

Pengembangan Sistem Sambungan Seismik dengan Mekanisme Kunci yang Dapat Diganti pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen

Prima Sukma Yuana*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Email: prima.s.yuana@gmail.com

Muslinang Moestopo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Email: mmoestopo@gmail.com

Dyah Kusumastuti

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Email: dkusumastuti@gmail.com

Made Suarjana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Email: mdsuarjana@yahoo.com

Abstrak

Dua pendekatan dalam desain sambungan tahan gempa telah digunakan sejauh ini. Pertama memanfaatkan balok sebagai sekering, berikutnya adalah melibatkan elemen tambahan sebagai sekering. Tuntutan untuk struktur berkelanjutan, membuat sistem struktur harus mudah dan cepat diperbaiki setelah gempa bumi. Sudah banyak dikembangkan penggunaan elemen tambahan pada komponen sambungan sebagai sekering. Beberapa mekanisme sambungan masih bisa dikembangkan lebih lanjut, salah satunya adalah sistem kunci. Namun dari keseluruhan penelitian, mekanisme disipasi energi masih dipusatkan pada elemen balok yang dimodifikasi dengan kunci. Kebaruan dan orisinalitas penelitian ini adalah mengembangkan sistem sambungan dengan kunci sebagai sekering yang dapat diganti. Model yang diusulkan menunjukkan perilaku seismik yang cukup baik. Sambungan berhasil diatur sehingga kegagalan hanya terjadi pada elemen sekering, elemen balok dan kolom masih pada rentang elastis. Penelitian dilakukan dengan membuat model numerik menggunakan program berbasis elemen hingga Abaqus/Standard. Evaluasi dilakukan pada sistem sambungan berdasarkan kriteria dalam AISC 341 menggunakan pola pembebanan monotonik dan siklik. Parameter yang dianalisis antara lain pola keruntuhan sambungan, kemampuan deformasi, perilaku histeresis beban vs perpindahan, karakteristik kekuatan, karakteristik kekakuan, dan kapasitas disipasi energi. Penyerapan energi pada elemen kunci berhasil membuat kerusakan hanya terpusat pada elemen sekering, sehingga sesuai dengan keunggulan utama dari sistem ini yaitu kemudahan dalam penggantian elemen sekering yang rusak akibat gempa.

Kata-kata Kunci: Sambungan, balok-kolom, sekering, kunci, penyerapan energi

Abstract

Two approaches in earthquake-resistant steel beam-column joints have been utilized, one involves using the beam as a fuse, while the other involves additional members as sacrificial elements. The current demand for sustainable structures requires systems that must be easily and quickly repaired after an earthquake. Various types of connections have been developed. Several connection mechanisms can still be developed further, interlock mechanism is one of them. However, from the entire research, the energy dissipation mechanism is still focused on beam elements modified with interlocking. The novelty and originality of this research is to develop a connection system with an interlock as a replaceable fuse element. The proposed model shows quite good seismic behavior. The connection was successfully arranged so that failure only occurred in the fuse element, the beam and column elements were still in the elastic range. The research was carried out by creating a numerical model using the Abaqus/Standard and the evaluation based on the criteria in AISC 341 using monotonic and cyclic loading. The parameters analyzed included connection failure patterns, deformation capability, load vs displacement hysteresis behavior, strength characteristics, stiffness characteristics, and energy dissipation capacity.

Keywords: Connection, joint, beam-column, fuse, interlock, replaceable, energy dissipation

* Penulis Korespondensi: prima.s.yuana@gmail.com

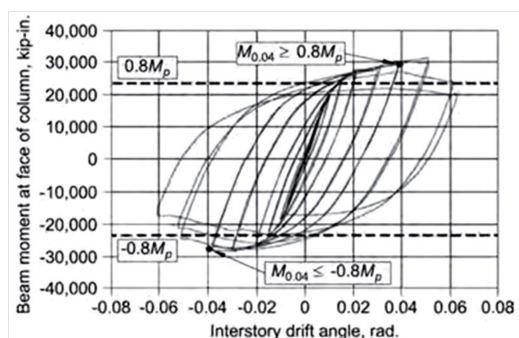
1. Pendahuluan

Potensi gempa yang tinggi membuat kecenderungan penelitian selalu mengarah pada segala hal yang berkaitan dengan ketahanan gempa. Bagaimana mengembangkan metode analisis, pembebanan, material, dan struktur yang tahan terhadap gempa. Hingga saat ini, sistem struktur baja maupun beton yang dominan digunakan masih mengandalkan sistem rangka pemikul momen, hal ini dikarenakan sistem rangka pemikul momen memberikan visibilitas dalam hal arsitektural. Namun dikarenakan Indonesia memiliki potensi gempa yang sangat tinggi, maka mayoritas wilayah akan mensyaratkan penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), dimana sistem tersebut memerlukan detailing sambungan yang cukup rumit.

Desain sambungan SRPMK dilakukan dengan menggunakan konsep desain kapasitas. Tujuan utamanya adalah untuk memastikan sambungan lebih kuat dari elemen yang disambungkannya. Langkah yang perlu dilakukan sebelum merancang sambungan adalah merancang elemen lain yaitu balok dan kolomnya agar memenuhi persyaratan *strong column weak beam*. Saat merancang balok dan kolom, perlu mendefinisikan terlebih dahulu nilai kuat lentur dan kuat gesernya karena nilai gaya yang digunakan dalam perhitungan belum tentu hasil dari analisis menggunakan program hitung. Berbeda pendekatan yang dilakukan untuk mendapatkan kuat lentur dan kuat geser. Kuat lentur diperoleh berdasarkan analisis elastis, sementara kuat geser berdasarkan momen lentur maksimum di posisi sendi plastis (M_{pr}). M_{pr} merupakan momen maksimum karena sudah memperhitungkan faktor kuat lebih bahan (R_y) dan kondisi *strain hardening* (C_{pr}).

Ketika persyaratan balok dan kolom sudah terpenuhi, selanjutnya dilakukan perencanaan sambungan tahan gempa. Dimana proses desain sambungan tahan gempa dapat berpedoman pada AISC 358-22. Namun apabila ingin mengembangkan sambungan jenis baru, maka kinerja sambungannya harus memenuhi ketentuan AISC 341-22. Persyaratan yang harus dipenuhi yaitu sambungan harus mampu menahan goyangan dengan sudut simpangan antar lantai (*drift*) minimal 0.04 radian dan tidak mengalami degradasi tahanan lentur melebihi 20% M_p balok, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Dokumen AISC 358-22 menjelaskan secara rinci pilihan tipe-tipe sambungan yang dapat digunakan.



Gambar 1. Persyaratan sambungan SRPMK (AISC 341-22)

Ketika petunjuk pada dokumen tersebut diikuti, mestinya kinerja bangunan akan sesuai yang diharapkan, tidak akan mengalami kegagalan pada sambungan, dan terhindar dari salah satu potensi kegagalannya yaitu *prying action* (Krishnamurty, 1978; Krishnamurty, 1980). Kolom dan sambungan tetap elastis, balok yang ditugaskan mendisipasi energilah yang mengalami kerusakan (kecuali sistem *Simpson Strong-Tie Strong-Frame* dan *Durafuse*).

Di sisi lain, tren yang berkembang saat ini adalah membuat sistem struktur yang mudah dan cepat diperbaiki setelah gempa. Hal ini disebabkan oleh sulitnya proses penggantian balok ketika terjadi kerusakan. Salah satu langkah yang banyak dikembangkan saat ini adalah penggunaan elemen tambahan sebagai penyerap energi, dan tidak lagi mengandalkan balok sebagai sekering. Terdapat bermacam-macam sistem baru yang dikembangkan pada ranah ini, antara lain sistem yang mengandalkan mekanisme pelelehan lentur (Khalili, 2021), pelelehan geser (Kobori, 1992; Oh dkk, 2009; Park & Oh, 2020), pelelehan tarik (Men dkk, 2023), mekanisme *friction-slip* (Liu dkk, 2023), dan mekanisme kuncian (Viscomi dkk, 1994; Perreira dkk, 1997; Matis dkk, 2019; Shemshadian dkk, 2019; Shemshadian dkk, 2020).

Penelitian mengenai sambungan yang memanfaatkan mekanisme kuncian memang sudah pernah dilakukan sebelumnya, namun berdasarkan hasil penelitian-penelitian tersebut, sambungan dengan memanfaatkan elemen sekring yang dapat diganti cenderung akan memiliki kapasitas (terutama kuat leleh) yang kecil dikarenakan mekanismenya memaksa kelelahan terjadi pada elemen sekring yang biasanya berukuran lebih kecil. Kondisi tersebut tentu masih bisa ditingkatkan, sehingga penelitian ini dirancang untuk mengembangkan sistem sambungan seismik dengan sekring berupa kuncian yang dapat diganti, dengan konfigurasi bentuk yang baru, dan memiliki kekuatan yang tinggi (mendekati sistem sambungan yang tak dapat diganti). Selain itu sistem struktur yang diusulkan harus tetap memiliki kekakuan, daktilitas, dan disipasi energi yang baik.

Penelitian ini dilakukan untuk memahami perilaku dan mekanisme kegagalan dari sambungan balok-kolom dengan kuncian terhadap beban gempa. Analisis dilakukan melalui kajian numerik pada benda uji terhadap beban monotonik dan siklik bolak-balik akibat gempa. Perilaku sambungan dievaluasi diantaranya berdasarkan parameter kekuatan, kekakuan, daktilitas, kapasitas disipasi energi, dan distribusi tegangan dan regangan yang terjadi, sehingga memastikan kegagalan hanya akan terjadi pada elemen sekring dan sistem sambungan memenuhi syarat sesuai AISC 341 sebagai sambungan tahan gempa.

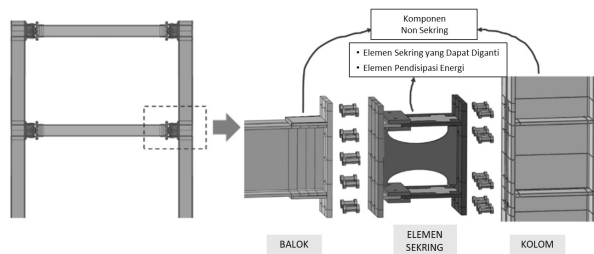
2. Metode Penelitian

Penelitian mengenai perilaku sambungan tipe *end plate moment* dengan kuncian ini harus dilakukan ke dalam beberapa tahapan untuk dapat memperoleh hasil yang dituju. Diawali dengan kajian literatur dilanjutkan dengan analisis secara numerik untuk mendapatkan

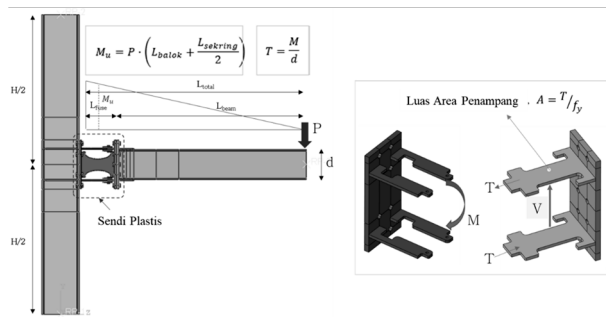
gambaran mengenai perilaku model sambungan dari respons *linear* hingga *nonlinear*, sampai mengalami kegagalan. Analisis numerik ini dilakukan menggunakan program berbasis elemen hingga Abaqus/Standard.

2.1 Konsep sambungan dengan mekanisme kuncian

Gambar 2 memperlihatkan model sambungan yang diusulkan dengan memanfaatkan mekanisme kuncian, sementara mekanisme penyaluran gaya pada sistem kuncian dapat dilihat pada **Gambar 3**, yaitu dengan mengubah momen lentur menjadi gaya tarik pada *flange*, dan akan gagal dengan memanfaatkan kelelahan tumpu (Shemshadian dkk., 2019). Sementara gaya geser diterima oleh elemen badan (*web*) yang dibuat khusus dengan konfigurasi tertentu sehingga dapat berperan sebagai pusat rotasi balok, memiliki kapasitas yang mampu menyerap energi yang besar, dan juga menahan gaya gravitasi balok ketika salah satu kuncian putus.



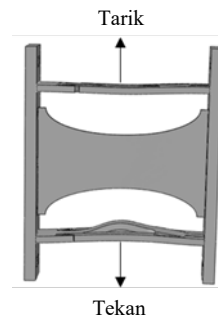
Gambar 2. Konfigurasi sambungan yang diusulkan



Gambar 3. Mekanisme penyaluran gaya

Performa elemen sekering tersebut akan menentukan bagaimana kondisi elemen struktur utamanya (balok dan kolom) setelah gempa besar, apakah terjadi kerusakan atau tidak pada elemen struktur utama (Al-Sabah dkk, 2020). Tidak diizinkan terjadi kerusakan pada elemen struktur utama, balok dan kolom harus masih dalam kondisi elastis sehingga memastikan penggantian elemen hanya pada elemen sekering.

Matis dkk, 2019 menyatakan bahwa penyaluran gaya tarik atau tekan akibat deformasi balok dapat memunculkan potensi kegagalan yang berbeda, *flange* yang tertekan mengandalkan tumpu secara langsung dari pelat, sementara *flange* yang tertarik mengandalkan kuncian (**Gambar 4**). Mekanisme kegagalan yang diharapkan adalah fraktur pada kuncian *flange* yang tertarik dan *buckling* pada *flange* yang tertekan.



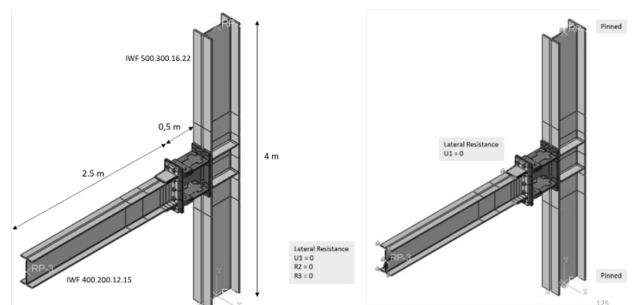
- Sisi tertarik akan menentukan kekuatan dari sistem sambungan karena kuncian membuat luas terkecil dari *flange* yang tertarik dan akan leleh terlebih dahulu.
- Sisi tertekan akan menyerap energi dalam dua fase, ketika masih elastis akan memberikan kekuatan melalui tumpu pelat, dan ketika sudah leleh serapan energi dilakukan melalui tekuk yang terjadi.

Gambar 4. Gaya pada elemen kuncian

Dapat dilihat pada **Gambar 3**, momen nominal (M) di sepanjang balok harus mampu menahan momen ultimit M_u akibat gaya luar P . Momen nominal (M) direncanakan sebesar momen leleh (M_y) balok. Untuk memenuhi aspek kekuatan, maka lebar elemen sekering harus didasarkan pada gaya tarik (T) akibat momen (M). Namun karena lebar minimum penampang tarik terletak pada elemen sekering, maka kegagalan akan terbentuk di posisi tersebut.

2.2 Konfigurasi struktur

Struktur dimodelkan sebagai sambungan balok-kolom eksterior seperti terlihat pada **Gambar 5**, dimodelkan sebagai kantilever dengan balok dihubungkan pada sumbu kuat dari kolom. Penentuan dimensi balok dan kolom ditetapkan berdasarkan hasil desain sesuai AISC 360-22, dimana untuk struktur SRPMK, penampang yang digunakan harus memenuhi angka kelangsingan untuk daktilitas tinggi (*highly ductile member*) sesuai AISC 341-22. Mutu material baja seluruhnya menggunakan ASTM A36, sedangkan baut mutu tinggi menggunakan ASTM A325.

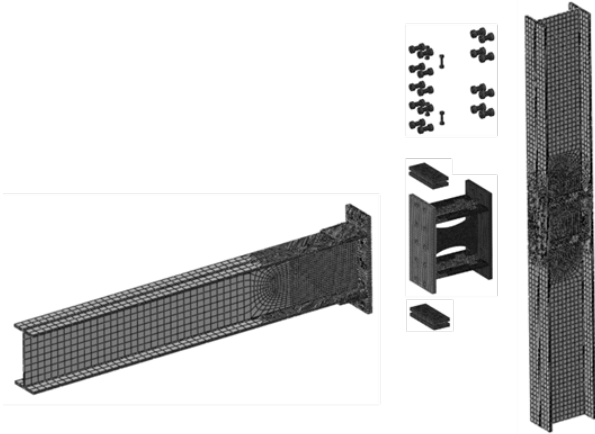


Gambar 5. Pemodelan struktur pada Abaqus/Standard

2.3 Pemodelan elemen hingga

Proses analisis dilakukan menggunakan Program Abaqus/Standard yang berbasis elemen hingga dengan memodelkan simulasi sambungan dengan kuncian yang diberikan beban gempa berupa beban monotonik dan siklik. *Meshing* model menggunakan tipe *1st Order 3D Solid-Reduced Integration C3D8R* dengan *enhanced hourglass control* untuk seluruh elemen. *Meshing* terkecil pada elemen kuncian menggunakan ukuran 5 mm, sementara bagian lain menggunakan ukuran 15 mm. Bagian elemen struktur utama (balok dan kolom) menggunakan *meshing* 15 mm, sementara area yang

jauh dari area sambungan menggunakan ukuran 15 mm x 50 mm. Untuk mencegah fenomena “hourglass”, sepanjang ketebalan elemen dibagi menjadi dua lapisan (Irvani, M. dkk., 2022). Secara lebih jelas dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Meshing elemen pada Abaqus/Standard

Model material yang digunakan adalah *Bi-Linear with Hardening* untuk seluruh elemen. Untuk memperhitungkan kontak antar permukaan baja yang bergesekan, digunakan koefisien friksi senilai 0.3 (AISC 341). Sementara untuk kontak yang saling menekan menggunakan fitur “*Hard Contact*” pada Program Abaqus/Standard, dengan mengizinkan terjadinya pemisahan akibat kontak antar permukaan. Selain itu, fitur “*NLGEOM*” diaktifkan untuk memperhitungkan pengaruh dari *geometric nonlinearity*.

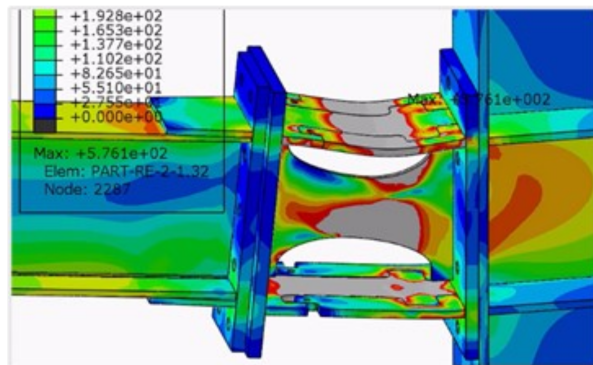
3. Hasil dan Pembahasan

Analisis numerik dilakukan sebagai studi awal untuk mendapatkan gambaran perilaku dari sistem sambungan yang diusulkan. Pertama yang harus dipastikan adalah mekanisme kegagalan dari sambungan, kegagalannya harus sesuai hierarki kekuatan yang direncanakan. Baru kemudian perilaku keseluruhan sambungan ditinjau terhadap persyaratan sambungan tahan gempa menurut *Seismic Provisions* (AISC 341).

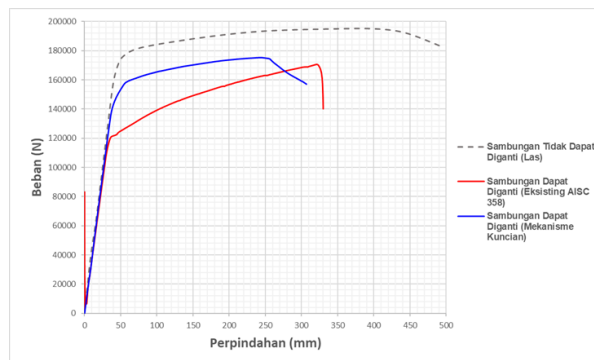
Elemen sekering dibagi menjadi dua bagian, kiri dan kanan (**Gambar 3**) yang dibuat saling mengunci.

Struktur dinilai gagal ketika terjadi sobek/putus pada kuncian seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. Hal tersebut sudah sesuai dengan hierarki kekuatan yang diharapkan. Kinerja sambungan sistem kuncian ini dirasa cukup baik terhadap gempa, konfigurasi sambungan diatur sedemikian sehingga kegagalan hanya terjadi pada elemen sekering.

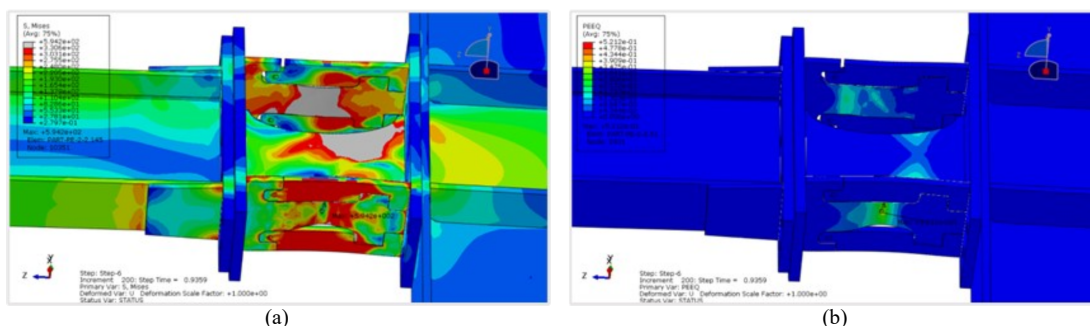
Kriteria kelelahan von Mises digunakan dalam simulasi ini, dan warna abu-abu dari *nephogram* tegangan seperti pada **Gambar 7a** memperlihatkan area yang sudah memasuki rentang inelastis ketika diberi beban siklik. Sementara elemen balok dan kolom masih pada rentang elastis ketika kekuatan maksimum sambungan tercapai. Distribusi regangan pada sambungan terlihat terlokalisasi pada area kuncian, seperti terlihat pada **Gambar 7b**. Sementara distribusi tegangan akibat beban monotonik dapat dilihat pada **Gambar 8**.



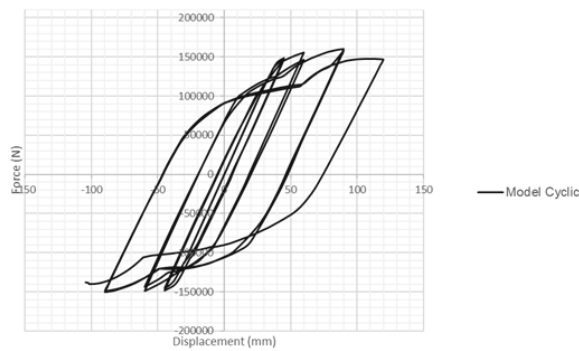
Gambar 8. Pola deformasi dan distribusi tegangan akibat beban monotonik



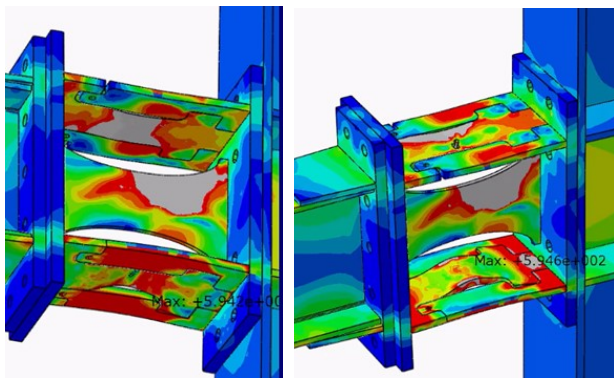
Gambar 9. Kurva beban vs perpindahan monotonik



Gambar 7. Distribusi tegangan von Mises (a), Distribusi regangan (b)



Gambar 10. Kurva beban vs perpindahan siklik



Gambar 11. Fraktur pada elemen sekering

Kurva beban-perpindahan struktur akibat beban monotonik dapat dilihat pada **Gambar 9** sementara akibat beban siklik dapat dilihat pada **Gambar 10**. Kurva beban-perpindahan (**Gambar 9**) mengindikasikan besaran kekuatan, kekakuan, dan daktilitas struktur tersebut. Dibandingkan dengan kapasitas balok yang dilas langsung ke kolom (balok sebagai sekring dan tidak dapat diganti), kekuatan dari sambungan yang diusulkan tidak melebihi acuan. Hal tersebut menjamin tidak terjadinya kelelahan pada balok ataupun kolom. Namun nilai kuat leleh tersebut lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem sambungan yang dapat diganti (eksisting dalam AISC 358). Adanya peningkatan nilai kuat leleh tersebut jelas menguntungkan karena balok akan memiliki kekuatan yang lebih besar, sehingga kapasitas lelehnya tidak mudah terlampaui dan lebih bisa dimaksimalkan kekuatannya.

Gambar 10 memperlihatkan kurva histeresis akibat beban siklik. Kurva yang gemuk menggambarkan perilaku struktur yang stabil dalam menerima beban gempa. Analisis siklik berhenti ketika terjadi sobek pada elemen sekring (**Gambar 11**). Penyerapan energi ditunjukkan dengan terlewatnya batas tegangan leleh pada elemen struktur, dimana warna abu-abu pada **Gambar 7** dan **Gambar 8** hanya terjadi pada elemen sekring. Hal tersebut menjadi indikasi tercapainya tujuan utama dari pengembangan sistem ini yaitu mengamankan balok dan kolom dari kerusakan. Namun begitu tetap ada hal yang mesti diperbaiki berikutnya, dimana terjadi tekuk pada kuncian yang tertekan. Jika tekuk tersebut bisa dicegah, maka kapasitas (kuat leleh) struktur akan dapat lebih ditingkatkan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengusulkan sistem sambungan seismik pada struktur baja pemikul momen yang ditambahkan elemen kuncian sebagai sekring yang dapat diganti. Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari hasil analisis yang sudah dilakukan antara lain:

1. Sambungan dengan memanfaatkan elemen sekring yang dapat diganti cenderung akan memiliki kapasitas (terutama kuat leleh) yang kecil karena mekanismenya memaksa kelelahan terjadi pada elemen sekring yang biasanya juga berukuran lebih kecil. Kondisi tersebut tentunya masih bisa ditingkatkan, sehingga penelitian ini dirancang untuk mengembangkan sistem sambungan seismik dengan sekring berupa kuncian yang dapat diganti, dengan konfigurasi bentuk yang baru, dan memiliki kekuatan yang tinggi (mendekati sistem sambungan yang tak dapat diganti).
2. Pengujiannya dilakukan secara numerik menggunakan program berbasis elemen hingga Abaqus/Standard untuk mendapatkan gambaran perilaku struktur akibat gempa. Berdasarkan analisis yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem sambungan menghasilkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang baik dalam menahan beban gempa. Nilai kuat leleh sambungan yang diusulkan lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem sambungan yang dapat diganti (eksisting dalam AISC 358). Kuat leleh yang lebih besar akan memberikan keuntungan karena kapasitas balok menjadi lebih besar. Penyerapan energi terlokalisasi pada elemen sekring sehingga balok dan kolom tidak mengalami kegagalan.
3. Namun begitu masih ada hal yang perlu ditingkatkan kembali terutama masalah tekuk yang terjadi pada kuncian yang tertekan. Jika tekuk tersebut bisa dicegah, maka kapasitas (kuat leleh) struktur akan dapat lebih ditingkatkan.

Daftar Pustaka

- AISC, 2022, *ANSI/AISC 360-22 Specification for structural steel building*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, Inc.
- AISC, 2022, *ANSI/AISC 341-22 Seismic provisions for structural steel building*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, Inc.
- AISC, 2022, *ANSI/AISC 358-22 Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, Inc.
- Al-Sabah, S., Laefer, D., Hong, L.T., Huynh, M.P., Le, J., Martin, T., Matis, P., McGettrick, P., Schultz, A., Shemshadian, M.E., Dizon, R., 2020, *Introduction of intermeshed steel connection – A new universal steel connection*. Buildings. 10.37.

- Irvani, M., Ezati, H., Khafajeh, R., Jaari, V. R. K., 2022, *Numerically study on the seismic response of partially restrained moment connection with structural fuse T-stub for European sections*. Structures. 35. 82-105.
- Khalili, M., Sivandi-Pour, A., Farsangi, E.N., 2021, *Experimental and numerical investigations of a new hysteretic damper for seismic resilient steel moment connections*. Journal of Building Engineering. 43. 102811.
- Kobori, T., Miura, Y., Fukuzawa, E., Yamada, T., Arita, T., Takenaka, Y., Miyagawa, N., Tanaka, N., Fukumoto, T., 1992, *Development and application of hysteresis steel dampers*. Earthquake Engineering, Tenth World Conference. 2341-2346.
- Krishnamurty, N., 1978, *A Fresh Look at Bolted End Plate Behavior and Design*. Engineering Journal, 2, 39-49.
- Krishnamurty, N., 1980, *Modelling and Prediction of Steel Bolted Connection Behavior*. Computer and Structures, Vol: 11, 75-82.
- Liu, R., Wu, J., Yan, G., Lai, Q., Wang, H., 2023, *Seismic Performance Of Earthquake-Resilient Beam-To-Column Connection Considering Friction-Slip Mechanism*. Journal of Building Engineering. 75: 107055. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107055>
- Matis, P., Martin, T., McGetrick, P.J., Robinson, D., 2019, *Modelling and experimental testing of interlocking steel connection behaviour*. Taylor and Francis Group. 2473-2478.
- Men, J., Li, T., Zhou, Q., Zhang, H., Huang, C., 2023, *Structural fuse performance and earthquake-resilient performance of beam-column joints with replaceable T-stub*. Journal of Construction Steel Research, 206, 107943.
- Oh, S.H., Kim, Y., Ryu, H., 2009, *Seismic performance of steel structures with slit dampers*. Engineering Structures. 31. 1997-2008.
- Park, H.Y., Oh, S.H., 2020, *Structural performance of beam system with T-stub type slit damper*. Engineering Structures. 205. 109858.
- Perreira, N.D., Nguyen, V.X., 1997, *A Connection Design Methodology For Automated Assembly And The Framing Of Buildings*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol.119: 37-49.
- Shemshadian, M.E., Le, J., Schultz, A.E., McGetrick, P., Al-Sabah, S., Laefer, D., Martin, A., Hong, L.T., Huynh, M.P., 2019, *Numerical study of the behavior of intermeshed steel connections under mixed-mode loading*. Journal of Constructional Steel Research. 160. 89-100.
- Shemshadian, M.E., Labbane, R., Schultz, A., Le, J., Laefer, D., Al-Sabah, S., McGetrick, P., 2020, *Experimental study of intermeshed steel connections manufactured using advanced cutting technique*. Journal of Constructional Steel Research. 172. 106169.
- Viscomi, B.V., Michaleria, W.D., Lu, L., 1994, *Automated Construction In The ATLSS Integrated Building Systems*. Automation In Construction. Vol 3: 35-43.