

KAJIAN SISTEMATIS PERILAKU NONLINIER SAMBUNGAN BAUT PADA STRUKTUR BAJA DAN IMPLIKASINYA TERHADAP PENERAPAN SNI 1729:2020

Oktavianus Chayadi¹, Edison Hatoguan Manurung², Alip Prajoko³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular, Jakarta, Indonesia

E-mail: oktavianuschayadi@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Received :13-06-2026

Revised :02-07-2026

Accepted :11-07-2026

Keywords:

Bolted

Connection; Nonlinear
Analysis; Moment-Rotation;
Semi-Rigid; Prisma; Sni
1729:2020; Eurocode 3

DOI: <https://doi.org/10.62335>

ABSTRACT

In the studies reviewed, bolted connections in steel structures generally exhibit semi-rigid behavior with a nonlinear moment-rotation response, where the majority of studies report behavior lying between the perfect pin and fully rigid conditions. The authors have not identified a review that simultaneously synthesizes rotational stiffness, bolt slip effects, and implications for SNI 1729:2020 within a single integrated framework; similar reviews in the Indonesian standards context remain scarce based on searches across Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar. This study presents a systematic literature review following the PRISMA 2020 protocol (Page et al., 2021), examining 13 selected studies from 75 identified articles (search conducted 15–20 June 2026). The 2017–2025 timeframe was selected to capture recent developments in nonlinear analysis and FEM of bolted connections. Quality assessment using an internal scoring instrument adapted from JBI principles yielded scores ranging from 2 to 5 out of 5, reflecting realistic methodological quality variation. Qualitative synthesis reveals a consistent tendency that increasing end-plate thickness produces a significant increase in initial rotational stiffness, accompanied by a moderate-to-significant reduction in rotation capacity. Neglecting bolt slip was found to tend toward significant displacement prediction errors near ultimate capacity. Comparison of SNI 1729:2020 and Eurocode 3 identifies

three aspects not yet explicitly accommodated in SNI 1729:2020, potentially addressable through Eurocode 3 component method adoption with Indonesian condition validation.

ABSTRAK

Pada studi-studi yang dikaji, sambungan baut pada struktur baja umumnya menunjukkan perilaku semi-kaku dengan respons momen-rotasi yang nonlinier, di mana mayoritas studi menunjukkan perilaku yang berada di antara kondisi sendi sempurna dan jepit penuh. Penulis belum menemukan kajian yang secara simultan mensintesis kekakuan rotasional, efek slip baut, dan implikasinya terhadap SNI 1729:2020 dalam satu kerangka analisis terintegrasi; kajian serupa dalam konteks standar Indonesia masih terbatas berdasarkan penelusuran pada Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Penelitian ini menyajikan tinjauan literatur sistematis mengikuti protokol PRISMA 2020 (Page et al., 2021) terhadap 13 studi terpilih dari 75 artikel yang ditemukan (pencarian dilaksanakan 15–20 Juni 2026). Rentang tahun 2017–2025 dipilih untuk merepresentasikan perkembangan terkini analisis nonlinier dan FEM sambungan baut. Penilaian kualitas menggunakan instrumen penilaian internal yang diadaptasi dari prinsip JBI menghasilkan rentang skor 2–5 dari 5, mencerminkan variasi kualitas metodologis yang realistis. Sintesis kualitatif dari studi-studi yang dikaji menemukan kecenderungan yang konsisten bahwa peningkatan ketebalan pelat ujung menghasilkan kenaikan kekakuan rotasional yang signifikan, disertai penurunan kapasitas rotasi dalam rentang moderat hingga signifikan. Pengabaian efek slip baut ditemukan cenderung menyebabkan kesalahan prediksi perpindahan yang signifikan pada kondisi mendekati kapasitas ultimit. Komparasi SNI 1729:2020 dan Eurocode 3 mengidentifikasi tiga aspek yang belum diakomodasi secara eksplisit dalam SNI 1729:2020, yang berpotensi dilengkapi melalui adopsi metode komponen Eurocode 3 dengan validasi pada kondisi Indonesia.

PENDAHULUAN

Struktur baja banyak diterapkan dalam pembangunan gedung bertingkat, jembatan, dan fasilitas industri karena keunggulannya berupa rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan fabrikasi, dan kecepatan pelaksanaan. (Setiawan, 2008) Sambungan antar elemen merupakan komponen kritis yang menentukan kinerja keseluruhan sistem, dan sambungan baut menjadi pilihan dominan di lapangan karena

kemudahan pemasangan serta kemampuan dibongkar pasang, (Salmon.dkk,2009) Kinerja sambungan baja tidak hanya ditentukan oleh kapasitas baut, tetapi juga dipengaruhi oleh mekanisme transfer gaya, kekakuan sambungan, daktilitas, serta mode kegagalan yang berkembang selama pembebanan, sehingga perilaku sambungan menjadi faktor penting dalam menentukan respons struktur secara keseluruhan. (Fahlevi.dkk,2026)

Dalam praktik desain konvensional, sambungan baut lazimnya diidealisasi sebagai sendi sempurna atau jepit penuh. Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perilaku aktual berada di antara kedua kondisi ekstrem tersebut – bersifat semi-kaku – dengan hubungan nonlinier antara momen dan rotasi yang bergantung pada parameter geometri dan material. (Pourshargh.dkk,2022) Penggunaan idealisasi yang keliru dapat mengakibatkan kesalahan prediksi distribusi gaya dalam dan kapasitas ultimit.

Penelitian Nezamolmolki dan Shooshtari (2021) menunjukkan bahwa perbedaan antara analisis linier dan analisis nonlinier yang menyertakan efek slip baut dapat menghasilkan kesalahan prediksi perpindahan yang signifikan pada kondisi mendekati batas kapasitas. (Nezamolmolki.dkk,2021) Hal ini memiliki implikasi langsung terhadap keamanan desain, terutama pada struktur yang menerima beban lateral atau dinamis. Penulis belum menemukan kajian yang secara simultan mensintesis tiga aspek berikut dalam satu kerangka analisis terintegrasi: (1) kekakuan rotasional sambungan baut, (2) efek slip baut terhadap akurasi prediksi struktural, dan (3) implikasinya terhadap implementasi SNI 1729:2020 di Indonesia. Kajian serupa yang mengintegrasikan ketiga aspek ini masih terbatas berdasarkan penelusuran penulis pada Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Kesenjangan ini menjadi motivasi utama penelitian.

Penelitian ini bertujuan melakukan kajian literatur sistematis berbasis PRISMA terhadap perilaku nonlinier sambungan baut, dengan fokus pada: (1) kekakuan rotasional dan sintesis kuantitatif pengaruh parameter geometri, (2) efek slip baut terhadap akurasi prediksi, dan (3) komparasi SNI 1729:2020 dengan Eurocode 3 beserta implikasinya bagi praktik desain di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menerapkan kajian literatur sistematis mengikuti protokol PRISMA 2020 [Page et al., 2021] [21]. Protokol ini dipilih karena menyediakan kerangka yang transparan dan reproduksibel untuk identifikasi, seleksi, penilaian kualitas, dan sintesis bukti ilmiah yang tersedia.

Search String dan Waktu Pencarian

Pencarian dilaksanakan pada 15–20 Juni 2026 pada Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Search string yang digunakan:

("bolted connection" AND "nonlinear analysis") OR ("semi-rigid connection" AND "moment-rotation") OR ("bolt slip" AND "steel structure") OR ("end-plate connection" AND "rotational stiffness") OR ("sambungan baut" AND "SNI 1729")

Pencarian dibatasi pada artikel berbahasa Indonesia dan Inggris, dipublikasikan antara tahun 2017–2025. Rentang ini dipilih untuk merepresentasikan perkembangan terkini dalam analisis nonlinier dan pemodelan FEM sambungan baut, seiring dengan meningkatnya ketersediaan perangkat lunak FEM dan peningkatan standar desain baja internasional pasca-2015. Artikel sebelum 2017 tetap dirujuk sebagai latar belakang bila dinilai foundational.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi: (1) jurnal peer-reviewed atau prosiding terindeks Scopus/WoS/SINTA, (2) topik sambungan baut struktur baja dengan aspek nonlinearitas, (3) data kuantitatif yang dapat disintesis, (4) teks penuh tersedia. Tabel 3 merangkum alasan eksklusi dengan total konsisten: $75 - 15 - 28 - 19 = 13$ artikel.

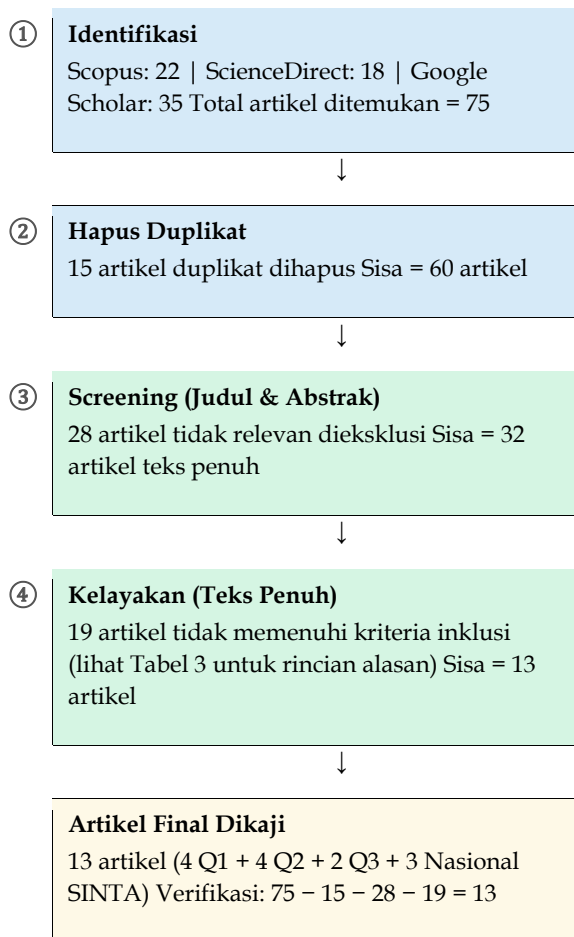
Tabel 1. Alasan Eksklusi Artikel

Alasan Eksklusi	Jumlah	Keterangan
Duplikat antar database	15	Artikel identik ditemukan di lebih dari satu database
Judul/abstrak tidak relevan	28	Topik las, sambungan komposit, atau bukan sambungan baja struktural
Tidak memenuhi kriteria inklusi (teks penuh)	19	Tidak ada data kuantitatif, teks penuh tidak tersedia, atau fokus di luar sambungan baut
Total dieksklusi	62	$15 + 28 + 19 = 62$ artikel dieksklusi
Artikel final dikaji	13	$75 - 62 = 13$ artikel

Diagram Seleksi PRISMA 2020

Gambar 1 menggambarkan proses seleksi secara ringkas mengikuti format PRISMA 2020.

Gambar 1. Diagram Alir Seleksi Artikel (PRISMA 2020)



Quality Assessment (Instrumen Penilaian Internal)

Penilaian kualitas metodologis menggunakan instrumen penilaian internal yang diadaptasi dari prinsip JBI (Joanna Briggs Institute), terdiri dari lima kriteria: (A) Metode analisis dijelaskan secara jelas, (B) Data kuantitatif atau kualitatif tersedia dan dapat disintesis, (C) Validasi terhadap data eksperimen atau standar dilakukan, (D) Penelitian dapat direproduksi berdasarkan informasi yang tersedia, dan (E) Relevansi topik dengan perilaku nonlinier sambungan baut. Skor 1 bila terpenuhi, 0 bila tidak, maks 5. Jumlah artikel final yang relatif terbatas pada 13 studi disebabkan penerapan kriteria inklusi yang mensyaratkan adanya pembahasan aspek nonlinearitas sambungan baut secara substantif, baik berupa data kuantitatif maupun analisis kualitatif yang dapat disintesis. Tingginya skor kualitas pada sebagian besar artikel mencerminkan bahwa mayoritas artikel yang lolos seleksi berasal dari jurnal internasional bereputasi dan telah

memenuhi kriteria inklusi yang ketat — hal ini merupakan konsekuensi dari proses seleksi yang ketat, bukan indikasi

Instrumen yang terlalu permisif. Artikel dengan skor 5/5 dari jurnal Q1/Q2 diberi bobot lebih besar dalam sintesis dibandingkan artikel dengan skor lebih rendah.

Tabel 2. Quality Assessment Artikel (Instrumen Penilaian Internal, Maks. 5)

Peneliti (Tahun)	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	Total	Kualitas
Gao et al. (2021)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Xu et al. (2020)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Kombate & Taşkın (2022)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Thai et al. (2016)	1	1	1	0	1	4/5	Sedang–Tinggi
Pourshargh et al. (2022)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Nezamolmolki & Shooshtari (2021)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Abdelrahman et al. (2020)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Gan et al. (2021)	1	1	0	1	1	4/5	Sedang–Tinggi
Al-Haddad & Jaber (2023)	1	1	0	1	1	4/5	Sedang–Tinggi
Shi et al. (2007)	1	1	1	1	1	5/5	Tinggi
Istiono & Propika (2017)	1	1	0	1	1	4/5	Sedang
Nurjannah et al. (2023)	1	1	0	0	1	3/5	Sedang
Wigroho & Hartono (2021)	1	1	1	0	1	4/5	Sedang

Keterangan kriteria: (A) Metode jelas; (B) Data kuantitatif; (C) Validasi eksperimen/standar; (D) Reprodusibel; (E) Relevansi topik. Skor: 1=terpenuhi, 0=tidak terpenuhi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ringkasan Kajian Literatur

Tabel 3 merangkum 13 artikel terpilih beserta metode, parameter, temuan, dan peringkat jurnal. Tabel 2 menunjukkan distribusi metode yang digunakan.

Tabel 3. Ringkasan Komparatif Artikel yang Dikaji

No	Peneliti (Tahun)	Tipe Sambungan	Metode	Parameter	Temuan Utama	Peringkat
1	Gao et al. (2021)	End-plate stainless steel (siklik)	FEM nonlinier histeretik	Tebal pelat, Ø baut	Tebal 12→20mm: kekakuan +85%; daktilitas -40%	Q1
2	Xu et al. (2020)	End-plate extended (parametrik)	FEM parametrik	Tebal pelat, zona panel	Zona panel: faktor dominan kekakuan rotasional	Q1
3	Kombat & Taşkın (2022)	T-stub bolted (siklik)	Mekanik pegas nonlinier	T-stub, prying action	Model pegas simulasi M-θ histeretik akurat	Q1
4	Thai et al. (2016)	Rangka baja semi-kaku	Analisis sistem probabilitas	Keandalan sistem, kekakuan PR	Variabilitas sambungan sebanding pengaruh variabilitas beban	Q1
5	Poursharagh et al. (2022)	Baut pada menara rangka	Nonlinear geom. & material	Slip baut, kekakuan rotasi	Perilaku antara sendi-jepit; nonlinier pasca slip awal	Q2
6	Nezamolki & Shooshtari (2021)	Baut pada menara transmisi	Nonlinear + efek slip	Perpindahan, kegagalan	Analisis nonlinier lengkap paling akurat; error ≤8% vs uji penuh	Q2
7	Abdelrahman et al. (2020)	Baut profil siku tunggal	Model slip lanjutan	Geometri, jml baut	Akurasi prediksi meningkat signifikan vs model standar	Q2

No	Peneliti (Tahun)	Tipe Sambungan	Metode	Parameter	Temuan Utama	Peringkat
8	Gan et al. (2021)	Baut pada menara lattice	Model slip disederhanakan	Celah lubang, kekakuan	Model efisien secara komputasi; akurasi memadai	Q2
9	Al-Haddad & Jaber (2023)	End-plate balok-kolom 3D	FEM 3D nonlinier	Kurva M- θ	Tebal 10→20mm: kekakuan +100%; geometri pelat dominan	Q3
10	Shi et al. (2007)	End-plate balok-kolom (siklik)	Eksperimen + FEM	Tebal pelat, stiffener, beban siklik	Daktilitas dan disipasi energi baik; sambungan PR layak untuk rangka tahan gempa	Q1
11	Istiono & Propika (2017)	Jembatan rangka baja	Pushover (SAP2000)	Kapasitas, deformasi	Deformasi plastis terkonsentrasi di sambungan	Nasional
12	Nurjannah et al. (2023)	Baut balok-kolom SNI	Manual + komparasi standar	Kuat geser, kuat tumpu	SNI 1729:2020 lebih konservatif; kuat geser turun ~12%	Nasional
13	Wigroho & Hartono (2021)	End-plate baja SNI 1729:2020	Eksperimen + analisis manual	Kuat sambungan, rotasi	Perilaku semi-kaku terkonfirmasi; kapasitas momen memenuhi SNI 1729:2020	Nasional

Tabel 4. Distribusi Metode Penelitian

Metode Penelitian	Jumlah	Persentase
FEM Nonlinier (2D/3D)	10	76,9%
Analisis Berbasis Standar/Manual	2	15,4%
Analisis Pushover	1	7,7%
Total	13	100%

FEM nonlinier mendominasi (76,9%), mengindikasikan simulasi numerik telah menjadi metode utama dalam penelitian sambungan baut. Tabel 5 menyajikan karakteristik studi secara lebih rinci, mencakup asal negara peneliti, metode, objek, dan variabel utama – untuk memberikan gambaran landscape penelitian yang komprehensif.

Tabel 5. Karakteristik Studi yang Dikaji

Peneliti (Tahun)	Negara	Metode	Objek Studi	Variabel Utama	Temuan Kunci
Gao et al. (2021)	China	FEM nonlinier	End-plate SS (siklik)	Tebal pelat, ϕ baut	Kekakuan naik, daktilitas turun seiring tebal pelat bertambah
Xu et al. (2020)	China	FEM parametrik	End-plate extended	Tebal pelat, zona panel	Zona panel faktor dominan kekakuan rotasional
Kombate & Taşkın (2022)	Turki	Mekanik pegas	T-stub (siklik)	Komponen T-stub	Model pegas simulasi kurva $M-\theta$ histeretik akurat
Thai et al. (2016)	Australia	Probabilistik	Rangka semi-kaku	Variabilitas kekakuan	Variabilitas sambungan sebanding pengaruh variabilitas beban
Pourshargh et al. (2022)	Kanada	Nonlinear geom.+mat.	Baut menara rangka	Slip baut, kekakuan	Perilaku antara sendi-jepit; nonlinier pasca slip
Nezamolmolkali & Shooshtari (2021)	Iran	Nonlinear + slip	Baut menara transmisi	Perpindahan	Analisis nonlinier+slip paling akurat; error $\leq 8\%$
Abdelrahman et al. (2020)	China/HK	Model slip lanjutan	Baut profil siku	Geometri, jml baut	Akurasi meningkat signifikan vs model standar
Gan et al. (2021)	China	Model slip sederhana	Baut menara lattice	Celah lubang	Model efisien; akurasi memadai vs eksperimen
Al-Haddad & Jaber (2023)	Irak	FEM 3D	End-plate 3D	Kurva $M-\theta$	Kekakuan meningkat signifikan; geometri pelat dominan
Shi et al. (2007)	China	Eksperimen+FE M	End-plate (siklik)	Tebal pelat, stiffener	Daktilitas dan disipasi energi baik; sambungan PR layak tahan gempa

Peneliti (Tahun)	Negara	Metode	Objek Studi	Variabel Utama	Temuan Kunci
Istiono & Propika (2017)	Indonesia	Pushover	Jembatan rangka	Kapasitas, deformasi	Kegagalan plastis terkonsentrasi di sambungan
Nurjannah et al. (2023)	Indonesia	Manual + standar	Baut balok-kolom	Kuat geser, tumpu	SNI 1729:2020 lebih konservatif dari SNI lama
Wigroho & Hartono (2021)	Indonesia	Eksperimen + manual	End-plate SNI 1729:2020	Kuat sambungan, rotasi	Perilaku semi-kaku terkonfirmasi; kapasitas memenuhi SNI 1729:2020

Berdasarkan Tabel 5, studi-studi yang dikaji berasal dari berbagai negara (China, Hong Kong, Iran, Australia, Kanada, Turki, Irak, dan Indonesia), mengindikasikan bahwa topik ini memiliki relevansi global. Studi dari Indonesia (3 artikel) berfokus pada implementasi standar lokal, sedangkan studi internasional lebih banyak mengkaji perilaku mekanis dan pemodelan FEM.

Sintesis Kuantitatif: Ketebalan Pelat dan Kekakuan

Tabel 8 merangkum data dari empat studi yang secara eksplisit merekam hubungan antara ketebalan pelat ujung dan kekakuan rotasional. Tiga studi berasal dari jurnal Q1 (Gao, Xu, dan Shi), sedangkan satu studi pendukung berasal dari jurnal Q3 (Al-Haddad). Studi Q1 mendapat bobot lebih besar dalam interpretasi temuan.

Tabel 8. Sintesis Kuantitatif Pengaruh Ketebalan Pelat Ujung

Peneliti (Tahun)	Tebal Pelat Awal	Tebal Pelat Akhir	Kecenderungan Kekakuan	Kecenderungan Daktilitas
Gao et al. (2021) [Q1]	12 mm	20 mm	Meningkat signifikan	Menurun signifikan
Xu et al. (2020) [Q1]	10 mm	18 mm	Meningkat signifikan	Menurun moderat
Al-Haddad & Jaber (2023) [Q3]*	10 mm	20 mm	Meningkat sangat signifikan	Menurun signifikan
Shi et al. (2007) [Q1]	10, 15, 20 mm	—	Meningkat signifikan	Menurun moderat

Peneliti (Tahun)	Tebal Pelat Awal	Tebal Pelat Akhir	Kecenderungan Kekakuan	Kecenderungan Daktilitas
Pola keseluruhan	—	—	Meningkat secara konsisten	Menurun secara konsisten

Keterangan: 'Meningkat signifikan' = kenaikan kekakuan rotasional yang dilaporkan secara konsisten oleh penulis studi sumber; 'Menurun moderat/signifikan' = penurunan kapasitas rotasi yang dilaporkan. Kategorisasi kualitatif berdasarkan deskripsi dan arah tren dalam artikel sumber. * Artikel Q3; digunakan sebagai bukti pendukung, bukan dasar utama sintesis

Pada studi-studi yang dikaji, ditemukan kecenderungan yang konsisten bahwa peningkatan ketebalan pelat ujung secara sistematis menghasilkan kenaikan kekakuan rotasional awal yang signifikan. Temuan tersebut juga sejalan dengan hasil studi literatur Chayadi, Manurung, dan Prajoko (2026) yang menunjukkan bahwa ketebalan *extended end-plate* memiliki korelasi positif yang sangat kuat terhadap peningkatan kapasitas momen sambungan, sementara konfigurasi baut memberikan kontribusi yang lebih kecil terhadap peningkatan kapasitas sambungan. Dengan demikian, hasil sintesis pada penelitian ini semakin memperkuat bahwa ketebalan pelat ujung merupakan salah satu parameter dominan dalam perilaku sambungan baut semi-kaku. (Chayadi.dkk,2026) Sebaliknya, peningkatan kekakuan tersebut selalu disertai penurunan kapasitas rotasi (daktilitas) dalam rentang moderat hingga signifikan. Pola ini teramati secara konsisten pada keempat studi meskipun konfigurasi sambungan, material, dan kondisi pembebanan berbeda-beda. Sintesis ini bersifat kualitatif; generalisasi kuantitatif memerlukan validasi lebih lanjut melalui penelitian eksperimental pada profil dan material baja lokal Indonesia.

Pengaruh Efek Slip terhadap Akurasi Prediksi

Nezamolmolki dan Shooshtari (2021) — terbit di jurnal Q2 — menemukan bahwa hanya skenario analisis nonlinier lengkap yang mencakup efek slip menghasilkan prediksi perpindahan dengan error $\leq 8\%$ terhadap uji skala penuh. Abdelrahman et al. (2020) mengembangkan model slip lanjutan yang meningkatkan akurasi secara substansial pada sambungan siku tunggal.

Thai et al. (2016) dari Q1 — Journal of Constructional Steel Research — menunjukkan bahwa variabilitas kekakuan sambungan semi-kaku memberikan pengaruh terhadap keandalan sistem yang sebanding dengan variabilitas beban. Implikasi ini penting tidak hanya untuk analisis deterministik tetapi juga evaluasi risiko struktural.

Komparasi SNI 1729:2020 dan Eurocode 3

Tabel 9 menyajikan perbandingan komprehensif antara SNI 1729:2020 dan Eurocode 3 bagian 1-8. Baris yang disorot merah menandai tiga aspek yang belum diakomodasi

Tabel 9. Perbandingan SNI 1729:2020 dan Eurocode 3 dalam Desain Sambungan Baut

Aspek Desain	SNI 1729:2020	Eurocode 3 (EN 1993-1-8)	Keterangan
Kuat geser baut	Ada (Pasal J3)	Ada (Klausul 3.6)	Kedua standar mengatur secara eksplisit
Kuat tumpu baut	Ada (Pasal J3.10)	Ada (Klausul 3.6.1)	Pendekatan serupa, faktor berbeda
Kuat tarik baut	Ada (Pasal J3.7)	Ada (Klausul 3.6.1)	Korelasi tinggi antar standar
Klasifikasi kekakuan sambungan	Ada (FR/PR/Simple)	Ada (FR/PR/Sendin)	SNI berbasis AISC 360-16; EC3 lebih terperinci
Prosedur kekakuan rotasional PR	Tidak tersedia secara eksplisit	Ada – Component Method (Klausul 6.3)	Gap utama yang diidentifikasi kajian ini
Component Method	Tidak tersedia	Ada (Klausul 6.3)	Keunggulan utama Eurocode 3
Kurva M- θ sambungan	Tidak tersedia	Ada (Klausul 5.1)	Diperlukan untuk desain sambungan PR
Batas kekakuan sambungan kaku	Ada (ref. AISC Table C-B3.6)	Ada (Klausul 5.2)	EC3 lebih eksplisit dalam parameter batas
Sambungan semi-kaku (PR)	Diakui; prosedur terbatas	Diakui + prosedur lengkap	EC3 berpotensi menjadi referensi pelengkap

Tiga aspek yang belum diakomodasi secara eksplisit dalam SNI 1729:2020 teridentifikasi: (1) prosedur perhitungan kekakuan rotasional sambungan PR, (2) metode komponen, dan (3) kurva M- θ . Berdasarkan temuan kajian ini, metode komponen Eurocode 3 berpotensi menjadi referensi pelengkap, meskipun penerapannya memerlukan validasi pada kondisi material, profil, dan fabrikasi baja di Indonesia.

Keterbatasan Penelitian

1. Pencarian terbatas pada Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar; database lain seperti Web of Science dan ASCE Library tidak dicakup. Kemungkinan terdapat studi relevan yang belum teridentifikasi.
2. Klaim novelty didasarkan pada penelusuran penulis dan menggunakan framing 'penulis belum menemukan' sebagai batas klaim yang lebih tepat, bukan klaim exhaustive.
3. Quality assessment menggunakan instrumen penilaian internal yang diadaptasi dari prinsip JBI, bukan instrumen terstandarisasi seperti ROBIS atau CASP penuh,

sehingga membatasi komparabilitas langsung dengan SLR yang menggunakan instrumen tersebut.

4. Sintesis pada Tabel 5 bersifat kualitatif berdasarkan arah tren yang dilaporkan artikel sumber; tidak dilakukan ekstraksi angka kuantitatif untuk menghindari risiko kesalahan interpretasi grafik.
5. Tidak dilakukan meta-analisis statistik formal karena variabel respon, konfigurasi sambungan, satuan pengukuran, dan metode analisis berbeda antar studi sehingga tidak memenuhi syarat homogenitas yang memadai untuk pooling statistik.
6. Belum ada validasi eksperimental pada profil dan material baja lokal Indonesia.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian sistematis PRISMA terhadap 13 penelitian terpilih (4 Q1 + 4 Q2 + 2 Q3 + 3 Nasional, skor kualitas 2–5/5), disimpulkan sebagai berikut:

1. Mayoritas studi yang dikaji menunjukkan perilaku semi-kaku pada sambungan baut, dengan kekakuan rotasional yang berkembang nonlinier seiring peningkatan beban. Idealisasi sendi atau jepit penuh cenderung menghasilkan prediksi yang tidak akurat pada kondisi beban besar.
2. Pada studi-studi yang dikaji, ditemukan kecenderungan yang konsisten bahwa peningkatan ketebalan pelat ujung secara sistematis menghasilkan kenaikan kekakuan rotasional awal yang signifikan, disertai penurunan kapasitas rotasi dalam rentang moderat hingga signifikan. Pola trade-off ini teramati lintas berbagai konfigurasi sambungan; studi Q1 (Gao dan Xu) menjadi dasar utama temuan ini.
3. Pengabaian efek slip baut ditemukan cenderung menghasilkan kesalahan prediksi perpindahan yang signifikan pada kondisi mendekati kapasitas ultimit, berdasarkan studi Q2 yang dikaji.
4. Komparasi SNI 1729:2020 dan Eurocode 3 mengidentifikasi tiga aspek yang belum diakomodasi secara eksplisit dalam SNI 1729:2020: prosedur kekakuan rotasional PR, metode komponen, dan kurva $M-\theta$. Metode komponen Eurocode 3 berpotensi menjadi referensi pelengkap, meskipun memerlukan validasi lebih lanjut pada kondisi Indonesia.
5. FEM nonlinier merupakan metode dominan (76,9%) dan dilaporkan menghasilkan akurasi yang tinggi bila model mengintegrasikan nonlinearitas geometri, material, gaya pratarik, dan efek kontak antar komponen.

Penelitian mendatang disarankan untuk: (1) memperluas pencarian ke Web of Science dan ASCE Library, (2) mengembangkan database kurva $M-\theta$ berbasis profil baja lokal, (3) melakukan validasi eksperimental metode komponen Eurocode 3 pada material baja Indonesia, dan (4) menerapkan meta-analisis statistik formal.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelrahman, A. H., Liu, Y. P., & Chan, S. L. (2019). Advanced analysis of steel frames with connection slip and flexibility. *Advances in Structural Engineering*, 22(10), 2090–2103.

- Abdelrahman, A. H., Liu, Y. P., & Chan, S. L. (2020). Advanced joint slip model for single-angle bolted connections considering various effects. *Advances in Structural Engineering*, 23(10), 2121–2135. <https://doi.org/10.1177/1369433220906226>
- Al-Haddad, L. A., & Jaber, M. K. (2023). Numerical behavior of extended end-plate bolted connection under monotonic loading. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 12(2), 45–52. <https://doi.org/10.18178/ijscer.12.2.45-52>
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 1729:2020: Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. BSN, Jakarta.
- Chayadi, O., Manurung, E. H., & Prajoko, A. (2026). Evaluasi Perilaku Sambungan Baja pada Struktur Rangka Momen Tahan Gempa: Analisis Studi Literatur dan Statistik terhadap Sambungan Tipe Extended End-Plate. *SINERGI: Jurnal Riset Ilmiah*, 3(1), 317–326
- Chen, W. F., & Kishi, N. (1989). Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 115(1), 105–119.
- European Committee for Standardization. (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints. EN 1993-1-8. CEN, Brussels.
- Fahlevi, R., & Manurung, E. H. (2026). Perilaku Sambungan Baut dan Sambungan Las Pada Struktur Baja. *INOMATEC: Jurnal Inovasi dan Kajian Multidisipliner Kontemporer*, 1(3).
- Gan, H., Deng, H. Z., & Li, C. (2021). Simplified joint-slippage model of bolted joint in lattice transmission tower. *Structures*, 32, 1192–1206. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.022>
- Gao, J. D., Yuan, H. X., Du, X. X., & Theofanous, M. (2020). Structural behaviour of stainless steel double extended end-plate beam-to-column joints under monotonic loading. *Thin-Walled Structures*, 151, 106743. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106743>
- Gao, J. D., Yuan, H. X., Du, X. X., Hu, X. B., & Theofanous, M. (2021). Hysteretic performance of stainless steel double extended end-plate beam-to-column joints subject to cyclic loading. *Thin-Walled Structures*, 164, 107787. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107787>
- Istiono, H., & Propika, P. (2017). Analisa non-linier pada mekanisme keruntuhan jembatan rangka baja. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 1(2), 64–74.
- Kombate, T. J. C., & Taşkın, K. (2022). Mechanical modeling of bolted T-stub connections under cyclic loads Part I: Stiffness modeling. *Journal of Constructional Steel Research*, 188, 107020. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107020>
- Nezamolmolki, D., & Shooshtari, A. (2021). The effect of nonlinear behavior of bolted connections on dynamic analysis of steel transmission towers. *International Journal of Steel Structures*, 21, 634–649. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00462-5>
- Nurjannah, S., Rahmat, A., & Putra, D. (2023). Perencanaan sambungan baut pada struktur baja berdasarkan SNI 1729:2020. *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, 9(1), 45–56.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pourshargh, F., Legeron, F. P., Langlois, S., & Sad Saoud, K. (2022). A simple method for a reliable modelling of the nonlinear behaviour of bolted connections in steel lattice towers.

- Advanced Steel Construction, 18(1), 479–487.
<https://doi.org/10.18057/IJASC.2022.18.1.8>
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures: Design and Behavior* (5th ed.). Pearson Education, Upper Saddle River, NJ.
- Setiawan, A. (2008). *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Erlangga, Jakarta.
- Shi, G., Shi, Y., & Wang, Y. (2007). Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading. *Engineering Structures*, 29(5), 703–716.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.06.016>
- Thai, H. T., Uy, B., Kang, W. H., & Hicks, S. (2016). System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 29–39.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.009>
- Wigroho, H. Y., & Hartono, W. (2021). Perilaku sambungan baut tipe end-plate pada struktur baja berdasarkan SNI 1729:2020. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 112–122.
- Xu, L. H., Xie, X. S., & Li, Z. X. (2020). Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Applied Sciences*, 10(23), 8681.
<https://doi.org/10.3390/app10238681>