



Analisis Perilaku Sambungan *Replaceable* Dengan Mekanisme Kunci Dan Sambungan Konvensional Pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus

Luqman Baskara¹, M. Sigit Darmawan², Afif Navir Revani³

^{1,2,3} Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
luqman.on24@gmail.com, msigitd@gmail.com, navir.afif@gmail.com

Abstract

The Special Moment Resisting Steel Frame (SMRF) system is designed to provide high ductility and energy dissipation capacity during earthquakes. However, conventional permanent welded connections have limited repairability because plastic damage generally develops in the main beam, complicating post-earthquake rehabilitation and increasing repair time and cost. This study develops a replaceable connection with a locking mechanism intended to localize damage within a structural fuse without compromising seismic performance. Numerical evaluation was conducted using the finite element method. Global modeling in ETABS was first performed to obtain internal forces, followed by detailed connection modeling in Abaqus based on AISC 341-22, AISC 358-22, ASTM A992, and ASTM A572 Gr.50. Performance was assessed under monotonic and cyclic loading using load capacity, stiffness, hysteretic response, energy dissipation, and equivalent plastic strain (PEEQ). The replaceable connection achieved a maximum load capacity of 1,015.7 kN, 92.94% higher than the conventional connection (526.4 kN), with greater secant stiffness (44.0 kN/mm versus 17.2 kN/mm). Conversely, the conventional connection dissipated more total energy, 276,156.94 kN.mm compared with 178,612.43 kN.mm, because plasticity occurred in the main beam. In the replaceable connection, damage was concentrated in the structural fuse, confirmed by a PEEQ value of 1.156, approximately 2.49 times the conventional beam value of 0.464. Both connections achieved inelastic rotation close to the 0.04 rad target, reaching 0.0399 rad. These results demonstrate that the replaceable connection effectively implements a controlled damage mechanism and offers improved post-earthquake repairability.

Keywords: Special Moment Resisting Steel Frame; Replaceable Connection; Locking Mechanism; Finite Element Method; Energy Dissipation; Repairability.

Abstrak

Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dirancang untuk memberikan daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang tinggi saat gempa. Namun, sambungan konvensional dengan pengelasan permanen memiliki keterbatasan dalam aspek *repairability* karena kerusakan plastis umumnya berkembang pada balok utama, sehingga rehabilitasi pascagempa menjadi lebih sulit serta meningkatkan waktu dan biaya perbaikan. Penelitian ini mengembangkan sambungan *replaceable* dengan *locking mechanism* yang dirancang untuk melokalisasi kerusakan pada elemen sekering (*structural fuse*) tanpa mengurangi kinerja seismik struktur. Evaluasi dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan global pada ETABS digunakan untuk memperoleh gaya dalam, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan detail sambungan pada Abaqus berdasarkan AISC 341-22, AISC 358-22, ASTM A992, dan ASTM A572 Gr.50. Kinerja sambungan dievaluasi melalui pembebanan monotonik dan siklik berdasarkan kapasitas beban, kekakuan, respons histeresis, disipasi energi, dan regangan plastis ekuivalen (PEEQ). Sambungan *replaceable* mencapai kapasitas maksimum 1.015,7 kN, meningkat 92,94% dibandingkan sambungan konvensional sebesar 526,4 kN, dengan kekakuan sekan 44,0 kN/mm dibandingkan 17,2 kN/mm. Sebaliknya, sambungan konvensional menghasilkan disipasi energi total lebih besar, yaitu 276.156,94 kN.mm dibandingkan 178.612,43 kN.mm, karena plastisasi terjadi pada balok utama. Pada sambungan *replaceable*, kerusakan terkonsentrasi pada *structural fuse*, yang dikonfirmasi oleh nilai PEEQ sebesar 1,156, sekitar 2,49 kali nilai pada balok konvensional sebesar 0,464. Kedua sambungan mencapai rotasi inelastik mendekati target 0,04 rad, yaitu 0,0399 rad. Hasil ini menunjukkan bahwa sambungan *replaceable* efektif menerapkan *controlled damage mechanism* dan berpotensi meningkatkan efisiensi perbaikan struktur pascagempa.

Kata Kunci: Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus; *Replaceable Connection*; *Locking Mechanism*; Metode Elemen Hingga; Disipasi Energi; *Repairability*.

1. Pendahuluan

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif, sehingga hampir seluruh wilayahnya tergolong daerah rawan gempa dengan tingkat risiko yang bervariasi. Kondisi ini menuntut struktur baja memiliki kapasitas daktilitas dan disipasi energi yang memadai untuk meminimalkan risiko keruntuhan struktural. Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus (SRPMK) banyak diaplikasikan karena mampu mempertahankan stabilitas struktur melalui pembentukan sendi plastis terkendali sesuai filosofi *strong column-weak beam* (SNI 1726:2019; AISC

341-22). Kinerja seismik sistem ini sangat bergantung pada perilaku sambungan balok–kolom sebagai jalur transfer gaya sekaligus lokasi utama deformasi inelastik.

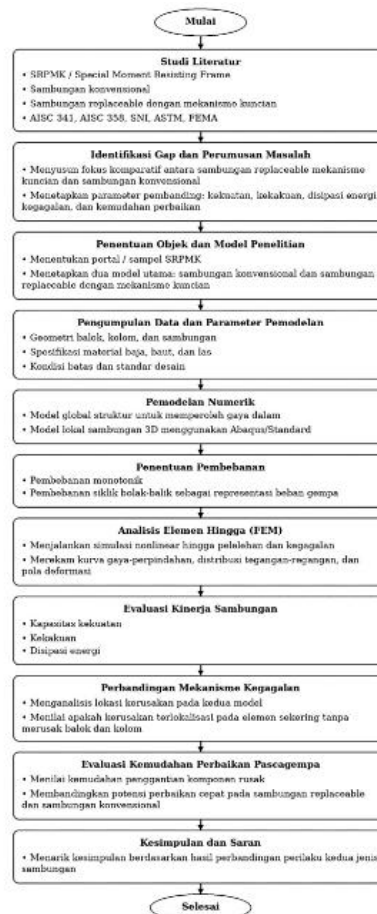
Sambungan momen konvensional yang diprakualifikasi AISC 358-22 memberikan kapasitas kekuatan, daktilitas, dan disipasi energi yang baik, namun secara inheren mengarahkan deformasi plastis pada elemen balok di sekitar zona sambungan. Akibatnya, kerusakan bersifat permanen pada elemen struktur utama, sehingga rehabilitasi pascagempa memerlukan pemotongan elemen dan pengelasan ulang—proses yang memperpanjang waktu perbaikan dan meningkatkan biaya konstruksi, terutama pada bangunan industri dengan lingkungan korosif dan tuntutan *downtime* minimal (AISC 358-22; FEMA 350; Yang et al., 2025). Pergeseran paradigma *performance-based seismic design* kini menekankan pula aspek *repairability*, mendorong pengembangan sambungan *replaceable* dengan elemen sekering (*structural fuse*) yang melokalisasi kerusakan pada komponen yang mudah diganti (Saravanan et al., 2018; Özkılıç, 2020; Moestopo et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Penelitian terdahulu—mulai dari konsep *link* pada EBF (Okazaki et al., 2004), penyederhanaan *replaceable link* (Mansour, 2010; Özkılıç, 2020), hingga mekanisme kunci (Yuana & Moestopo, 2024)—masih berfokus pada pembuktian konsep sambungan, tanpa evaluasi komprehensif yang membandingkan kapasitas beban, degradasi kekakuan, respons histeresis, disipasi energi, distribusi PEEQ, dan efektivitas reparasi terhadap sambungan konvensional secara terintegrasi. Padahal, keunggulan suatu inovasi sambungan seismik idealnya dinilai melalui *trade-off* antar-parameter, bukan satu-dua parameter saja—sebagaimana ditunjukkan pada hasil penelitian ini, di mana peningkatan kapasitas beban dan kekakuan sekan tidak serta-merta diikuti peningkatan energi disipasi total. Di sisi lain, metode elemen hingga (FEM) telah terbukti mampu merepresentasikan perilaku sambungan baja secara akurat (Diputra et al., 2024; Nicolas et al., 2024), namun kajian sambungan *replaceable* bermekanisme kunci pada SRPMK menggunakan FEM 3D dengan pembebanan monotonik dan siklik sesuai AISC 341-22 masih sangat terbatas.

Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik sambungan *replaceable* bermekanisme kunci secara komprehensif dan membandingkannya dengan sambungan konvensional pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus (SRPMK), melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ETABS dan Abaqus. Evaluasi dilakukan secara sistematis terhadap enam parameter kinerja: (1) kapasitas beban lateral, (2) kekakuan awal dan degradasi kekakuan, (3) respons histeresis, (4) kapasitas disipasi energi, (5) distribusi *Equivalent Plastic Strain* (PEEQ), serta (6) pola kegagalan, yang seluruhnya dikaji di bawah skema pembebanan monotonik dan siklik. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada dua aspek utama. Pertama, penelitian ini menyajikan evaluasi multi-parameter yang saling terintegrasi—bukan sekadar pembuktian konsep tunggal—sehingga memungkinkan identifikasi *trade-off* kinerja antara kapasitas beban, kekakuan, dan kapasitas disipasi energi secara lebih objektif. Kedua, penelitian ini secara eksplisit mengaitkan temuan numerik dengan kriteria kualifikasi normatif AISC 341-22, AISC 358-22, dan SNI 1726:2019, sehingga hasil yang diperoleh tidak hanya bersifat deskriptif-akademis, tetapi juga memiliki relevansi langsung terhadap kelayakan implementasi teknis sambungan *replaceable* bermekanisme kunci pada bangunan baja tahan gempa, khususnya pada aplikasi bangunan industri yang menuntut kemudahan reparasi pascagempa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*, FEM) untuk mengevaluasi kinerja seismik sambungan *replaceable* bermekanisme kunci terhadap sambungan konvensional pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku nonlinier material, interaksi kontak antar komponen, serta mekanisme kegagalan sambungan secara lebih rinci dibandingkan metode analitis. Analisis dilakukan secara bertahap melalui pemodelan struktur global menggunakan ETABS untuk memperoleh respons struktur dan menentukan sambungan kritis, yang selanjutnya dimodelkan secara detail menggunakan Abaqus. Integrasi kedua perangkat lunak tersebut memungkinkan kondisi pembebanan pada model sambungan merepresentasikan respons aktual struktur terhadap beban gempa. Alur metodologi penelitian disajikan pada Gambar 1, yang menggambarkan tahapan penelitian mulai dari pemodelan struktur global, pengembangan model elemen hingga, penerapan pembebanan monotonik dan siklik, hingga evaluasi kinerja serta perbandingan perilaku sambungan konvensional dan sambungan *replaceable*.



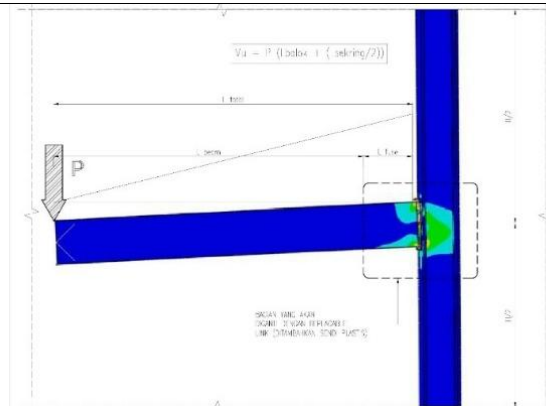
Gambar 1. Flow Chart Prosedur Penelitian

Model struktur global diadopsi dari bangunan pabrik baja di Karawang yang digunakan sebagai *sample structure*. Pemodelan dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 1726:2019, SNI 1729:2020, AISC 341-22, dan AISC 360-22. Hasil analisis ETABS digunakan untuk memperoleh distribusi gaya dalam dan mengidentifikasi sambungan balok-kolom yang mengalami kondisi pembebanan paling kritis. Sambungan tersebut selanjutnya dijadikan objek analisis rinci menggunakan Abaqus sehingga kondisi pembebanan pada model elemen hingga sesuai dengan respons struktur secara global.

2.1 Konsep Sambungan

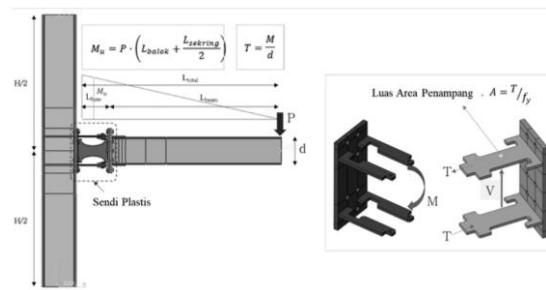
Konsep sambungan yang dikembangkan dalam penelitian ini mengadopsi prinsip *damage-controlled structure*, yaitu dengan mengarahkan deformasi inelastik dan kerusakan hanya pada komponen yang dirancang sebagai elemen sekering (*structural fuse*), sehingga elemen struktur utama tetap mempertahankan kapasitas elastisnya selama pembebanan gempa. Pendekatan ini dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan *repairability* struktur pascagempa melalui penggantian komponen yang mengalami kerusakan tanpa memerlukan perbaikan pada balok maupun kolom.

Rancangan sambungan pada penelitian ini mengacu pada *replaceable link* yang diperkenalkan oleh Yuana dkk. (2024). Sistem tersebut memanfaatkan pelat *link* sebagai elemen sekering (*structural fuse*) yang didesain memiliki kapasitas lebih rendah dibandingkan balok dan kolom, sehingga deformasi plastis terpusat pada elemen yang dapat diganti. Mekanisme tersebut memungkinkan kerusakan pascagempa tidak menyebar ke elemen struktur utama, sehingga proses rehabilitasi menjadi lebih sederhana dan efisien. Berdasarkan rancangan tersebut, penelitian ini mengembangkan mekanisme kuncian (*locking mechanism*) untuk meningkatkan stabilitas sambungan selama menerima pembebanan siklik. Bentuk awal sambungan yang dijadikan acuan ditunjukkan pada Gambar 2 :



Gambar 2. Bagian Sambungan Baja Umum

Berdasarkan konfigurasi tersebut, penelitian ini mengembangkan mekanisme penguncian (*locking mechanism*) pada sistem sambungan untuk meningkatkan kestabilan transfer gaya selama pembebanan bolak-balik. Modifikasi dilakukan tanpa mengubah prinsip dasar *structural fuse*, sehingga mekanisme pelelehan tetap diarahkan pada pelat link, sedangkan balok, kolom, dan komponen sambungan lainnya tetap berada dalam kondisi elastis. Konsep sambungan hasil pengembangan ditunjukkan pada Gambar 3 :



Gambar 3. Sambungan Replaceable Link Existing

Secara mekanis, momen yang bekerja pada sambungan ditransformasikan menjadi gaya tarik dan tekan pada flange balok serta gaya geser pada badan (*web*) sambungan. Dimensi pelat sekering ditentukan agar memiliki kapasitas lebih rendah dibandingkan balok dan kolom sehingga mekanisme pelelehan berkembang terlebih dahulu pada elemen sekering sesuai filosofi *strong column-weak beam* yang dipersyaratkan dalam AISC 341-22 dan SNI 7860:2020. Dengan mekanisme tersebut, kerusakan pascagempa diharapkan terlokalisasi pada pelat link sehingga proses rehabilitasi cukup dilakukan melalui penggantian elemen sekering tanpa pembongkaran struktur utama.

3. Hasil dan Pembahasan

Kajian ini diawali dengan pengambilan struktur contoh (*sample structure*) dari bangunan pabrik di Karawang, yang selanjutnya dimodelkan dalam perangkat lunak ETABS untuk mengidentifikasi konfigurasi sambungan balok-kolom yang representatif dan layak dianalisis lebih lanjut. Bagian sambungan hasil identifikasi tersebut kemudian menjadi dasar pemodelan rinci berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) menggunakan perangkat lunak Abaqus, guna mengevaluasi perilaku struktural sambungan konvensional dan sambungan replaceable secara komparatif.

3.1 Pemodelan Elemen Hingga Sambungan Konvensional

Sambungan konvensional dimodelkan pada Abaqus menggunakan elemen solid dengan partisi *shell* untuk meningkatkan presisi analisis. Kolom menggunakan profil WB 400×400×14×24, balok WB 600×250×10×16, dengan sambungan berupa *end plate* berukuran 864×254×32 mm dan baut mutu tinggi A490 berdiameter 32 mm. Material baja ASTM A992/A572 Gr. 50 didefinisikan dengan densitas $7,85 \times 10^{-9}$ ton/mm³, modulus elastisitas 200.000 MPa, dan rasio Poisson 0,30. Perilaku plastis menggunakan model *isotropic hardening*, dengan tegangan leleh meningkat dari 345 MPa hingga 450 MPa pada rentang regangan plastis 0–0,16, menghasilkan total regangan sekitar 0,162 yang masih berada di bawah regangan putus material (0,20–0,22). Baut A490 dimodelkan dengan regangan plastis maksimum yang lebih kecil (0,06) untuk merepresentasikan sifat material yang lebih getas dibandingkan baja profil.

Kondisi batas berupa jepit penuh (*encastre*) diterapkan pada dasar kolom untuk mencegah terjadinya *rigid body motion*. Pembebanan diterapkan melalui metode *displacement control* pada ujung bebas balok hingga mencapai

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.13033>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

perpindahan 60 mm, setara dengan rotasi inelastik 0,04 rad berdasarkan panjang efektif balok 1500 mm. Metode ini dipilih karena mampu menangkap fenomena degradasi kekakuan dan *strain softening* pascapleah yang tidak dapat diperoleh melalui metode *force control*.

Proses *meshing* dilakukan secara adaptif, dengan ukuran elemen 2 mm pada zona kritis seperti pelat kunci, sambungan baut, dan panel pertemuan balok-kolom guna menangkap konsentrasi tegangan secara akurat, serta ukuran elemen 5 mm pada elemen balok dan kolom yang didominasi deformasi elastis untuk mengoptimalkan waktu komputasi. Output analisis diatur untuk merekam gaya reaksi dan perpindahan, tegangan von Mises, serta regangan plastis ekuivalen (PEEQ) guna mengevaluasi pola sebaran plastisitas.

3.2 Pemodelan Sambungan Replaceable

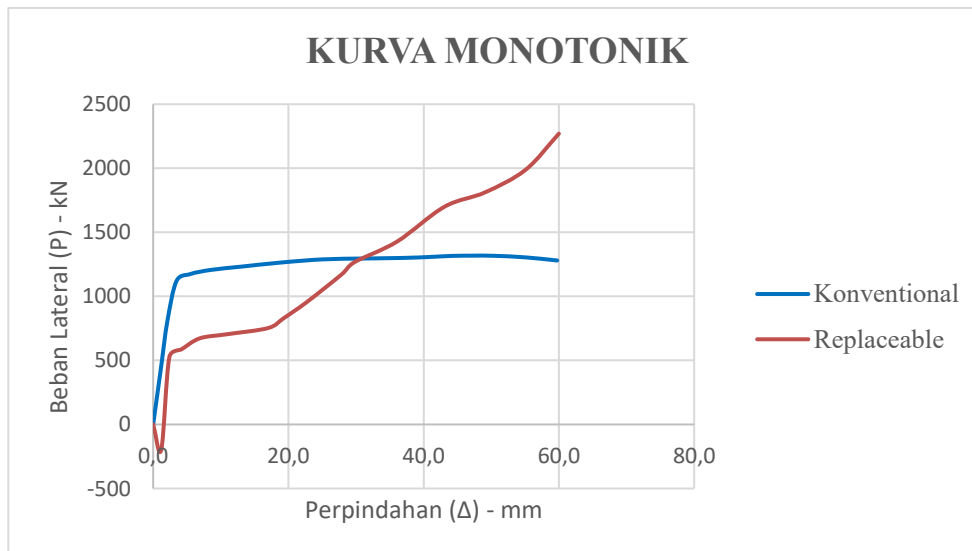
Pengaturan mekanikal sambungan *replaceable* pada dasarnya identik dengan sambungan konvensional, dengan perbedaan utama berupa penambahan elemen sekering (*fuse element*) dan elemen pengunci (*locking element*) sebagai komponen disipasi energi tambahan.

Elemen sekering pertama dimodelkan melalui *solid extrusion* berdasarkan geometri pelat yang telah ditentukan, sedangkan elemen sekering kedua memiliki ketebalan ekstrusi 13 mm dengan panjang 450 mm dan lebar 100 mm, dilengkapi area takikan (*notch*) berjari-jari R10–R16 mm yang berfungsi mengarahkan lokasi konsentrasi deformasi plastis. Elemen pengunci berbentuk pelat berukuran 250×150 mm dengan dua lubang baut R16 mm berperan menjaga posisi *fuse* tetap stabil selama pembebanan sekaligus memfasilitasi mekanisme bongkar-pasang saat penggantian komponen pascagempa. Elemen sekering keempat berupa pelat badan (*web fuse plate*) berdimensi 600×428 mm dengan pengurangan penampang berbentuk lengkung (*curved cut*, $R \approx 454,17$ mm) di bagian tengah, yang secara khusus dirancang untuk melokalisasi pelelehan pada area tersebut.

Secara keseluruhan, strategi geometri pada seluruh elemen sekering—baik melalui pengurangan penampang, takikan, maupun kelengkungan lokal—menunjukkan bahwa desain sambungan *replaceable* secara konsisten diarahkan untuk memusatkan deformasi inelastis pada komponen yang dapat diganti, sementara elemen struktural utama tetap dipertahankan dalam kondisi elastis. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *structural fuse* dalam konsep *controlled damage mechanism*, dan menjadi dasar bagi perbedaan pola keruntuhan yang teramati antara sambungan *replaceable* dan sambungan konvensional pada hasil analisis pembebanan monotonik dan siklik.

3.3 Kapasitas Beban Lateral

Simulasi pembebanan monotonik menunjukkan (Gambar 4) perbedaan signifikan antara sambungan konvensional dan sambungan *replaceable* berpengasangan kunci. Sambungan konvensional mencapai beban lateral maksimum **1316,8 kN** pada perpindahan 50,4 mm, kemudian mengalami degradasi kapasitas hingga 1280,0 kN pada perpindahan 59,8 mm — mengindikasikan onset deformasi plastis pada elemen sambungan. Sambungan *replaceable* mencapai beban maksimum **2270,3 kN** pada perpindahan 60,0 mm tanpa menunjukkan penurunan kapasitas hingga akhir pembebanan.



Gambar 4. Kurva beban-perpindahan (monotonik) sambungan konvensional vs *replaceable*

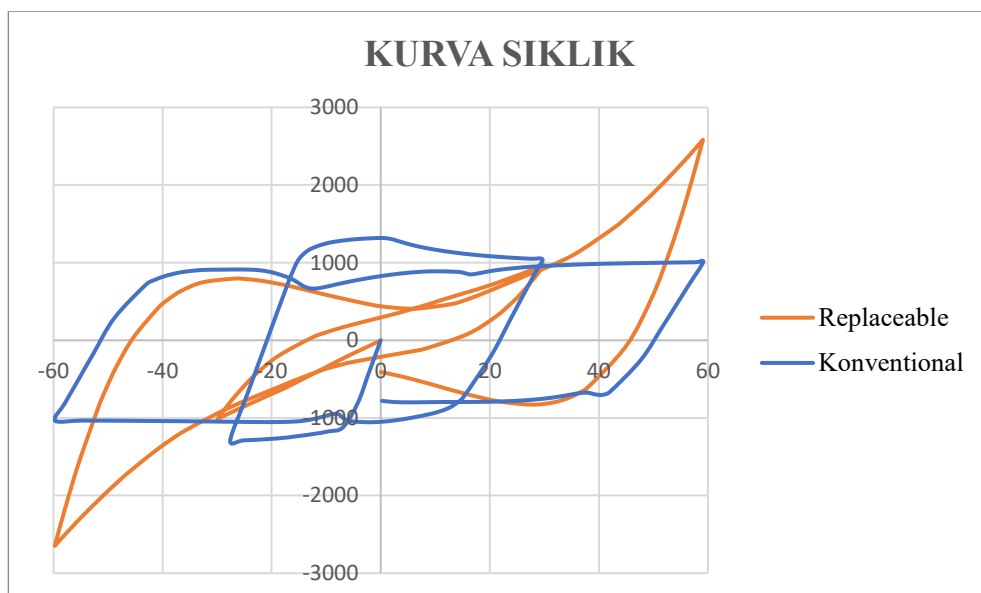
Sambungan *replaceable* menghasilkan peningkatan kapasitas sebesar **72,4%** dibandingkan sambungan konvensional. Peningkatan ini menegaskan bahwa mekanisme kunci mendistribusikan gaya secara lebih efektif

antar elemen sambungan, elemen pengunci, dan elemen disipasi energi, sehingga kapasitas struktural meningkat signifikan.

Evaluasi lebih lanjut dilakukan terhadap kekakuan sekan (*secant stiffness*) sebagai representasi kemampuan sambungan menahan deformasi pada fase elastis awal. Hasil perhitungan menunjukkan sambungan konvensional memiliki kekakuan awal **45,7% lebih tinggi** (selisih 44,5 kN/mm) dibandingkan sambungan *replaceable*. Temuan ini konsisten dengan prinsip desain *structural fuse*: elemen pengunci pada sambungan *replaceable* sengaja dirancang lebih daktail agar berperan sebagai komponen pengorbanan (*sacrificial element*), sehingga kekakuan awal yang lebih rendah justru memungkinkan deformasi inelastik terkonsentrasi pada elemen yang mudah diganti, bukan pada elemen struktural utama. Dari sisi degradasi, sambungan konvensional menunjukkan penurunan kekakuan yang cepat setelah melewati titik leleh, tercermin dari penurunan beban pasca-puncak. Sebaliknya, sambungan *replaceable* mempertahankan kenaikan kapasitas secara stabil hingga perpindahan besar tanpa indikasi *softening*, menunjukkan kapasitas deformasi inelastik yang lebih baik.

3.4 Analisis Respons Histeresis dan Disipasi Energi

Analisis pembebanan siklik menunjukkan (Gambar 5) bahwa sambungan konvensional memiliki kekakuan awal yang lebih tinggi dibandingkan sambungan *replaceable*. Nilai kekakuan awal sambungan konvensional sebesar **141,9 kN/mm**, sedangkan sambungan *replaceable* sebesar **97,4 kN/mm**, atau sekitar **45,7%** lebih rendah. Meskipun demikian, sambungan *replaceable* menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan kekakuan selama peningkatan deformasi.



Gambar 5. Perbandingan kurva histeresis sambungan konvensional dan *replaceable* akibat pembebanan siklik

Pada sambungan konvensional, penurunan kekakuan mulai terjadi setelah mencapai kapasitas maksimum sebesar **1316,8 kN** pada perpindahan **50,4 mm**, yang ditandai dengan menurunnya kemampuan sambungan dalam menahan tambahan beban. Sebaliknya, sambungan *replaceable* masih mampu meningkatkan kapasitas hingga **2270,3 kN** pada perpindahan **60 mm**, sehingga menunjukkan degradasi kekakuan yang lebih lambat dan respons struktur yang lebih stabil dibandingkan sambungan konvensional. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme kunci pada sambungan *replaceable* mampu mempertahankan transfer gaya secara lebih efektif selama deformasi berlangsung. Mekanisme ini memungkinkan redistribusi gaya pada komponen sambungan sehingga deformasi plastis terkonsentrasi pada elemen yang dapat diganti (*replaceable fuse*), sementara elemen struktur utama tetap terlindungi dari kerusakan yang signifikan.

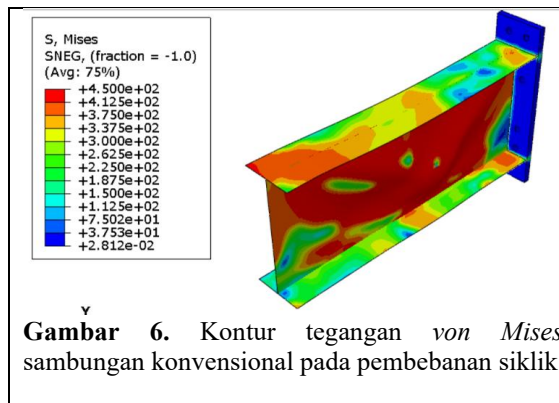
Selanjutnya, untuk membandingkan kekakuan sisa kedua tipe sambungan pada kondisi siklik, digunakan rasio kekakuan (*stiffness ratio*), yaitu perbandingan kekakuan sekan sambungan *replaceable* terhadap sambungan konvensional. Hasil analisis degradasi kekakuan menunjukkan bahwa sambungan konvensional memiliki nilai kekakuan sekan sebesar **17,2 kN/mm**, sedangkan sambungan *replaceable* mencapai **44,0 kN/mm** atau sekitar **2,56 kali** lebih tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sambungan *replaceable* mampu mempertahankan kemampuan transfer gaya secara lebih efektif meskipun telah mengalami deformasi yang besar.

Selain memiliki kekakuan sekan yang lebih tinggi, sambungan *replaceable* juga menunjukkan respons siklik yang lebih stabil. Meskipun fenomena *pinching* masih terjadi akibat mekanisme kontak antar komponen sambungan, mekanisme kunci (*interlock*) mampu mempertahankan kekakuan efektif selama pembebanan berlangsung.

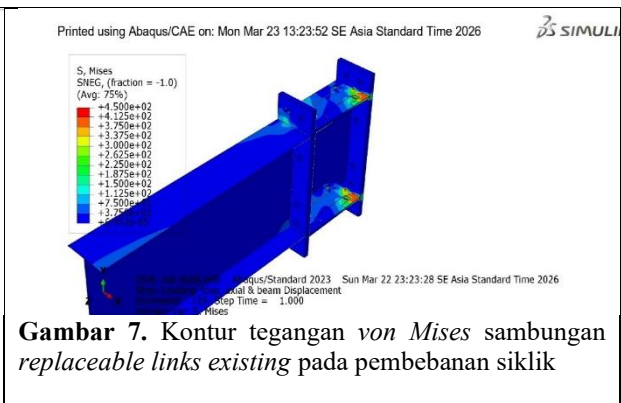
Sebaliknya, sambungan konvensional mengalami penurunan kekakuan yang lebih cepat akibat berkembangnya deformasi plastis pada elemen utama. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme *replaceable* tidak hanya meningkatkan kemampuan transfer gaya, tetapi juga mengarahkan deformasi plastis pada komponen yang dapat diganti (*replaceable fuse*), sehingga kerusakan pada elemen utama struktur dapat diminimalkan dan kinerja struktur pascagempa menjadi lebih baik.

3.5 Analisis Pola Kegagalan dan Distribusi Plastisitas

Pola kegagalan sambungan dianalisis berdasarkan distribusi tegangan *von Mises* dan regangan plastis ekuivalen (*Equivalent Plastic Strain/PEEQ*) yang diperoleh dari hasil simulasi elemen hingga. Tegangan *von Mises* digunakan untuk mengidentifikasi daerah konsentrasi tegangan, sedangkan nilai PEEQ digunakan untuk mengevaluasi perkembangan deformasi plastis serta lokasi terbentuknya sendi plastis. Hasil kontur distribusi tegangan dan plastisitas masing-masing sambungan ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Kontur tegangan *von Mises* sambungan konvensional pada pembebanan siklik



Gambar 7. Kontur tegangan *von Mises* sambungan *replaceable links existing* pada pembebanan siklik

Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua sambungan mengalami tegangan *von Mises* maksimum sebesar **450 MPa**, namun dengan pola distribusi yang berbeda. Pada sambungan konvensional, konsentrasi tegangan terlokalisasi di ujung balok dekat muka kolom sehingga deformasi plastis berkembang pada elemen utama struktur. Sebaliknya, pada sambungan *replaceable*, konsentrasi tegangan berpindah ke elemen *replaceable link* yang berfungsi sebagai komponen disipasi energi. Perbedaan distribusi tegangan tersebut menunjukkan bahwa mekanisme kunci (*interlock*) mampu mengalihkan jalur transfer gaya menuju elemen yang telah dirancang untuk mengalami deformasi plastis.

Perbedaan mekanisme tersebut diperkuat oleh hasil distribusi PEEQ. Sambungan konvensional menghasilkan nilai PEEQ maksimum sebesar **0,464**, sedangkan sambungan *replaceable* mencapai **1,156** atau sekitar **2,49 kali** lebih besar. Nilai PEEQ yang lebih tinggi pada sambungan *replaceable* tidak menunjukkan terjadinya kegagalan prematur, tetapi mengindikasikan bahwa deformasi plastis berhasil dipusatkan pada elemen *replaceable link* sebagai *structural fuse*. Sebaliknya, pada sambungan konvensional, perkembangan plastisitas terjadi langsung pada balok utama sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan permanen pada elemen struktur.

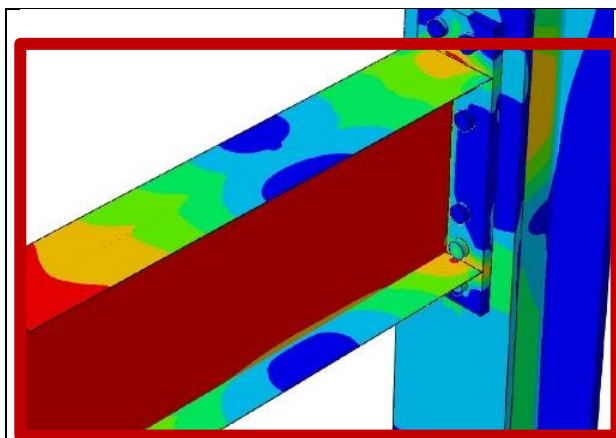
Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme *replaceable* mampu mengendalikan lokasi terbentuknya sendi plastis sesuai prinsip *capacity design*, yaitu mengarahkan kerusakan pada komponen yang dapat diganti tanpa mengurangi integritas elemen utama. Dengan demikian, sambungan *replaceable* tidak hanya meningkatkan pengendalian mekanisme kerusakan selama pembebanan siklik, tetapi juga mendukung kemudahan rehabilitasi struktur pascagempa melalui penggantian elemen *fuse* tanpa memerlukan perbaikan pada balok maupun kolom.

3.6 Tingkat Kerusakan Elemen Sekering dan Perlindungan Balok-Kolom

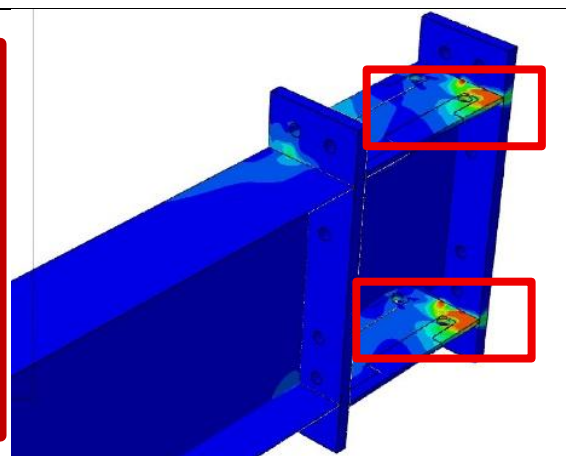
Tingkat kerusakan elemen sambungan dievaluasi berdasarkan distribusi tegangan *von Mises* dan regangan plastis ekuivalen (*Equivalent Plastic Strain/PEEQ*) untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan serta perkembangan deformasi plastis akibat pembebanan siklik. Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas mekanisme *replaceable* dalam mengendalikan lokasi kerusakan sehingga plastisitas terkonsentrasi pada elemen sekering (*replaceable fuse*), sementara balok dan kolom tetap mempertahankan integritas struktural. Pola distribusi kerusakan pada kedua tipe sambungan ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua sambungan mengalami tegangan *von Mises* maksimum sebesar **450 MPa**, namun dengan pola distribusi yang berbeda. Pada sambungan konvensional, konsentrasi tegangan terjadi pada ujung balok di sekitar muka kolom, sehingga elemen balok menjadi lokasi utama terbentuknya deformasi plastis. Sebaliknya, pada sambungan *replaceable*, konsentrasi tegangan berpindah ke elemen *replaceable link* yang memang dirancang sebagai komponen disipasi energi. Perbedaan pola distribusi tersebut menunjukkan

bahwa mekanisme *interlock* mampu mengalihkan jalur transfer gaya menuju elemen yang direncanakan untuk mengalami pelelehan terlebih dahulu.



Gambar 8. Area kerusakan sambungan konvensional



Gambar 9. Area kerusakan sambungan *replaceable*

Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua sambungan mengalami tegangan *von Mises* maksimum sebesar **450 MPa**, namun dengan pola distribusi yang berbeda. Pada sambungan konvensional, konsentrasi tegangan terjadi pada ujung balok di sekitar muka kolom, sehingga elemen balok menjadi lokasi utama terbentuknya deformasi plastis. Sebaliknya, pada sambungan *replaceable*, konsentrasi tegangan berpindah ke elemen *replaceable link* yang memang dirancang sebagai komponen disipasi energi. Perbedaan pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme *interlock* mampu mengalihkan jalur transfer gaya menuju elemen yang direncanakan untuk mengalami pelelehan terlebih dahulu.

Perbedaan mekanisme kerusakan juga terlihat dari distribusi regangan plastis ekuivalen. Sambungan konvensional menghasilkan nilai PEEQ maksimum sebesar **0,464**, sedangkan sambungan *replaceable* mencapai **1,156** atau sekitar **2,49 kali** lebih besar. Nilai PEEQ yang lebih tinggi pada sambungan *replaceable* tidak menunjukkan kegagalan struktur yang lebih besar, tetapi mengindikasikan bahwa deformasi plastis berhasil dipusatkan pada elemen sekering (*replaceable fuse*). Sebaliknya, pada sambungan konvensional, plastisitas berkembang langsung pada balok sebagai elemen utama struktur, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan permanen yang lebih sulit diperbaiki.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa mekanisme *replaceable* mampu menerapkan konsep *damage localization*, yaitu memusatkan kerusakan pada komponen yang dapat diganti tanpa mengurangi fungsi elemen utama struktur. Dengan demikian, balok dan kolom tetap terlindungi dari deformasi plastis yang berlebihan, sehingga proses rehabilitasi pascagempa dapat dilakukan melalui penggantian elemen sekering tanpa memerlukan perbaikan signifikan pada sistem struktur utama.

4. Kesimpulan

Serangkaian simulasi numerik yang telah dilakukan, baik melalui skema pembebanan monotonik maupun siklik, memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai perbedaan mendasar antara sambungan *replaceable* berpengunci dan sambungan konvensional dalam merespons beban lateral. Dari segi kapasitas, sambungan berpengunci terbukti mampu menahan gaya hingga 1015,7 kN, hampir dua kali lipat dari kemampuan sambungan konvensional yang berhenti di angka 526,4 kN. Selisih ini setara dengan peningkatan kapasitas sekitar 93 persen, sebuah angka yang cukup signifikan untuk menunjukkan bahwa mekanisme kunci pada sambungan *replaceable* memberikan kontribusi nyata terhadap kekuatan sambungan secara keseluruhan. Kondisi serupa juga tampak pada aspek kekakuan, di mana nilai secant stiffness sambungan *replaceable* tercatat sebesar 44,0 kN/mm, jauh melampaui sambungan konvensional yang hanya mencapai 17,2 kN/mm.

Namun demikian, tidak semua indikator menunjukkan keunggulan pada sisi sambungan *replaceable*. Pengujian histeresis justru mengungkap bahwa sambungan konvensional mampu mendisipasikan energi total yang lebih besar, yaitu 276.156,94 kN.mm, dibandingkan sambungan *replaceable* yang tercatat sebesar 178.612,43 kN.mm. Temuan ini sekilas terlihat sebagai kelemahan, tetapi apabila ditelusuri lebih jauh, perbedaan tersebut sesungguhnya bersumber dari cara kedua sambungan tersebut menyerap energi, bukan semata-mata pada besarannya. Sambungan konvensional mendisipasikan energi melalui deformasi plastis yang terjadi pada elemen balok utama, sementara sambungan *replaceable* justru mengarahkan energi tersebut ke komponen fuse yang secara khusus dirancang untuk mengalami deformasi plastis secara terkendali. Dengan kata lain, energi yang lebih

rendah pada sambungan replaceable bukan indikasi kelemahan, melainkan konsekuensi dari strategi desain yang memang mengutamakan lokalisasi kerusakan.

Pemahaman ini diperkuat oleh hasil evaluasi distribusi regangan plastis ekuivalen (PEEQ). Pada sambungan konvensional, konsentrasi tegangan dan deformasi plastis berkembang di sekitar ujung balok yang berdekatan dengan muka kolom, dengan nilai PEEQ maksimum sebesar 0,464, yang mengindikasikan bahwa balok menjadi lokasi utama pembentukan sendi plastis. Sebaliknya, pada sambungan replaceable, deformasi plastis justru terpusat pada elemen fuse dengan nilai PEEQ mencapai 1,156, atau sekitar 2,49 kali lebih tinggi dibandingkan sambungan konvensional. Perbedaan ini menegaskan bahwa mekanisme kuncian pada sambungan replaceable berhasil mengarahkan kerusakan menuju elemen yang memang diperuntukkan sebagai disipator energi, sehingga elemen struktural utama seperti balok dan kolom dapat terhindar dari kerusakan yang berarti. Konsep controlled damage mechanism pun dapat dikatakan tercapai, karena kerusakan yang terjadi terpusat pada bagian yang secara desain memang dapat diganti pascagempa.

Dari sisi pemenuhan standar, evaluasi terhadap ketentuan AISC 341-22, AISC 358-22, dan SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa kedua jenis sambungan sama-sama mampu mencapai tingkat deformasi inelastik yang dipersyaratkan. Berdasarkan perhitungan rotasi menggunakan panjang efektif balok 1500 mm, target rotasi sebesar 0,04 rad membutuhkan simpangan lateral sebesar 60 mm. Hasil simulasi memperlihatkan simpangan maksimum yang dicapai sebesar 59,8 mm, sehingga rotasi yang terealisasi adalah 0,0399 rad, mendekati target yang ditetapkan bagi sambungan tahan gempa.

Berdasarkan keseluruhan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa sambungan replaceable dengan mekanisme kuncian menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan sambungan konvensional, terutama dalam hal kapasitas gaya, kemampuan mempertahankan kekakuan, serta pengendalian lokasi kerusakan. Meskipun energi disipasi totalnya lebih rendah pada skema pembebanan yang diuji, hal tersebut justru mencerminkan efektivitas mekanisme struktural fuse dalam mengarahkan kerusakan ke lokasi yang dapat diganti, sehingga pada akhirnya berpotensi mempercepat dan menyederhanakan proses pemulihan struktur pascagempa.

Referensi

- AISC. 2016. *Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-16)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.
- 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.
- ASTM International. 2018. *ASTM A572/A572M-18: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM A992/A992M-20. *Standard Specification for Structural Steel Shapes for Building Framing*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2020.
- ASTM International. 2020. *ASTM A992/A992M-20: Standard Specification for Structural Steel Shapes for Building Framing*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Diputra, A. T., Suswanto, B., Tajunnisa, Y., & Masiran, H. S. 2024. Analisis numerik sambungan baja reduced beam section pada sumbu lemah kolom menggunakan program bantu ANSYS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 22(3), 295–306.
- FEMA 350. 2000. *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C.
- Ideastatica. *Reduced-beam-section*.
- Mansour, N. (2010). *Development of the design of eccentrically braced frames with replaceable shear links* (Doctoral dissertation, University of Toronto).
- Moestopo, M., Rama, I., & Rachma, I. N. (2022). Kajian numerik dan eksperimental pada struktur dengan core frame menggunakan coupling beam dan replaceable link. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 29(1), 27–38.
- Nicolas, dkk. 2024. Numerical modeling of beam plastic hinges in steel moment resisting frames including local buckling and stiffness/strength degradation. Contents lists available at ScienceDirect. Elsevier.
- Noruzvand, dkk. 2024. Performance-based seismic design of low-rise steel moment-resisting frames targeting collapse fragility curve. Contents lists available at ScienceDirect. Elsevier.
- Okazaki, T., Arce, G., Ryu, H.-C., & Engelhardt, M. D. (2004). Recent research on link performance in steel eccentrically braced frames. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (Paper No. 302)*. Vancouver, Canada.
- Özkılıç, Y. O. (2020). *Experimental and numerical studies on replaceable links for eccentrically braced frames* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).
- Rafael, J. W. M., & Lukas, A. Y. 2020. Comparison study of bracing configuration with shear link in eccentrically braced frame steel structure. *Journal of Infrastructure and Civil Engineering (JICE)*, 1(1), 7–17.
- Rafael, J. W. M., & Suswanto, B. 2017. Studi perilaku link pendek, link menengah dan link panjang pada struktur baja sistem EBF. *ITS Journal of Civil Engineering*, 32(1), 25–34.
- Saravanan, M., Goswami, R., & Palani, G.S. 2018. Replaceable fuses in earthquake resistant steel structures: A review. *International Journal of Steel Structures* 18: 868-879.
- SNI 1729:2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2020.
- SNI 1726:2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta, 2019.
- Yang, J., Zhao, K., Fan, M., Gao, Q., Zhou, W., Fan, C., Lu, Q., Miao, W., Luo, D., Chen, Q., Shang, C., Xiao, D., & Zhang, Z. (2025). Effect of different stabilizers on corrosion resistance and damage resistance of Q420qNH weathering steel in industrial atmospheric environment. *Construction and Building Materials*, 490, 142398.
- Yuana, dkk. 2024. Pengembangan Sistem Sambungan Seismik dengan Mekanisme Kuncian yang Dapat Diganti pada Sistem Rangka Baja Pemikul Momen. Diterbitkan oleh Jurnal Teknik Sipil ITB. ISSN 0853-2982.

DOI: <https://doi.org/10.69693/ijmst.v4i2.13033>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

- Yuyun, dkk. 2014. Perbandingan Evaluasi Kinerja Bangunan Gedung Tahan Gempa antara Metode SRPMM dan SRPMK. Jurnal Aplikasi, Vol.12, No.1.
- Zhang, dkk. 2024. Seismic performance of eccentrically braced precast reinforced concrete columns-steel beams frame with replaceable shear links based on plastic design. Contents lists available at ScienceDirect. Elsevier.