunyai nilai koefisien gesekan yang tinggi. Dengan nilai koefisien gesekan yang tinggi dapat mengurangi dimensi ukuran dari pelat bantalan gesekan[13]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Piluso, dkk dengan tujuan untuk mengamati adanya lima jenis permukaan yang

berbeda pada gesekan pelat. Menghasilkan nilai koefisien gesekan statis dan dinamis pada setiap jenis bantalan redaman (**Tabel 2**).

Tabel 2. Nilai Koefisien Gesekan Spesimen

Interface	μ static	μ dynamic
Steel on Steel	0.173	0.351
Brass on Steel	0.097	0.200
M0 on Steel	0.254	0.254
M1 on Steel	0.201	0.201
M2 on Steel	0.158	0.180

Sumber: Latour, Piluso, et al, 2018[15]

3. Metode

Pemodelan dilakukan dengan membuat sambungan balok-kolom lengkap dengan friction damping dengan menggunakan alat bantu software Abaqus 6.13. Model ini dibuat berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Latour, Piluso, dan Rizzano[15], yang mengacu pada spesimen sambungan balok dan kolom yang dilengkapi dengan *single friction damping* dan T-Stub tanpa *haunch*. Adapun set-up test yang digunakan dalam penelitian tersebut seperti yang terlihat pada **Gambar 3** dan **4**. Set-up tes ini akan kembali dimodelkan dalam penelitian ini sebagai dasar untuk pemodelan berikutnya. Pada analisa dengan program bantu ABAQUS, sambungan dimodelkan sebagai berikut:

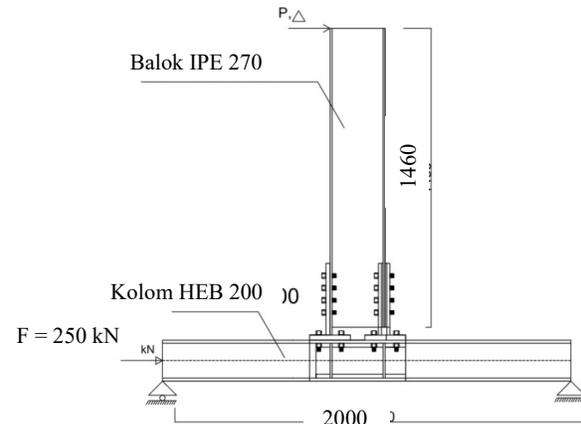
- Sambungan *T-Stub* dimodelkan dengan dua pelat terpisah yang disambung dengan baut, dalam ABAQUS sambungan ini dinamakan *Tie-constrain*.
- Tipe kontak antara baut dengan pelat dimodelkan dengan tipe **friction** pada program ABAQUS pada modul *interaction*
- Sambungan profil *T-Stub* dan *L-Stub* ke balok dimodelkan menggunakan *surface control* pada program ABAQUS
- Mur dimodelkan langsung menyatu dengan baut
- Pemodelan kontak antara baut dengan pelat berupa gesekan
- Bantalan redaman/Pad tidak dimodelkan hanya saja permukaan pelat *T-Stub* atau *L-Stub* diberikan *hard contact* dengan diberikan koefisien gesekan sesuai dengan penelitian experimental Piluso.

Material Properties:

Perkiraan dimensi awal dari elemen elemen struktur pada gedung, penentuan bahan, dan material struktur, dan merencanakan dimensi profil yang akan digunakan.

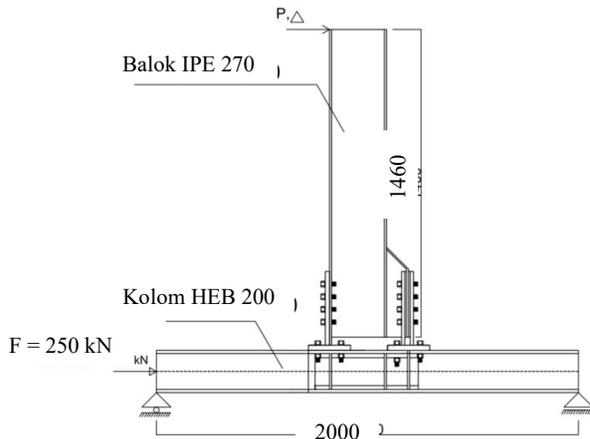
Profil Kolom	: Profil HEB 200 (BJ 41)
	: $f_y = 250$ Mpa ; $f_u = 410$ Mpa
Profil Balok	: Profil IPE 270 (BJ 41)
	: $f_y = 250$ Mpa ; $f_u = 410$ Mpa

Baut : Baut Mutu Tinggi
 : $f_y = 995$ Mpa ; $f_u = 1160$ Mpa
 Profil T-stub, L-stub, Stiffener, Supplementary Web (BJ 41)
 : $f_y = 250$ Mpa ; $f_u = 410$ Mpa



Gambar 3. Variasi sambungan TSJ-1

Sumber: Pemodelan Penelitian



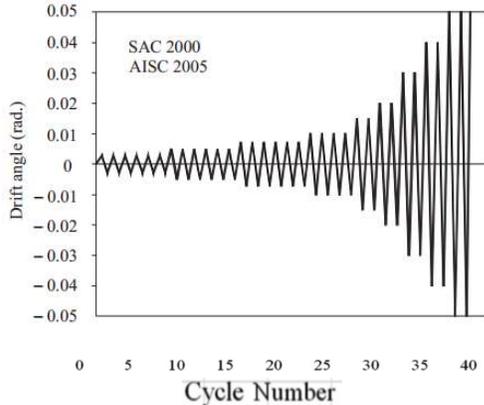
Gambar 4. Variasi sambungan TSJ-H

Sumber: Pemodelan Penelitian

Pembebanan

Pembebanan dilakukan berdasarkan penelitian yang dilakukan Latour, Piluso, dan Rizzano dalam jurnal *Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers* di tahun 2018[15]. Adapun pembebanan yang diberikan secara *aktuator hidrolis* dengan dua cara berbeda. Cara pertama dengan penerapan *under force control*, yaitu dengan memberikan beban aksial pada kolom sebesar 30% dari beban ultimatanya. Kedua pembebanan akuator hidrolis digunakan untuk mengontrol *under displacement* pada ujung balok dari keadaan semula agar mendapatkan perpindahan yang direncanakan. Untuk menghindari adanya tekuk lateral akibat torsi pada balok,

maka digunakan rangka baja yang dirancang secara horisontal sebagai penjepit dari balok yang diuji agar tidak terjadi perpindahan lateral. Pembebanan didefinisikan sebagai simpangan sudut yang terjadi sesuai dengan peraturan pengujian yang terdapat pada AISC.



Gambar 5. Sistem Pembebanan

Validasi Hasil Pembebanan:

Kontrol terhadap pemodelan dilakukan dengan cara perbandingan terhadap hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dengan cara pemodelan dengan program abaqus yang serupa dengan penelitian Latour, Piluso, dan Rizzano pada tahun 2018[15], pada specimen TSJ-SA300-320-CYC12 dan TSJ-SA300-320-CYC13. Seperti yang diharapkan, atas dasar kriteria desain yang dipakai, di semua pengujian eksperimental belum ada kerusakan komponen sambungan yang signifikan, tetapi kerusakan hanya terjadi pada pemakaian bantalan gesekan. Pada nilai kekuatan yang rendah, sambungan menunjukkan perilaku elastis yang ditandai dengan kekakuan awal yang tinggi. Khususnya, dalam kasus TS-H-SA300-260-CYC13 saat awal terjadi kekakuan lebih tinggi karena adanya peningkatan momen akibat dari pemakaian *haunch*. Ketika tekanan terjadi pada ujung balok *kantilever* mempunyai nilai yang sama dengan besar nilai rencana momen lentur dibagi dengan panjang balok, pada saat ini mulai terjadi *slippage* peredam gesekan (Gambar 17-18). Setelah selip pertama, respons histeresis menandakan siklus untuk semua loading/unloading yang mendekati bentuk jajaran genjang dengan sedikit perubahan penurunan karena jumlah siklus pembebanan yang meningkat dari awal (Gambar 19).

Ciri yang paling penting dari hasil penelitian adalah sambungan dengan *friction damper* hal itu mampu memberikan kapasitas tinggi disipasi dan memiliki nilai rotasi yang sesuai dengan peraturan yang tertera pada Eurocode 8 untuk kerangka yang memiliki daktilitas tinggi. Selanjutnya, sangat penting untuk digaris bawahi pada penelitian didapatkan hasil kekuatan lentur balok yang lebih besar dari

nilai resistensi plastis dari sambungan balok, sehingga penelitian diperoleh hasil tanpa mengakibatkan kerusakan pada ujung balok.

Modifikasi Pemodelan

Pemodelan serupa dilakukan kembali dengan beberapa perubahan dan modifikasi, sehingga menjadi langkah selanjutnya dalam pengerjaan keseluruhan penelitian ini. Tabel 3 adalah rencana Identifikasi Material pemodelan *Friction damper* yang diterapkan pada sambungan balok kolom dengan variasi sambungan yang berbeda

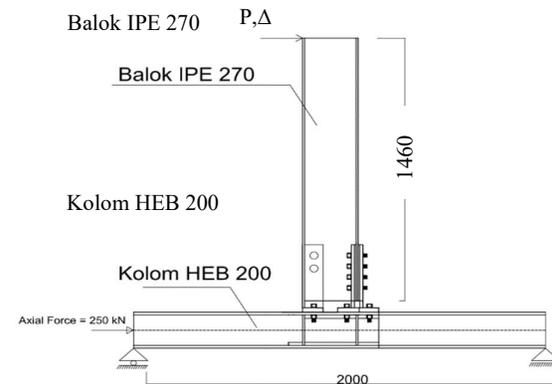
Tabel 3. Identifikasi Material

Jenis elemen	Profil	Fy (Mpa)	fu (Mpa)	Ukuran Section (mm)				
				b	h	tw	tf	t
Kolom	HEB	250	410	200	500	10	16	-
Balok Atas	IPE	250	410	199	446	8	12	-
Stiffner	Plate	250	410	91	182	-	-	10
T-Stub	T	250	410	200	375	20	25	10.2
Internal angel	L	250	410	200	375	20	25	10.2
External angel	L	250	410	200	375	20	25	10.2
Supplementary web plate	Plate	250	410	91	114	-	-	10
Ribs	Plate	250	410	-	-	-	-	6.6

Sumber: Latour, Piluso, et al, 2018[15]

Karakteristik Model

Spesimen yang akan dimodelkan terdiri dari dua spesimen (TSJ-1 dan TSJ-H) sebagai verifikasi penelitian Piluso dkk, serta dua pemodelan berikutnya adalah hasil modifikasi sambungan dua pemodelan sambungan sebelumnya (TSJ-3 dan TSJ-H) (Gambar 6 dan 7).



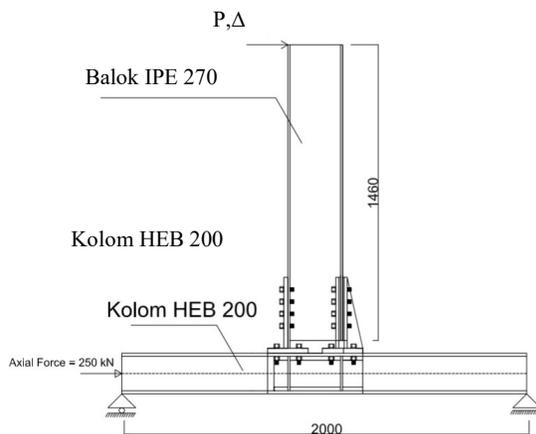
Gambar 6. Variasi sambungan TSJ-3

Analisa Metode elemen Hingga

Analisa metode elemen hingga akan dilakukan untuk memodelkan sambungan balok dan kolom yang dilengkapi dengan *friction damping* dalam bentuk 3 dimensi. Dalam analisa ini juga akan dilihat mekanisme sendi plastis dan kerusakan yang terjadi pada elemen. Sehingga gambaran dari

perilaku dan kemampuan elemen dalam menerima beban dapat diketahui. Analisa metode elemen hingga ini dilakukan dengan program bantu ABAQUS. Berikut ini merupakan prosesnya sebagai berikut:

1. Analisa Kapasitas *Friction damper* pada sambungan Kemampuan *Friction damper* pada sambungan sistem rangka dalam menerima beban yang didapatkan setelah melakukan pembebanan siklik, mulai dari pembebanan pertama, saat mencapai kekuatan leleh maupun kekuatan *ultimate*.



Gambar 7. Variasi sambungan TSJ-R

2. Kurva Histeresis

Hasil analisa numerik yang ditampilkan dalam kurva beban-*displacement* akan ditampilkan data yang didapatkan selama proses pembebanan berlangsung, khususnya pembebanan siklik. Kurva ini akan memperlihatkan kenaikan atau penurunan *displacement* seiring dengan pembebanan yang dikenakan pada sambungan yang dimodifikasi *Friction damper* pada sambungan.

3. Perilaku Boundary Elemen
Efek yang dihasilkan pada portal di sekitar sambungan balok - kolom yang dimodifikasi *Friction* berupa bentuk dan besarnya deformasi.
4. Daktilitas
Hubungan antara simpangan *ultimate* dengan simpangan waktu leleh awal. Dalam setiap varian perilaku yang dikenakan pada sambungan balok – kolom yang dimodifikasi *Friction damper*, akan diambil nilai tegangan dan regangan dan diambil pada tempat yang sama, sehingga dapat menghasilkan nilai yang valid.
5. Pola Kegagalan sambungan balok – kolom yang dimodifikasi dengan *Friction damper*

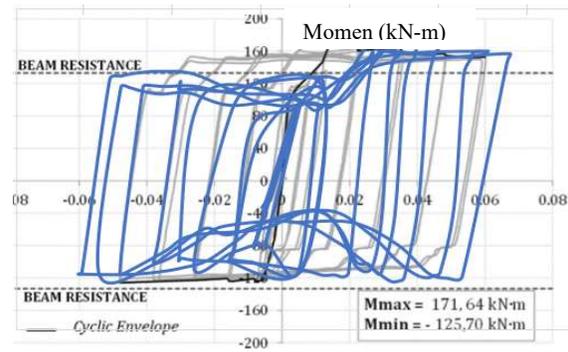
Perilaku struktur selama pembebanan berlangsung, dan besarnya deformasi pada setiap tahap pembebanan. Dalam

setiap proses pembebanan, elemen struktur akan mengalami deformasi. Nilai dalam proses pembebanan ini akan dicatat sehingga performa terbaik elemen struktur dapat direncanakan untuk dicapai.

4. Hasil dan Analisa

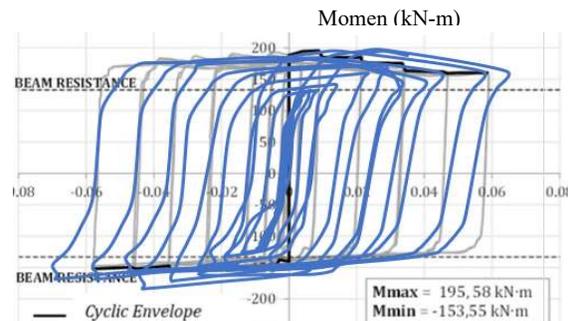
Verifikasi Hasil FEM Dengan Hasil Eksperimen

Sebelum studi parametrik dilakukan maka perlunya pembuktian (Verifikasi) hasil dari model *finite elemen* (ABAQUS). Untuk memvalidasi keakuratan hasil pemodelan dengan program bantu *finite element*, dilakukan perbandingan hasil kurva Momen – Rotasi dari hasil pemodelan setiap variasi pemodelan pada tesis ini (**Tabel 4 dan 5**).



Gambar 8. Perbandingan *Hysterisis Loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe TSJ-1

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 9. Perbandingan *Hysterisis Loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe TSJ-H

Sumber: Hasil Analisis

Gambar 9 menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe TSJ-1 dengan step berturut – turut step 109, dan step 147. Nilai tegangan maksimum dari spesimen ini mencapai 397.864 MPa saat *displacement* mencapai 91.2731 mm yang terjadi pada pusat rotasi dari sambungan (gambar dengan lingkaran berwarna merah) pada step 147.

Tabel 4. Verifikasi Variasi TSJ-1

No	Variasi	Momen-Rotasi	
		Mmax (KNm)	Θ (rad)
1	Eksperimen TSJ-1	171.64	0.022
2	Pemodelan TSJ-1	163.20	0.060
	Selisih	8.44	-0.048

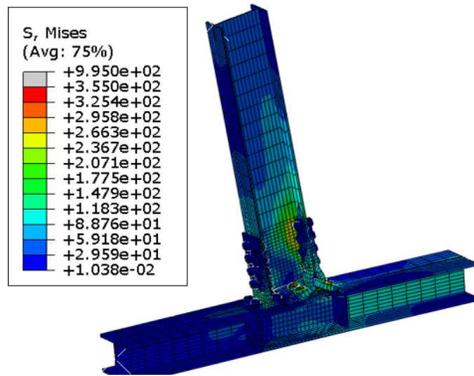
Sumber: Hasil Analisis

Tabel 5. Verifikasi Variasi TSJ-1

No	Variasi	Momen-Rotasi	
		Mmax (KNm)	Θ (rad)
1	Eksperimen TSJ-H	195.58	0.01
2	Pemodelan TSJ-H	225.742	0.049
	Selisih	30.1620	-0.055

Sumber: Hasil Analisis

Distribusi Tegangan akibat Beban Siklik

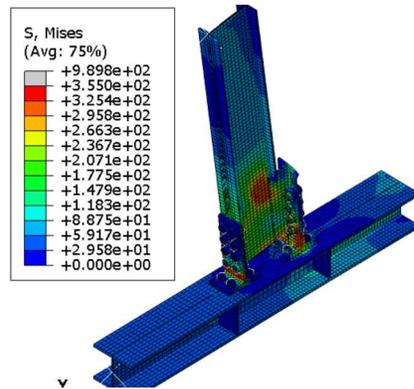


Gambar 10. Distribusi tegangan TSJ-1

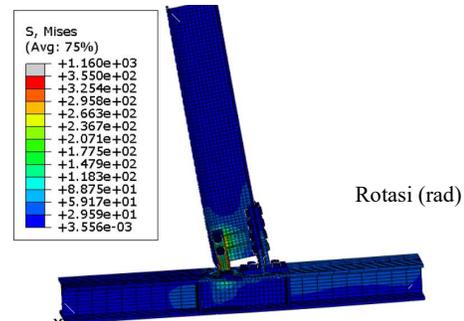
Sumber: Hasil Analisis

Gambar 10 menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi akibat beban siklik pada model sambungan tipe TSJ-1 dengan step berturut – turut step 199, dan step 205. Nilai tegangan maksimum dari spesimen ini mencapai 419.8610 MPa saat *displacement* mencapai 94.7008 mm yang terjadi pada pusat rotasi dari sambungan (gambar dengan lingkaran berwarna merah) pada step 205.

Gambar 11, menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan awal yang terjadi pada model sambungan tipe TSJ-3 terjadi pada L-Stub yang menempel pada *web* balok. Bagian yang mengalami leleh berikutnya adalah permukaan kontak antara L-Stub dan badan balok serta baut pengait keduanya.



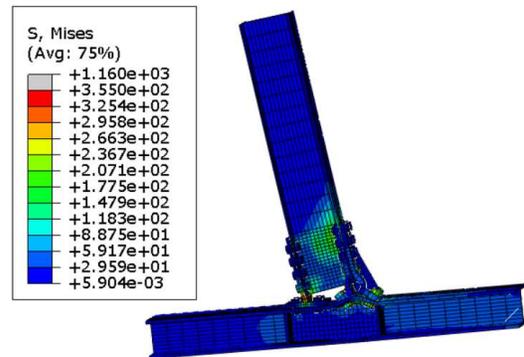
Gambar 10. Distribusi tegangan TSJ-H



Gambar 11. Distribusi tegangan TSJ-3

Sumber: Hasil Analisis

Gambar 12, menunjukkan distribusi tegangan dan mode kegagalan yang terjadi pada model sambungan tipe TSJ-R. Bagian awal yang mengalami leleh terlebih dahulu adalah *Haunch* bagian yang menempel pada balok. Kemudian bagian yang leleh berikutnya adalah *flange* balok bagian *friction damper* yang kemudian diikuti oleh baut-baut pengait pada L-Stub dan *Flange* baloknya.



Gambar 12. Distribusi tegangan TSJ-R

Sumber: Hasil Analisis

Daktilitas

Faktor daktilitas struktur gedung (μ) adalah rasio antara simpangan ultimit dan simpangan pada saat terjadinya leleh pertama. Nilai daktilitas dari setiap spesimen perlu menjadi perhatian dalam mempertimbangkan pemilihan penggunaan metode yang tepat dalam penerapannya pada gedung bertingkat. Nilai daktilitas yang tinggi akan sangat terasa manfaatnya bila diterapkan pada gedung di daerah dengan nilai beban lateral yang tinggi. Hasil Analisa dari masing – masing pemodelan dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Daktilitas

No	Spesimen	Simpangan saat		Daktilitas
		Leleh Pertama	Ultimate	
1	TSJ-1	33.670	91.273	2.711
2	TSJ-H	13.227	94.701	7.160
3	TSJ-3	23.339	95.096	2.075
4	TSJ-R	34.6369	95.895	4.176

Sumber: Hasil Analisis

Dari **Tabel 6** terlihat bahwasannya tambahan *haunch* pada spesimen TSJ-H dan penggunaan *Ribs* pada pemodelan TSJ-R pada sambungan balok dan kolom mampu menambah nilai daktilitas bilamana diterapkan pada struktur baja.

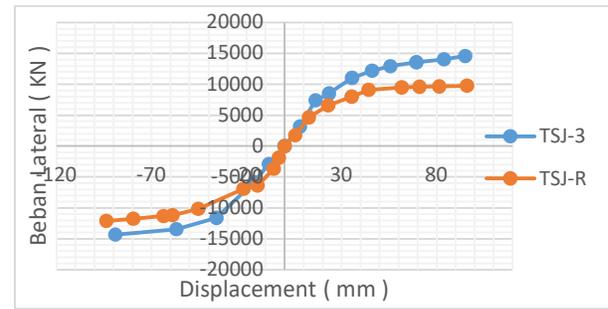
Envelope curve

Envelope curve terdiri dari beban puncak siklus pertama dari masing-masing siklus pembebanan lateral bolak-balik. *Displacement* arah positif menghasilkan *envelope curve* positif sedangkan *displacement* negatif menghasilkan *envelope curve* negatif. Kurva hasil perbandingan beban dan *displacement* dapat dilihat pada **Gambar 13**. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi TSJ-3 mengalami pencapaian beban lateral maksimum tekan dan tarik serta penurunan beban tekan dan tarik yang sama, bila dibandingkan variasi sambungan TSJ-R. Hal ini terjadi dikarenakan variasi sambungan TSJ-R mengalami retakan awal pada sayap bagian balok yang kemudian diteruskan dengan retakan yang terjadi pada *T-Stub* sehingga sampai pada titik terjadi buckling pada tiap siklus pembebanan secara berurutan. Berbeda dengan spesimen TSJ-3 yang tidak mengalami retak pada panel zone dikarenakan adanya penambahan *L-Stub Web* yang digunakan sebagai pusat rotasi.

Disipasi energi

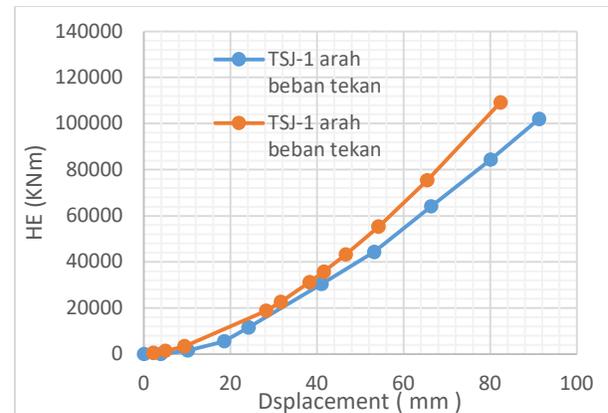
Grafik energi disipasi setiap siklus pembebanan disajikan pada **Gambar 14 - 17**. Grafik perbandingan energi disipasi variasi sambungan TSJ-3 dan TSJ-R terlihat pada setiap variasi cenderung meningkat setiap adanya peningkatan beban, tetapi untuk setiap siklus pengulangan pada setiap level beban yang sama besarnya energi disipasi cenderung

menurun. Adapun energi disipasi atau hysteric energy menggambarkan kemampuan spesimen untuk mendisipasikan beban yang bekerja pada benda uji tersebut. Besarnya energi disipasi dihitung berdasarkan besarnya luasan kurva yang dibentuk dari satu siklus lengkap (positif dan negatif). Besarnya energi disipasi dihitung berdasarkan pendekatan numerik dengan cara menghitung luasan tiap pias pada siklus positif dan negatif.



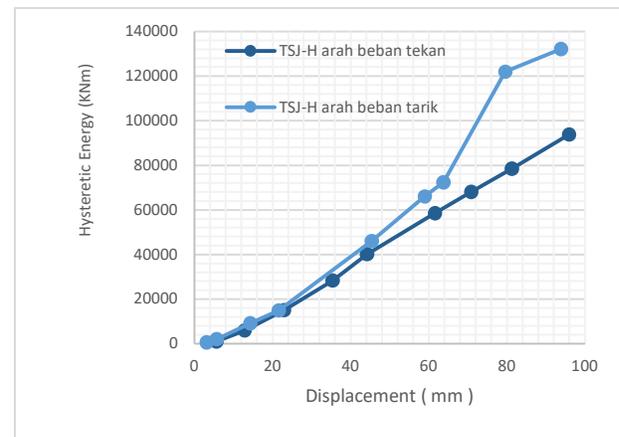
Gambar 13. Envelope curve TSJ-3 dan TSJ-R

Sumber: Hasil Analisis



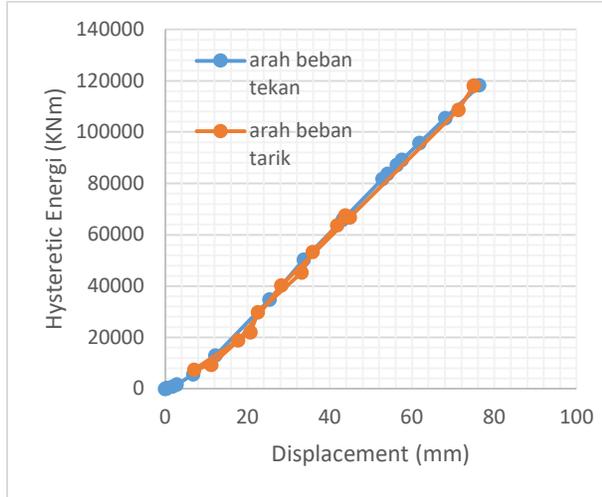
Gambar 14. Hysteric curve TSJ-1

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 15. Hysteric curve TSJ-H

Sumber: Hasil Analisis

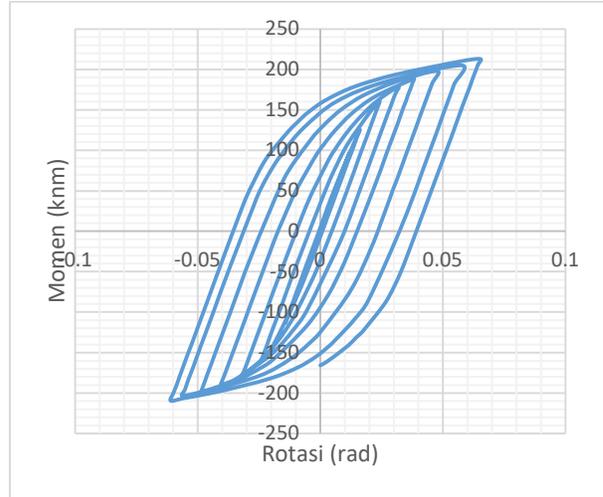


Gambar 16. *Hysteretic curve TSJ-3*
 Sumber: Hasil Analisis

Pada **Gambar 14** dan **15** menunjukkan bahwa spesimen variasi TSJ-H memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan variasi TSJ-1. Model TSJ-R menghasilkan nilai *Hysteretic* energi yang lebih besar bila dibandingkan dengan TSJ-3. Hal ini juga masih berkaitan dengan serapan energi yang dialami oleh setiap spesimen terhadap beban luar yang bekerja untuk setiap siklusnya untuk melihat kestabilan system struktur pada level perpindahan maksimum, ACI 374.1-05 mensyaratkan rasio energi disipasi pada siklus terakhir pada pembebanan siklik tidak boleh kurang dari 1/8 (0.125).

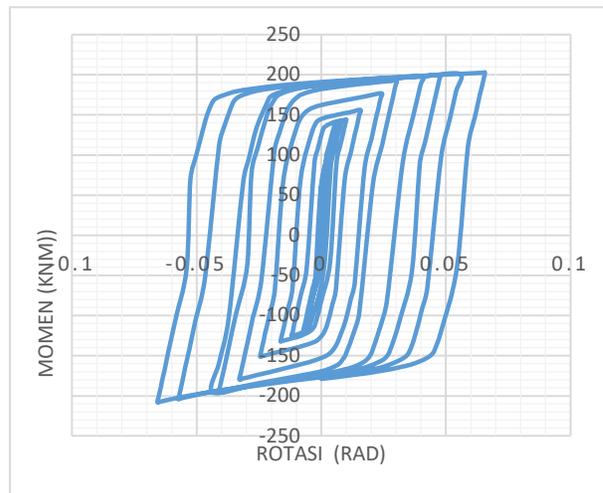


Gambar 17. *Hysteretic curve TSJ-R*
 Sumber: Hasil Analisis



Gambar 18. *Hysteresis Loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe TSJ-3
 Sumber: Hasil Analisis

Pada gambar 18 dan 19 di atas menunjukkan bahwa spesimen variasi TSJ-R memiliki luasan kurva momen rotasi yang lebih besar bila dibandingkan dengan TSJ-3. Hal ini menyebabkan *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan variasi TSJ-3. Penambahan *Ribs* pada sambungan balok – kolom juga menambah tingkat kekakuan dari model TSJ-R, hal ini terlihat dari rotasi yang dihasilkan kecil dengan nilai momen yang dihasilkan cukup tinggi. Kurva hysteresis loop antara TSJ-3 dan TSJ-R berbeda dikarenakan adanya awal terjadinya leleh hingga saat terjadinya kegagalan pada sambungan balok dan kolom.



Gambar 19. *Hysteresis Loop* Eksperimen dengan Pemodelan Tipe TSJ-R
 Sumber: Hasil Analisis

Pada gambar 18 dan 19 di atas menunjukkan bahwa spesimen variasi TSJ-R memiliki luasan kurva momen rotasi yang lebih besar bila dibandingkan dengan TSJ-3. Hal ini menyebabkan *potential energy* lebih besar dibandingkan dengan variasi TSJ-3. Penambahan *Ribs* pada sambungan balok – kolom juga menambah tingkat kekakuan dari model TSJ-R, hal ini terlihat dari rotasi yang dihasilkan kecil dengan nilai momen yang dihasilkan cukup tinggi. Kurva hysteresis loop antara TSJ-3 dan TSJ-R berbeda dikarenakan adanya awal terjadinya leleh hingga saat terjadinya kegagalan pada sambungan balok dan kolom.

5. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dari hasil analisa yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Perilaku yang dihasilkan dari spesimen variasi TSJ-1 dan TSJ-H untuk eksperimental dan ABAQUS memiliki mode kegagalan yang hampir sama. Dimana variasi TSJ-1 terjadi kegagalan pada baut dan TSJ-H terjadi *buckling* pada panel zone dan patah pada baut. Namun jika dibandingkan dari segi performa, untuk distribusi tegangan variasi TSJ-H memiliki performa yang lebih baik dari variasi TSJ-1 karena dengan adanya penambahan *haunch*. Penambahan *haunch* akan mengalami tingkat kegagalan lebih sedikit dibandingkan tanpa *haunch*.
2. Adapun hasil dari beban lateral dan displacement, dimana beban lateral maksimal untuk spesimen TSJ-1 sebesar 111.78 KN pada displacement 91.2731 mm, dan untuk spesimen TSJ-H sebesar 160.71 KN pada displacement 94.70 mm, TSJ-3 sebesar 145.93 KN pada displacement 95.096 mm, dan untuk spesimen TSJ-R sebesar 97.74 KN pada displacement 95.89 mm. Ini menunjukkan bahwa kapasitas beban lateral spesimen TSJ-H lebih besar dari kapasitas beban spesimen untuk variasi yang lainnya. Dari hasil tersebut terlihat bahwa spesimen TSJ-H lebih daktail bila dibandingkan dengan spesimen lainnya.
3. Perbandingan energi disipasi pada spesimen TSJ-1, TSJ-H, TSJ-3, dan TSJ-R terlihat pada tiap spesimen cenderung meningkat setiap adanya penambahan beban. Pada semua spesimen yang dianalisis, spesimen TSJ-H memiliki *potential energy* lebih besar dibandingkan spesimen yang lainnya yakni sebesar 101679.81 KNmm disusul dengan spesimen TSJ-3 sebesar 98769.8 KNmm, TSJ-R sebesar 93732.27 KNmm dan TSJ-1 sebesar 84361.66 KNmm.
4. Dari semua variasi sambungan penggunaan *Hauch* pada variasi berpengaruh terhadap peningkatan performa dari sambungan balok dan kolom.
5. Nilai momen – rotasi pada eksperimental dan pemodelan pada setiap spesimen tidak jauh berbeda. Untuk spesimen TSJ-1 sebesar 171.64 KNm, pada eksperimental momen sebesar 163.20 KNm sehingga selisihnya sebesar 8.44 KNm. Untuk spesimen TSJ-H sebesar 225.742 KNm, pada eksperimental momen sebesar 195.58 KNm sehingga selisihnya sebesar 30.1620 KNm. Untuk nilai rotasi pada spesimen TSJ-1 sebesar 0.022 rad dan pada eksperimental sebesar 0.065 rad dengan selisih sebesar 0.048 rad. Untuk nilai rotasi pada spesimen TSJ-H sebesar 0.049 rad dan pada eksperimental sebesar 0.01 rad dengan selisih sebesar 0.055 rad.

Daftar Pustaka

- [1] Billina, “Studi Komparasi Isolasi Dasar High Damiping Rubber Bearing dan Friction Pendulum System pada Bangunan Beton Bertulang,” *J. Tek. Sipil*, vol. 3, no. 3, 2017.
- [2] R. L. M. D’Aniello, R. Tartaglia, S. Costanzo, “Seismic design of extended stiffened end-plate joints in the framework of Eurocodes,” *Seism. Des. Ext. stiffened end-plate joints Framew. Eurocodes*, vol. 512–527, no. J. Constr. Steel Res. 128 (January 2017), 2017.
- [3] A. B. Francavilla, M. Latour, V. Piluso, and G. Rizzano, “Design of full-strength full-ductility extended end-plate beam-to-column joints,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 148, pp. 77–96, 2018.
- [4] M. E. Lemonis, “Steel moment resisting frames with both joint and beam dissipation zones,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 147, pp. 224–235, 2018.
- [5] W. Adiyatma, I. Yasin, and Z. F. Haza, “Analisis Sambungan Geser Balok Baja dan Kolom Baja dengan Plat dan Baut Menggunakan Metode Elemen Hingga,” vol. 82051, p. 82051.
- [6] L. Dai, X. Zhao, and K. J. R. Rasmussen, “Cyclic performance of steel storage rack beam-to-upright bolted connections,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 148, pp. 28–48, 2018.
- [7] R. Leon and J. Swanson, “Tests On Steel T-Stub Connections,” *Proc. 12th World Conf. Earthq. Eng. Auckland, New Zeal.*, no. 1, p. 8, 2000.
- [8] P. Barata and A. Santiago, “Experimental Behaviour of T-Stub Joint Component at Elevated,” no. April 2014, 2013.
- [9] F. Danesh and E. Mohammadrezapour, “Experimental Investigation of T-Stub Link-to-Column Connections in Eccentrically Braced Frames,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 18, no. 2, pp. 486–495, 2018.
- [10] K. Weynand and J.-P. Jaspert, “Design of Structural Steel Joints Design of Structural Steel Joints,” 2014.
- [13] R. Soltani and D. E. Kerdal, “Behaviour of elementary bolted steel T-stub connections: An evaluation of EC3

- design procedure,” *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–20, 2011.
- [14] G. R. V. Piluso, “Random material variability effects on full-strength end-plate beam-to-column joints,” , *J. Constr. Steel Res.* vol. 5, no. 658–666, 2007.
- [15] M. Latour, V. Piluso, and G. Rizzano, “Experimental Analysis of Beam-to-Column Joints Equipped with Sprayed Aluminium Friction Dampers,” , *J. Constr. Steel Res.* vol. 146, pp. 33–48, 2018.

