

# JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang

## Kajian Kelayakan Seismik dan Penyusunan Sambungan Tipikal Bolted Flange Plate Pada Sistem SRPMK Menggunakan Profil Baja Indonesia

**Dyah Kusumastuti\***

Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no 10, Bandung. 40132, Indonesia E-mail: dkusumastuti@itb.ac.id

**Randy Tenderan**

Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no 10, Bandung. 40132, Indonesia E-mail: randy.tenderan@itb.ac.id

**Naufal Yusviansyah Mahib**

Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no 10, Bandung. 40132, Indonesia E-mail: naufalyus30@gmail.com

**Andi Alfian Jayusman**

Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha no 10, Bandung. 40132, Indonesia E-mail: andijayusman25@gmail.com

### Abstrak

*Indonesia merupakan negara dengan tingkat aktivitas seismik tinggi, sehingga perancangan struktur baja tahan gempa menjadi sangat penting. SNI 7860:2020 dan SNI 7972:2020 menetapkan bahwa sambungan balok-kolom dalam Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) harus menggunakan sambungan terpraktualifikasi atau diuji untuk memastikan kekakuan dan kapasitas rotasinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kesesuaian profil baja berdasarkan SNI 9150 terhadap perencanaan sambungan Bolted Flange Plate (BFP), salah satu tipe sambungan terpraktualifikasi. Studi dilakukan dengan menganalisis berbagai kombinasi profil balok dan kolom berdasarkan persyaratan seismik berupa ketentuan geometri, kapasitas momen plastis, dan rasio strong column-weak beam (SCWB). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa profil yang memenuhi seluruh persyaratan terbatas, dengan kendala utama teridentifikasi pada kelangsingan kolom yang mengurangi kapasitas momen plastis. Temuan ini menegaskan perlunya strategi pemilihan profil baja yang lebih selektif serta potensi pengembangan kebijakan produksi baja untuk mendukung penerapan sambungan terpraktualifikasi di Indonesia.*

**Kata-kata Kunci:** Struktur baja, Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), sambungan momen balok-kolom, Bolted Flange Plate (BFP), persyaratan seismik.

### Abstract

*Indonesia is a country with a high level of seismic activity, making the design of earthquake-resistant steel structures extremely important. SNI 7860:2020 and SNI 7972:2020 stipulate that beam-column connections in Special Moment Frame Systems (SMF) must use prequalified connections or be tested to ensure their stiffness and rotational capacity. This research aims to examine the suitability of steel profiles based on SNI 9150 for the planning of Bolted Flange Plate (BFP) connections, one type of prequalified connection. The study was conducted by analyzing various combinations of beam and column profiles based on seismic requirements, including geometric criteria, plastic moment capacity, and the strong column-weak beam (SCWB) ratio. The evaluation results show that profiles meeting all requirements are limited, with the main constraint identified as column slenderness, which reduces plastic moment capacity. These findings confirm the need for a more selective steel profile selection strategy as well as the potential development of steel production policies to support the implementation of prequalified connections in Indonesia.*

**Keywords:** Steel structure, Special Moment Frame Systems (SMF), beam-column moment connection, Bolted Flange Plate (BFP), seismic requirements.

\* Penulis Korespondensi: dkusumastuti@itb.ac.id

## 1. Pendahuluan

Indonesia terletak pada kawasan *Pacific Ring of Fire* yang merupakan salah satu zona tektonik paling aktif di dunia. Kondisi geografis ini menjadikan Indonesia sangat rentan terhadap gempa bumi dengan frekuensi dan magnitudo yang tinggi. Fakta ini menegaskan pentingnya penerapan prinsip-prinsip perencanaan struktur tahan gempa secara konsisten pada pembangunan gedung dan infrastruktur di seluruh wilayah Indonesia.

Di antara berbagai sistem struktur yang direkomendasikan untuk menahan gaya gempa, *Special Moment Frame* (SMF) diakui sebagai salah satu sistem dengan kinerja paling andal. Sistem ini dirancang untuk memiliki daktilitas tinggi, sehingga mampu mengalami deformasi inelastik besar sambil tetap menjaga stabilitas keseluruhan struktur. Melalui kemampuan untuk mendisipasikan energi melalui rotasi plastis, SMF secara signifikan mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan getas yang mendadak. Oleh karena itu, SMF banyak digunakan untuk bangunan penting dan gedung bertingkat tinggi di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi. Studi-studi internasional seperti FEMA-350 (2000) dan AISC 341 (2016) menegaskan bahwa SMF merupakan salah satu sistem struktur baja paling dapat diandalkan dalam mengurangi risiko keruntuhan pada kondisi gempa besar, karena sistem ini dirancang untuk menahan simpangan antarlantai yang signifikan, memenuhi persyaratan daktilitas tinggi, serta memiliki kapasitas disipasi energi yang memadai.

Namun, kinerja unggul SMF hanya dapat dicapai apabila persyaratan desain tertentu terpenuhi. Standar internasional seperti AISC 341, yang juga diadopsi dalam SNI 7860 (2020), menetapkan sejumlah ketentuan yang harus dipenuhi dalam perencanaan SMF. Persyaratan tersebut meliputi: (1) *Highly Ductile Member* (HDM), yang memastikan balok dan kolom memiliki kapasitas rotasi plastis yang cukup tanpa mengalami kegagalan getas; (2) *Strong Column-Weak Beam* (SCWB), yang mengarahkan mekanisme leleh terjadi pada balok, bukan pada kolom; dan (3) penggunaan *Prequalified Moment Connections*, yaitu tipe sambungan yang telah terbukti melalui pengujian eksperimental mampu mencapai daktilitas dan kapasitas disipasi energi yang dipersyaratkan. Ketiga ketentuan ini merupakan pilar utama dalam menjamin kinerja seismik SMF.

Dalam konteks Indonesia, implementasi persyaratan tersebut menemui sejumlah tantangan. Salah satunya adalah terkait dengan persyaratan *Highly Ductile Member*, di mana terdapat ketidaksesuaian antara ketentuan perancangan struktur baja tahan gempa yang mengacu pada AISC/SNI dengan spesifikasi material dan dimensi baja Indonesia yang mengikuti

standar Jepang (*Japanese Industrial Standards* - JIS), seperti baja SN400B. Perbedaan standar ini berpotensi menimbulkan kesulitan dalam memastikan profil baja lokal dapat memenuhi kriteria daktilitas yang dipersyaratkan. Keterbatasan dalam pemenuhan kriteria HDM ini juga berdampak langsung pada persyaratan *Strong Column-Weak Beam* (SCWB). Karena hanya sebagian kecil profil Indonesia yang dapat dikategorikan sebagai HDM, maka jumlah kombinasi balok-kolom yang memenuhi kriteria SCWB semakin terbatas. Padahal, prinsip SCWB sangat penting untuk menjamin bahwa plastisitas terkonsentrasi di balok, bukan di kolom. Apabila kondisi ini tidak tercapai, maka potensi terbentuknya mekanisme keruntuhan pada kolom meningkat, yang dapat mengurangi stabilitas global struktur dan menimbulkan kegagalan yang bersifat mendasar. Dengan kata lain, isu mismatch antara AISC dan JIS tidak hanya memengaruhi pemilihan profil individu sebagai HDM, tetapi juga mempersempit peluang terbentuknya sistem SMF yang sesuai dengan prinsip desain kapasitas SCWB.

Selain itu, pada aspek *Prequalified Moment Connection*, praktik di lapangan di Indonesia masih didominasi oleh penggunaan sambungan *haunch* karena alasan kemudahan fabrikasi dan pemasangan. Yuana dkk. (2023) mencatat bahwa sambungan *haunch* merupakan salah satu tipe yang paling umum digunakan, meskipun tidak termasuk dalam daftar sambungan terpraktualifikasi AISC 358 (2016) maupun SNI 7972 (2020), dan kinerjanya terhadap gempa belum terbukti secara meyakinkan. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara regulasi yang berlaku dan praktik aktual di lapangan, yang berpotensi menurunkan ketahanan seismik struktur bangunan di Indonesia.

Untuk menjawab tantangan tersebut, salah satu alternatif sambungan terpraktualifikasi yang menjanjikan adalah *Bolted Flange Plate* (BFP). Sambungan ini telah divalidasi melalui berbagai penelitian eksperimental dan terbukti mampu memenuhi kriteria penerimaan SMF. Keunggulan utama BFP adalah sebagian besar proses pengelasan dapat dilakukan di workshop dengan kualitas terkontrol, sementara pemasangan di lapangan dapat dilakukan dengan baut, sehingga mengurangi risiko cacat pengelasan di lapangan. Sato dkk. (2008) menunjukkan bahwa sambungan BFP mampu mencapai rotasi antarlantai lebih dari 0,04 rad, yang sesuai dengan kriteria yang dipersyaratkan untuk sistem struktur tahan gempa.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi analitis terhadap kesesuaian profil baja Indonesia yang berbasis JIS dengan persyaratan desain seismik AISC, khususnya dalam penerapan sambungan BFP pada sistem SMF. Studi ini difokuskan pada

penilaian kelayakan profil baja Indonesia dalam konteks penerapan sambungan terpraktualifikasi *Bolted Flange Plate* (BFP) pada sistem SRPMK. Penelitian ini menghasilkan sebuah *benchmark* sambungan BFP yang memuat parameter-parameter desain, seperti tebal *cover plate*, konfigurasi baut, spesifikasi *shear tab*, pelat kontinuitas, dan *doubler plate*. *Benchmark* ini diharapkan dapat menjadi acuan praktis bagi para perencana di Indonesia dalam mengimplementasikan sambungan BFP pada desain SRPMK, sehingga membantu menjembatani perbedaan antara regulasi desain internasional dan kondisi material lokal, serta mendorong peningkatan ketahanan seismik bangunan di Indonesia.

## 2. Metode Analisis

### 2.1. Seleksi persyaratan parametrik sambungan BFP

Pada sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP), SNI 7972:2020 yang mengadopsi ketentuan AISC 358-16 menetapkan sejumlah batasan *prequalification* yang harus dipenuhi. Dalam penelitian ini, sebagai langkah awal dilakukan evaluasi parametrik terhadap batasan-batasan tersebut dengan meninjau berbagai profil *H-beam* dan *I-shaped wide flange* (IWF) yang tercantum dalam SNI 9150:2023, yaitu katalog penampang baja canai panas yang diproduksi di Indonesia. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai apakah profil baja domestik memenuhi kriteria parametrik sambungan BFP sebagaimana ditetapkan dalam SNI 7972:2020.

Pada sisi balok, batasan *prequalification* meliputi tinggi penampang maksimum W36 (W920), tebal flens tidak lebih dari 25 mm, dan berat maksimum 150 lb/ft (223 kg/m). Sementara itu, untuk elemen kolom berbentuk *rolled section*, tinggi penampang dibatasi hingga W36 (W920) apabila terdapat pelat lantai beton, dan maksimum W14 (W360) apabila pelat lantai beton tidak tersedia. Selain batasan dimensi tersebut, rasio lebar-tebal flens dan web juga harus memenuhi ketentuan penampang kompak (*compact section*) sebagaimana diatur dalam SNI 7860:2020 (AISC 341).

Batasan-batasan parametrik ini merefleksikan rentang spesimen sambungan BFP yang telah divalidasi melalui pengujian eksperimental, di mana sambungan dinyatakan layak digunakan dalam sistem SMF apabila mampu mencapai rotasi plastis minimum sebesar 0,04 radian. Oleh karena itu, pada tahap ini dilakukan seleksi awal terhadap profil balok dan kolom berdasarkan kesesuaiannya terhadap batasan *prequalification* sambungan BFP, sebelum dilanjutkan ke tahapan evaluasi seismik berikutnya.

### 2.2. Seleksi persyaratan *Highly Ductile Member*

Pada tahap ini, evaluasi difokuskan pada pemenuhan

persyaratan *Highly Ductile Member* (HDM) sebagai tahapan lanjutan dari seleksi parametrik sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP). Evaluasi ini dilakukan untuk meninjau apakah profil baja domestik yang dinyatakan layak secara parametrik untuk sambungan BFP juga memenuhi kriteria HDM sebagaimana ditetapkan dalam SNI 7860:2020. Persyaratan ini mengatur penggunaan elemen dengan daktilitas tinggi dalam perencanaan seismik guna mencegah terjadinya tekuk lokal prematur pada penampang dan menjamin kemampuan deformasi plastis yang memadai pada sistem struktur.

Evaluasi HDM mencakup pemeriksaan rasio kelangsingan pada komponen flens dan web terhadap batas  $\lambda_{hd}$  yang ditentukan dalam standar. Untuk komponen flens, kelangsingan dinyatakan sebagai  $b/t_f$ , di mana  $b$  adalah setengah lebar flens dan  $t_f$  adalah tebal flens. Untuk komponen web, kelangsingan dinyatakan sebagai  $h/t_w$ , di mana  $h$  adalah tinggi bersih antara flens dan  $t_w$  adalah tebal web. Rasio-rasio ini kemudian dibandingkan dengan batas  $\lambda_{hd}$  untuk HDM, yang lebih ketat dibandingkan dengan syarat penampang *compact* biasa.

Dalam analisis ini, sejumlah parameter kunci didefinisikan untuk mendukung evaluasi kapasitas elemen struktur baja. Modulus elastisitas ( $E$ ) diambil sebesar 200.000 MPa sebagai representasi kekakuan material baja struktural, sedangkan kuat leleh minimum ( $F_y$ ), yang dinyatakan dalam satuan MPa, digunakan sebagai acuan awal terjadinya pelemahan material, dan nilainya diambil dari nilai nominal berdasarkan spesifikasi material. Kebutuhan kuat tekan aksial ( $P_u$ ) ditentukan berdasarkan kombinasi pembebanan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD). Selanjutnya, parameter  $R_y$  didefinisikan sebagai rasio antara kuat leleh ekspektasi terhadap kuat leleh nominal untuk memperhitungkan pengaruh *overstrength* material, sementara faktor reduksi kekuatan tekan ( $\phi_c$ ) diterapkan guna memberikan margin keamanan dalam perencanaan elemen yang bekerja terhadap gaya tekan aksial.

Untuk memberikan evaluasi yang komprehensif, setiap profil *H-beam* dan IWF pada SNI 9150 (2023) dievaluasi dalam dua kondisi pembebanan yang berbeda, yaitu sebagai kolom yang dikenai kombinasi gaya aksial dan lentur, serta sebagai balok yang diasumsikan hanya menahan momen lentur. Pada evaluasi kolom, pengaruh beban aksial diperhitungkan dengan menggunakan beban desain representatif  $P_u = 0,3P_n$ , yang mencerminkan kondisi beban aksial moderat sebagaimana lazim ditemukan pada sistem SMF. Kuat tekan nominal  $P_n$  dihitung berdasarkan SNI 1729 (2020), khususnya menggunakan tegangan tekuk kritis yang diturunkan dari persamaan Euler ( $F_{cr}$ ) dan luas penampang bruto

( $A_g$ ). Beban aksial ini digunakan untuk menghitung rasio gaya aksial  $C_a$ , yang selanjutnya digunakan

$$b/t_f = 0.32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} \quad (1)$$

$$h/t_w \leq \begin{cases} 2.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (1 - 1.04) C_a, & C_a \leq 0.114 \\ 0.88 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}} (2.68 - C_a) \geq 1.57 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}, & C_a > 0.114 \end{cases} \quad (2)$$

$$C_a = \frac{P_u}{\phi_c P_y} \quad (3)$$

### 2.3. Seleksi persyaratan kapasitas lentur dan lendutan

Tahap seleksi berikutnya dilakukan dengan meninjau kapasitas lentur dan lendutan balok terhadap kombinasi beban gravitasi ultimit. Evaluasi ini menjadi krusial karena profil balok yang tidak mampu memenuhi tuntutan beban gravitasi tidak dapat dianggap layak untuk tahap analisis berikutnya, seperti persyaratan SCWB maupun perencanaan sambungan BFP. Dalam analisis ini, akan digunakan berbagai variasi bentang elemen struktur dan beban yang dimaksudkan untuk merepresentasikan kondisi nyata pada bangunan gedung dengan konfigurasi yang berbeda, sehingga profil yang lolos seleksi benar-benar dapat bertahan dalam aplikasi praktis.

Beban gravitasi yang digunakan meliputi *Dead Load* (DL), *Superimposed Dead Load* (SIDL), serta variasi *Live Load* (LL). Variasi beban hidup (LL) yang digunakan adalah sebesar 1,9; 2,4; 3,8; dan 4,8 kN/m<sup>2</sup>, sedangkan beban mati tambahan (*Superimposed Dead Load* – SIDL) terdiri atas *ceiling* sebesar 0,29 kN/m<sup>2</sup>, *floor* sebesar 0,77 kN/m<sup>2</sup>, *filler stone concrete* sebesar 2,3 kN/m<sup>2</sup>, dinding sebesar 0,38 kN/m<sup>2</sup>, dan beban MEP sebesar 0,25 kN/m<sup>2</sup>. Dalam analisis ini, digunakan variasi panjang bentang balok mulai dari 5 hingga 8 m dengan *tributary area* sebesar 8 m × 8 m sebagai dasar penentuan beban garis pada balok.

Kapasitas lentur ditinjau dengan membandingkan momen ultimit akibat beban gravitasi ( $M_u$ ) dengan kapasitas momen nominal penampang ( $M_n$ ). Seleksi hanya meloloskan profil yang memenuhi kondisi  $M_u \leq \phi_b M_n$ , dengan  $\phi_b$  sebagai faktor reduksi kekuatan lentur sesuai AISC 360 (2016). Penentuan  $M_u$  dilakukan dengan menggunakan kombinasi beban ultimit ditetapkan mengikuti ketentuan LRFD, yaitu 1,2DL + 1,6LL. Selain kapasitas lentur, setiap profil juga diperiksa terhadap batas lendutan layan. Perhitungan lendutan dilakukan dengan beban kombinasi layan (D+L) menggunakan persamaan elastis klasik. Batas lendutan ditetapkan sesuai commentary AISC 360-16 Bab L2, yaitu L/360 untuk balok interior dan L/240 untuk balok atap. Dengan demikian, profil yang dinyatakan lolos

untuk membedakan konfigurasi balok ( $C_a = 0$ ) dan kolom ( $C_a > 0$ ).

pada tahap ini adalah profil yang tidak hanya mampu mengembangkan kapasitas lentur memadai, tetapi juga memiliki kekakuan cukup untuk menjaga lendutan dalam batas yang diizinkan.

$$M_n = F_y Z_x \quad (4)$$

$$\delta = \frac{wL^4}{384EI} \quad (5)$$

Parameter  $F_y$  merepresentasikan tegangan leleh minimum yang menjadi batas transisi perilaku elastis ke plastis pada baja, sedangkan  $Z_x$  menunjukkan kapasitas geometri penampang dalam menahan momen plastis. Semakin besar nilai  $Z_x$ , semakin besar pula kemampuan penampang untuk menyalurkan momen plastis. Sementara itu, lendutan balok ( $\delta$ ) ditentukan menggunakan persamaan elastis klasik, di mana  $w$  adalah beban merata yang bekerja sepanjang balok,  $L$  adalah panjang bentang balok,  $E$  adalah modulus elastisitas baja (200.000 MPa untuk baja struktural), dan  $I$  adalah momen inersia penampang.

Hasil dari tahap seleksi ini menjadi filter penting untuk memastikan bahwa profil balok yang dipertahankan tidak hanya memenuhi persyaratan seismik, tetapi juga layak digunakan dalam kondisi pembebanan gravitasi yang realistis pada bangunan gedung. Profil yang lolos pada tahap ini kemudian dapat dilanjutkan untuk evaluasi lanjutan terhadap persyaratan SCWB dan desain sambungan Bolted Flange Plate (BFP).

### 2.4. Seleksi persyaratan *Strong Column Weak Beam*

Konsep *Strong Column-Weak Beam* (SCWB) merupakan prinsip fundamental dalam perencanaan seismik pada sistem *Moment Resisting Frame* (MRF). Prinsip ini memastikan bahwa sendi plastis berkembang terutama pada balok, bukan pada kolom, sehingga deformasi plastis dapat terjadi secara lokal dan terkontrol sekaligus mencegah terjadinya keruntuhan vertikal progresif. Secara teknis, hal ini dicapai dengan mengatur rasio kekuatan kolom terhadap balok (*Column-to-Beam Strength Ratio* / CBSR) pada setiap sambungan balok-kolom. Studi numerik dan eksperimental, seperti yang dilakukan oleh Zaghi dkk. (2014),

menunjukkan bahwa sistem MRF dengan nilai CBSR rendah (di bawah 1,0) cenderung mengalami mekanisme keruntuhan yang tidak terkendali, yang diawali dengan kegagalan kolom dan berujung pada instabilitas lateral global saat terjadi gempa besar.

Analisis SCWB dalam penelitian ini dilakukan pada berbagai profil baja tipe H dan IWF sebagaimana tercantum dalam SNI 9150:2023, yang sebelumnya telah diseleksi untuk memenuhi persyaratan seleksi sebelumnya. Evaluasi ini bertujuan untuk meninjau kesesuaian profil baja yang diproduksi secara lokal dengan ketentuan desain kapasitas seismik sebagaimana dipersyaratkan dalam SNI 7860:2020, khususnya dalam memastikan hierarki kekuatan yang menempatkan kolom lebih kuat dibandingkan balok.

$$\Sigma M_{pc}^* / \Sigma M_{pb}^* > 1.0 \quad (6)$$

$$\Sigma M_{pc}^* = \Sigma Z_c (F_{yc} - \alpha_s P_r A_g) \quad (7)$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma (M_{pr} + \alpha_s M_v) \quad (8)$$

Dalam evaluasi *Strong Column-Weak Beam* (SCWB), sejumlah parameter utama didefinisikan untuk menentukan kapasitas lentur elemen balok dan kolom. Luas penampang bruto kolom dinyatakan sebagai  $A_g$ , sementara kuat leleh minimum balok dan kolom masing-masing dilambangkan dengan  $F_{yb}$  dan  $F_{yc}$ . Momen plastis probabilistik pada lokasi sendi plastis dinyatakan sebagai  $M_{pr}$ , yang ditentukan berdasarkan ketentuan AISC 358-16 atau melalui protokol pengujian eksperimental yang tervalidasi. Selain itu, kontribusi momen tambahan akibat amplifikasi geser dari sendi plastis hingga garis pusat kolom dinyatakan sebagai  $M_v$ , yang besarnya bergantung pada karakteristik spesifik bangunan, termasuk panjang bentang balok ( $L_h$ ) dan distribusi beban gravitasi pada kombinasi pembebanan LRFD maupun ASD. Beban aksial kolom dilambangkan dengan  $P_r$ , sedangkan  $Z_c$  menyatakan modulus plastis kolom terhadap sumbu lenturnya. Sesuai dengan SNI 7860:2020, faktor amplifikasi  $\alpha_s$  diambil sebesar 1 untuk perencanaan berbasis LRFD. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan dalam perhitungan kapasitas lentur kolom dan balok, yang diverifikasi untuk memastikan pemenuhan persyaratan SCWB dalam standar perencanaan seismik. Untuk menjaga konsistensi asumsi beban aksial antara analisis *Highly Ductile Member* (HDM) dan evaluasi SCWB, nilai  $P_r$  pada evaluasi SCWB diambil sama dengan  $P_u$  pada analisis HDM, yaitu sebesar  $0,3P_n$ . Pendekatan ini memastikan keseragaman dalam mengevaluasi kapasitas kolom pada kondisi desain yang sebanding.

## 2.5. Desain sambungan BFP

Desain sambungan BFP meliputi perencanaan terhadap baut dan tebal cover plate, pemeriksaan

kekuatan (akan dilakukan iterasi apabila kekuatan tidak terpenuhi), desain terhadap geser, serta perencanaan pelat kontinuitas dan pelat double. Detail perencanaan dapat dilihat pada SNI 7972 Bab 7.6.

Sambungan terprakualifikasi, pada dasarnya merupakan sambungan yang unik. Dengan kata lain sambungan terprakualifikasi dipengaruhi oleh komponen perencanaan struktur lainnya seperti beban hidup yang bekerja, dimensi struktur, hingga ketidakberaturan struktur dapat mempengaruhi hasil akhir perencanaan sambungan terprakualifikasi. Oleh karena itu, penulis membuat batasan sebagai syarat berlakunya *benchmark* sambungan terprakualifikasi ini, yang disajikan pada **Tabel 1**.

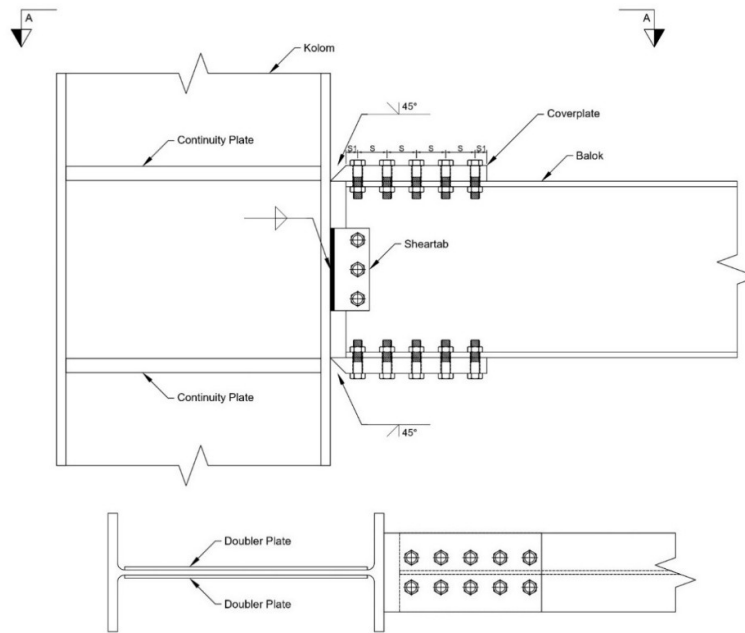
**Tabel 1. Batasan dan asumsi desain *benchmark* sambungan BFP**

Kategori	Batasan dan Asumsi Desain
Peraturan & Standar	Desain sambungan mengacu pada SNI 7860, SNI 7972, dan SNI 1729 keluaran tahun 2020
Material	Profil Balok dan Kolom menggunakan Baja Struktural Jenis SN400B
Asumsi Struktural	<ul style="list-style-type: none"> <li>Struktur dianggap beraturan dengan denah tipikal</li> <li>Balok diasumsikan terkekang lateral secara penuh sehingga <math>M_n = M_p</math></li> <li>Beban aksial pada kolom tidak lebih dari 30% kapasitasnya, <math>P_r \leq 0.3P_n</math></li> </ul>
Pembebanan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beban mati tambahan (SIDL) area yang bekerja sebesar 3.61 kN/m<sup>2</sup></li> <li>Beban mati tambahan (SIDL) dinding yang bekerja sebesar 0.38 kN/m<sup>2</sup></li> </ul>
Detail	Web balok disambung ke muka kolom menggunakan <i>full double fillet weld</i> dengan tebal 10mm

Selain itu, penulis juga membatasi variasi *benchmark* yang akan disajikan pada variasi-variasi berikut:

- Mutu baut : F10T
- L balok (m) : 5, 6, 7, dan 8
- Live load (kN/m<sup>2</sup>) : 1,9 ; 2,4 ; 3,8 ; dan 4,8

Dengan demikian, *benchmark* yang akan disusun akan memuat informasi parameter sambungan terprakualifikasi BFP meliputi: diameter baut, spasi antar baut (s), spasi baut tepi (s1), jumlah baut pada sisi flens, jumlah baut pada sisi web, tebal *coverplate*, tebal *sheartab*, tebal *continuity plate*, dan tebal *doubler plate* yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



### Potongan A-A

**Gambar 1. Parameter sambungan terprakualifikasi BFP sebagai output *benchmark***

### 3. Hasil Analisis

### 3.1. Evaluasi hasil seleksi profil

Hasil seleksi profil baja dilakukan secara bertahap berdasarkan persyaratan yang telah dibahas sebelumnya, mulai dari batasan prakualifikasi sambungan BFP, klasifikasi *Highly Ductile Member* (HDM), kapasitas lentur dan lendutan, hingga verifikasi *Strong Column-Weak Beam* (SCWB).

Hasil analisis parametrik sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP) menunjukkan bahwa untuk tinjauan profil sebagai elemen kolom, seluruh 46 profil baja memenuhi batasan prakualifikasi berdasarkan tinggi penampang ( $H \leq 920$  mm), sehingga tidak terdapat pembatasan dari sisi dimensi global kolom dalam penerapan sambungan BFP. Sebaliknya, hasil yang lebih restriktif diperoleh pada tinjauan profil sebagai elemen balok. Seluruh profil memenuhi batasan tinggi penampang maksimum, namun jumlah profil yang lolos berkurang menjadi 40 setelah diterapkan batasan tebal flens maksimum sebesar 25 mm. Penerapan batasan berat penampang maksimum sebesar 223 kg/m tidak mengurangi jumlah profil tambahan, sehingga jumlah profil balok yang memenuhi seluruh kriteria *prequalification* tetap sebanyak 40. Temuan ini menunjukkan bahwa tebal flens merupakan parameter pengendali utama dalam seleksi parametrik sambungan BFP untuk elemen balok, sedangkan batasan berat penampang berperan sekunder.

Dari sisi mekanisme perilaku, flens dengan ketebalan berlebih berpotensi menimbulkan ketidakselarasan deformasi antara pelat sambungan dan flens balok, yang dapat memicu konsentrasi regangan lokal, penurunan daktilitas, serta meningkatkan risiko terjadinya *premature fracture* sebelum kapasitas rotasi plastis yang dipersyaratkan tercapai. Sementara itu, batasan berat penampang lebih berkaitan dengan dimensi global dan konstruktabilitas sambungan, tanpa memberikan pengaruh tambahan yang signifikan setelah kriteria tebal flens terpenuhi. Dengan demikian, hasil seleksi parametrik menghasilkan 46 profil yang layak sebagai elemen kolom dan 40 profil yang layak sebagai elemen balok untuk dilanjutkan ke tahap evaluasi berikutnya.

Tahap kedua, hasil evaluasi *Highly Ductile Member* (HDM) menunjukkan bahwa pemenuhan kriteria daktilitas masih menjadi pembatas signifikan bagi profil baja Indonesia yang telah lolos seleksi parametrik sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP). Pada tinjauan profil sebagai elemen kolom, dari total 46 profil yang dievaluasi, sebanyak 26 profil (56,5%) tidak memenuhi persyaratan HDM. Kegagalan tersebut didominasi oleh ketidakpatuhan elemen flens terhadap batas kelangsingan HDM, yaitu sebanyak 22 profil, sementara masing-masing 2 profil gagal akibat keterbatasan pada elemen web saja serta kombinasi kegagalan flens dan web. Distribusi ini menunjukkan bahwa elemen flens merupakan

merupakan faktor pengendali utama dalam pemenuhan persyaratan HDM untuk profil kolom.

Pada tinjauan profil sebagai elemen balok, hasil yang lebih restriktif diperoleh. Dari 40 profil balok yang telah memenuhi seleksi parametrik BFP, sebanyak 24 profil (60%) tidak memenuhi persyaratan HDM. Seluruh kegagalan pada tinjauan balok disebabkan oleh elemen flens yang tidak memenuhi batas kelangsingan yang dipersyaratkan, sedangkan elemen web pada seluruh profil balok dinyatakan memenuhi kriteria HDM. Temuan ini menegaskan bahwa keterbatasan pemenuhan HDM pada profil baja Indonesia, baik sebagai kolom maupun balok, secara konsisten dikendalikan oleh karakteristik geometrik flens, sementara kontribusi elemen web relatif tidak kritis pada tahap evaluasi ini. Rekapitulasi profil yang lolos persyaratan HDM ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Temuan ini menegaskan bahwa elemen flens merupakan faktor pengendali utama dalam pemenuhan persyaratan *Highly Ductile Member* (HDM) pada profil baja Indonesia yang telah lolos seleksi parametrik sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP). Dominasi kegagalan pada elemen flens, baik pada tinjauan sebagai kolom maupun balok, berkaitan dengan karakteristik geometrik penampang IWF yang umumnya memiliki flens relatif lebar dengan ketebalan terbatas, sehingga menghasilkan rasio lebar–tebal ( $b/t$ ) yang mendekati atau melampaui batas  $\lambda_{nd}$ . Kondisi ini menjadikan flens sebagai elemen kritis dalam evaluasi daktilitas, sementara elemen web menunjukkan kontribusi kegagalan yang relatif terbatas, khususnya pada tinjauan sebagai balok.

Implikasi dari ketidakmampuan memenuhi persyaratan HDM dalam konteks ini tidak hanya bersifat geometrik, tetapi berkaitan langsung dengan kinerja inelastik sambungan dan sistem struktur. Wu dkk. (2017) menunjukkan bahwa bahkan penampang yang secara klasifikasi tergolong kompak masih berpotensi mengalami *local buckling* sebelum mencapai kapasitas rotasi plastis yang dipersyaratkan apabila rasio lebar–tebal mendekati nilai batas. Dalam kerangka penerapan sambungan BFP pada sistem MRF, ketidakstabilan flens selama deformasi inelastik berpotensi mengganggu pembentukan sendi plastis yang stabil di lokasi yang direncanakan, sehingga menurunkan kapasitas disipasi energi sistem. Kondisi ini dapat memicu respons seismik yang kurang terkendali, seperti terjadinya degradasi kekuatan yang cepat dan bentuk kurva histeresis yang terjepit (*pinched hysteresis*), sebagaimana diobservasi oleh Medina dan Krawinkler (2005).

Tahap ketiga, akan ditentukan terlebih dahulu beban maksimum *Live Load* yang dapat diterima profil dari berbagai variasi bentang yang ditinjau,

**Tabel 2. Klasifikasi HDM profil SNI 9150**

Profil	Klasifikasi HDM	
	Column	Beam
H 100.100.6.8	✓	✓
H 125.125.6.5.9	✓	✓
H 150.150.7.10	✓	✓
H 414.405.18.28	✓	✗
H 428.407.20.35	✓	✗
H 458.417.30.50	✓	✗
H 498.432.45.70	✓	✗
W 100.50.5.7	✓	✓
W 125.60.6.8	✓	✓
W 148.100.6.9	✓	✓
W 150.75.5.7	✓	✓
W 198.99.4.5.7	✓	✓
W 200.100.5.5.8	✓	✓
W 248.125.5.9	✓	✓
W 250.125.6.9	✓	✓
W 450.200.9.14	✓	✓
W 500.200.10.16	✓	✓
W 588.300.12.20	✓	✓
W 600.200.11.17	✓	✓
W 700.300.13.24	✓	✓

kemudian maksimum *Live Load* tersebut yang akan digunakan dalam peninjauan terhadap batas lendutan. Perlu ditegaskan bahwa tahapan seleksi kapasitas lentur dan lendutan hanya diterapkan pada profil yang ditinjau sebagai balok. Hal ini dikarenakan pada profil yang ditinjau sebagai kolom, kapasitas aksial telah diasumsikan aman melalui pendekatan konservatif  $P_u = 0,3P_n$ , sehingga tidak diperlukan verifikasi tambahan terhadap kapasitas maupun lendutan. Sebaliknya, untuk profil balok, meskipun telah memenuhi persyaratan HDM, kelayakan terhadap beban

gravitasi dan kriteria lendutan tetap harus diverifikasi sebelum profil dinyatakan layak digunakan dalam sistem MRF.

Berdasarkan hasil analisis, dari total 16 profil yang ditinjau sebagai balok pada tahap seleksi kapasitas lentur dan lendutan, hanya 5 profil yang dinyatakan lolos. Profil yang tidak memenuhi persyaratan umumnya tidak mampu menahan beban hidup tambahan pada bentang yang ditinjau, sehingga kapasitas lenturnya menjadi faktor pembatas utama. Kondisi ini terutama terjadi pada profil dengan dimensi penampang yang relatif kecil, di mana keterbatasan kapasitas lentur menyebabkan profil tersebut tidak lagi memenuhi persyaratan kapasitas pada bentang yang lebih panjang dan variasi beban hidup yang lebih tinggi. Selanjutnya, untuk 5 profil yang lolos tahap seleksi kapasitas lentur tersebut, hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruhnya memenuhi batas lendutan yang dipersyaratkan. Dengan demikian, hanya sebagian kecil dari profil balok yang ditinjau yang pada akhirnya terbukti layak digunakan setelah melalui keseluruhan tahapan seleksi kapasitas lentur dan lendutan.

**Tabel 3. Kombinasi profil lolos seleksi hingga persyaratan SCWB**

Kombinasi	Profil	
	Kolom	Balok
Kombinasi A	H 414.405.18.28	W 450.200.9.14
Kombinasi B	H 428.407.20.35	W 450.200.9.14
Kombinasi C	H 458.417.30.50	W 450.200.9.14
Kombinasi D	H 458.417.30.50	W 500.200.10.16
Kombinasi E	H 458.417.30.50	W 600.200.11.17
Kombinasi F	H 498.432.45.70	W 450.200.9.14
Kombinasi G	H 498.432.45.70	W 500.200.10.16
Kombinasi H	H 498.432.45.70	W 588.300.12.20
Kombinasi I	H 498.432.45.70	W 600.200.11.17
Kombinasi J	W 700.300.13.24	W 450.200.9.14
Kombinasi K	W 700.300.13.24	W 500.200.10.16

Tahap terakhir adalah seleksi *Strong Column–Weak Beam* (SCWB) untuk memastikan bahwa kapasitas kolom tetap lebih besar dibandingkan kapasitas balok sesuai prinsip desain seismik. Berdasarkan hasil seleksi sebelumnya, diperoleh 5 profil balok dan 20 profil kolom yang memenuhi kriteria, sehingga secara teoritis tersedia 100 kombinasi balok–kolom yang dapat digunakan. Mengingat  $M_{pr}$

sangat dipengaruhi oleh lokasi sendi plastis yang bervariasi bergantung jenis sambungan dan karakteristik spesifik bangunan, pada tahap ini, penulis memodifikasi batas keberterimaan SCWB pada persamaan (6) dengan persamaan di bawah untuk mengakomodasi tambahan momen pada balok akibat amplifikasi geser dari sendi plastis. Setelah dilakukan evaluasi, hanya 11 kombinasi (11,0%) yang memenuhi persyaratan SCWB seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1.2 \quad (9)$$

Kegagalan sebagian besar kombinasi (89,0%) disebabkan oleh rasio kekuatan kolom terhadap balok (CBSR) yang tidak mencukupi. Dalam banyak kasus, kapasitas momen balok yang relatif besar tidak sebanding dengan kapasitas aksial–lentur kolom, terutama pada kombinasi dengan balok yang lebih berat atau memiliki flens tebal. Kondisi ini menyebabkan rasio  $\Sigma M_c^* / \Sigma M_b^* < 1,2$  sehingga melanggar prinsip SCWB. Secara teknis, fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun kolom telah lolos seleksi HDM dan BFP, peningkatan kapasitas balok akibat beban gravitasi maksimum dapat menggeser titik leleh plastis ke elemen kolom. Hal ini berisiko memicu terbentuknya plastic hinge pada kolom, yang sangat tidak diinginkan karena dapat memicu mekanisme *soft story* dan meningkatkan potensi keruntuhan progresif pada sistem SMF. Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa syarat SCWB merupakan filter paling ketat dalam proses seleksi. Meskipun jumlah kandidat profil awal cukup banyak, hanya sebagian kecil kombinasi yang benar-benar layak diterapkan untuk memastikan terbentuknya sendi plastis yang terkendali pada balok dan terjaganya stabilitas global struktur.

### 3.2. Benchmark sambungan BFP

Hasil seleksi profil menjadi dasar dalam desain benchmark sambungan BFP. Dengan kata lain, hanya terdapat 11 kombinasi balok–kolom, dari 2070 kombinasi profil H-beam dan IWF Indonesia, yang berhasil lolos pada setiap tahap penyaringan dan dapat digunakan sebagai sambungan terpraktualifikasi Jenis BFP sehingga memberikan sistem SMF yang memenuhi persyaratan desain kapasitas seismik secara utuh. Perhitungan desain mengikuti prosedur yang ada pada SNI 7972:2020 dan dilakukan dengan pendekatan paling konservatif serta paling ekonomis.

Dalam proses penyusunan *benchmark*, ditemukan bahwa tidak semua kombinasi profil pada **Tabel 3** dapat dirancang detail sambungannya. Sebagian besar penyebabnya adalah persyaratan SCWB yang tidak terpenuhi. Lokasi sendi plastis pada sambungan BFP sangat bergantung pada jumlah baris baut yang digunakan. Semakin banyak jumlah baris baut semakin jauh lokasi sendi plastis ke muka



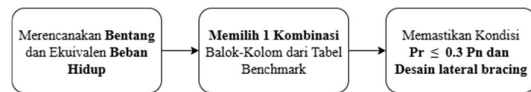
kolom sehingga semakin kecil rasio kekuatan balok-kolom, dan sebaliknya. Sehingga modifikasi **persamaan (6)** menjadi **persamaan (9)** bekerja secara kasar dalam menyeleksi profil yang dapat digunakan sebagai sambungan BFP. Di sisi lain, terdapat kondisi *beam flange blockshear* yang harus dipenuhi. Kondisi ini mengharuskan adanya pemanjangan bidang geser melalui penambahan baris baut yang merupakan kebalikan dari langkah pemenuhan SCWB.

Penyebab minor lainnya adalah kondisi *coverplate buckling*. Kondisi ini dapat dipenuhi dengan meningkatkan ketebalan pelat coverplate, tetapi memberikan implikasi pada penambahan jarak lokasi sendi plastis ke muka kolom, sehingga pemenuhan SCWB gagal tercapai.

Terakhir, terdapat kondisi rasio bentang terhadap tinggi balok ( $L/H$ ). Berdasarkan peraturan, nilai  $L/H$  tidak boleh kurang dari 9. Hal ini bertujuan untuk memastikan perilaku sambungan tetap duktail. Nilai  $L/H$  yang terlalu kecil mempengaruhi pola distribusi momen yang dapat memicu konsentrasi tegangan dan berpotensi menyebabkan keruntuhan getas pada komponen las. Rasio ini tidak diperhitungkan dalam

seleksi profil karena merupakan karakteristik spesifik bangunan.

Penggunaan *benchmark* ini membutuhkan data bentang balok dan beban hidup yang bekerja pada ruang tinjauan. Kemudian diperlukan pemilihan kombinasi balok-kolom, tersedia pada **Tabel 4**, berdasarkan data bentang dan beban hidup. Selain itu, diperlukan pemeriksaan pemenuhan asumsi, yaitu memastikan beban aksial kolom tidak lebih dari 30% kapasitasnya ( $P_r \leq 0.3P_n$ ). Jika asumsi tersebut tidak terpenuhi, maka kombinasi tersebut tidak bisa digunakan dan diganti ke kombinasi dengan kolom yang lebih besar. Di samping itu, kebutuhan *lateral bracing* balok atau pengaku lateral balok juga wajib didesain supaya balok dapat mencapai kekuatan lenturnya sebelum mengalami tekuk lokal. Secara sederhana, alur penggunaan benchmark dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Alur penggunaan benchmark

**Tabel 4. Benchmark sambungan terpraktualifikasi jenis BFP**

Benchmark Sambungan BFP				
Live Load	Bentang			
	5	6	7	8
1.9	B2, C4, D4, F3, G6, J3	B2, C3, D2, F3, G3, I4, J3	B1, C2, D2, E2, F2, G2, I2, J2	B1, C1, D1, E1, F1, G1, I1, J1
2.4	B2, C4, D4, F3, G6, J3	B2, C3, D2, F3, G3, I4, J3	B1, C3, D2, E2, F2, G2, I3, J3	B1, C1, D1, E2, F2, G1, I1, J2
3.8	B3, C5, D4, F4, G6, J4	B2, C4, D3, F3, G4, I5, J3	B2, C3, D2, F3, G3, I3, J3	B2, C3, D2, E2, F3, G3, I3, J3
4.8	B3, C5, D5, F4, G7, J4	B2, C4, D3, F3, G5, I5, J3	B2, C4, D2, F3, G3, I4, J3	B2, C3, D2, F3, G3, I3, J3

**Tabel 5. Daftar kombinasi balok-kolom benchmark sambungan BFP**

List Detail Sambungan										
ID	No	dia. Baut	s	s1	Sisi Flens		Sisi Web		Sisi Column	
			mm	mm	n. bolt	tCover	n. bolt	tSheartab	tContinuity	tDoubler/side
A	0		SCWB and Beam Blockshear not Satisfied							
B	1	D20	65	30	12	PL45X200X430	3	PL14X105X190	36 mm	8 mm
B	2	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL12X105X255	36 mm	8 mm
B	3	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL14X105X255	36 mm	8 mm
C	1	D20	65	30	12	PL45X200X430	3	PL14X105X190	-	-
C	2	D22	75	30	10	PL45X200X405	3	PL12X105X210	-	-
C	3	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL12X105X255	-	-

List Detail Sambungan										
ID	No	dia. Baut	s	s1	Sisi Flens		Sisi Web		Sisi Column	
			mm	mm	n. bolt	tCover	n. bolt	tSheartab	tContinuity	tDoubler/side
C	4	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL12X105X255	-	8 mm
C	5	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL14X105X255	-	8 mm
D	1	D24	75	35	10	PL50X200X420	3	PL14X120X220	-	8 mm
D	2	D20	65	30	14	PL50X200X500	4	PL14X110X255	-	8 mm
D	3	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL14X110X270	-	8 mm

Tabel 6. Daftar kombinasi balok-kolom benchmark sambungan BFP (Lanjutan)

List Detail Sambungan										
ID	No	dia. Baut	s	s1	Sisi Flens		Sisi Web		Sisi Column	
			mm	mm	n. bolt	tCover	n. bolt	tSheartab	tContinuity	tDoubler/side
D	4	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL15X110X270	-	8 mm
D	5	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL16X110X270	-	8 mm
E	1	D24	75	35	12	PL55X200X500	4	PL12X125X295	-	8 mm
E	2	D24	75	35	12	PL55X200X500	4	PL14X125X295	-	8 mm
F	1	D22	75	30	10	PL40X200X400	3	PL12X100X210	-	-
F	2	D20	65	30	12	PL45X200X430	3	PL14X105X190	-	-
F	3	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL12X105X255	-	-
F	4	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL14X105X255	-	-
G	1	D24	75	35	10	PL50X200X420	3	PL14X120X220	-	-
G	2	D20	65	30	14	PL50X200X500	4	PL12X110X255	-	-
G	3	D20	65	30	14	PL50X200X500	4	PL14X110X255	-	-
G	4	D20	65	30	14	PL50X200X500	4	PL16X110X255	-	-
G	5	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL14X110X270	-	-
G	6	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL15X110X270	-	-
G	7	D22	70	30	12	PL50X200X460	4	PL16X110X270	-	-
H	0	SCWB not Satisfied or Cover Buckling not Satisfied or Span/H not Satisfied								
I	1	D20	65	30	16	PL55X200X570	5	PL12X115X320	-	-
I	2	D20	65	30	16	PL55X200X570	5	PL14X115X320	-	-
I	3	D24	75	35	12	PL55X200X500	4	PL14X125X295	-	-
I	4	D24	75	35	12	PL55X200X500	4	PL15X125X295	-	-
I	5	D24	75	35	12	PL60X200X505	4	PL16X130X295	-	-
J	1	D22	75	30	10	PL40X200X400	3	PL12X100X210	36 mm	8 mm
J	2	D22	75	30	10	PL45X200X405	3	PL12X105X210	36 mm	8 mm
J	3	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL12X105X255	36 mm	8 mm
J	4	D20	65	30	12	PL45X200X430	4	PL14X105X255	36 mm	8 mm

List Detail Sambungan									
ID	No	dia. Baut	s	s1	Sisi Flens		Sisi Web		Sisi Column
			mm	mm	n. bolt	tCover	n. bolt	tSheartab	tContinuity tDoubler/side
K	0								SCWB not Satisfied

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan untuk meninjau kelayakan seismik dan menyusun sambungan tipikal *Bolted Flange Plate* (BFP) pada sistem Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) menggunakan profil baja Indonesia, didapatkan hasil sebagai berikut:

1. Pada tahap seleksi parametrik sambungan BFP, seluruh 46 profil baja memenuhi persyaratan sebagai elemen kolom, sedangkan pada tinjauan sebagai elemen balok hanya 40 profil yang memenuhi seluruh kriteria. Kegagalan seleksi terutama dikendalikan oleh batasan tebal flens, sementara batasan berat penampang tidak menyingkirkan profil tambahan setelah kriteria tebal flens terpenuhi.
2. Pada tahap evaluasi *Highly Ductile Member* (HDM), pemenuhan kriteria daktilitas masih menjadi pembatas utama. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa 26 dari 46 profil kolom dan 24 dari 40 profil balok tidak memenuhi persyaratan HDM. Kegagalan pada profil balok dan sebagian besar kegagalan pada profil kolom dikendalikan oleh elemen flens, sedangkan elemen web umumnya tidak menjadi faktor pembatas. Ketidakpatuhan tersebut terutama disebabkan oleh rasio lebar-tebal flens (b/t) yang melampaui batas  $\lambda_{hd}$ , sehingga profil tidak memenuhi kriteria daktilitas yang dipersyaratkan.
3. Pada tahap seleksi kapasitas lentur dan lendutan, hanya 5 dari 16 profil balok yang memenuhi seluruh persyaratan kinerja gravitasi. Profil yang tidak lolos umumnya mengalami keterbatasan kapasitas lentur, meskipun telah memenuhi persyaratan daktilitas pada tahap sebelumnya. Profil dengan penampang relatif kecil gagal menahan beban hidup dan beban mati tambahan pada bentang yang lebih panjang, sedangkan profil dengan penampang lebih besar mampu menahan beban hidup hingga 4,8 kN/m<sup>2</sup> serta memenuhi batas lendutan yang dipersyaratkan.
4. Pada tahap akhir seleksi SCWB, hanya 11 kombinasi balok-kolom (11%) lolos persyaratan SCWB dari kombinasi 20 profil kolom dan 5 profil balok. Sebagian besar gagal karena balok terlalu kuat dibandingkan kolom sehingga berpotensi memicu terbentuknya

sendi plastis pada kolom, yang tidak diinginkan dalam sistem SRPMK.

5. Dari proses tersebut, *benchmark* sambungan *Bolted Flange Plate* (BFP) telah disusun untuk 8 kombinasi profil baja yang ditinjau sebagai balok-kolom, dengan total 35 detail sambungan yang mencakup 16 kasus variasi bentang balok dan beban hidup. Sementara itu, 3 kombinasi profil baja lainnya tidak memenuhi rasio kekuatan kolom terhadap balok ( $\Sigma M_c^* / \Sigma M_b^*$ ) setelah dilakukan perancangan secara mendetail.

Hasil kajian menunjukkan bahwa tidak banyak kombinasi profil baja lokal yang dapat digunakan sebagai sambungan terpraktualifikasi Jenis BFP sehingga memberikan sistem SRPMK yang memenuhi persyaratan desain kapasitas seismik sesuai SNI 7972:2020. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk penggunaan jenis sambungan terpraktualifikasi yang lain dan pengembangan profil yang lebih sesuai dengan kebutuhan perencanaan struktur baja Indonesia di masa mendatang.

#### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini sebagian didanai oleh Institut Teknologi Bandung (ITB, Indonesia) melalui program Fast Track Program dan P2MI ITB. Ucapan terima kasih juga disampaikan pada Pusat Rekayasa Industri untuk fasilitas dan bantuannya.

#### Daftar Pustaka

- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). AISC 341 - Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). AISC 358 - Prequalified Connections for SMF and IMF with Supplement. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). AISC 360 - Specification for Structural Steel Building. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 1729:2020, Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Jakarta.

- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 7860-2020, Ketentuan Seismik untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2020). SNI 7972-2020 Sambungan Terprakualifikasi untuk Rangka Momen Khusus dan Menengah Baja pada Aplikasi Seismik. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2023). SNI 9150-2023, Baja Profil Canai Panas. Jakarta.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). FEMA 350 - Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. Washington DC: Federal Emergency Management Agency.
- Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2005). Strength Demands on Steel Moment-Resisting Frame Buildings During Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34.
- Sato, A., Newell, J. D., & Uang, C.-M. (2008). Cyclic Behavior and Seismic Design of Bolted Flange Plate Steel Moment Connections. *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction*, 45, 221-232.
- Wu, A.-L., Zhang, D.-C., Liu, Y.-F., & Xue, Q. (2017). Experimental Study on Local Buckling and Ductility of Steel Beam Sections with Various Width-Thickness Ratios. *Journal of Constructional Steel Research*, 138.
- Yuana, P. S., Moestopo, M., Kusumastuti, D., & Pratiwi, N. (2023). An Overview of Commonly Used Steel Beam-Column Connection in Indonesia for Low-Rise Building. *INTEK Jurnal Penelitian*, 7-14.
- Zaghi, A. E., Hartle, R. J., Motter, A. C., Gibbons, M. C., Fitzpatrick, D. T., Laidlaw, R. S., & Evan, A. I. (2014). Experimental Evaluation of Strong-Column Weak-Beam Behavior in Steel Moment-Resisting Frame Systems. *Journal of Structural Engineering*, 140.