

OPTIMASI KINERJA SEISMİK SAMBUNGAN BSEEP MELALUI MODIFIKASI *T-STIFFENER*: STUDI PARAMETRIK NUMERIK

Bryant Rizwantuana^{1*}, Aniendhita Rizki Amalia¹, Budi Suswanto¹

¹ Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, 60111.

e-mail : bryantrizwantuana12@gmail.com *

ABSTRACT

One of the crucial aspects in the design of earthquake-resistant buildings, especially those using steel structural systems, is the design of beam-to-column connections in the steel structure. Following the Northridge earthquake, regulations and standards for earthquake-resistant building design have been continuously developed and updated until now. This research will combine the Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP) connection from previous experimental studies with a T-Stiffener as a replacement for its stiffener plate. The T-Stiffener is made in several variations to investigate its effect when applied to a connection. This research uses ANSYS Workbench software. The connection modification modeling is planned with 6 modification models. Model-1 is the initial connection that is equated with previous experimental research. Model-2 uses the same type of stiffener as Model-1 but with the addition of a continuity plate. Model-3 and Model-4 are modification models using a T-Stiffener with a vertical height of 140 mm and lengths of 120 mm and 300 mm, which are welded to the beam flange and column flange. Model-5 and Model-6 are variations of Model-3 and Model-4 with a height of 180 mm and lengths of 120 mm and 300 mm. Model-6 produced the highest moment capacity at 4% rotation, which is 376.36 kN-m, or an increase of 27.91% from Model-1. In terms of energy dissipation, Model-6 also had the largest energy dissipation, which is 2,763.39 kN-m-rad, or an increase of 18.45% from Model-1. All analyzed connection models show relatively similar stress contours and buckling in the panel zone. This can occur because the column and beam profile sizes are relatively similar. With these relatively similar profile sizes, the connection cannot achieve a strong-column weak-beam system even though modifications have been made to strengthen the connection.

Keywords : Bolted Stiffened Extended End-Plate; T-Stiffener; ANSYS; Moment Capacity; Energy Dissipation

ABSTRAK

Salah satu hal krusial dalam perencanaan bangunan gedung tahan gempa khususnya yang menggunakan sistem struktur baja adalah perencanaan sambungan balok dan kolom pada struktur baja. Pasca gempa Northridge, regulasi dan standar perencanaan bangunan tahan gempa terus dikembangkan dan diperbaharui hingga sekarang. Dalam penelitian ini akan menggabungkan sambungan Bolted Stiffened Extended End-Plate (BSEEP) dari studi eksperimental terdahulu dengan T-Stiffener sebagai pengganti pelat pengakunya. T-Stiffener dibuat dalam beberapa variasi untuk diteliti pengaruhnya saat diaplikasikan dalam suatu sambungan. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench. Pemodelan modifikasi sambungan direncanakan 6 model modifikasi. Model-1 adalah sambungan awal yang disamakan dengan dengan penelitian eksperimental terdahulu. Model-2 menggunakan jenis stiffener yang sama dengan Model-1 namun dengan penambahan continuity plate. Model-3 dan Model-4 adalah model modifikasi dengan menggunakan T-Stiffener dengan tinggi vertikal 140 mm serta panjang masing-masing sebesar 120 mm dan 300 mm, yang dilas pada sayap balok dan sayap kolom. Model 5- dan Model-6 adalah variasi Model-3 dan Model-4 dengan tinggi 180 mm dan panjang masing-masing sebesar 120 mm dan 300 mm. Model-6 menghasilkan kapasitas momen terbesar pada saat rotasi 4%, yaitu 376,36 kN-m atau meningkat 27,91% dari Model-1. Dari disipasi energi, Model-6 juga memiliki disipasi energi terbesar, yaitu 2.763,39 kN.m-rad atau meningkat 18,45% dari Model-1. Semua model sambungan yang dianalisis menunjukkan kontur tegangan dan buckling yang relatif sama pada panel zone. Hal ini dapat terjadi karena ukuran profil kolom dan balok yang relatif sama. Dengan ukuran profil yang relatif sama ini membuat sambungan tidak dapat mencapai sistem strong column weak beam meskipun telah dilakukan modifikasi untuk memperkuat sambungan tersebut.

Kata kunci : Bolted Stiffened Extended End-Plate; T-Stiffener; ANSYS; Kapasitas Momen; Energi Disipasi

PENDAHULUAN

Bencana alam yang tidak dapat dihindarkan di Indonesia salah satunya adalah gempa bumi. Gempa bumi tak dapat dihindari karena Indonesia dilalui beragam pergerakan lempeng tektonik. Salah satu dampak saat terjadi suatu gempa adalah rusaknya infrastruktur bangunan pada daerah terdampak. Namun hal ini dapat dihindari dengan adanya perencanaan dan pembangunan gedung dengan konsep bangunan tahan gempa. Regulasi dan standar perencanaan bangunan tahan gempa terus dikembangkan dan diperbaharui hingga sekarang.

Salah satu hal krusial dalam perencanaan bangunan gedung tahan gempa khususnya yang menggunakan sistem struktur baja adalah perencanaan sambungan balok dan kolom pada struktur baja. Sambungan menjadi krusial karena menjadi jembatan penyaluran momen dari balok ke kolom. Sambungan juga berperan dalam menyerap energi yang disebabkan saat terjadi gempa. Contoh kegagalan struktur sambungan balok – kolom yang paling jelas saat peristiwa gempa Northridge pada tahun 1994. Pasca gempa Northridge, banyak peneliti yang menginvestigasi kegagalan yang terjadi hingga berkembanglah konsep *Prequalified Moment Connection* [1].

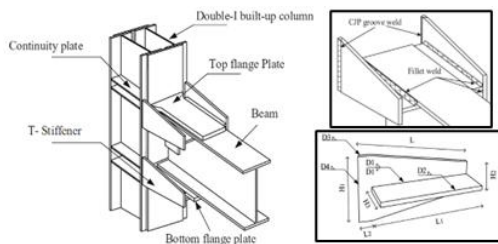
Prequalified Moment Connection diatur dan dibahas dalam American Institute of Steel Construction 358-16. Bolt Stiffened Extended End Plate adalah satu jenis *Prequalified Moment Connection* yang sering digunakan dalam bangunan gedung struktur baja. Umumnya sambungan Bolt Stiffened Extended End Plate memiliki performa yang baik dalam menahan beban yang terjadi [2]. Dari hasil pengujian secara eksperimental dan finite element analysis pada end-plate connection, menunjukkan bahwa kinerja seismik pada end-plate connection memuaskan

dengan kekakuan, keuletan, dan penyerapan energi semuanya memenuhi persyaratan standar dengan baik, dan menunjukkan keamanan yang tinggi [3].

Shi dkk. melakukan pengujian eksperimental terhadap delapan spesimen sambungan balok-kolom dengan tipe *flush* dan *extended end-plate* dengan beban *cyclic* terukur [4]. Spesimen divariasikan dari penggunaan *stiffener*, jumlah baut, diameter baut, dan ketebalan *end-plate*. Dari studi ini menunjukkan sambungan tipe *extended end-plate* dengan *stiffener* memberikan kekuatan, daktilitas, dan kapasitas energi disipasi yang baik pada sambungan dibandingkan sambungan dengan tipe *flush end-plate* yang menunjukkan penurunan kekakuan dan kapasitas disipasi energi yang tidak memadai untuk sambungan kolom-balok. Namun pada kedelapan spesimen, kegagalan terjadi pada bagian *panel zone* dan area sambungan seperti *stiffener*, baut, dan *end-plate* yang berbahaya jika terjadi pada sambungan kolom-balok. Sehingga diperlukan kajian untuk memindahkan kegagalan yang terjadi berpindah ke area balok [4].

Studi Ayoubi & Ghobadi menunjukkan bahwa metode perkuatan menggunakan *T-Stiffener* pada sambungan momen *welded flange plate* yang dilas pada kolom dapat meningkatkan kinerja sambungan [5]. Sambungan yang diperkuat *T-Stiffener* mampu memenuhi persyaratan SRPMK sesuai dengan ketentuan seismik AISC, dengan menunjukkan kekuatan dan daktilitas yang memadai. Sambungan yang diperkuat mampu menahan simpangan antar lantai sebesar 0,04 radian [5]. Perkuatan ini berhasil memindahkan lokasi sendi plastis dari area sambungan ke dalam balok, mengubah mode kegagalan dari getas pada las menjadi daktil pada balok [5]. Sehingga metode perkuatan menggunakan *T-Stiffener*

efektif dan praktis untuk meningkatkan kinerja seismik sambungan momen.



Gambar 1. Detail Perkuatan Sambungan Menggunakan *T-Stiffener* [5]

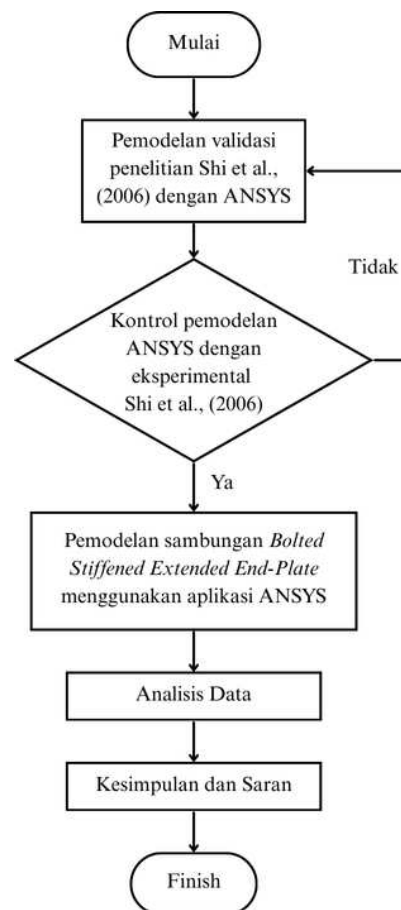
Dalam penelitian ini akan menggabungkan sambungan *Bolted Stiffened Extended End-Plate* (BSEEP) pada penelitian Shi dkk. [4] dengan *T-Stiffener* sebagai pengganti pelat pengakunya. Dalam penelitian sebelumnya melakukan perkuatan pada sambungan *Bolted Stiffened Extended End-Plate* (BSEEP) dengan menggunakan variasi haunch dan ukuran *stiffener* tunggal [6], [7], [8], belum ada yang meneliti pengaruh *T-Stiffener* pada sambungan *Bolted Stiffened Extended End-Plate* (BSEEP). Diharapkan penggunaan *T-Stiffener* dalam sambungan BSEEP akan meningkatkan kapasitas momen, energi disipasi, dan daktilitas pada sambungan

METODE PENELITIAN

Untuk memperoleh hasil data yang kredibel dan valid, maka dalam pelaksanaan penelitian ini diperlukan bantuan perangkat lunak (*software*) yang mendukung yaitu ANSYS Workbench. Dari penelitian yang dilakukan, menghasilkan perilaku momen-rotasi, kapasitas momen, dan disipasi energi yang terjadi pada model sambungan sebelum dan sesudah menggunakan *T-Stiffener*. Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir.

Pemodelan Validasi

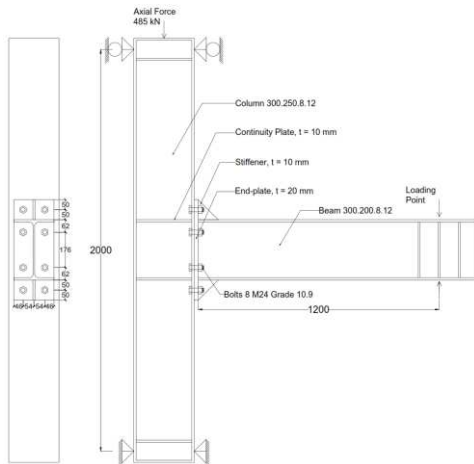
Validasi menggunakan model dari penelitian eksperimental jenis sambungan *bolted stiffened extended end-plate*. Validasi model ini diperlukan untuk meninjau dan mengatur parameter yang digunakan dalam eksperimental dan metode numerik menggunakan aplikasi ANSYS menghasilkan *output* hasil yang sama. Dalam penelitian ini, pemodelan awal mengacu pada model sambungan JD-6 yang digunakan dalam penelitian Shi dkk. [4]. Dengan konfigurasi dan spesifikasi sesuai pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Pemodelan numerik awal yang mengacu pada penelitian eksperimental dari Shi dkk [4] perlu dilakukan untuk meninjau apakah parameter pemodelan yang diinputkan seperti geometri, *material properties*, *boundary condition*, dan interaksi yang digunakan telah sesuai

dan menunjukkan hasil analisis yang mendekati dengan hasil eksperimental.



Gambar 3. Detail konfigurasi model sambungan eksperimental [4]

Tahapan dalam melakukan validasi pemodelan numerik meliputi:

1. Pemodelan Geometri Sambungan

Setiap elemen-elemen dan konfigurasi spesimen sambungan baik baut, plat, dan profil dibuat geometrinya pada program ANSYS sehingga membentuk model validasi JD-6.

Tabel 1. Parameter model sambungan eksperimental

Elemen Struktur	Dimensi
Kolom	WF 300.250.8.12
Balok	WF 300.200.8.12
End plate, t	20 mm
Extended end plate stiffener, t	10 mm
Baut	M24

2. Input Material Properties

Material properties disesuaikan dengan pengujian eksperimental oleh Shi dkk. menggunakan mutu Q345 untuk balok, kolom, pelat dan *high strength bolts grade 10.9* [4].

Agar memperoleh hasil yang sama dengan hasil dari pengujian eksperimental, material perlu diatur menjadi non-linear dengan menambahkan data *multilinear kinematic hardening* pada Engineering

Data setiap material sesuai dengan mutu yang digunakan dalam eksperimental.

Tabel 2. Material properties model eksperimental

Material	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (MPa)
Steel ($t \leq 16$ mm)	409,0	536,6	195.452
Steel ($t \geq 16$ mm)	372,6	537	188.671
Bolts (M24)	975	1188	206.000

Untuk Steel mutu Q345 kurva *multilinear kinematic hardening* mengacu pada kurva dalam studi Shuailing Li dkk. [9] dan untuk bolts grade 10.9 mengacu pada penelitian Yaoliang dkk. [10] yang kemudian disesuaikan kembali dengan f_y dan f_u setiap material. Kurva *multilinear kinematic hardening* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 36 sampai Gambar 38.

3. Input Boundary Condition dan Beban

Boundary condition pada pemodelan berupa peletakan rol pada ujung kiri dan pada ujung kanan kolom menggunakan peletakan sendi. Spesimen diberikan beban *displacement* pada ujung balok dan mengikuti ketentuan *cyclic test* yang digunakan dalam pengujian eksperimental Shi dkk. [4].

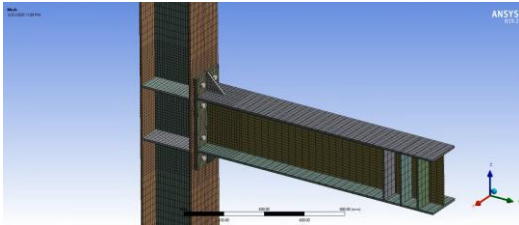
Tabel 3. Beban *cyclic* spesimen eksperimental

Load Step	Load (kN)	Displacement (mm)	Number of cycles
1	70	-	1
2	140	-	1
3	210	-	1
4	-	10	2
5	-	20	2
6	-	30	2
7	-	40	2
8	-	50	2
9	-	60	2
10	-	70	2
11	-	80	2
12	-	90	2
13	-	100	2
14	-	110	2

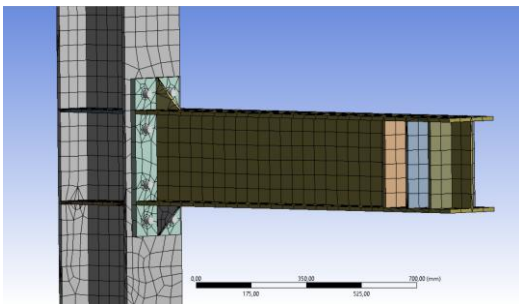
Selain beban *cyclic*, spesimen pada penelitian Shi dkk. [4] juga dilakukan pengujian secara terpisah dengan beban *monotonic*.

4. Meshing

Meshing pada pemodelan validasi sambungan menggunakan bentuk *hexahedral* dengan ukuran 15 mm pada sambungan dan *end-plate* dan bagian lainnya sebesar 40 mm. Penerapan ukuran *mesh* ini telah melalui trial-error. Jika *mesh* diterapkan dengan ukuran yang sama pada semua elemen akan menghasilkan bentuk *mesh* yang tidak beraturan khususnya pada bagian area lubang baut seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. Tampilan *meshing* model validasi

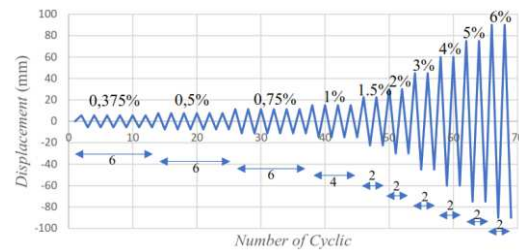


Gambar 5. Tampilan mesh dengan ukuran yang sama pada setiap elemen

Pemodelan Modifikasi Sambungan

Pemodelan modifikasi sambungan direncanakan 6 model modifikasi. Dimensi elemen struktur, *material properties*, *boundary condition*, dan ukuran *meshing* pada setiap model menggunakan data yang sama dengan yang digunakan dalam pemodelan validasi sebelumnya. Perbedaannya terdapat pada detail model sambungan dan pembebanan yang hanya dilakukan

dengan beban *cyclic* yang telah disesuaikan dengan aturan dalam FEMA[11].



Gambar 6. Beban siklik menyesuaikan FEMA [11]

Dari keenam model modifikasi, Model-1 dan Model-2 adalah model awal menggunakan jenis *stiffener* yang sama dengan yang digunakan dalam studi Shi dkk. [4]. Perbedaan Model-1 dan Model-2 adalah Model-2 menggunakan *continuity plate* pada ujung *end-plate*. Model-3 sampai Model-6 adalah model sambungan yang menggunakan *T-Stiffener*. Detail setiap modelnya diringkas dalam Tabel 5.

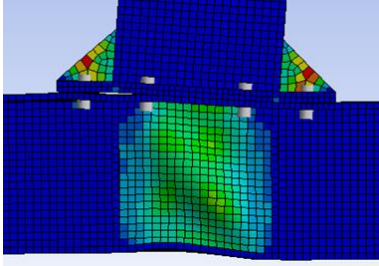
HASIL dan PEMBAHASAN

Validasi Hasil Model ANSYS dengan Hasil Eksperimen

Proses simulasi di ANSYS diawali dengan pendefinisian properti material dan kondisi pembebanan yang relevan dengan jurnal eksperimental untuk dilakukan validasi hasil untuk menguji keakuratan dari pemodelan ANSYS. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan pola kegagalan dan kurva histeris Momen-Rotasi dari hasil pemodelan dalam ANSYS dengan hasil eksperimental Shi dkk. [4].

Perbandingan pola kegagalan dalam penelitian eksperimental Shi dkk. [4] dengan hasil pemodelan dalam aplikasi ANSYS ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Pola kegagalan menunjukan kesamaan yaitu muncul gap antara *end-plate* dengan *flange* kolom yang dapat diartikan telah mengalami pelelehan.

Terlihat juga pada hasil pemodelan dan eksperimental mengalami tekukan pada area *panel zone*



Gambar 7. Pola kegagalan hasil pemodelan ANSYS

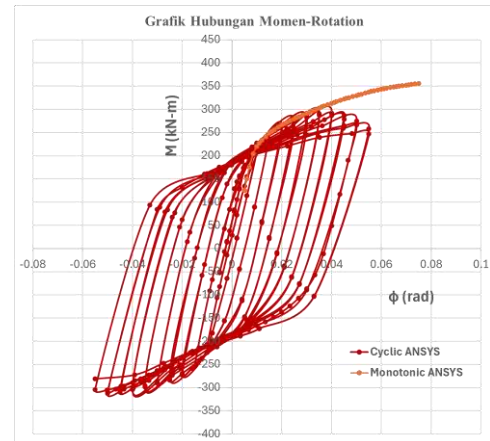


Gambar 8. Pola kegagalan eksperimental [4]

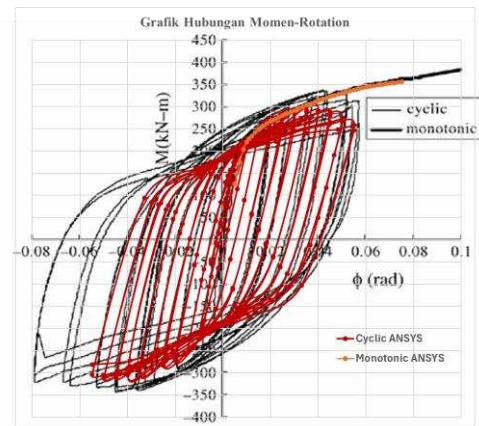
Kurva histeris dari hasil *running* menggunakan aplikasi ANSYS diperoleh dari penggunaan *chart* dari data *Force Reaction* (N) dan *Deformation* (mm) yang kemudian diolah dan diubah menjadi *chart* hubungan *Moment* (kNm) dan *Rotation* (rad) sehingga menghasilkan kurva histeris pengujian dengan beban *cyclic* dan *monotonic* seperti pada Gambar 9. Kurva histeris dari ANSYS kemudian dibandingkan dengan kurva histeris model JD6 dalam penelitian Shi dkk. [4], seperti pada Gambar 10.

Dari perbandingan kurva histeris pada Gambar 9 terlihat tidak menunjukkan perbedaan yang jauh, khususnya pada pengujian dengan beban *monotonic* yang menunjukkan bentuk grafik yang sama persis dengan hasil eksperimental. Ada perbedaan pada grafik pengujian dengan beban *cyclic* yang dapat disebabkan data *multilinear kinematic hardening* yang digunakan dalam mendefinisikan sifat

non-linear dari suatu material dalam ANSYS berbeda dengan kondisi asli material dalam penelitian eksperimental. Namun perbedaan nilai M_u dari eksperimental dan aplikasi ANSYS menunjukkan selisih di bawah 10% sehingga dapat disimpulkan penggunaan ANSYS sebagai program bantu dalam penelitian ini dapat dilakukan.



Gambar 9. Kurva histeris aplikasi ANSYS



Gambar 10. Perbandingan kurva histeris ANSYS dan eksperimental

Tabel 4. Perbandingan nilai M_u

Spesimen/Model	M_u (kN.m)	ΔM_u (%)
JD-6 (Eksperimen)	336,2	0,0
Model (ANSYS)	313	7,0

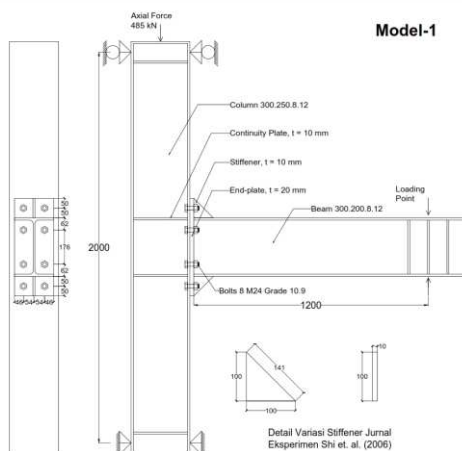
Hasil Analisis Model Modifikasi

Hasil analisis dari seluruh model modifikasi pada studi ini berupa pola kegagalan, kurva histeris, dan tegangan

yang terjadi pada setiap model. Pola kegagalan ditinjau dari tegangan *von-mises* dan *strain energy* pada area sambungan. Kurva histeris diperoleh dari data *Force Reaction* (N) dan *Deformation* (mm) yang kemudian diolah dan diubah menjadi *chart* hubungan *Moment* (kNm) dan *Rotation* (rad). Kapasitas momen akan ditinjau pada saat rotasi 4% (rad) sesuai dengan persyaratan sambungan terpraktualifikasi AISC 341-16 section E3.6b.

Model-1

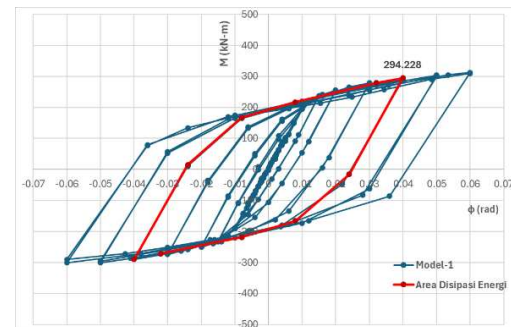
Model-1 adalah model sambungan yang sama dengan spesimen JD-6 pada studi Shi dkk. [4] namun beban yang diaplikasikan pada Model-1 telah disesuaikan dengan aturan *cyclic test* dalam FEMA [11]. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Detail konfigurasi Model-1

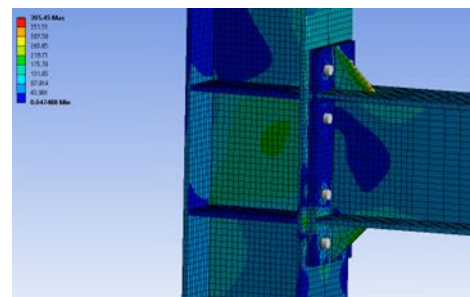
Gambar 11 menunjukkan kurva histeris dari Model-1 yang dapat dilihat kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% menunjukkan angka 294,23 kN-m. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model sambungan mengalami degradasi kekakuan adalah sebesar 303,67 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm.

Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-1, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 12 adalah sebesar 2.333,05 kN.m-rad.



Gambar 12. Kurva histeris Model-1

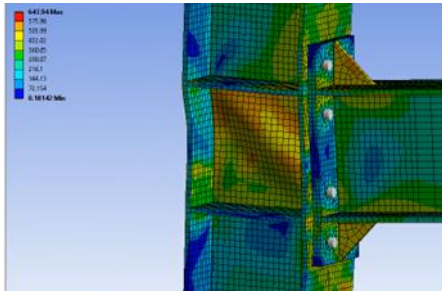
Pelelehan awal yang terjadi pada Model-1 pada saat *step*-12 dengan *displacement* sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Pelelehan awal terjadi pada area *stiffener*, muka kolom dan *panel zone*. Tegangan yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 395,45 MPa.



Gambar 13. Tegangan *von-mises* Model-1 *step*-12

Gambar 14 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-1. Dapat dilihat model mengalami *buckling* pada area *end-plate*, *panel zone*, dan bagian sayap kolom. *Buckling* ini menyebabkan kurva histeris mengalami degradasi kekakuan. Tegangan yang terjadi pada saat *step* akhir ini adalah sebesar 614 MPa. Perilaku kegagalan yang terjadi pada Model-1 ini tidak diperbolehkan terjadi pada struktur bangunan karena tidak memenuhi ketentuan *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) sehingga dalam studi ini dilakukan modifikasi

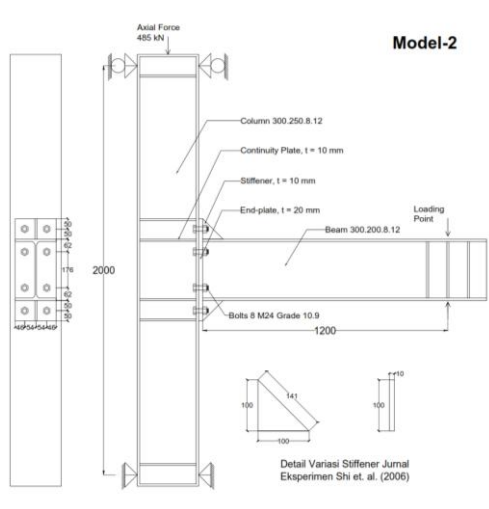
pada sambungan untuk mencegah kegagalan pada area *panel zone* dan sayap kolom.



Gambar 14. Tegangan von-mises Model-1 step-68

Model-2

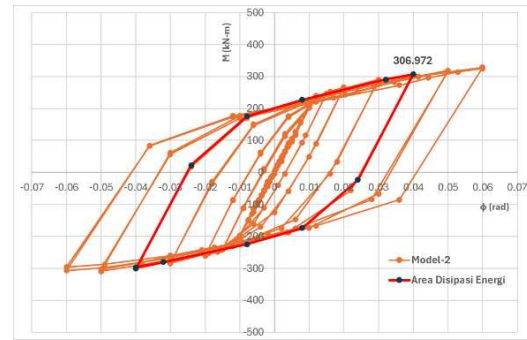
Model-2 menggunakan jenis *stiffener* yang sama dengan Model-1 namun dengan penambahan *continuity plate*. Mutu model yang digunakan sama, yaitu Q-345 untuk elemen profil baja dan plat *stiffener* dan baut menggunakan Grade 10.9. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Detail konfigurasi Model-2

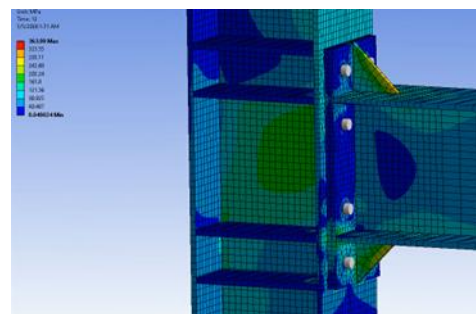
Gambar 16 menunjukkan kurva histeris dari Model-2. Dapat dilihat kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% sebesar 306,97 kN-m. Penambahan *continuity plate* membuat kapasitas momen mengalami peningkatan cukup signifikan, yaitu meningkat 4,33% dibandingkan dengan Model-1. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model sambungan

mengalami degradasi kekakuan adalah sebesar 318,82 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm. Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-2, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 16 adalah sebesar 2.421,30 kN.m-rad atau meningkat 3,78% dari Model-1.



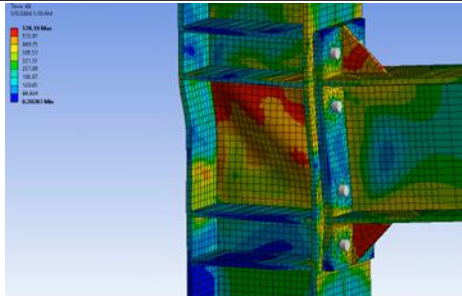
Gambar 16. Kurva histeris Model-2

Pelelehan awal yang terjadi pada Model-1 pada saat *step*-12 dengan *displacement* sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17. Pelelehan awal terjadi pada area *stiffener*, muka kolom dan *panel zone*. Tegangan yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 363,99 MPa.



Gambar 17. Tegangan von-mises Model-2 step-12

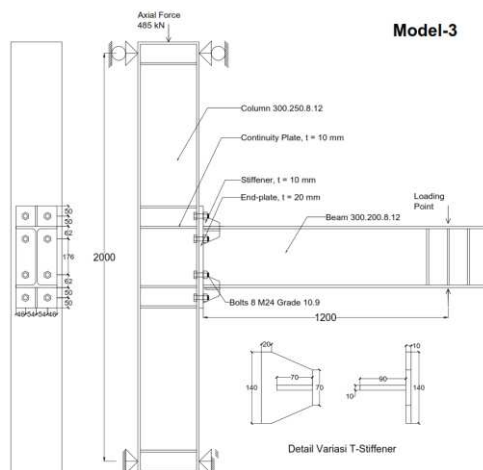
Gambar 18 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-2. Lokasi *buckling* masih sama dengan Model-1 yaitu berpusat pada area *end-plate*, *panel zone*, dan bagian sayap kolom. Meskipun lokasi *buckling* sama, tegangan maksimal yang terjadi pada Model-2 saat *step* akhir mengalami penurunan menjadi 578,19 MPa.



Gambar 18. Tegangan *von-mises* Model-2 *step-68*

Model-3

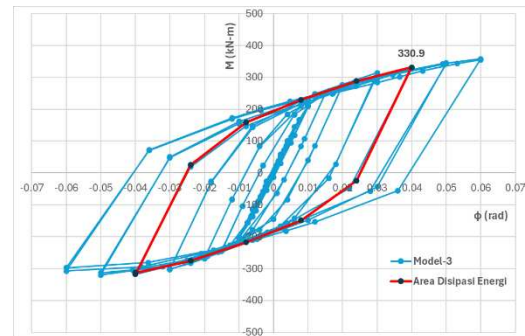
Model-3 merupakan model modifikasi dengan menggunakan *T-Stiffener* yang dilas pada sayap balok dan sayap kolom. Panjang *T-Stiffener* vertikal pada Model-3 dibuat sama dengan jarak ujung *stiffener* awal ke muka sayap kolom, yaitu 120 mm. Tebal *T-Stiffener* setebal *stiffener* awal, yaitu 10 mm. Mutu model yang digunakan sama, yaitu Q-345 untuk elemen profil baja dan plat *stiffener* dan baut menggunakan *Grade* 10,9. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Detail konfigurasi Model-3

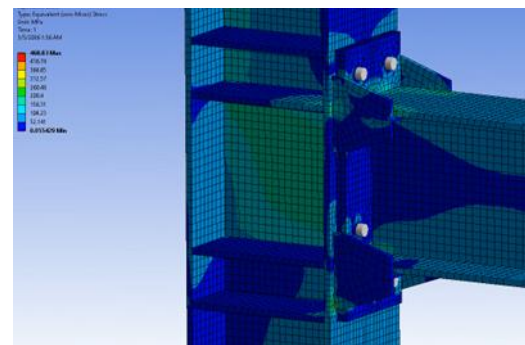
Kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% sebesar 330,9 kN-m. Penggunaan *T-stiffener* dengan panjang 120 mm membuat kapasitas momen mengalami peningkatan yang signifikan, yaitu meningkat 12,46% dibandingkan dengan Model-1. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model

sambungan mengalami degradasi kekakuan adalah sebesar 345,71 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm. Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-1, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 20 adalah sebesar 2.430,57 kN.m-rad atau meningkat 4,18% dari Model-1.



Gambar 20. Kurva histeris Model-3

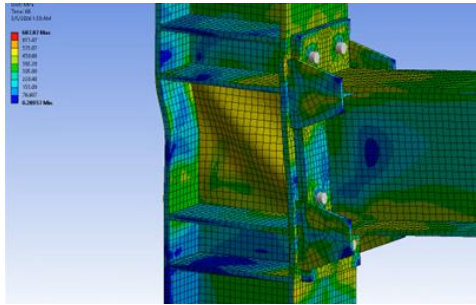
Pelelehan awal yang terjadi pada Model-3 sudah terjadi pada *step* awal dengan *displacement* sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21. Pelelehan awal terjadi dominan pada area ujung *stiffener* yang menempel pada muka sayap kolom. Tegangan maksimal yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 468,83 MPa.



Gambar 21. Tegangan *von-mises* Model-3 *step-1*

Gambar 22 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-3 dengan penggunaan *T-Stiffener*. Lokasi *buckling* masih menunjukkan persamaan dengan Model-1 dan Model-2. Namun konsentrasi tegangan pada *panel zone* lebih berkurang dibandingkan 2 model

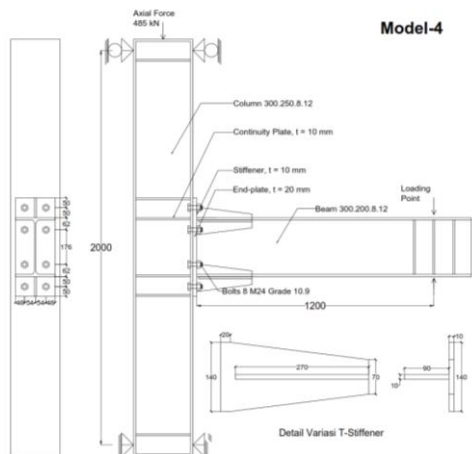
sebelumnya. Tegangan maksimal yang terjadi pada saat *step* akhir ini adalah sebesar 687,87 MPa.



Gambar 22. Tegangan von-mises Model-3 *step*-68

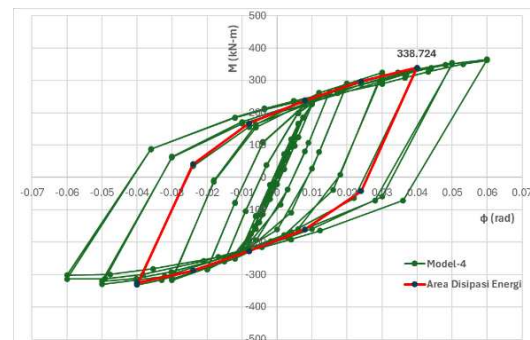
Model-4

Model-4 merupakan model modifikasi dengan menggunakan *T-Stiffener* yang dilas pada sayap balok dan sayap kolom. Panjang *T-Stiffener* vertikal pada Model-4 dibuat lebih panjang dibandingkan dengan Model-3, yaitu 300 mm. Ukuran dan bentuk *T-Stiffener* pada Model-4 mengikuti bentuk *T-Stiffener* dalam studi Ayoubi & Ghobadi [5]. Tebal *T-Stiffener* setebal *stiffener* awal, yaitu 10 mm. Mutu model yang digunakan sama, yaitu Q-345 untuk elemen profil baja dan plat *stiffener* dan baut menggunakan *Grade* 10,9. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 23.



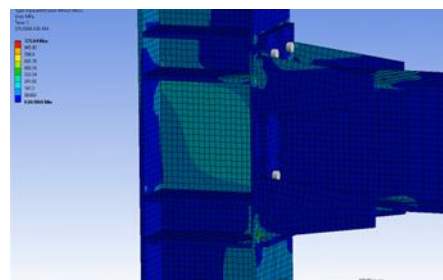
Gambar 23. Detail konfigurasi Model-4 Kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% sebesar 338,72 kN-m. Penggunaan *T-stiffener* dengan panjang 300 mm membuat kapasitas momen mengalami peningkatan 15,12%

dibandingkan dengan Model-1. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model sambungan mengalami degradasi kekakuan adalah sebesar 353,69 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm. Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-1, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 24 adalah sebesar 2.555,1 kN.m-rad atau meningkat 9,52% dari Model-1.



Gambar 24. Kurva histeris Model-4

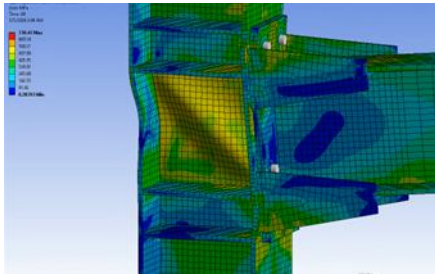
Sama seperti Model-3, pelelehan awal yang terjadi pada Model-4 sudah terjadi pada *step* awal dengan *displacement* sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25. Pelelehan awal terjadi dominan pada area ujung *stiffener* yang menempel pada muka sayap kolom. Tegangan maksimal yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 725,64 MPa.



Gambar 25. Tegangan von-mises Model-4 *step*-1

Gambar 26 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-4 dengan penggunaan *T-Stiffener* dengan ukuran yang lebih panjang. *Panel zone* masih mengalami *buckling* dengan tegangan

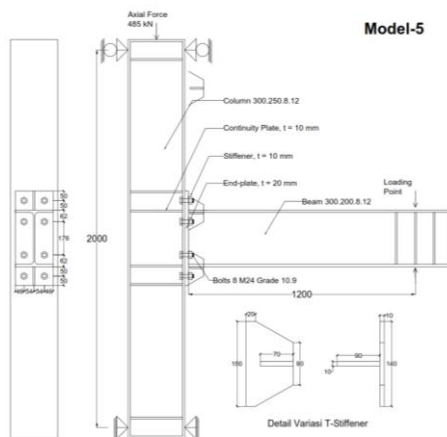
maksimal yang terjadi pada saat *step* akhir ini adalah sebesar 730,47 MPa.



Gambar 26. Tegangan von-mises Model-4 *step*-68

Model-5

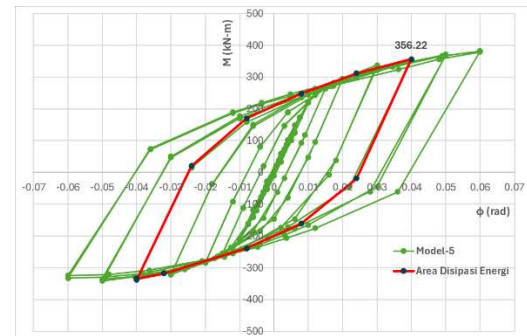
Model-5 merupakan variasi dari Model-3 dengan panjang *stiffener* yang sama namun tinggi *stiffener* vertikal divariasikan menjadi lebih tinggi menjadi 180 mm dari awalnya 140 mm. Tebal *T-Stiffener* setebal *stiffener* awal, yaitu 10 mm. Mutu model yang digunakan sama, yaitu Q-345 untuk elemen profil baja dan plat *stiffener* dan baut menggunakan *Grade* 10,9. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 27.



Gambar 27. Detail konfigurasi Model-5

Kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% sebesar 356,22 kN-m. Penggunaan *T-stiffener* dengan panjang 120 mm dan tinggi 180 mm membuat kapasitas momen mengalami peningkatan 21,07% dibandingkan dengan Model-1. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model

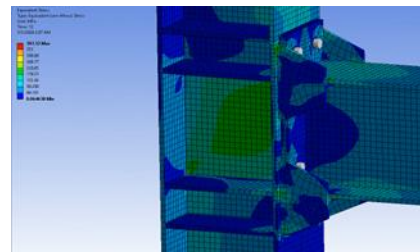
sambungan mengalami degradasi kekakuan adalah sebesar 371,00 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm. Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-1, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 28 adalah sebesar 2.587,60 kN.m-rad atau meningkat 10,91% dari Model-1.



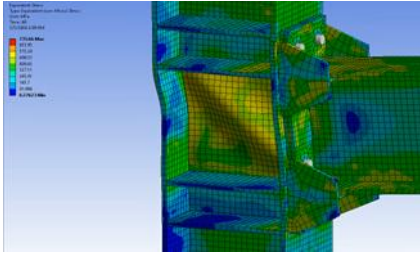
Gambar 28. Kurva histeris Model-5

Berbeda dengan Model-3 dan Model-4 yang mengalami pelelehan awal pada *step* 1, Model-5 baru menunjukkan pelelehan awal pada saat *step* 12. Dengan *displacement* yang masih sama sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 29. Pelelehan awal masih terjadi dominan pada area ujung *stiffener* yang menempel pada muka sayap kolom. Tegangan maksimal yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 397,12 MPa.

Gambar 30 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-5. *Panel zone* masih mengalami *buckling* dengan tegangan maksimal yang terjadi pada saat *step* akhir ini adalah sebesar 735,66 MPa.



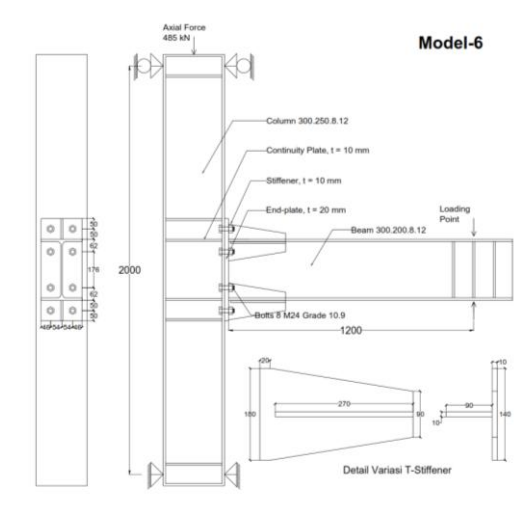
Gambar 29. Tegangan von-mises Model-5 *step*-12



Gambar 30. Tegangan von-mises Model-5 step-68

Model-6

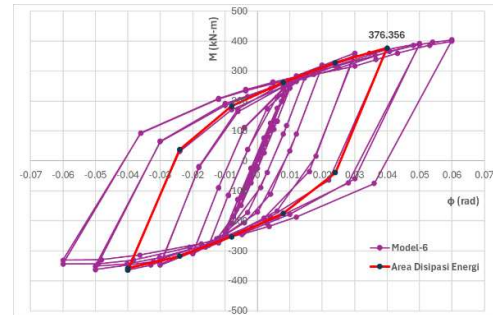
Model-6 merupakan variasi dari Model-4 dengan panjang *stiffener* yang sama 300 mm dan tinggi *stiffener* vertikal divariasikan menjadi lebih tinggi menjadi 180 mm dari awalnya 140 mm. Tebal *T-Stiffener* setebal *stiffener* awal, yaitu 10 mm. Mutu model yang digunakan sama, yaitu Q-345 untuk elemen profil baja dan plat *stiffener* dan baut menggunakan Grade 10,9. Geometri sambungan secara detail dapat dilihat pada Gambar 31.



Gambar 31. Detail konfigurasi Model-6

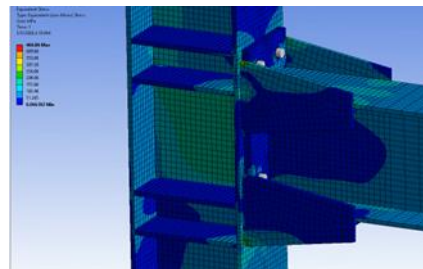
Kapasitas momen di muka kolom pada saat rotasi 4% sebesar 376,36 kN-m. Penggunaan *T-stiffener* dengan panjang 300 mm dan tinggi 180 mm membuat kapasitas momen mengalami peningkatan 27,91% dibandingkan dengan Model-1. Sedangkan momen maksimum yang terjadi sebelum model sambungan mengalami degradasi

kekakuan adalah sebesar 392,41 kN-m pada saat mengalami rotasi 5% dengan total *deformation* sebesar 75 mm. Sedangkan disipasi energi yang dihasilkan oleh Model-1, yang ditunjukkan pada area merah Gambar 32 adalah sebesar 2.763,39 kN.m-rad atau meningkat 18,45% dari Model-1.



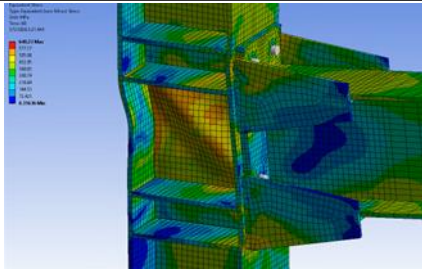
Gambar 32. Kurva histeris Model-6

Sama seperti Model-4, pelelehan awal yang terjadi pada Model-6 sudah terjadi pada *step* awal dengan *displacement* sebesar 5,625 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 33. Pelelehan awal terjadi dominan pada area ujung *stiffener* yang menempel pada muka sayap kolom. Tegangan maksimal yang terjadi pada saat pelelehan awal ini adalah 460,86 MPa.



Gambar 33. Tegangan von-mises Model-6 step-1

Gambar 34 merupakan *step* akhir pembebanan pada Model-6 dengan penggunaan *T-Stiffener* dengan ukuran yang lebih panjang dan tinggi. *Panel zone* masih tetap mengalami *buckling* dengan tegangan maksimal yang terjadi pada saat *step* akhir ini adalah sebesar 649,27 MPa.



Gambar 34. Tegangan *von-mises* Model-6 *step-68*

Komparasi Hasil Model Modifikasi

Perbandingan Kapasitas Momen Sambungan

Kapasitas momen dari ke-enam model modifikasi sambungan dapat dilihat pada Gambar 39. Model-1 atau model sambungan awal menghasilkan kapasitas momen sebesar 294,23 kN-m pada saat terjadi rotasi sebesar 4%. Setelah dimodifikasi dengan penambahan *continuity plate* atau Model-2, kapasitas momen menjadi 306,97 kN-m atau meningkat 4,33%. Saat *T-Stiffener* digunakan pada Model-3 dan Model-4 kapasitas momen naik cukup signifikan dan memiliki kapasitas momen yang relatif sama masing-masing sebesar 330,9 kN-m dan 338,72 kN-m atau meningkat sebesar 12,46% dan 15,12%. Sedangkan model sambungan variasi dari Model 3- dan Model-4 dengan tinggi *T-Stiffener* vertikal dibuat 180 mm, yaitu Model-5 dan Model-6, memiliki kapasitas momen masing-masing sebesar 356,22 kN-m dan 376,36 kN-m atau meningkat sebesar 21,07% dan 27,91% dari Model-1. Dari hasil perbandingan kapasitas momen setiap model sambungan, penggunaan *T-Stiffener* menghasilkan kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan model sambungan yang menggunakan *stiffener* biasa. Ukuran dari *T-Stiffener* juga mempengaruhi kapasitas momen pada sambungan.

Perbandingan Energi Disipasi

Energi disipasi yang dihasilkan ke-enam model modifikasi sambungan dapat dilihat pada Gambar 40. Penggunaan *T-Stiffener* pada model sambungan juga mempengaruhi energi disipasi pada sambungan cukup signifikan. Model-1 atau model sambungan awal menghasilkan energi disipasi terkecil yaitu sebesar 2.333,05 kN.m-rad. Model-2 dengan penambahan *continuity plate* pada sambungan menghasilkan energi disipasi sebesar 2.421,30 kN.m-rad atau meningkat 3,78%. Model-3 dan Model-4 yang menggunakan *T-Stiffener* dengan panjang masing-masing 120 mm dan 300 mm menghasilkan energi disipasi sebesar 2.430,57 kN.m-rad dan 2.555,1 kN.m-rad atau meningkat 4,18% dan 9,52%. Sedangkan, Model-5 dan Model-6 yang tinggi *T-Stiffener* vertikal 180 mm menghasilkan energi disipasi masing-masing sebesar 2.587,60 kN.m-rad dan 2.763,39 kN.m-rad atau meningkat 10,91% dan 18,45% dari Model-1.

Perbandingan *Panel Zone*

Kontur tegangan pada *panel zone* dari masing-masing model modifikasi sambungan menunjukkan hasil dan bentuk *buckling* yang sama. Hal ini dapat terjadi karena ukuran profil kolom dan balok yang sama pada tinggi dan tebal pada sayap dan badannya. Yang membedakan hanya pada lebar profil, balok memiliki lebar 200 mm dan kolom memiliki lebar profil 250 mm. Untuk membuktikannya dilakukan kontrol

Kontrol Strong Column – Weak Beam

Material Properties:

F_y balok = 409,0 MPa

F_u balok = 536,6 MPa

Profil kolom = 300x250x8x12

A_g kolom	$= 8,21 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Z_x kolom	$= 1,02 \times 10^6 \text{ mm}^3$
Profil balok	$= 300 \times 200 \times 8 \times 12$
A_g balok	$= 7,00 \times 10^3 \text{ mm}^2$
Z_x balok	$= 8,44 \times 10^5 \text{ mm}^3$
E	$= 195.452 \text{ MPa}$
R_y	$= 1,5$
P_u Lantai 1 (ETABS)	$= 209,65 \times 10^3 \text{ N}$
P_u Lantai 2 (ETABS)	$= 148,17 \times 10^3 \text{ N}$

Momen Plastis Kolom

Lantai 1

$$M_{pc1} = Z_{xc} \times \left(F_y - \frac{P_u}{A_g} \right)$$

$$M_{pc1} = 1,02 \times 10^6$$

$$\times \left(409 - \frac{209,65 \times 10^3}{8,21 \times 10^3} \right)$$

$$M_{pc1} = 391.133.349,5 \text{ Nmm}$$

$$= 391,13 \text{ kNm}$$

Lantai 2

$$M_{pc2} = Z_{xc} \times \left(F_y - \frac{P_u}{A_g} \right)$$

$$M_{pc2} = 1,02 \times 10^6$$

$$\times \left(409 - \frac{148,17 \times 10^3}{8,21 \times 10^3} \right)$$

$$M_{pc2} = 398.771.546,9 \text{ Nmm}$$

$$= 398,77 \text{ kNm}$$

Momen Plastis Balok

$$M_{pb} = C_{pr} \times R_y \times F_y \times Z_x$$

$$M_{pb} = 1,2 \times 1,5 \times 409 \times 8,44$$

$$\times 10^5$$

$$M_{pb} = 621.352.800 \text{ Nmm}$$

$$= 621,35 \text{ kNm}$$

Kontrol SCWB

$$\frac{\sum M_{pc}}{\sum M_{pb}} > 1$$

$$\frac{M_{pc1} + M_{pc2}}{2 \times M_{pb}} = \frac{391,13 + 398,77}{2 \times 621,35}$$

$$0,636 < 1 \quad (\text{Tidak memenuhi SCWB})$$

Dengan ukuran profil yang relatif sama ini membuat sambungan tidak dapat mencapai sistem strong column-weak beam meskipun telah dilakukan modifikasi untuk memperkuat sambungan tersebut. Sehingga diperlukan studi lanjutan dengan menggunakan modifikasi perkuatan lainnya, seperti penambahan *double plate* pada *panel zone*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil perbandingan kapasitas momen setiap model sambungan, penggunaan *T-Stiffener* menghasilkan kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan model sambungan yang menggunakan *stiffener* biasa. Ukuran dari *T-Stiffener* juga mempengaruhi kapasitas momen pada sambungan. Model-1 atau model sambungan awal menghasilkan kapasitas momen sebesar 294,23 kN-m pada saat terjadi rotasi sebesar 4%. Kapasitas momen tertinggi dihasilkan oleh Model-6, yaitu sebesar 376,36 kN-m atau meningkat sebesar 27,91% dari Model-1.
2. Penggunaan *T-Stiffener* pada model sambungan juga mempengaruhi energi disipasi pada sambungan cukup signifikan. Model-1 atau

model sambungan awal menghasilkan energi disipasi terkecil yaitu sebesar 2.333,05 kN.m-rad. Model-6 dengan penggunaan *T-Stiffener* terbesar menghasilkan energi disipasi tertinggi, yaitu sebesar 2.763,39 kN.m-rad atau meningkat 18,45% dari Model-1.

3. Semua model sambungan yang dianalisis menunjukkan kontur tegangan dan *buckling* yang relatif sama pada *panel zone*. Hal ini terjadi karena ukuran profil kolom dan balok yang relatif sama yang membuat sambungan tidak dapat mencapai sistem *strong column-weak beam* meskipun telah dilakukan modifikasi untuk memperkuat sambungan tersebut. Sehingga diperlukan studi lanjutan dengan menggunakan modifikasi perkuatan lainnya, seperti penambahan *double plate* pada *panel zone*.

Untuk penelitian selanjutnya yang akan meneliti kinerja *Prequalified Moment Connection Bolted Stiffened Extended End-Plate* disarankan menggunakan sistem struktur kolom dan balok yang telah memenuhi kriteria *Strong Column Weak Beam* (SCWB) agar *buckling* awal terjadi pada bagian *stiffener* dan bagian tubuh elemen balok. Saran ukuran yang dapat digunakan adalah *H-Beam* 350.350.12.19 sebagai kolom dan IWF 350.175.7.11 sebagai balok.

DAFTAR PUSTAKA

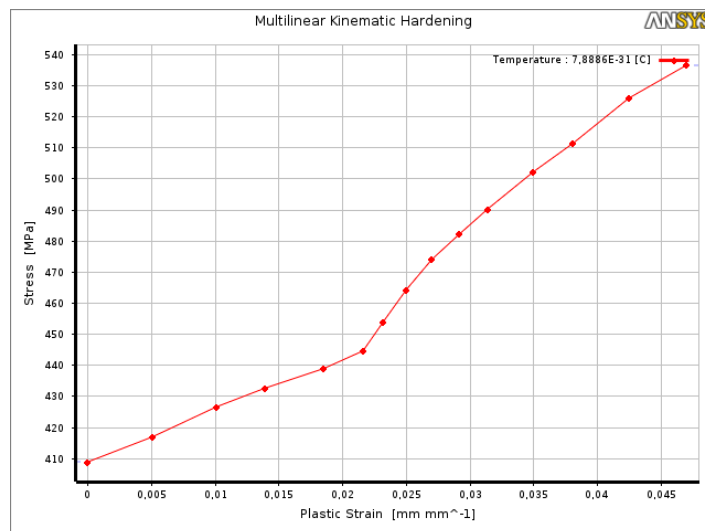
- [1] E. A. Sumner, F. A. Charney, W. S. Easterling, S. M. Holzer, and M. P. Singh, "UNIFIED DESIGN OF EXTENDED END-PLATE MOMENT CONNECTIONS SUBJECT TO CYCLIC LOADING," 2003.
- [2] American Institute of Steel Construction (AISC), *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016. [Online]. Available: www.aisc.org
- [3] K. Wang *et al.*, "Experimental and numerical research on hysteretic behavior of bolted end-plate connections," *Structures*, vol. 73, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.108397.
- [4] G. Shi, Y. Shi, and Y. Wang, "Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 5, pp. 703–716, May 2007, doi: 10.1016/j.engstruct.2006.06.016.
- [5] M. R. Ayoubi and M. S. Ghobadi, "Seismic retrofitting of beam to double-I built-up column moment connections by lateral T-stiffeners: Experimental and numerical study," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 205, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.jcsr.2023.107875.
- [6] D. Almirah Hariadi, B. Suswanto, Y. Tajunnisa, and H. Kristijanto, "Analisis Numerik Sambungan Bolted Extended End Plate (BEEP) Menggunakan Program Bantu ANSYS," 2025.
- [7] O. Yılmaz, S. Bekiroğlu, F. Alemdar, G. Arslan, B. Sevim, and Y. Ayvaz, "Experimental investigation of bolted stiffened end-plate and bolted flange-plate connections," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, no. 3, 2019, doi: 10.1590/1679-78255089.
- [8] B. Suswanto, F. Ghifari, Y. Tajunnisa, and D. Iranata, "Retrofitting Bolted Flange Plate (BFP) Connections Using Haunches and Extended End-Plates," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 10, no. 8, pp.

- 2450–2470, Aug. 2024, doi: 10.28991/CEJ-2024-010-08-03.
- [9] S. Li, X. Xie, and Y. Liao, “Improvement of cyclic void growth model for ultra-low cycle fatigue prediction of steel bridge piers,” *Materials*, vol. 12, no. 10, May 2019, doi: 10.3390/ma12101615.
- [10] Y. Lu, J. Jiang, Q. Chen, W. Cai, W. Chen, and J. Ye, “Fracture behavior of Grade 10.9 high-strength bolts and T-stub connections in fire,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 199, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107618.
- [11] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *FEMA 350 - Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002.

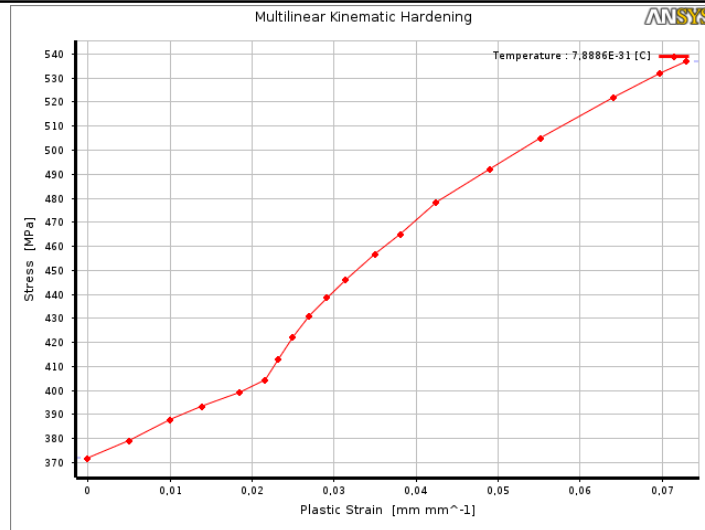
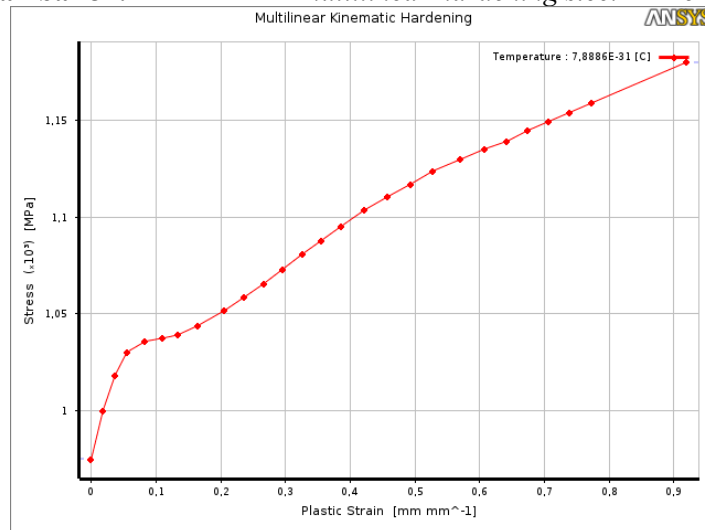
LAMPIRAN TABEL DAN GAMBAR

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus and Poisso...			
6	Young's Modulus	2,06E+05	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,7167E+11	Pa		
9	Shear Modulus	7,9231E+10	Pa		
10	Multilinear Kinematic Hardening	Tabular			
11	Scale	1			
12	Offset	0	MPa		

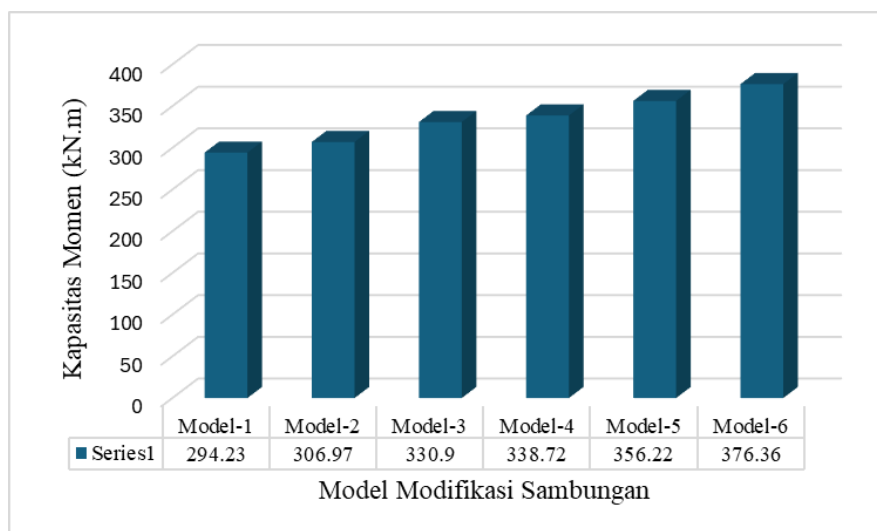
Gambar 35. Properti material pada aplikasi ANSYS



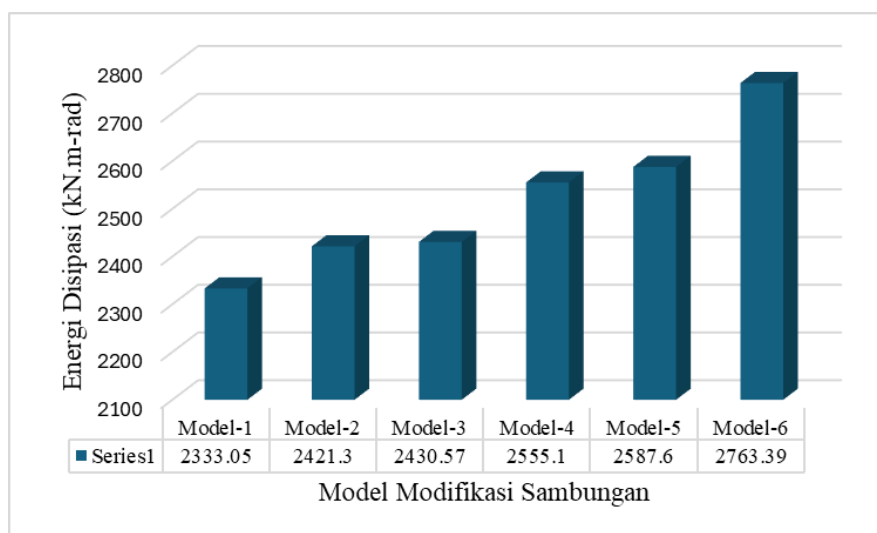
Gambar 36. Pendefinisian *multilinear hardening steel* $t < 16$ mm

Gambar 37. Pendefinisian *multilinear hardening steel t > 16 mm*Gambar 38. Pendefinisian *multilinear hardening bolts grade 10,9*Tabel 5. Detail model modifikasi *T-stiffener*

Model	Panjang T-Stiffener Vertikal (mm)	Tinggi T-Stiffener Vertikal (mm)	Lebar T-Stiffener Horizontal (mm)
Model-3	100	140	90
Model-4	300	140	90
Model-5	100	180	90
Model-6	300	180	90



Gambar 39. Perbandingan kapasitas momen sambungan



Gambar 40. Perbandingan Energi Disipasi