

# EVALUASI PENGGUNAAN ANALISIS ORDE PERTAMA MENGUNAKAN ANALISIS ORDE KEDUA ELASTIS DAN INELASTIS

## EVALUATION OF FIRST ORDER ANALYSIS USING AN SECOND ORDER ELASTIC AND INELASTIC ANALYSIS

Fajri Yusmar \*<sup>1</sup>

\*Email: fajriyusmar5558@gmail.com

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP

---

**Abstrak**— Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung atau SNI 03-1729-2002 telah digantikan dengan peraturan baru, yaitu Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Strktural atau SNI 1729:2015. Penggunaan analisis orde pertama dengan factor amplifikasi yang terdapat pada SNI 03-1729-2002 telah dibatasi, dan hanya dapat digunakan untuk struktur yang memiliki rasio simpangan orde kedua maksimum terhadap simpangan orde pertama dalam semua tingkat sama dengan atau kurang dari 1.5. Struktur dengan nilai faktor amplifikasi momen lebih besar dari 1.5 dapat terjadi pada struktur yang mengalami efek P-Delta yang besar. Peningkatan tambahan momen yang terjadi hingga 50 % dari momen yang dihasilkan pada analisis orde pertama, menunjukkan bahwa struktur sangat sensitif dengan efek P-Delta. tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kekuatan struktur (stress ratio) yang didesain dengan SNI 03-1729-2002 dan memiliki nilai faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5, menggunakan metode analisis langsung SNI 1729:2015 dan analisis inelastis atau metode advanced analysis. Struktur yang memiliki faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 dan didesain dengan metode SNI 2002 apabila dievaluasi dengan metode analisis langsung SNI 1729:2015 masih menghasilkan struktur yang aman dengan nilai stress ratio masih kurang dari satu. Sedangkan apabila dievaluasi dengan metode advanced analysis, struktur hanya aman untuk struktur dengan kelangsingan  $kL/r$  kurang dari 79 ( $SR \leq 1$ ).

**Kata kunci** — Efek *P-Delta*, analisis langsung, *advanced analysis*, *stress ratio*

---

**Abstract**— Steel Structure Regulation SNI 03-1729-2002 have been replaced with new regulations, It is called with Specifications for Structured Steel Buildings or SNI 1729: 2015. The use of first-order analysis with amplification factors contained in SNI 03-1729-2002 has been restricted, and can only be used for structures having a maximum second-order deviation ratio to first-order deviations at all levels equal to or less than 1.5. Structures with a moment amplification factor value greater than 1.5 can occur in structures with large P-Delta effects. An additional moments occurring up to 50% in first-order analysis, indicating that the structure is very sensitive to the P-Delta effect. The purpose of this study was to evaluate the strength ratio (structure ratio) designed with SNI 03-1729-2002 and has amplification factor value greater than 1.5, using direct analysis method of SNI 1729: 2015 and inelastic analysis or advanced analysis method. Structure having amplification factor greater than 1.5 and designed with SNI 2002 method, if evaluated by direct analysis method, the structure is still safe with stress ratio value less than one. Whereas if evaluated by advanced analysis method, structure is only safe for structure with slenderness ratio ( $kL/r$ ) less than 79 ( $SR \leq 1$ ).

**Keywords** — P-Delta effects, direct analysis, advanced analysis, stress ratio

---

## I. PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Saat ini, Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung atau SNI 03-1729-2002 telah digantikan dengan peraturan baru, yaitu Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Strkturral atau SNI 1729:2015. Dalam peraturan SNI 03-1729-2002, analisis untuk pengaruh orde kedua terdapat di dalam pasal 7.4.2. Pasal ini menyebutkan bahwa pengaruh orde kedua dapat dianalisis menggunakan analisis orde pertama dan analisis orde kedua. Untuk analisis orde pertama lebih lanjut di jelaskan pada pasal 7.4.3, sedangkan untuk metode analisis orde kedua, tidak disebutkan penjelasan yang lebih rinci, hanya sebatas ketentuan yang baku dan diterima secara umum.

Pengaruh orde kedua terjadi pada saat struktur menerima beban lateral seperti beban gempa atau beban angin. Beban lateral dapat menimbulkan deformasi pada struktur. Hal ini memberikan efek kepada beban gravitasi pada struktur terhadap sumbu vertikal kolom atau dinding pada struktur yang telah terdeformasi. Efek yang dihasilkan adalah momen tambahan yang dipikul oleh kolom struktur sebesar gaya gravitasi dikalikan dengan deformasi yang terjadi.

Analisis orde pertama yang terdapat pada SNI 03-1729-2002, yang lebih dikenal dengan metode panjang efektif, pada SNI 1729:2015 digunakan sebagai metode alternative. Keterangan ini terdapat dalam lampiran 7 pasal 7.2.1 butir dua. Penggunaan analisis dengan metode ini telah dibatasi, dan hanya dapat digunakan untuk struktur yang memiliki rasio simpangan orde kedua maksimum terhadap simpangan orde pertama dalam semua tingkat sama dengan atau kurang dari 1.5, hal mana ini

tidak terdapat pada SNI 03-1729-2002. Dijelaskan lebih lanjut, rasio simpangan orde kedua terhadap simpangan orde pertama dalam satu tingkat dapat diambil sebagai pengali B<sub>2</sub>. Lampiran 8 SNI 1729:2015 pasal 8.2 poin ke dua menyebutkan bahwa nilai B<sub>2</sub> ditentukan berdasarkan formula berikut :

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha P_{\text{story}}}{P_{e\text{story}}}} \geq 1.0 \quad (1)$$

dengan

$\alpha = 1$  (DFBK) dan 1.6 (DKI)

$P_{\text{story}}$  = Beban vertikal total pada tingkat

$P_{e\text{story}}$  = Kekuatan tekuk kritis elastis untuk tingkat pada arah translasi yang ditentukan atau dengan analisis tekuk bergoyang (*sidesway*) atau;

$$P_{e\text{story}} = R_M \frac{H L}{\Delta_H} \quad (2)$$

dengan

$$R_M = 1 - 0.15 \frac{P_{mf}}{P_{\text{story}}} \quad (3)$$

L = Tinggi tingkat (mm)

$P_{mf}$  = Total beban vertikal pada kolom yang merupakan bagian dari portal momen (N)

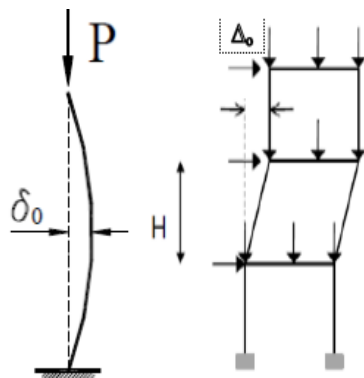
$\Delta_H$  = Simpangan tingkat orde pertama dalam arah translasi yang diperhitungkan

H = Gaya geser tingkat dalam arah translasi, yang dihasilkan oleh gaya lateral yang digunakan untuk menghitung  $\Delta_H$

Struktur dengan nilai faktor amplifikasi momen lebih besar dari 1.5 dapat terjadi pada struktur yang mengalami efek P-Delta yang besar. Peningkatan tambahan momen yang terjadi hingga 50 % dari momen yang dihasilkan pada analisis orde pertama, menunjukkan bahwa struktur sangat sensitif dengan efek P-Delta. Berdasarkan persamaan (1) dapat diketahui bahwa

besar kecilnya nilai faktor amplifikasi dipengaruhi oleh besarnya beban vertikal total pada tingkat ( $P_{story}$ ) dan kekuatan tekuk kritis elastis tingkat ( $P_e$  story) struktur. Nilai faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 terjadi bila perbandingan antara beban vertikal total pada tingkat ( $P_{story}$ ) dengan kekuatan tekuk kritis elastis tingkat ( $P_e$  story) minimum adalah 0.333.

Selain itu, masih ada dua faktor lain yang belum diperhitungkan secara explicit pada SNI 03-1729-2002. Faktor tersebut adalah efek ketidaksempurnaan geometri yang terdiri dari ketidaklurusan batang ( $P-\delta_0$ ) dan ketidaktepatan rangka ( $P-\Delta_0$ ) (Gambar 1), dan efek ketidaksempurnaan material. Dalam analisis orde pertama efek dari kedua tipe ketidaksempurnaan tersebut baru dipertimbangkan dalam penentuan kekuatan tersedia atau kapasitas penampang saja. Hal ini dapat dilihat pada reduksi kekuatan dari persamaan kapasitas elemen tekan. Sementara itu, efek ketidaksempurnaan geometri kategori ketidaktepatan rangka ( $P-\Delta_0$ ) belum dipertimbangkan dalam penentuan kekuatan tersedia penampang. Begitu juga untuk penentuan kekuatan perlu, efek ketidaksempurnaan juga tidak dipertimbangkan.



Gambar 1. Pengaruh efek ketidaksempurnaan geometri ( $P-\Delta_0$  dan  $P-\delta_0$ ) (Shayan, 2013)

Efek ketidaksempurnaan juga berdampak terhadap peningkatan

kekuatan perlu dari struktur. Apabila hal ini tidak dipertimbangkan dengan tepat, maka hasil analisis tidak menggambarkan perilaku struktur yang sebenarnya dan berpotensi menimbulkan kegagalan. Dalam analisis, sebaiknya semua faktor yang dapat mempengaruhi perilaku struktur harus dipertimbangkan. Seperti dalam proses penentuan kekuatan tersedia (kapasitas), kekuatan perlu (gaya dalam akibat beban luar dan geometri struktur), dan proses desain.

Metode analisis yang mampu mengatasi keterbatasan penggunaan metode analisis orde pertama dengan faktor amplifikasi adalah metode analisis orde dua elastis dan inelastis. Kedua metode ini telah mempertimbangkan efek ketidaksempurnaan dengan baik.

## B. Rumusan Masalah

Telah disebutkan sebelumnya, bahwa penggunaan metode faktor amplifikasi untuk struktur yang mengalami efek orde kedua cukup besar sudah tidak dibolehkan dalam SNI 1729:2015. Nilai faktor amplifikasi atau faktor pengali 1.5 merupakan batasan maksimal untuk penggunaan metode faktor amplifikasi. Untuk struktur yang memiliki nilai faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 harus dianalisis dengan metode analisis orde kedua.

Metode analisis orde kedua merupakan peningkatan dari metode analisis orde satu (analisis linear elastis). Analisis struktur orde kedua telah memperimbangkan efek orde kedua didalam analisis, atau persamaan ekuilibrium disusun berdasarkan kondisi struktur yang terdeformasi, sehingga efek orde kedua tidak lagi dihitung menggunakan faktor amplifikasi sebagaimana dalam analisis orde satu. Analisis orde kedua sedikit lebih kompleks, bila dibandingkan dengan

analisis orde satu yang tidak membutuhkan proses iterasi dan tahapan pembebanan sebagaimana analisis orde kedua. Sehingga untuk memudahkan pengerjaan analisis orde kedua dibutuhkan bantuan perangkat lunak (software), seperti SAP 2000, ETABS dll.

Analisis orde kedua terdiri dari analisis orde kedua elastis dan analisis orde kedua inelastis. Perbedaan antara analisis orde dua elastis dan inelastis adalah kelelahan material tidak dipertimbangkan dalam analisis dan elemen struktur masih dianggap dalam kondisi elastis. Metode analisis yang menggunakan prinsip analisis orde dua elastis adalah metode analisis langsung (Direct analysis). Sedangkan metode yang telah mempertimbangkan efek kelelahan geometri dan material didalam analisis, disebut dengan metode analisis orde dua inelastis atau yang lebih dikenal dengan advanced analysis.

### C. Tujuan

Selain metode analisis langsung (direct analysis), SNI 1729:2015 juga memberikan alternatif untuk analisis yang lebih advanced atau analisis inelastis. Analisis inelastis melibatkan pengaruh nonlinear geometri (P-Delta) dan nonlinear material dalam analisis. Analisis inelastis bisa menyederhanakan prosedur desain. Dengan kata lain, analisis inelastis atau yang lebih populer disebut advanced analysis tidak membutuhkan persamaan interaksi sebagaimana dua metode analisis sebelumnya (factor panjang efektif dan analisis langsung). Hal ini disebabkan oleh kemampuan metode advanced analysis dalam memodelkan seluruh parameter dan aspek yang mempengaruhi perilaku dan kinerja struktur, seperti efek orde kedua ( $P-\Delta$  dan  $P-\delta$ ), geometri imperfection, residual stress, dan nonlinear material (Chen dan Metwally, 2009). Disamping itu, metode advanced analysis juga dapat menggambarkan

respon gaya dan perpindahan atau perilaku struktur.

Berdasarkan uraian di atas, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kekuatan struktur (stress ratio) yang didesain dengan SNI 03-1729-2002 dan memiliki nilai faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5, menggunakan metode analisis langsung SNI 1729:2015 dan analisis inelastis atau metode advanced analysis.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Metode Analisis Langsung (Direct Analysis)

Prinsip metode direct analysis adalah menggabungkan antara pengaruh initial imperfection kategori ketidaktepatan rangka (out of plumbnes) ( $P-\Delta_0$ ) dan reduksi kekakuan akibat pelelehan gradual yang dapat menimbulkan residual stress dalam analisis stuktur.

Analisis harus meliputi:

#### I. Analisis Kekuatan Perlu

##### 1. Pertimbangan Ketidaksempurnaan Awal

Ketidaksempurnaan dari tipe ini adalah kemiringan kolom atau ketidaksempurnaan pada lokasi titik-titik perpotongan dari komponen struktur. Hal ini dapat dilakukan dengan pemodelan secara langsung atau tambahan notional load. Beban notional di setiap level ( $N_i$ ), harus didistribusikan di atas level itu dengan cara yang sama seperti beban gravitasi di level tersebut. Beban notional harus digunakan pada arah yang memberi efek destabilisasi terbesar. Besarnya beban notional adalah:

$$N_i = 0,002 Y_i$$

Dimana;

$N_i$  = beban notional di level  $i$

$Y_i$  = beban gravitasi di level  $i$  dari hasil beban kombinasi cara LRFD

Nilai 0,002 pada persamaan di atas merepresentasikan nilai toleransi rasio

kemiringan tingkat maksimum sebesar 1/500.

2. Penyesuaian Kekakuan

Terjadinya leleh setempat (partial yielding) akibat adanya tegangan sisa pada profil baja (hot rolled atau welded) secara umum dapat menghasilkan pelemahan ketika mendekati kondisi batas kekuatan. Pada akhirnya menghasilkan efek destabilizing seperti yang terjadi akibat adanya geometri imperfection. Direct analysis mengatasi dengan penyesuaian kekakuan struktur, yaitu memberi faktor reduksi kekakuan yang sesuai, nilainya diperoleh dari kalibrasi dengan cara membandingkannya dengan analisis distribusi plastisitas maupun uji test empiris (Galambos 1998).

Analisis struktur untuk menentukan kekuatan perlu dari komponen atau elemen struktur harus menggunakan kekakuan yang direduksi sebagai berikut :

- a) Suatu faktor 0.8 harus digunakan pada semua kekakuan yang berkontribusi terhadap stabilitas struktur.
- b) Suatu faktor tambahan ( $\tau_b$ ), harus digunakan pada kekakuan lentur dari semua komponen struktur dimana kekakuan lenturnya berkontribusi terhadap stabilitas struktur.

$$\alpha P_r / P_y \leq 0,5 \tag{2}$$

$$\tau_b = 1,0 \tag{3}$$

$$\alpha P_r / P_y > 0.5 \tag{4}$$

$$\tau_b = 4(\alpha P_r / P_y)(1 - \alpha P_r / P_y) \tag{5}$$

Dengan;

$$\alpha = 1$$

$P_r$  =Kekuatan tekan aksial perlu (kN)

$P_y$  =Kekuatan leleh aksial = $F_y A_g$  (kN)

II. Perhitungan Kekuatan Tersedia

Untuk metode analisis langsung, kekuatan tersedia dari komponen struktur dan sambungan harus dihitung sesuai dengan Bab yang terdapat pada SNI 1729:2015. Untuk nilai faktor panjang efektif (k) dari semua komponen struktur harus diambil satu.

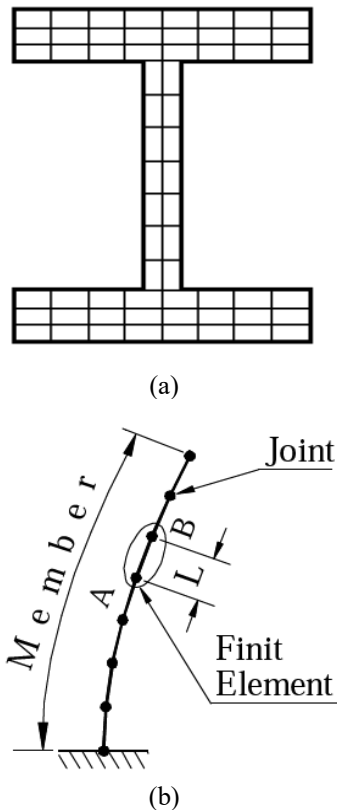
B. MetodeAdvanced Analysis

Metode analisis yang mampu menggambarkan perilaku struktur dengan lengkap adalah analisis inelastik orde dua

atau disebut juga dengan advanced analysis. Advanced analysis dapat menggabungkan analisis non linear material dan non linear geometri. Penggunaan metode advanced analysis juga telah dikalibrasi dengan pengujian eksperimen (Toma dan Chen 1992; Toma dkk 1993; Toma dan Chen 1994; dan Kim 2006). White dan Chen (1993), menjelaskan definisi advanced analysis sebagai metode analisis non linear – inelastik yang mampu menganalisis secara langsung kekuatan dan stabilitas struktur, serta mampu menggambarkan dengan tepat perilaku yang menghubungkan antara komponen (elemen struktur) dengan sistem struktur.

Chen dan Metwally (2009) menjelaskan aspek yang diperhitungkan dalam advanced analysis, diantaranya adalah (1) sifat inelastik material; (2) efek stabilitas; (3) efek tegangan sisa (residual stress); (4) geometri imperfection; (5) lokal buckling; (6) perilaku sambungan; (7) kondisi batas; dan (8) hubungan dengan pondasi. Semua poin diatas merupakan rujukan dalam analisis inelastik orde dua, dimana tidak lagi dibutuhkan penentuan faktor panjang efektif (k) dan pemisahan pemeriksaan kapasitas elemen. Sementara itu, Alvarenga dan Silveria (2009) menjelaskan aspek minimal yang harus dipenuhi dalam analisis menggunakan metode advanced analysis

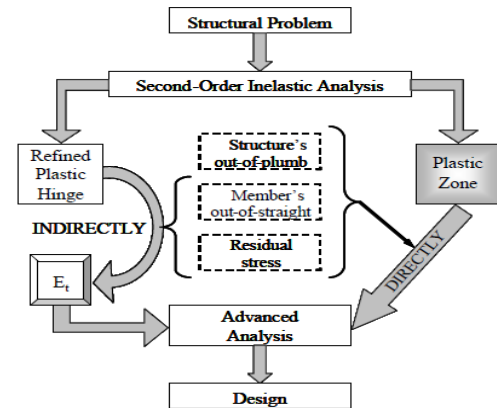
adalah residual stress dan geometri imperfection yang terdiri dari out of plumbness dan out of straight.



Gambar 2. Diskritisasi (a) penampang (Chen dan Toma, 2992)(b) elemen (ALvarenga dan Silveria, 2009)

Metode advanced analysis terdiri dari metode plastic zone dan refined plastic hinge. Metode plastic zone merupakan metode yang memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode refine plastic hinge. Pada saat menggunakan metode plastic zone, elemen didiskrit menjadi elemen-elemen kecil (Gambar 2), kemudian penampang dari setiap elemen didiskritisasi lagi menjadi elemen yang lebih kecil(Gambar 2). Elemen yang digunakan dalam analisis adalah elemen shell 3D dan beam element (3D). Akan tetapi, metode yang lebih populer untuk analisis dan desain struktur dengan advanced analysis adalah metode refine plastic hinge, sedangkan metode yang paling baik dan mampu memodelkan keadaan sebenarnya atau model eksak adalah

metode plastic zone. Perbedaan kedua metode advanced analysis dalam memodelkan aspek-aspek yang telah disebutkan sebelumnya. Dimana, metode plastic zone memodelkan secara langsung, sedangkan metode refined plastic hinge tidak memodelkan secara langsung (Gambar 3).



Gambar 3. Metode advanced analysis (Alverenga dan Silveria, 2009)

**Persyaratan Metode Advanced Analysis**

**1. Non linearitas material**

**Kriteria Kelelahan**

Dalam kasus tegangan uniaksial, terjadinya leleh pertama diketahui pada saat material mulai berdeformasi plastis. Untuk kondisi tegangan pada suatu titik yang terdiri dari beberapa komponen tegangan dengan arah yang berbeda, maka diperlukan suatu kriteria kelelahan. Kriteria kelelahan berfungsi untuk menentukan kombinasi tegangan yang menyebabkan terjadinya kelelahan. Dalam penelitian ini digunakan kriteria kelelahan Von Mises, yang mendefinisikan kelelahan material ditentukan oleh besarnya tegangan geser oktahedral atau energi regangan distrosi yang bekerja pada material

**2. Non linear geomteri**

Jika suatu sistem struktur mengalami efek P-Delta, baik yang disebabkan oleh geometri imperfection atau pada saat beban gravitasi bekerja pada struktur

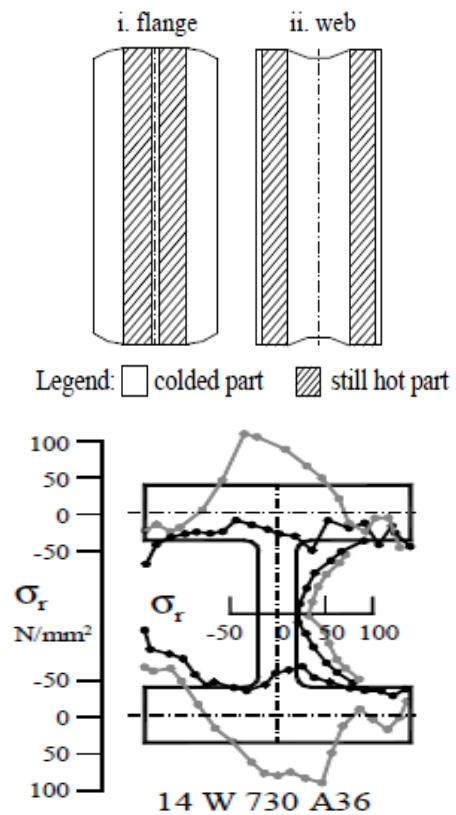
yang terdeformasi akibat beban lateral, maka kemudian terjadi peningkatan perpindahan. Analisis yang dapat menyelesaikannya adalah analisis non linear geometri, dimana persamaan ekuilibrium di formulasikan pada saat struktur terdeformasi yang mana selalu berganti setiap mengalami peningkatan beban dalam analisis. Solusi dari persamaan ekuilibrium tidak bisa diperoleh pada satu level beban kerja saja. Dan perilaku dari masalah non linear geometri dari suatu sistem struktur biasanya di rekam dengan membuat perubahan geometri untuk setiap incremental dengan iterasi algoritma.

Dalam penyelesaian masalah non linear, proses iterasi dan penentuan inkremen merupakan bagian yang sangat penting agar diperoleh solusi sistem persamaan non linear. Urutan inkremental beban mempunyai pengaruh yang sangat signifikan terhadap efisiensi dan akurasi perhitungan terutama untuk masalah yang tergantung kepada proses riwayat pembenanan. Beberapa metode yang digunakan untuk menyelesaikan analisis non linear adalah metode Newton Raphson dan metode Arc Length.

**3. Tegangan sisa (Residual stress)**

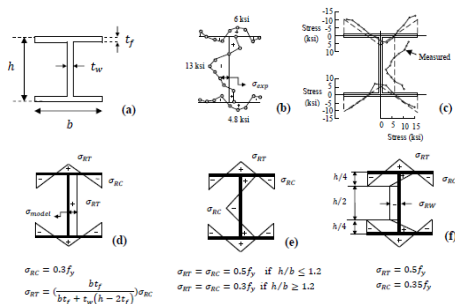
Semua baja konstruksi seperti profil standar, plat, dan pipa (tube), mengalami tegangan sisa (residual stress) pada saat proses manufaktur. Penyebab terjadinya tegangan sisa adalah proses pendinginan (cooling) yang tidak merata setelah proses rolling, pemotongan (cutting), dan pengelasan (welding). Sehingga distribusi tegangan sisa pada profil bervariasi. Adapun faktor yang dapat mempengaruhi besar dan kecilnya tegangan sisa adalah dimensi flange, dimensi web, dan proses pembentukan. Bagian pelat yang mengalami pendinginan terlebih dahulu berada dalam keadaan tertekan, dan bagian pelat yang mengalami pendinginan

selanjutnya akan mengalami tegangan Tarik (Gambar 4).



Gambar 4. Distribusi tegangan sisa pada pelat sayap dan pelat badan (Alverenga dan Silveria, 2009)

Beberapa model tegangan sisa yang sering digunakan dalam analisis adalah model Galambos dan Ketter (1959), ECCS 1976, dan Bild Trahair (Gambar 5). Model distribusi tegangan sisa diperoleh berdasarkan hasil eksperimen. Dua metode yang sering digunakan dalam analisis yang memperhitungkan efek tegangan sisa adalah dengan metode pendekatan dan metode pemodelan secara langsung.

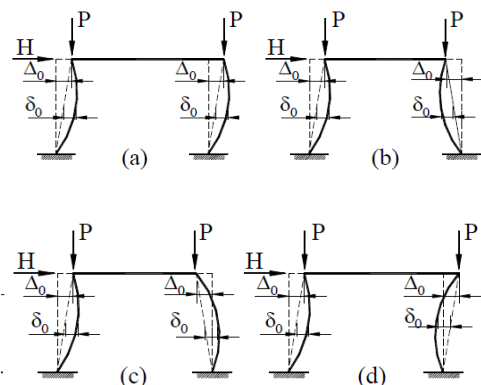


Gambar 5. Pola distribusi tegangan sisa (a) potongan penampang, (b) data hasil ukuran tegangan sisa (Beedle, 1958), (c) data hasil pengukuran tegangan sisa (Chen dan Sohal, 1995), (d) model Galambos dan Ketter (1959), (e) ECCS 1976, dan (f) Bid Trahair (1989)

**4. Geometri Imperfection**

Elemen struktur pada rangka baja dalam kenyataannya memiliki cacat bawaan. Cacat bawaan terjadi pada proses manufaktur atau terjadi akibat kesalahan pada proses fabrikasi dan toleransi yang diberikan pada saat proses ereksi atau instalasi dilapangan. Ketidaklurusan batang terjadi pada saat proses pembukaan cetakan, dimana profil baja yang telah mengalami proses pendinginan atau pengelasan mengalami perubahan bentuk atau profilnya tidak sepenuhnya lurus. Hal ini mengakibatkan profil baja memiliki initial kurvatur, sedangkan ujungnya tetap dan tidak mengalami perubahan. Sementara itu, ketidaktepatan rangka pada struktur terjadi pada saat proses ereksi atau proses instalasi dilapangan. Meskipun pemasangan sudah tepat dan tidak mengalami penurunan, namun pada praktek dilapangan, sangat sulit untuk mendapatkan kolom yang terpasang vertikal sempurna. Deformasi lateral yang kecil selalu timbul dalam pelaksanaan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah bentuk profil, jarak bersih antara lubang baut, metode pelaksanaan, urutan pemasangan, dan pengaruh suhu lapangan pada saat pengelasan.

Salah satu metode pemodelan efek geometri imperfection didalam analisis adalah dengan pemodelan langsung (explicit). Metode pemodelan langsung dilakukan dengan cara memindahkan masing-masing koordinat node dalam pemodelan struktur dari koordinat awal sebesar nilai imperfection yang ditentukan. Besaran dan bentuk imperfection yang direncanakan harus menghasilkan pengurangan kapasitas struktur terbesar. Untuk portal sederhana, Alvengieria (2009) memberikan beberapa kombinasi kemungkinan bentuk dari imperfection dan menyimpulkan kombinasi model yang memberikan efek destabilizing maksimum (Gambar 6). Kebanyakan peraturan atau code struktur baja memberikan nilai besaran maksimum dari pengaruh imperfection. Akan tetapi tidak untuk pola atau bentuk dari imperfection tersebut (Tabel 1).



Gambar 6. Beberapa kemungkinan kombinasi out of plumb dan out of straight pada portal sederhana (Alverenga dan Silveria, 2009)



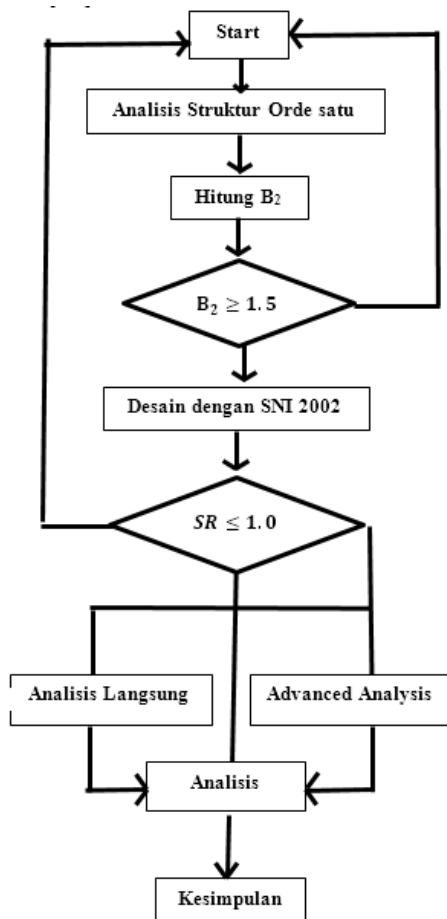
Tabel 1. Rangkuman nilai geometri *imperfection* dari beberapa *code* (Shayan, 2013)

Code	Out-of-plumb	Out-of-straightness	Reference
ECCS	$h/200$	$L/1000$	(ECCS 1976)
AS4100	$h/500$	$L/1000$	(AS4100 1998)
CSA	$h/500$	$L/1000$	(CAN/CAS-S16 1994)
AISC	$h/500$	$L/1000$	(AISC 1994)
GB50205	$h/1000$	$L/1500$ for columns, $L/1200$ for beams	(GB50205 2001)
Eurocode 3	$\alpha_{cr} \alpha_{im}/200$	$L/300$	(Eurocode3 2003)
BS 5950-1	$h/600$ or $6mm$ whichever is greater	$L/1000$ or $6mm$ whichever is greater	(BS5950-1 2003)
DIN 18800-2	$r_1, r_2/200$	1/300 (elastic analysis, S 235 to S420) 1/250 (Plastic analysis, S 235 to S420) 1/350 (elastic analysis, S 460) 1/300 (Plastic analysis, S 460)	(DIN18800-2 1990)

\* Note:  $L$ =member length,  $h$ =web height (column height),  $\alpha_{cr}$ =the reduction factor for length, and  $\alpha_{im}$ = the reduction factor for number of columns in a row,  $r_1 = \sqrt{3L}$ ,  $r_2 = 0.3(1 + \sqrt{1/3})$ ,  $n$  is the number of columns in a row

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan penelitian adalah;



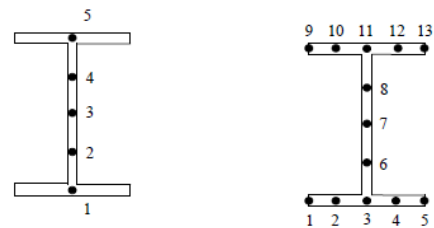
### IV. PEMODELAN STRUKTUR

#### 4.1 Pemodelan Elemen Hingga untuk metode Advanved Anlysis

#### A. Elemen

Dalam penelitian ini, analisis inelstik orde dua dibatasi untuk elemen 2D, menggunakan perangkat lunak ABAQUS Versi 13-1. Formulasi plastic zone digunakan untuk memodelkan kelelahan gradual dari penampang dan disepanjang elemen. Sebagai konsekuensinya adalah pola plastisitas dari tegangan pada level tertentu dari regangan plastis di simpan pada masing-masing titik dan di update pada setiap terjadinya increment disepanjang analisis. Dalam analisis finite element, hasil analisis sangat sensitif dengan tipe elemen yang digunakan. ABAQUS menyediakan beberapa macam model tipe elemen. Penelitian ini menggunakan beam elemen 3D

Timosenko yang mengijinkan adanya deformasi geser. Elemen balok diberi nama B31 (dua node berdasarkan interpolasi linear) dan B32 (tiga node berdasarkan interpolasi kuadratik). Kedua model beam elemen memiliki 6 derajat kebebasan. ABAQUS B31 memiliki satu integration point disepanjang panjang beam, sedangkan B32 memiliki dua integration point disepanjang beam.



Gambar 7. Section point untuk beam 2D dan 3D (ABAQUS)

Karena fokus dari penelitian ini adalah portal 2D, namun elemen yang dipilih adalah beam tipe 3D maka jumlah derajat kebebasan yang tersedia lebih banyak daripada yang dibutuhkan walaupun demikian, disitribusi section point yang disediakan oleh 3D beam elemen dibutuhkan. Jumlah section point yang disediakan oleh beam 2D hanya terdapat pada bagian web saja, sedangkan untuk beam 3D terdapat pada flange dan web. Hal ini berhubungan dengan pemodelan residual stress, karena besaran residual

stress diberikan pada masing-masing section point, sehingga section point untuk bagian sayap juga diperlukan.

**B. Model Material**

ABAQUS menyediakan model plastisitas menggunakan kriteria kelelahan Von Mises. Zona elastis didefinisikan dengan modulus elastisitas dan poisson ratio. Sedangkan untuk zona plastis didefinisikan dengan true stress dan logarithmic plastic strain. Nilai true stress dan logarithmic plastic strain diperoleh dari nominal stress dan nominal strain hasil tes uniaxial. Tegangan nominal didasarkan kepada asumsi penampang tidak mengalami perubahan pada saat terjadi deformasi, hal ini hanya valid untuk struktur yang mengalami deformasi kecil, sedangkan untuk deformasi besar perubahan penampang akan sangat besar sehingga digunakan true stress (Shayan, 2013). Formulasi untuk mendapatkan nilai true stress dan logarithmic plastic strain adalah (ABAQUS).

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom}) \tag{6}$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln (1 + \epsilon_{nom}) - \sigma_{true} / E \tag{7}$$

- $\sigma_{true}$  = True stress
- $\sigma_{nom}$  = Nominal stress
- $\epsilon_{ln}^{pl}$  = Logarithmic plastic strain
- $\epsilon_{nom}$  = Nominal strain
- E = Modulus elastisitas

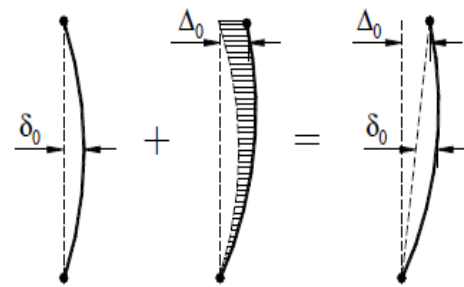
**C. Residual stress**

Pendinginan yang tidak merata setelah proses rolling menimbulkan tegangan awal pada penampang, yang disebut tegangan sisa (Residual stress). Dalam penelitian ini menggunakan model tegangan sisa ECCS 1976. ABAQUS menyediakan fasilitas user subroutine (SIGINI) untuk menerapkan tegangan sisa dalam analisis pada model struktur. SIGINI subroutine memodelkan distribusi

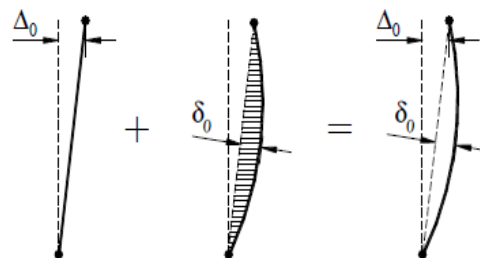
tegangan sisa yang ditentukan berdasarkan fungsi koordinat, nomor elemen, atau nomor section point. Perintah subroutine ditambahkan dalam input file dengan perintah \*INITIAL CONDITION, TYPE=STRESS, USER. Untuk mendapatkan nilai distribusi tegangan sisa jumlah section point yang ada pada tipe beam 3D dari 13 section point ditingkatkan menjadi 25 section point.

**D. Geometri imperfection**

Dalam penelitian ini digunakan besaran imperfection berdasarkan SNI 1729:2015, dimana untuk nilai ketidaklurusan batang sebesar L/1000, sedangkan untuk ketidaktepatan rangka sebesar L/500. Pemodelan kombinasi efek ketidaksempurnaan geometri menggunakan model dari Alvengria (2009). Kemudian untuk model kombinasi efek ketidaksempurnaan geometri yang menghasilkan efek destabilizing maksimum juga menggunakan hasil penelitian Alvengria (2009).

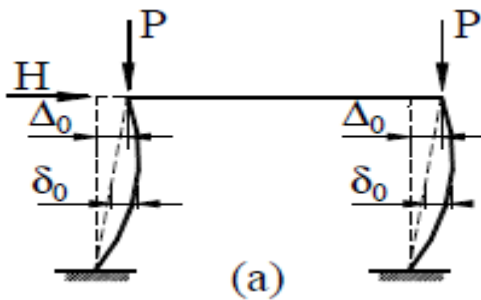


Opsi 1



Opsi 2

Gambar 8. Kombinasi ketidaktepatan rangka dan ketidaklurusan batang, (a) opsi yang disarankan (b) opsi yang tidak disarankan (Alvarenga dan Silveira (2009))



Gambar 9. Kombinasi ketidaktepatan rangka dan ketidaklurusan batang yang menghasilkan efek destabilizing maksimum (Alvarenga dan Silveira (2009))

**E. Pembebanan dan Boundry Condition**

Dalam penelitian ini penampang yang digunakan adalah penampang kompak hot rolled profil-I serta perilaku out of plane yang dikekang. Lokal buckling dan lateral torsional buckling tidak dipertimbangkan dalam analisis. Untuk semua degree of freedom (DOF) arah keluar bidang (out of plane) dikekang dengan cara memberikan perintah \*BOUNDARY untuk mengkekang komponen U3 (pepindahan arah Z untuk keluar bidang) dan komponen rotasi untuk UR1 dan UR2 (rotasi sumbu global diarah X dan Y). Sementara itu, tumpuan dimodelkan sendi dan jepit dengan menahan derajat kebebasan dari node baik untuk arah translasi atau rotasi, sedangkan hubungan balok kolom dianggap kaku sempurna (rigid). Untuk pembebanan yang digunakan adalah beban terpusat pada ujung kolom dan beban merata disepanjang balok.

**F. Tipe Analisis**

Ada dua tipe analisis non linear yang disediakan oleh ABAQUS, yaitu static general dan statik riks. Metode yang pertama atau static general menggambarkan respon gaya dan perpindahan hingga batas maksimum (ascending branch) dengan menggunakan solusi Newton-Rapson. Untuk analisis static riks mampu

menangkap batas maksimum (ascending branch) dan perilaku setelah mencapai puncak (descending branch) atau perilaku pasca tekuk dengan menerapkan metode arc length untuk menyelesaikan persamaan ekuilibrium.

Kedua metode ini memiliki kemampuan untuk mengganti ukuran increment yang tergantung dari solusi non linear yang diperlukan. Jika solusi cukup linear ukuran increment dapat cukup besar, Akan tetapi jika analisis nonlinear cukup kompleks, maka ukuran increment harus kecil agar dapat menangkap efek nonlinearitas (Shayan, 2013).

**4.2 Studi Kasus**

Studi kasus pada penelitian ini di fokuskan kepada struktur rangka portal baja sederhana 2D. Dalam analisis diasumsikan bahwa struktur ditopang pada arah keluar bidang (out of plane), sehingga pola tekuk hanya terjadi searah bidang (inplane) struktur

Parameter yang menjadi pokok permasalahan dalam penelitian adalah nilai faktor amplifikasi (B2). Besar kecilnya nilai B2 ditentukan oleh besarnya gaya vertikal yang bekerja pada struktur (P story) dan nilai kekuatan tekuk elastis struktur (Pe story). Untuk mendapatkan struktur yang memiliki nilai faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 maka akan ditinjau parameter-parameter yang paling dominan dalam penentuan nilai faktor amplifikasi.

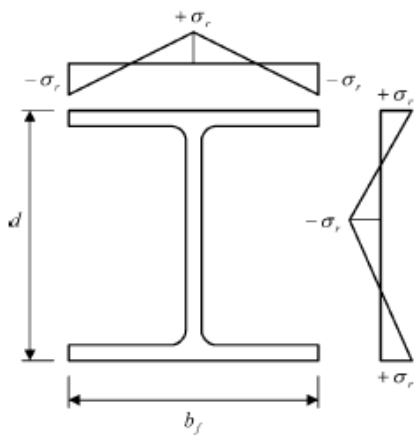
**A. Parameter imperfection**

Parameter yang dominan didalam penentuan nilai faktor amplifikasi adalah baban vertikal total yang bekerja pada ujung elemen kolom struktur (P story). Kemudian, untuk fungsi dari kekuatan tekuk kritis (Pe story), akan ditinjau kelangsingan struktur dalam hal ini adalah tinggi struktur (H). Faktor

kelangsingan merupakan salah satu faktor yang dapat meningkatkan efek P-Delta, disamping itu tinggi struktur merupakan fungsi dari besaran ketidaksempurnaan geometri struktur.

**B. Residual Stress**

Untuk efek ketidaksempurnaan material semua komponen struktur diberikan residual stress 0.5 fy dengan menggunakan model residual stress dari ECCS 1976.



Gambar 10 Model residual stress yang digunakan (ECCS 1976)

**C. Konfigurasi penampang**

Penampang yang digunakan memiliki ukuran yang sama untuk semua konfigurasi struktur, baik untuk kolom atau balok. Dalam hal ini penampang termasuk kedalam kategori penampang kompak, agar tidak terjadi tekuk lokal. Disamping itu, untuk melihat pengaruh residual stress yang cukup signifikan maka digunakan penampang dengan ukuran heavy section atau jumbo section.

Tabel 2. Konfigurasi Penampang

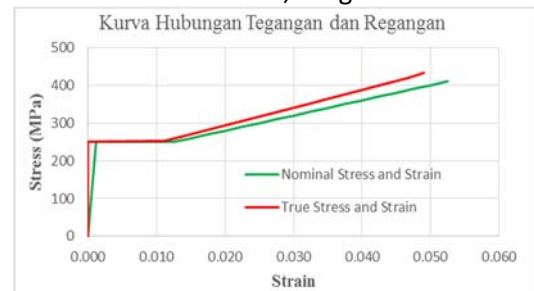
Penampang Kolom	
Ukuran Penampang	Ix Kolom (mm <sup>4</sup> )
400X400X13X22	653600000
Penampang Balok	
Ukuran Penampang	Ix Balok (mm <sup>4</sup> )
450X200X9X14	322600000

**D. Pembebanan**

Untuk pembebanan pada struktur terdiri dari beban gravitasi dan beban horizontal yang bekerja di ujung-ujung kolom atau pertemuan balok dan kolom, serta beban merata disepanjang balok. Untuk besaran gaya horizontal diasumsikan sama untuk semua konfigurasi struktur yaitu sebesar 1%Ag. Begitu juga dengan beban merata disepanjang balok, diasumsikan sama untuk semua konfigurasi struktur dengan nilai 10 kNm. Hanya saja beban terpusat P pada masing-masing kolom berbeda untuk masing-masing konfigurasi struktur. Tetapi untuk nilai faktor amplifikasi semua konfigurasi struktur adalah lebih besar dari 1.5.

**Model material**

Model material yang digunakan adalah model tri linear, sebagai berikut:



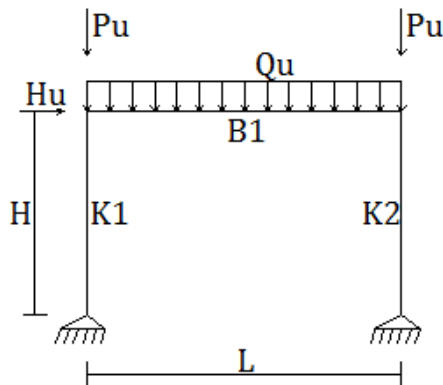
Gambar 11. Model material yang digunakan adalah model tri linear

**4.3 Pembahasan**

Struktur tipe 1 terdiri dari 3 konfigurasi struktur, dengan data sebagai berikut:

Tabel 3. Model struktur yang di analisis

No	L (m)	H (m)	rx (mm)	SNI 2002		Cek k <sub>x</sub> L/r <sub>x</sub> ≤ 200
				k <sub>x</sub>	k <sub>x</sub> L/r	
1	5	5	174.5	2.11	60.44	OKE
2	7,5	7,5	174.5	2.11	90.66	OKE
3	10	10	174.5	2.11	120.8	OKE



Gambar 12. Portal Sederhana

Elemen struktur yang ditinjau adalah kolom 2. Kolom K2 merupakan elemen yang mengalami gaya dalam terbesar diantara elemen struktur yang lain. Penentuan nilai faktor panjang efektif (k) diperoleh berdasarkan alignment chart untuk portal bergoyang dan portal tidak bergoyang, dengan perhitungan sebagai berikut:

Penentuan nilai GA dan GB

Ix Balok	= 2.296*10E8 mm <sup>4</sup>
Ix Kolom	= 6,536*10E8 mm <sup>4</sup>
L Balok	= 5000 mm
H Kolom	= 5000 mm
GA	= 10 (Tumpuan Sendi)

$$G_B = \frac{\frac{I_x \text{ Kolom}}{H \text{ Kolom}}}{\frac{I_x \text{ Balok}}{L \text{ Balok}}} = 2.03$$

Berdasarkan alignment chart diperoleh nilai faktor panjang efektif sebagai berikut:

kx untuk portal tidak bergoyang	= 0.99
kx untuk portal bergoyang	= 2.11

Struktur model 1 dengan konfigurasi H=L=5000 mm, dan rasio kelangsingan struktur masih dalam kategori aman berdasarkan SNI 2002 yaitu sebesar 60.433 atau lebih kecil dari 200 (batas kelangsingan untuk batang tekan).

1. Penentuan nilai B2

Pemeriksaan struktur dengan nilai B2  $\geq 1.5$  diawali dengan penentuan konfigurasi pembebanan sebagai berikut.

Pg	= 5363.5 kN
Beban vertikal	
%Pg	= 0.48
Pu	= 2574.48 kN
Qu	= 10 kN/m
Beban Horizontal	
%Pg	= 0.1
Hu	= 53.64

Dengan konfigurasi pembebanan diatas, perhitungan dilanjutkan dengan analisis struktur orde satu atau analisis linear elastis. Dari hasil analisis struktur dapat dihitung nilai B2 sebagai berikut :

$\Delta o_h$ (mm)	= 18.57 mm
H Geser (kN)	= 53.635 kN
Pmf (kN)	= 5148.96 kN
P story	= 5198.96 kN
RM	= 0.851
Pe story	= 12295.94 kN
B2	= 1.733 ( $\geq 1.5$ )

4.3.1 Analisis Kekuatan Perlu

Metode Linear Elastis

Metode linear elastis merupakan metode yang paling sederhana, dimana proses desain dapat dilakukan setelah melakukan analisis orde pertama. Dalam metode linear elastis efek P-Delta tidak diperhitungkan atau diabaikan. Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai kekuatan perlu untuk momen lentur sebesar 149.47 kNm.

Metode SNI 03-1729-20022002

Dalam metode SNI 2002 efek P-Delta tidak diabaikan. Perhitungan efek P-Delta dilakukan dengan faktor amplifikasi yang terdiri dari analisis untuk struktur portal tidak bergoyang dan struktur portal bergoyang.

Dalam metode SNI 2002 efek P-Delta tidak diabaikan. Perhitungan efek P-Delta dilakukan dengan faktor amplifikasi yang terdiri dari analisis untuk struktur portal tidak bergoyang dan struktur portal bergoyang.

- A. Penentuan faktor amplifikasi untuk struktur portal tidak bergoyang

$$Peuler = \frac{\pi^2 EI_x}{(k.L)^2}$$

$$= \frac{\pi^2 200000 \cdot 6.535 \times 10^8}{(0.9 \cdot 5000)^2}$$

$$= 63711.3 \text{ kN}$$

$$Pu = 2574.48 \text{ kN}$$

$$Cm = 0.6 - 0.6 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)$$

$$= 0.6 - 0.6(0)$$

$$= 0.6$$

$$B_1 = \frac{Cm}{1 - \frac{Pu}{Pe}} = \frac{0.6}{1 - \frac{2574.48}{63711.3}} = 0.63 < 1$$

maka  $B_1=1$

- B. Penentuan faktor amplifikasi untuk struktur portal bergoyang

Cara 1

$$k_x = 2.11$$

$$Peuler = \frac{\pi^2 EI_x}{(k.L)^2} = \frac{\pi^2 200000 \cdot 6.536 \cdot 10^8}{(2.11 \cdot 5000)^2}$$

$$= 11591 \text{ kN}$$

$$\Sigma Peuler = 2 \times 8699.42 = 23182.85 \text{ kN}$$

$$\Sigma Pu = 2 * Pu + Qu = 5198.96 \text{ kN}$$

(2= jumlah kolom)

$$B_2 = 1.289$$

Cara 2

$$\Delta_H = 18.57 \text{ mm (Hasil analisis orde satu akibat beban H)}$$

$$\Sigma H = 53.635 \text{ kN (Total gaya H)}$$

$$L = 5000 \text{ mm}$$

$$\Sigma Pu = 5198.96 \text{ kN}$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma Pu \Delta_H}{HL}}$$

$$= \frac{1}{1 - 5198.96 \times \frac{18.57}{53.635 \times 5000}} = 1.56$$

Dari kedua cara diambil nilai  $B_2$  yang paling besar (Konservatif), yaitu 1.56.

- C. Perhitungan momen lentur perlu  
Mnt = 0 kNm

$$Mlt = 149.47 \text{ kNm}$$

$$B_1 = 1$$

$$B_2 = 1.56$$

$$Mult = B_1 Mnt + B_2 Mlt = 233.55 \text{ kNm}$$

Hasil analisis struktur untuk momen lentur meningkat sebesar 56.25% atau **dari 149.47 kNm menjadi 233.55 kNm.**

### Metode analisis langsung SNI 1729:2015

Pengerjaan metode analisis orde kedua elastis menggunakan bantuan perangkat lunak (software) SAP 2000.

- A. Perhitungan geometri imperfection

Geometri imperfection dimodelkan dengan tambahan beban atau notional load.

$$Ni = 0.002 Pe$$

$$Pu \text{ total} = 2 Pu + Qu$$

$$Pu \text{ total} = 2 \times 2574.48 + 10 \times 5 = 5198.96 \text{ kN}$$

$$Ni = 0.002 (2 \cdot 10.40 \text{ kN})$$

Beban *notional* ditambahkan pada model struktur.

- B. Perhitungan penurunan kekakuan akibat residual stres

$$\alpha = 1$$

$$Pu \text{ 1 kolom} = 2574.48 + 0.5 \times 10 \times 5 = 2624.5 \text{ kN}$$

$$Py = As fy = 5363.5$$

$$\frac{\alpha Pu}{Py} = \frac{2624.5}{5363.5} = 0.49$$

$$\text{Untuk } \frac{\alpha Pu}{Py} \leq 0.5 \text{ Maka } \tau_b = 1$$

Maka :

$$\text{Reduksi kekakuan aksial} = 0.8 EA$$

$$\text{Reduksi kekakuan lentur} =$$

$$EI \tau_b = 1 \cdot 0.8 EI = 0.8 EI$$

properties penampang lentur di modifikasi untuk kekakuan lentur menjadi 0.8

- C. Analisis Struktur

Gaya dalam yang dihasilkan dengan SNI 1729:2015 mengalami peningkatan, terutama untuk momen

lentur. Peningkatan momen lentur mencapai 104.73 % dibandingkan dengan metode analisis linear elastis, yaitu dari 149.47 menjadi 306.01 kNm.

**Metode Advanced Analysis**

Metode advanced analysis memiliki kesamaan dengan metode analisis langsung SNI 1729:2015, karena telah memodelkan parameter imperfection dalam analisis. Akan tetapi, pemodelan efek geometri imperfection dan material imperfection dilakukan secara langsung (explicit). Berbeda dengan metode analisis langsung yang memodelkan efek imperfection dengan penambahan beban notional dan reduksi kekakuan (lentur dan aksial) untuk efek residual stress.

**A. Pemodelan imperfection**

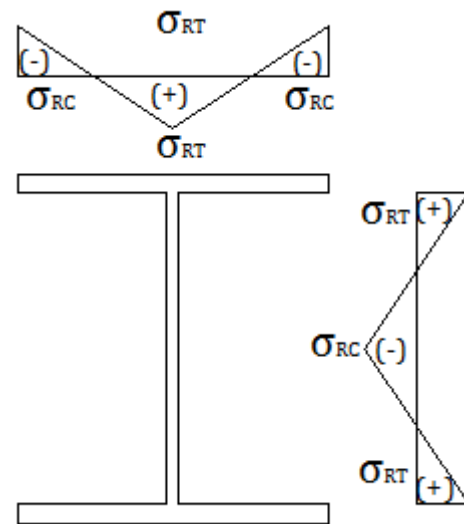
Besaran ketidaksempurnaan geometri berupa ketidaktepatan rangka dan ketidaklurusan batang, menggunakan ketentuan SNI 1729:2015. Pemodelan secara langsung (explicit) dilakukan dengan cara memindahkan koordinat geometri pada kedua ujung kolom dan tengah bentang, sehingga terjadi perpanjangan dan perpendekan pada geometri struktur.

Tabel 4 Besaran geometri imperfection struktur tipe 1 dan model 1

H (mm)	Imperfection	
	( $\Delta o$ ) (mm)	( $\delta o$ ) (mm)
5000	H/500	H/1000
	10.00	5.00

**B. Pemodelan residual stress**

Model distribusi tegangan sisa yang digunakan adalah model ECCS 1976. Nilai tegangan sisa maksimum yang sering terjadi menurut AISC 360-10 adalah 30 s.d 50 %  $F_y$ . Dalam analisis digunakan nilai  $F_r=0.5 F_y$ , untuk bagian pelat badan dan pelat sayap.



Gambar 13. Model dan besaran tegangan sisa

$F_y$  = Tegangan Leleh  
= 250 MPa

$\sigma_{RC}$  = Tegangan Tekan (*Compression*)

$\sigma_{RC} = 0.5 F_y = 125$  MPa

$\sigma_{RT}$  = Tegangan Tarik (*Tension*)

$\sigma_{RT} = 0.5 F_y = 125$  MPa

Hasil analisis menunjukkan bahwa, gaya dalam yang dihasilkan dengan metode advanced analysis, mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Momen yang dihasilkan meningkat 155.52% atau dari 149.47 kNm menjadi 393.67 kNm.

**4.3.2 Analisis Kekuatan Tersedia**

**Metode linear elastis dan 03-1729-2002**

Analisis kekuatan tersedia untuk metode linear elastis dan SNI 2002 memiliki formulasi yang sama. Berikut ditampilkan langkah perhitungan untuk kapasitas tekan dan kapasitas lentur dari kedua metode.

**Kapasitas Tekan**

Penentuan nilai parameter kelangsingan :

$$\lambda_{cx} = \frac{L k_x}{\pi r_x} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{5000}{\pi} \frac{2.11}{174.545} \sqrt{\frac{250}{200000}} = 0.68$$

Penentuan  $\omega_x$

Untuk  $0,25 \leq \lambda_x < 1,2$  maka :

$$\omega_x = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot 0,68} = 1.25$$

$$\Phi P_{crits} = \frac{\Phi F_y A_s}{\omega_x} = 3647.98 \text{ kN}$$

### Kapasitas Lentur

Asumsi tidak terjadi tekuk keluar bidang (*out of plane*).

Cek penampang kompak :

Sayap

Badan

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10.752$$

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = 106.25$$

$$\lambda_r = \frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}} = 33.09$$

$$\lambda_r = \frac{2250}{\sqrt{f_y}} = 161.28$$

$$\lambda = \frac{b}{2t_f} = 9.524$$

$$\lambda = \frac{H}{t_w} = 30.77$$

Karena  $\lambda < \lambda_p$  maka  $M_n = M_p$

$$M_p = Z_x f_y = 3600133 \cdot 250 = 900033250$$

Nmm

$$\Phi b = 0.9$$

$$\Phi b M_n = 0.9 \times 9000133250 = 810.03 \text{ kNm}$$

Metode analisis langsung SNI 1729:2015

Dalam metode RSNI 201X penentuan nilai faktor panjang efektif tidak lagi menggunakan alignment chart, akan tetapi nilai faktor tekuk diambil sama dengan satu. Sedangkan untuk penentuan kapasitas lentur metode **SNI 1729:2015** masih sama dengan metode SNI 2002.

### Kapasitas Tekan

Menentukan tipe keruntuhan

$$\frac{k_x L}{r_x} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\frac{1 \times 5000}{174.54} \leq 4,71 \sqrt{\frac{200000}{250}}$$

$$28.65 \leq 133.22 \text{ (Tekuk Inelastik)}$$

Menghitung  $P_e$

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_x}{(k.L)^2}$$

$$P_e = \frac{\pi^2 200000 \cdot 6.535 \times 10^8}{(1 \cdot 5000)^2} = 5135.19 \text{ kN}$$

Menghitung  $\sigma_e$

$$\sigma_e = \frac{P_e}{A} = 2405.43 \text{ MPa}$$

Menentukan  $P_{crits}$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_e} = \frac{240}{2405.43} = 0,0997$$

$$\sigma_{cr} = (0,658^{\frac{\sigma_y}{\sigma_e}}) \sigma_y = 239.36 \text{ MPa}$$

$$P_{cr} = \sigma_{cr} A = 5135.19 \text{ kN}$$

$$\Phi P_{cr} = 0,9 \cdot 2274 = 4621.67 \text{ kN}$$

### Metode Advanced Analysis

Perhitungan kekuatan tersedia untuk metode advanced analysis berbeda dengan kedua metode analisis sebelumnya. Kekuatan tersedia untuk metode advanced analysis dihitung berdasarkan kekuatan untuk seluruh sistem struktur, bukan elemen struktur seperti dilakukan pada metode SNI 2002 dan metode SNI 1729:2015

#### 4.3.3 Proses Design

Berdasarkan perhitungan kekuatan perlu dan kekuatan tersedia, maka dapat diketahui nilai stress ratio dari masing-masing analisis. Stress ratio merupakan perbandingan diantara kekuatan perlu dengan kekuatan tersedia yang merupakan gabungan interaksi diantara momen lentur dan aksial yang bekerja pada struktur

Metode analisis linear elastis, SNI 2002, dan SNI 1729:2015 memiliki kesamaan dalam penentuan nilai stress ratio, yaitu menggunakan persamaan interaksi lentur dan aksial untuk masing-masing elemen atau komponen struktur. Akan tetapi, tidak untuk metode advanced analysis yang memperoleh nilai stress ratio berdasarkan kekuatan dari sistem struktur. Hasil analisis terdiri dari suatu nilai load factor yang



mencerminkan faktor pengali beban maksimum yang dapat dipikul oleh struktur pada saat mencapai kapasitas maksimum, sehingga sangat memungkinkan untuk melakukan peningkatan beban struktur pada saat analisis, selama struktur masih memiliki kekuatan tersedia. Nilai stress ratio dihitung dengan cara membagi nilai stress ratio maksimum (satu) dengan nilai load factor (LF) atau 1/LF.

**Metode Linear Elastis**

Berdasarkan hasil analisis kekuatan perlu dan kekuatan tersedia, dapat ditentukan nilai stress ratio untuk metode linear elastis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_u &= 2653.12 \text{ kN} \\
 M_u &= 149.47 \text{ kNm} \\
 \phi P_n &= 3647.98 \text{ kN} \\
 \phi M_n &= 810.03 \text{ kN} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} &= \frac{2653.23}{3647.98} = 0.73 \\
 \text{Untuk } \frac{P_u}{\phi P_n} &\geq 0.2 \text{ maka :} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi M_n} &= \frac{2653.12}{3647.98} + \frac{8}{9} \times \frac{149.47}{810.03} = 0.89
 \end{aligned}$$

**Metode 03-1729-2002**

Berdasarkan hasil analisis kekuatan perlu dan kekuatan tersedia, dapat ditentukan nilai stress ratio untuk metode SNI 2002 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_u &= 2653.23 \text{ kN} \\
 M_u &= 233.55 \text{ kNm} \\
 \phi P_n &= 3647.98 \text{ kN} \\
 \phi M_n &= 810.03 \text{ kN} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} &= \frac{2653.23}{3647.98} = 0.73 \\
 \text{Untuk } \frac{P_u}{\phi P_n} &\geq 0.2 \text{ maka :} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi M_n} &= \frac{2653.23}{3647.98} + \frac{8}{9} \times \frac{233.55}{810.03} = 0.98
 \end{aligned}$$

**Metode analisis langsung SNI 1729:2015**

Berdasarkan hasil analisis kekuatan perlu dan kekuatan tersedia, dapat

ditentukan nilai stress ratio untuk metode SNI 1729:2015 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_u &= 2715.9 \text{ kN} \\
 M_u &= 306.010 \text{ kNm} \\
 \phi P_n &= 4621.67 \text{ kN} \\
 \phi M_n &= 810.03 \text{ kN} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} &= \frac{2715.9}{4621.67} = 0.59 \\
 \text{Untuk } \frac{P_u}{\phi P_n} &\geq 0.2 \text{ maka :} \\
 \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi M_n} &= \frac{2715.9}{4621.67} + \frac{8}{9} \frac{306.01}{810.03} = 0.9
 \end{aligned}$$

**Metode Advanced analysis**

Dari hasil analisis dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS, diperoleh suatu nilai load factor untuk struktur tipe 1 dan model 1 sebesar 1.17, sehingga diperoleh nilai stress ratio untuk sistem struktur sebesar 1/1.17=0.86.

**4.3.4 Analisis**

Berdasarkan tabel 5 diketahui bahwa :

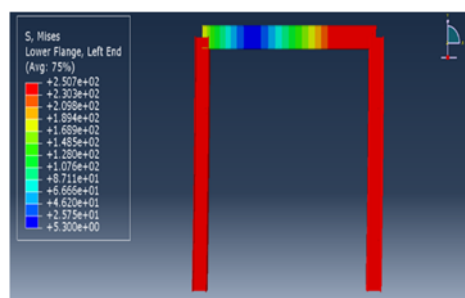
1. Stress Ratio yang dihasilkan metode SNI 2002 mengalami peningkatan sebesar 10.34 % menjadi 0.98, bila dibandingkan dengan metode linear elastis. Peningkatan yang terjadi disebabkan oleh analisis SNI 2002 telah mempertimbangkan efek P-Delta (factor amplifikasi)
2. Metode Analisis langsung menghasilkan stress ratio yang lebih kecil (0.92) bila dibandingkan dengan nilai stress ratio metode SNI 2002 (0.98), hal ini disebabkan:
  - Nilai faktor panjang efektif untuk menentukan kapasitas tekan tidak menggunakan alignment chart sebagaimana metode SNI 2002. Nilai faktor panjang efektif harus diambil sama dengan satu. Hal ini dapat meningkatkan kapasitas tekan elemen struktur sampai 26.69%.

Table 5. Rangkuman nilai stress ratio untuk keempat metode analisis dapat dilihat pada

Metode	Mu		Pu(kN)	Φb Mn (kNm)	Φc Pn (kN)	Pu/φPn	Mu/Φb Mn	Stress Ratio	
	kNm	(%)						SR	%
Linear Elastis	149.47	1.00	2653.12	810.03	3647.98	0.73	0.18	0.89	1.00
SNI 2002	233.55	56.25	2653.12	810.03	3647.98	0.73	0.29	0.98	10.4
Analisis Langsung	306.01	104.73	2715.88	810.03	4621.67	0.59	0.38	0.92	3.61
Advanced Analysis	393.67	163.38	3196.38					0.86	4.07

- Pengaruh efek residual stress dan imperfection pada metode RSNi 2015 terlihat dari peningkatan stress ratio yang dihasilkan oleh momen lentur bila dibandingkan dengan metode SNI 2002 dan metode linear elastis yang belum mempertimbangkan parameter imperfection dalam analisis. Peningkatan stress ratio akibat lentur yang terjadi adalah 31.03%.
- Gabungan dan interaksi antara aksial dan lentur masih menghasilkan nilai stress ratio yang lebih kecil dari metode SNI 2002. Meskipun peningkatan momen lentur cukup besar, akan tetapi pada saat penentuan stress ratio dengan persamaan interaksi, efek lentur harus direduksi sebesar 0.88% pada struktur yang dominan terhadap efek aksial  $P_u/P_n \geq 0.2$ .

Von Mises diketahui bahwa hampir seluruh penampang pada kolom mampu mencapai kapasitas maksimumnya.



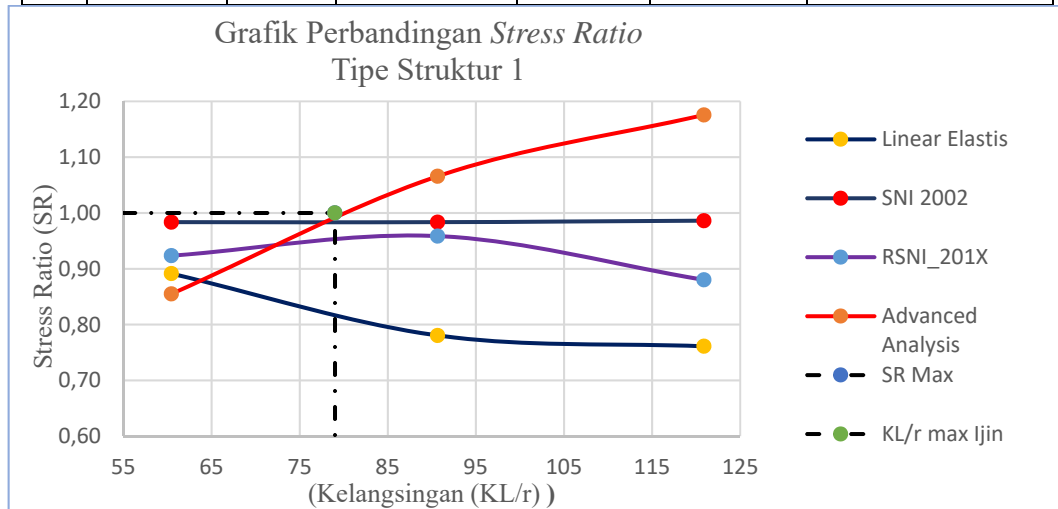
Gambar 14 Distribusi tegangan Von Mises struktur tipe 1

2. Metode advanced analysis memberikan nilai stress ratio paling optimal, hal ini disebabkan:
  - Kemampuan metode advanced analysis dalam memaksimalkan sifat inelastis dan menerima tambahan kekuatan akibat adanya strain hardening yang dimiliki material baja.
  - Metode advanced analysis dapat melakukan proses redistribusi gaya dalam antar elemen struktur. Berdasarkan distribusi tegangan

**4.3.5 Rangkuman Analisis**

Tabel 6. Perbandingan *stress ratio* untuk 4 metode analisis tipe struktur 1

No	H (mm)	KL/r	Stress Ratio			
			Linear Elastis	SNI 2002	SNI 2015	Advanced Analysis
1	5000	60.44	0.89	0.98	0.92	0.86
2	7500	90.66	0.78	0.98	0.96	1.07
3	10000	120.89	0.76	0.99	0.88	1.18



Gambar 15. Perbandingan stress ratio Tipe struktur 1

Berdasarkan tabel IV.18 diketahui :

1. Metode linear elastis tidak mempertimbangkan efek P-Delta dan imperfection
2. Stress ratio yang dihasilkan metode SNI 2002 lebih besar bila dibandingkan dengan metode linear elastis.
3. Stress ratio yang dihasilkan metode SNI 1729:2015 masih dalam kategori aman, dan lebih kecil bila dibandingkan dengan metode SNI 2002, meskipun belum mempertimbangkan efek imperfection.
4. Metode advanced analysis memberikan nilai stress ratio yang aman ( $SR \leq 1.0$ ) untuk struktur dengan kelangsingan kurang dari ( $KL/r$ ) 79.
5. Untuk struktur model 2 ( $KL/r=90$ ) dan model 3 ( $KL/r=120$ ), nilai stress ratio lebih besar dari 1.0. Hal ini

dipengaruhi oleh stabilitas dari sistem struktur.

**A. Kesimpulan**

Dari hasil analisis dapat disimpulkan :

1. Struktur yang memiliki faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 dan didesain dengan metode SNI 2002 apabila dievaluasi dengan metode analisis langsung SNI 1729:2015 masih menghasilkan struktur yang aman dengan nilai stress ratio masih kurang dari satu.
2. Struktur yang memiliki faktor amplifikasi lebih besar dari 1.5 dan didesain dengan metode SNI 2002 apabila dievaluasi dengan metode advanced analysis menghasilkan informasi sebagai berikut :

- Untuk tipe struktur 1 struktur yang memiliki kelangsingan  $kl/r$  kurang dari 79 masih tergolong aman.
- 3. Metode advanced analysis memiliki pendekatan yang berbeda dengan metode SNI 2015 dan metode SNI 2002 dalam menentukan nilai stress ratio, dimana metode advanced analysis berdasarkan kekuatan dari sistem struktur, sedangkan metode SNI 2002 dan RSNI 2015 berdasarkan kekuatan dari elemen struktur.
- 4. Metode advanced analysis merupakan metode exact yang sangat efektif digunakan pada struktur dengan nilai kelangsingan struktur kecil dan pada portal yang memiliki jumlah degree of freedom yang besar.
- 5. Metode advanced analysis sangat sensitif dengan peningkatan kelangsingan dari struktur, karena dapat membatasi kemampuan struktur untuk mengoptimalkan seluruh kapasitas penampang.

#### B.Saran

Saran untuk peneliti selanjutnya :

1. Untuk verifikasi pemodaln struktur dengan metode advanced analysis dapat ditingkatkan dengan hasil eksperimen
2. Analisis dapat ditingkatkan pada struktur dengan model 3D dan lantai banyak.
3. Analisis dapat ditingkatkan dengan mempertimbangkan efek lateral torsional buckling dan sumbu lemah struktur.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] ABAQUS/STANDARD (2009). User's manual version 6.10.
- [2] AISC360-10 (2010) : Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois.
- [3] Alvarenga, A.R. dan Silveira, R.A.M. (2009) : Second-order Plastic-zone Analysis of Steel Frames Part I : Numerical Formulation and Examples of Validation, Latin American Journal of Solid and Structures, 6, 131-152.
- [4] Alvarenga, A.R. dan Silveira, R.A.M. (2009) : Second-order Plastic-zone Analysis of Steel Frames Part II: Effect of initial geometric imperfection and residual stress, Latin American Journal of Solid and Structures, 6, 323-342.
- [5] Avery, P dan Mahendran, M (1999) : Distributed plasticity analysis of steel frame structures comprising non-compact sections, Engineering Structures 22 (2000) 901-919.
- [6] Barsan, G.M dan Chiorean C.G (1999) : Influence of residual stress on the carrying-capacity of steel framed structures numerical investigation, Elsevier Science Pub.Pages 317-324.
- [7] Clarke, M.J., dkk (1992) : Advanced Analysis of Steel Building Frames, J. Construct. Steel Research 23 (1992) 1-29
- [8] Chen, W.F. dan Toma, S. (1992) : Advanced Analysis of Steel Frames, Front. Archit. Civ. Eng. China 2008, 2(3): 189-196.
- [9] Chen, W.F. (2008) : Advanced Analysis for structural steel building design,
- [10] Dewobroto, W. dan Russer, E (2013) : Pengaruh Kelangsingan Portal Baja Terhadap Efektivitas DAM (Direct Analysis Method) dibanding metode lama ( $kl/r$ ), Konferensi Nasional Teknik Sipil 7.
- [11] Dewobroto, W. (2014) : Rekayasa Komputer dalam Analisis dan Desain Struktur Baja Studi Kasus Direct Analysis Method (AISC 2010), Seminar dan Lokakarya Rekayasa Struktur (Universitas Kristen Petra)
- [12] Geschwindner, L.F (2002) : A Practical Look at Frame Analysis, Stability and Leaning Columns, Engineering Journal / Fourth Quarter / 2002 / 167.
- [13] Hwa, K. (2003) : Toward Advanced Analysis in Steel Frame Design, Disertasi Program Doktor, University of Hawaii Library.
- [14] Kim, S.E dan Chen, W.F (1997) : An Innovative Design For Steel Frame Using Advanced Analysis, CRC Press in LRFD Steel Design Using Advanced Analysis.
- [15] Kim, S.E dan Lee, D.H (2001) : Second-order distributed plasticity analysis of space steel frames, Engineering Structures 24 (2002) 735-744
- [16] NRL Steel Lab., Sejong University : State-of-the-art Review on Nonlinear Inelastic Analysis for Steel Structures.
- [17] SNI 03-1729.1-2015 : Spesifikasi untuk Gedung Baja Struktural
- [18] SNI 03-1729-2002 (2002) : Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung.

- [19] Setiady,F., Kusumastuti,D.,dan Ediansjah (2010) : Evaluasi Penggunaan Metode SNI-2002 dan Direct Analysis Method dengan Advanced Analysis dalam Analisis Efek Orde Kedua.
- [20] Shayan, Shabnam., Rasmussen, Kim., dan Zhang, Hao : On the modeling of initial geometric imperfection of steel frames in advanced analysis. Journal of construction steel research 98 (2014) 167-177.
- [21] Shayan, Shabnam (2013) : System Reliability-Based Design Of 2D Steel Frames By Advanced Analysis, Disertasi Program Doktor, The University Of Sydney
- [22] White, D.W., Surovek, A.E., Alendar, B.N., Chang, C.J., Kim, Y.D. dan Kuchenbecker, G.H. (2006) : Stability Analysis and Design of Steel Building Frames Using the 2005 AISC Specification, Steel Structures, 6, 71-91.
- [23] Yuan, Zeng. (2003) : Advanced analysis of steel frame structure subject to lateral torisional buckling, Disertasi Program Doktor, Quesland University Of Technology.