



# Analisis Tidak Langsung Pada Desain Terhadap Stabilitas Struktur Gedung Baja

Fedora Marleen Tumena, Bambang Suryoatmono\*

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

\*suryoatm@unpar.ac.id

Received: 24 November 2022 Revised: 17 Juli 2023 Accepted: 12 September 2023

## Abstract

*There are three methods of design for stability defined in AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings, namely Direct Analysis Method (DAM), Effective-Length Method (ELM), and First-Order Analysis Method (FOM). DAM is the method that is featured by AISC. Based on DAM, Rafael Sabelli proposed another method called Indirect Analysis Method (IAM). IAM is a new method that has not generally been used, and also has not been included in the AISC Specification. This research is conducted in order to study IAM and compares the analysis results of IAM with those of DAM. Using a nonlinear structural analysis software, design and analysis were conducted for stability design of an eight-story building loaded with dead load, live load, and wind load. IAM provides a simple amplifier approach which is called  $B_3$  to address the member inelasticity, member imperfections, and uncertainty in member stiffness. From the study that has been conducted, the analysis results using IAM show close values with those of DAM, in terms of demand-to-capacity ratios, with IAM is more conservative than DAM. The use of IAM simplifies the design process without affecting the economy of the design.*

**Keywords:** *Direct analysis method, effective-length method, first-order analysis method, indirect analysis method, design for stability*

## Abstrak

*Ada tiga metode yang tercantum di dalam AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings untuk desain terhadap stabilitas, yaitu: Metode Analisis Langsung (DAM), Metode Panjang Efektif (ELM), dan Metode Analisis Orde Pertama (FOM). DAM merupakan metode yang diunggulkan oleh AISC. Berdasarkan metode tersebut, Rafael Sabelli mengusulkan metode lain, yaitu Metode Analisis Tidak Langsung (IAM). IAM merupakan metode yang baru dan belum banyak digunakan, serta belum masuk di dalam AISC 360-16. Kajian ini dilakukan dalam rangka melakukan studi penggunaan IAM dan membandingkan hasil analisisnya dengan DAM. Dengan menggunakan perangkat lunak analisis struktur nonlinear, dilakukan desain dan analisis terhadap stabilitas gedung baja delapan tingkat yang mengalami beban mati, beban hidup, dan beban angin. IAM memberikan pendekatan dengan sebuah faktor sederhana yang disebut  $B_3$  untuk mengatasi inelastisitas komponen struktur, ketidaksempurnaan komponen struktur, dan ketidakpastian dalam kekakuan komponen struktur. Dari studi yang telah dilakukan, hasil analisis menggunakan IAM menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan DAM, dalam hal rasio demand-to-capacity, dengan IAM lebih konservatif dibandingkan dengan DAM. Penggunaan IAM dapat mempermudah proses desain tanpa mempengaruhi desain dalam hal ekonomi.*

**Kata kunci:** *Metode analisis langsung, metode panjang efektif, metode analisis orde pertama, metode analisis tidak langsung, desain terhadap stabilitas*

## Pendahuluan

Terdapat tiga metode untuk desain terhadap stabilitas yang didefinisikan di dalam AISC 360-16 *Specification for Structural Steel Buildings* (AISC,

2016), yaitu Metode Analisis Langsung (*Direct Analysis Method*, DAM), Metode Panjang Efektif (*Effective Length Method*, ELM), dan Metode Analisis Orde Pertama (*First Order Analysis Method*, FOM). Ketiga metode ini juga terdapat di

dalam SNI 1729-2020, di dalam Bab C (DAM) dan Lampiran 7 (ELM dan FOM). Dua metode yang disebut terakhir (ELM dan FOM) terbatas penggunaannya karena ada syarat keberlakuan yang harus dipenuhi. Dengan demikian, kedua metode tersebut ditempatkan di Lampiran di dalam SNI 1729-2020 (SNI, 2020a), dan tidak dibahas lebih lanjut di dalam kajian ini. Metode Analisis Langsung (DAM) memperhitungkan efek reduksi kekakuan dalam analisis serta mengharuskan analisis orde kedua yang menggunakan kekakuan komponen struktur tereduksi.

Analisis orde kedua dapat dilakukan secara eksplisit atau dengan pendekatan analisis orde pertama yang diamplifikasi dengan faktor amplifikasi  $B_1$  dan  $B_2$  sehingga dikenal dengan nama Metode  $B_1$ - $B_2$  (Segui, 2018; White *et al.*, 2007). Efek reduksi kekakuan dalam DAM diperhitungkan secara global dan juga per komponen struktur. Secara global, semua kondisi kekakuan direduksi menggunakan faktor 0,8. Selain itu, reduksi kekakuan lentur komponen struktur untuk kolom pada rangka momen yang diberi notasi  $\tau_b$ , bergantung pada gaya aksial komponen struktur tersebut, sehingga sekurangnya satu iterasi analisis diperlukan untuk menentukan gaya aksial yang berkaitan dengan kondisi pembebanan. Setiap kombinasi pembebanan dapat membawakan serangkaian reduksi kekakuan komponen struktur masing-masing, walaupun pengelompokan biasanya dilakukan untuk mengurangi usaha dalam desain. Meski demikian, karena kekakuan tereduksi pada model DAM tidak dimaksudkan untuk digunakan dalam menghitung drift, sekurangnya dua model biasanya dibutuhkan untuk desain untuk verifikasi kekuatan dan yang lainnya untuk penentuan drift. Drift dapat menjadi kondisi batas layan sebagaimana pada umumnya dalam kasus untuk angin, atau kondisi batas keamanan seperti pada kasus untuk gempa. Dalam kasus angin maupun gempa tersebut, properti kekakuan penuh digunakan, walaupun alasannya berbeda. Stabilitas pada DAM, diperhitungkan tanpa memerlukan faktor panjang efektif,  $K$  yang lebih besar dari 1,0; faktor ini dapat diambil sebesar 1,0.

Untuk memperhitungkan ketidaktegan kolom (ketidak sempurna awal struktur), DAM mendefinisikan beban lateral nosional (imajinatif). Beban nosional ini diperlukan untuk kombinasi beban gravitasi. Pada kombinasi yang mengandung beban lateral dengan rasio drift orde kedua terhadap drift orde pertama yang melebihi 1,7 beban lateral nosional juga digunakan dalam DAM. Permasalahan utama adalah penentuan kekakuan tereduksi yang nilainya bergantung pada gaya aksial yang merupakan hasil analisis orde kedua yang mana analisis tersebut membutuhkan kekakuan

tereduksi. Permasalahan lain yang menyertai DAM adalah keharusan penentuan beban lateral nosional untuk memperhitungkan ketidaksempurnaan komponen struktur. Kedua permasalahan tersebut dapat diatasi dengan Metode Analisis Tidak Langsung (*Indirect Analysis Method*, IAM).

Metode IAM merupakan sebuah pendekatan dengan menggunakan faktor amplifikasi atau pembesar sederhana untuk mengatasi inelastisitas komponen struktur, ketidaksempurnaan komponen struktur, dan ketidakpastian dalam kekakuan komponen struktur. Ketiga faktor tersebut dinamakan efek reduksi kekakuan. IAM memungkinkan analisis orde kedua dengan properti kekakuan penuh; efek reduksi kekakuan dinyatakan dengan sebuah faktor amplifikasi,  $B_3$ , yang diterapkan pada beban lateral sebelum analisis atau pada efek beban (gaya-gaya dalam) setelah analisis (Sabelli, 2020).

Kajian ini ditujukan untuk mendalami penggunaan IAM yang diterapkan pada struktur gedung baja bertingkat delapan dengan mempelajari *demand-to-capacity ratio* komponen struktur dan membandingkannya dengan hasil DAM. Untuk mengkaji cara penerapan faktor amplifikasi  $B_3$  yang manakah yang paling optimal, pada kajian ini IAM dilakukan dengan tiga cara: (a) faktor  $B_3$  terbesar diterapkan terhadap gaya lateral yang bekerja pada struktur untuk semua tingkat, (b) faktor  $B_3$  diterapkan pada beban lateral tingkat per tingkat, dan (c) faktor  $B_3$  diterapkan pada gaya dalam tingkat per tingkat.

## Metode

IAM adalah versi sederhana dari DAM, yang mana efek reduksi kekakuan diperhitungkan secara global atau lantai per lantai, bukan per komponen struktur. IAM memiliki cara yang relatif mudah untuk diterapkan, yaitu analisis orde kedua dan suatu faktor amplifikasi yang disebut  $B_3$  diterapkan pada beban lateral atau pada efeknya) dan tidak memerlukan metode yang lebih rumit (seperti penentuan faktor panjang efektif lebih besar dari 1,0 atau diperlukan beberapa model) (Sabelli, 2020).

IAM menggabungkan analisis orde kedua (baik analisis orde kedua secara eksplisit maupun analisis orde pertama yang diamplifikasi oleh faktor  $B_1$  dan  $B_2$ ) dan sebuah faktor amplifikasi yang disebut  $B_3$  untuk memperhitungkan reduksi kekakuan. Faktor amplifikasi ini digunakan untuk memperbesar gaya-gaya pada analisis orde kedua sehingga hasil yang diperoleh sesuai dengan hasil yang didapatkan dari DAM sehingga IAM dapat disebut sebagai versi sederhana dari DAM (Sabelli, 2020). Faktor  $B_3$  ini secara efektif berfungsi sama dengan reduksi

kekakuan  $0,8\tau_b$  dalam DAM, yang memungkinkan penggunaan faktor panjang efektif,  $K$  sebesar 1,0 dalam IAM. Penggunaan nilai  $\tau_b$  secara global atau tingkat dapat membuat IAM lebih konservatif dibanding DAM untuk kasus-kasus dengan rentang rasio gaya aksial kolom pada rangka momen yang lebih besar. Selain itu, pendekatan ini memungkinkan kuantifikasi efek reduksi kekakuan dan penerapannya sebagai faktor di dalam analisis dengan menggunakan properti kekakuan penuh dan tidak membutuhkan model lain untuk desain terhadap stabilitas.

AISC 360-16 (AISC, 2016) membutuhkan lima tinjauan untuk metode desain terhadap stabilitas yang dapat diterima. Kelima hal tersebut dipaparkan di bawah ini bersamaan dengan bagaimana semua itu diperhitungkan di dalam IAM. Pertama, semua deformasi diperhitungkan. Syarat ini diperhitungkan dengan pemodelan yang tepat. Ke dua, efek orde kedua (efek P- $\Delta$  dan P- $\delta$ ) diperhitungkan. Syarat ini diperhitungkan dengan melakukan analisis orde kedua, baik secara eksplisit maupun melalui penerapan faktor  $B_1$  dan  $B_2$ . Ke tiga, ketidaksempurnaan geometris diperhitungkan, Syarat ini diperhitungkan dengan penerapan beban nosional, penerapan faktor  $B_3$ , dan penerapan rumus kekuatan komponen struktur dengan panjang efektif  $L_c = L$ . Ke empat, reduksi kekakuan akibat inelastisitas diperhitungkan. Syarat ini diperhitungkan dengan penerapan faktor  $B_3$  dan penerapan rumus kekuatan komponen struktur dengan  $L_c = L$ . Ke lima, ketidakpastian pada kekuatan dan kekakuan diperhitungkan. Syarat ini diperhitungkan dengan penerapan faktor  $B_3$  dan penerapan rumus kekuatan tersedia komponen struktur dengan  $L_c = L$ . Pendekatan untuk setiap tinjauan sesuai dengan DAM dengan perbedaan bahwa tinjauan ke tiga sampai ke lima menggunakan faktor  $B_3$ , yang memasukkan  $0,8\tau_b$  untuk memperhitungkan efek reduksi kekakuan.

Walaupun penelitian tentang efek stabilitas seringkali memperhitungkan sistem yang mendekati ketidakstabilan, pemeriksaan kasus-kasus seperti itu tidak seharusnya dianggap sebagai diperkenalkannya desain sistem yang mendekati ketidakstabilan. Batasan untuk IAM hanya didasarkan atas verifikasi metode tersebut. Ketika sebuah sistem mendekati batasan tersebut, batasan sistem tersebut menjadi semakin sensitif terhadap akurasi atas asumsi pembebanan, pemodelan, dan analisis. Lebih lanjut, harus diperhatikan bahwa untuk desain seismik, ASCE/SEI 7, Section 12.8.7, membatasi koefisien stabilitas,  $\theta$ , hingga 0,25 (atau lebih rendah untuk beberapa sistem). Menurut ASCE/SEI 7 Commentary (ASCE, 2016), koefisien stabilitas dapat dituliskan dengan:

$$\theta = \frac{\alpha P_{story} \Delta H}{HL} \quad (1)$$

dengan  $H$  adalah gaya geser lantai total (N),  $L$  adalah tinggi tingkat (mm),  $P_{story}$  adalah beban vertikal total yang dipikul lantai (N),  $\alpha$  adalah faktor penyesuaian level gaya yang bernilai sama dengan 1,0 (LRFD) atau 1,6 (ASD), dan  $\Delta_H$  adalah drift antar tingkat orde pertama akibat gaya lateral (mm). Dengan demikian, batas pada koefisien stabilitas,  $\theta$ , adalah batas untuk efek stabilitas geometri (P- $\Delta$ ). Sesuai dengan metode yang terdapat pada *Design Guide 28* (Griffis & White, 2013), IAM diturunkan berdasarkan faktor amplifikasi orde kedua  $\bar{B}_2$ , yang bertujuan ganda, yaitu untuk memperhitungkan ketidaklinaran geometri (efek P- $\Delta$ ) dan efek reduksi kekakuan.

Gaya geser orde kedua (dengan beban nosional) ditetapkan sama dengan gaya geser orde pertama dengan gaya-gaya tambahan yang dibutuhkan untuk desain terhadap stabilitas (Persamaan 2)

$$\bar{B}_2(H + \Sigma N) = H + \bar{H}_{P\Delta} \quad (2)$$

dengan  $\bar{B}_2$  adalah faktor amplifikasi orde kedua menggunakan reduksi kekakuan  $EI^* = 0,8\tau_b EI$ ,  $\bar{H}_{P\Delta}$  adalah gaya geser P- $\Delta$  (N) yang sesuai dengan Persamaan B-10b (Griffis dan White, 2013),  $\Sigma N$  adalah beban nosional untuk memperhitungkan ketidaktegakan (pada atau di atas level yang ditinjau) (N),  $E$  modulus elastisitas (MPa),  $I$  adalah momen inersia (mm<sup>4</sup>), dan  $\tau_b$  adalah parameter reduksi kekakuan.

Definisi  $\tau_b$  menurut AISC 360-16 (AISC, 2016) dapat dituliskan sebagai Persamaan 3.

$$\tau_b = 4 \frac{\alpha P_r}{P_{ns}} \left( 1 - \frac{\alpha P_r}{P_{ns}} \right) \leq 1,0 \quad (3)$$

dengan  $P_{ns}$  adalah kekuatan tekan penampang melintang (N) yang bernilai  $F_y A_g$  untuk kolom tanpa elemen langsing atau  $F_y A_e$  untuk kolom dengan elemen langsing,  $P_r$  = kekuatan aksial perlu dengan menggunakan kombinasi LRFD atau ASD (N),  $A_g$  adalah luas penampang bruto (mm<sup>2</sup>),  $A_e$  adalah luas penampang efektif (mm<sup>2</sup>), dan  $F_y$  adalah tegangan leleh minimum terspesifikasi (MPa).

Faktor pembesaran peralihan  $\bar{B}_2$  di dalam *Design Guide 28* (Persamaan B-4 dalam Griffis & White (2013)) memasukkan faktor reduksi kekakuan 0,8 untuk FOM:

$$\bar{B}_2 = \frac{1}{1-Q/0,8} \quad (4)$$

dengan  $Q$  adalah indeks stabilitas yang berkaitan dengan koefisien stabilitas  $\theta$ . Dengan demikian,

$$Q = \frac{\theta}{R_M} \quad (5)$$

dan  $R_M$  adalah koefisien untuk memperhitungkan pengaruh  $P-\delta$  komponen struktur terhadap  $P-\Delta$  struktur.

Faktor 0,8 pada Persamaan 4 merepresentasikan reduksi kekakuan DAM. Bentuk lain Persamaan 4 dapat dituliskan dengan memasukkan parameter reduksi kekakuan lentur yang bergantung pada gaya aksial,  $\tau_b$ .

$$\overline{B}_2 = \frac{1}{1-Q/0,8\tau_b} = \frac{1}{1-\theta/0,8\tau_b R_M} \quad (6)$$

Penggabungan  $\tau_b$  ke dalam  $\overline{B}_2$  secara efektif mengaplikasikan parameter ini secara seragam pada semua komponen struktur dan semua gaya dalam (baik aksial maupun momen lentur). Aplikasi  $\tau_b$  pada semua efek beban lateral secara seragam ini berpotensi melebihi pengaruh sebenarnya, namun memungkinkan penggunaan sebuah faktor pada beban lateral untuk memperhitungkan pengaruh tegangan aksial yang tinggi terhadap kekakuan sistem. Indeks stabilitas,  $Q$ , selain dinyatakan dengan Persamaan 5 juga dapat dituliskan sebagai Persamaan 7.

$$Q = \frac{\alpha P_{story} \Delta H}{R_M H L} \quad (7)$$

Terlihat bahwa indeks stabilitas  $Q$  lebih lengkap daripada koefisien stabilitas  $\theta$ , yaitu adanya reduksi kekakuan yang berkaitan dengan gaya tekan kolom pada rangka momen,  $R_M$ . Namun demikian, koefisien stabilitas,  $\theta$ , digunakan di dalam standar ASCE 7 (ASCE, 2016) sehingga koefisien tersebut digunakan di dalam kajian ini (bersama dengan  $R_M$ ). Bagian kanan dalam Persamaan 7 yang mendefinisikan indeks stabilitas  $Q$  juga dapat digunakan untuk mendefinisikan faktor  $B_2$ :

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha P_{story} \Delta H}{R_M H L}} \quad (8)$$

Dengan demikian, indeks stabilitas  $Q$  dapat dinyatakan dalam  $B_2$ :

$$Q = 1 - \frac{1}{B_2} \quad (9)$$

Untuk pengembangan IAM, efek geometri dan efek reduksi kekakuan yang tergabung dalam faktor  $\overline{B}_2$  dapat ditulis sebagai Persamaan 10.

$$\overline{B}_2 = B_2 B_3 \quad (10)$$

dengan  $B_3$  adalah faktor pembesar IAM untuk memperhitungkan reduksi kekakuan akibat inelastisitas, ketidaksempurnaan komponen struktur, dan ketidakpastian dalam kekakuan.

Dengan demikian,  $B_2$  memperhitungkan efek geometris orde kedua, dan  $B_3$  memperhitungkan reduksi kekakuan akibat inelastisitas, ketidaksempurnaan komponen struktur, dan ketidakpastian dalam kekakuan. Dengan

memisahkan  $B_2$  dan  $B_3$ , IAM tidak mempengaruhi prosedur analisis orde kedua yang sudah ada yang menggunakan properti komponen struktur berkekakuan penuh. Penggunaan faktor amplifikasi  $B_2$  hanya berlaku untuk sistem dengan kolom vertikal (AISC, 2016), maka IAM (yang memanfaatkan  $B_2$ ) juga dibatasi hal tersebut.

Dengan menggabungkan Persamaan 6 dengan Persamaan 10, maka:

$$B_2 B_3 = \frac{1}{1-\theta/0,8\tau_b R_M} \quad (11)$$

Faktor amplifikasi orde kedua ( $B_2$ ) dapat dituliskan dengan cara yang serupa (serupa dengan Persamaan B-3 dalam Griffis dan White, 2013):

$$B_2 = \frac{1}{1-\theta/R_M} \quad (12)$$

Dengan menggabungkan Persamaan 11 dan Persamaan 12, faktor  $B_3$  dapat ditentukan.

$$B_3 = \frac{1-\theta/R_M}{1-\theta/0,8\tau_b R_M} \quad (13)$$

Terlihat dari Persamaan 13 bahwa faktor  $B_3$  merupakan fungsi dari koefisien stabilitas,  $\theta$ , faktor  $P-\delta$ ,  $R_M$ , dan parameter reduksi kekakuan lentur,  $\tau_b$ . Batasan pada nilai-nilai ini dapat ditentukan di awal desain sedemikian sehingga faktor  $B_3$  dapat ditentukan dan digunakan dalam analisis sejak awal iterasi. Persamaan 13 dapat dinyatakan dalam  $B_2$  dan  $\tau_b$  dengan menggunakan Persamaan 9 dan 5:

$$B_3 = \frac{0,8\tau_b}{1-(1-\tau_b)B_2} \quad (14)$$

Persamaan 13 atau Persamaan 14 dapat digunakan untuk mengamplifikasi hasil analisis orde kedua. Apabila  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,5$ ,  $\tau_b = 1,0$ , maka Persamaan 14 dapat disederhanakan menjadi:

$$B_3 = \frac{4}{5-B_2} \quad (15)$$

Apabila analisis orde kedua eksplisit dilakukan, faktor amplifikasi orde kedua dapat ditentukan berdasarkan hasil analisis dan digunakan sebagai ganti dari  $B_2$  dari Persamaan A8-6 di dalam AISC 360-16 (AISC, 2016) untuk menghitung faktor amplifikasi yang memperhitungkan reduksi kekakuan. Faktor amplifikasi ini ( $B_2'$ ) ditentukan dengan menggunakan rasio peralihan orde kedua terhadap peralihan orde pertama dari analisis.

$$B_2' = \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \quad (16)$$

dengan  $\Delta_1$  dan  $\Delta_2$  adalah drift orde pertama dan kedua menggunakan kekakuan penuh (mm). Faktor amplifikasi reduksi kekakuan yang sesuai,  $B_3'$ , diperoleh dengan menggabungkan Persamaan 14 dan Persamaan 16 (dengan  $B_2 = B_2'$ ).

$$B_3' = \frac{0,8\tau_b}{1-(1-\tau_b)\Delta_2/\Delta_1} \quad (17)$$

Pada IAM, terdapat beban nosional yang sama dengan yang diperlukan untuk DAM. yaitu

$$N_i = \frac{\Delta_0}{L} Y_i \quad (18)$$

dengan  $N_i$  adalah beban nosional di tingkat ke- $i$  ( $N$ ),  $Y_i$  adalah beban gravitasi yang diterapkan pada tingkat ke- $i$  ( $N$ ), dan  $\Delta_0$  adalah ketidaktegakan awal nominal yang diambil sebesar 0,002 tinggi lantai sesuai AISC 360-16 (AISC, 2016). Beban nosional diterapkan per lantai, sehingga terakumulasi sebagaimana halnya beban vertikal yang dipikul,  $P_{story}$ , juga terakumulasi.

Sesuai dengan DAM, beban nosional pada IAM diterapkan pada kombinasi beban gravitasi apabila  $B_2 \leq 1,5$  dan pada semua kombinasi pembebanan apabila  $B_2 > 1,5$ . Analisis orde ke dua yang memperhitungkan efek  $P-\Delta$  dan  $P-\delta$  untuk kasus  $B_2 > 1,5$  (Nair, 2009). Namun demikian, apabila faktor  $B_2$  sudah memperhitungkan  $R_M$ , maka penggunaan beban nosional dapat diterima (Sabelli, 2020).

IAM dapat digunakan apabila ketujuh kondisi di bawah ini terpenuhi (Sabelli, 2020). Pertama,  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,7$  untuk kolom rangka momen. Ke dua, Semua kolom merupakan kolom vertikal. Ke tiga, Analisis orde kedua dilakukan secara eksplisit atau dengan metode pendekatan faktor  $B_1$  dan  $B_2$ . Ke empat, Beban nosional diterapkan untuk  $B_2 > 1,5$  dan untuk kombinasi pembebanan gravitasi. Ke lima,  $B_3$  diambil sebagai nilai terbesar pada atau di atas level yang sedang ditinjau. Ke enam, Nilai  $\tau_b$  ditentukan (atau dikonfirmasi) menggunakan hasil analisis orde kedua yang diamplifikasi menggunakan faktor  $B_3$ . Terakhir, Peralihan terbesar pada lantai digunakan untuk menentukan  $B_2$  dan  $B_3$ .

Faktor amplifikasi untuk memperhitungkan efek orde kedua ( $B_2$ ) dan reduksi kekakuan ( $B_3$ ) harus digunakan apabila analisis orde pertama digunakan. Hasil kali kedua faktor ini dapat diperoleh dengan mengalikan Persamaan 14 dengan  $B_2$ , yang diterapkan pada beban lateral atau pada efeknya yang ditentukan dengan analisis orde pertama.

$$B_2 B_3 = \frac{0,8\tau_b}{1/B_2 - (1 - 0,8\tau_b)} \quad (19)$$

Hasil kali  $B_2 B_3$  ini juga merupakan indikasi besarnya pengaruh stabilitas terhadap desain. Apabila  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,5$ , maka  $\tau_b = 1,0$ , dan Persamaan 19 dapat disederhanakan menjadi:

$$B_2 B_3 = \frac{4}{5/B_2 - 1} \quad (20)$$

Dalam IAM, Persamaan (20) digunakan sebagai faktor amplifikasi pada beban lateral yang sama dengan beban lateral yang perlu diterapkan pada DAM.

IAM memperhitungkan efek reduksi kekakuan di dalam analisis seperti pada DAM, bukan di dalam persamaan kekuatan desain seperti pada ELM. Sebagaimana telah dibahas dalam penurunan IAM, nilai  $B_2$  dan  $B_3$  merepresentasikan kekakuan linear lateral tereduksi. Dengan demikian, faktor amplifikasi IAM dapat diterapkan sebelum dilakukannya analisis orde kedua atau pada efek beban setelahnya, sebelum desain, atau (secara konservatif) pada rasio *demand-to-capacity*. Sebagai metode yang lebih sederhana, IAM tentu saja harus lebih konservatif dari pada DAM.

Ada tiga alternatif penerapan IAM, yaitu metode rasio *demand-to-capacity*, metode pembesaran beban, dan metode pembesaran gaya dalam tingkat per tingkat. Metode rasio *demand-to-capacity* adalah metode paling sederhana dengan menggunakan kebalikan dari faktor  $B_3$  sebagai batas rasio *demand-to-capacity* yang diizinkan. Metode ini secara efektif memperbesar efek beban gravitasi sehingga konservatif untuk kasus dengan  $B_3$  kecil.

Alternatif yang ke dua adalah metode pembesaran beban, dimana nilai  $B_3$  dapat dipilih sebelum desain dengan membatasi  $\alpha P_r/P_{ns}$  dan mengambil  $B_2$  yang terkecil di antara  $B_2$  yang terkait dengan batas koefisien stabilitas,  $\theta$ , dan yang terkait dengan batas drift. Satu faktor  $B_3$  dapat digunakan untuk memperbesar seluruh hasil analisis lateral, dengan menggunakan nilai  $B_3$  terbesar untuk semua lantai. Karena  $B_3$  didasarkan atas nilai terkecil  $\tau_b$  untuk semua kolom rangka momen dalam satu lantai, maka hal ini dapat memperbesar pengaruh nilai kecil  $\tau_b$  secara dramatis. Namun demikian, di dalam praktik tipikal, kolom rangka momen jarang memiliki gaya aksial di atas  $0,5P_{ns}$ , dan gaya aksial harus jauh lebih besar dari nilai ini untuk memberikan efek yang signifikan terhadap kekakuan. Apabila beberapa rasio  $\alpha P_r/P_{ns}$  melebihi 0,5 (dan desain komponen struktur ditentukan oleh kekuatan, bukan oleh kekakuan yang diperlukan untuk memenuhi batas drift), maka penerapan  $B_3$  per tingkat lebih disarankan.

Alternatif ke tiga penerapan DAM adalah dengan pembesaran gaya dalam per tingkat. Penggunaan sebuah nilai  $B_3$  untuk seluruh beban lateral akan menjadi konservatif untuk lantai-lantai dimana efek orde kedua relatif rendah. Faktor  $B_3$  dapat diterapkan pada gaya dalam lantai per lantai, bukan sebagai faktor global. Sekalipun demikian, penggunaan faktor  $B_3$  sebagai faktor khusus per tingkat pada beban yang diterapkan (bukan pada gaya dalam) berpotensi menjadi tidak konservatif karena amplifikasi atas efek guling lebih kecil dari amplifikasi geser pada tingkat dengan nilai  $B_3$  yang lebih tinggi dibanding tingkat-tingkat di atasnya (hal tersebut tipikal apabila drift seragam), sehingga

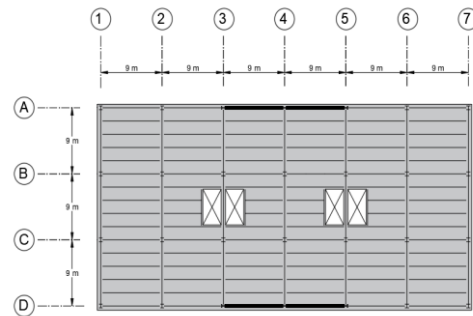
metode ini tidak direkomendasikan, kecuali apabila potensi ketidaksesuaian tersebut telah dikaji.

Penerapan hasil kali  $B_2B_3$  lantai per lantai pada efek beban lateral mudah dilakukan, yaitu dengan superposisi masing-masing efek beban yang didapatkan dari analisis orde pertama. Penerapan faktor  $B_3$  lantai per lantai dengan hasil analisis orde kedua dapat dilakukan dengan membuat sebuah model dengan kekakuan geometri berdasarkan beban vertikal; analisis menggunakan model kekakuan geometri seperti ini cocok untuk superposisi linear (Wilson & Habibullah, 1987) dan dengan demikian cocok untuk aplikasi faktor  $B_3$  baik pada beban lateral maupun efek beban lateral.

Prosedur penerapan IAM yang diusulkan Sabelli (2020) meliputi sepuluh langkah. Langkah pertama, tetapkan batas *drift* serta beban vertikal dan lateral yang sesuai untuk persyaratan daya layan. Langkah ke dua, tetapkan beban vertikal dan lateral untuk evaluasi kekuatan. Langkah ke tiga, pilih ukuran komponen struktur yang memenuhi batas *drift*. Langkah ke empat, periksa batas koefisien stabilitas  $\theta$ , apabila diperlukan. Langkah ke lima, tentukan efek orde kedua  $B_2$  (Persamaan 8) untuk kombinasi pembebanan yang berlaku. Langkah ke enam, hitung nilai awal  $B_3$  (berdasarkan  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,5$  menggunakan Persamaan 15). Langkah ke tujuh, terapkan beban nosional tambahan sebesar  $0,001P_{story}$  di awal agar pengecekan  $\alpha P_r/P_{ns}$  tidak diperlukan (hal ini opsional). Langkah ke delapan, lakukan analisis orde kedua dengan beban lateral yang diperbesar dengan nilai  $B_3$  terbesar. Langkah ke sembilan, periksa apakah rasio *demand-to-capacity* komponen struktur tidak melebihi 1,0. Apabila pada langkah 7 diasumsikan  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,5$  periksa apakah asumsi ini memang benar. Langkah terakhir, apabila pemeriksaan kekuatan atau stabilitas menunjukkan ketidakcukupan, lakukan iterasi menggunakan IAM atau ganti ke DAM. Untuk iterasi IAM, periksa  $\alpha P_r/P_{ns}$  (untuk menentukan apakah beban nosional tambahan dapat ditiadakan), hitung ulang  $B_3$ , terapkan faktor  $B_3$  terpisah pada tiap lantai, atau ubah ukuran komponen struktur.

Langkah 4, 5, dan 6 dapat dilakukan sebelum desain dengan mengasumsikan kekakuan yang diperlukan untuk memenuhi batas drift (termasuk efek orde kedua), sehingga menyederhanakan proses desain. Pada kajian ini digunakan sebuah kasus untuk mengilustrasikan penerapan IAM untuk desain terhadap stabilitas. Struktur yang ditinjau merupakan bangunan gadung baja delapan tingkat yang denahnya ditunjukkan pada **Gambar 1**. Denah tersebut tipikal untuk setiap tingkat. Gedung tersebut berfungsi sebagai perkantoran. Kombinasi pembebanan yang ditinjau dalam kajian ini hanya

kombinasi yang mengandung beban lateral. Analisis dua dimensi dilakukan pada rangka momen pada as D di dalam **Gambar 1**.



**Gambar 1. Denah tipikal pada seluruh lantai (Tumena, 2022)**

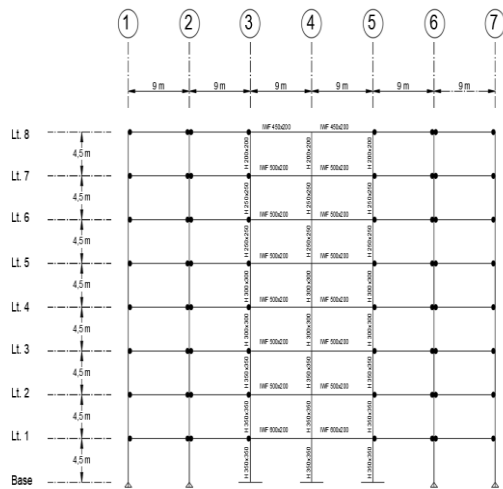
Gambar 2 menunjukkan elevasi rangka struktur. Kolom pada as 3, 4, dan 5 adalah kolom yang merupakan bagian dari rangka momen, sementara kolom lainnya merupakan *leaning-columns* yang bukan pemikul beban lateral (Geschwindner, 2002).

Hanya dua kombinasi pembebanan yang ditinjau pada kajian ini, yaitu kombinasi lateral pada tingkat layan dan tingkat kekuatan. Keduanya merupakan kombinasi pembebanan yang tercantum di dalam SNI 1727-2020 (SNI, 2020b). Karena beban hidup pada gedung tidak melebihi  $4,78 \text{ kN/m}^2$ , maka faktor beban  $L$  pada kombinasi pembebanan untuk desain kekuatan diizinkan sebesar 0,5 (SNI 2020b). Kombinasi pembebanan untuk desain layan adalah  $q = 1,0 \text{ DL} + 0,75 \text{ LL} + 0,75 (0,6W)$ , sedangkan kombinasi pembebanan untuk desain kekuatan adalah  $q = 1,2 \text{ DL} + 0,5 \text{ LL} + 1,0 W$ .

### Informasi desain pra-analisis

Data-data yang mendukung desain ditunjukkan pada Tabel 1. Beban gravitasi dan beban lateral diberikan untuk seluruh gedung, dengan asumsi beban terdistribusi sebesar 50% pada rangka yang sedang ditinjau (as D). Beban gravitasi yang terbagi tersebut juga termasuk beban gravitasi yang dipikul oleh *leaning-columns*. Beban-beban tersebut diterapkan secara langsung di kolom pada rangka momen.

Beban gravitasi dan beban lateral diasumsikan terbagi rata secara menyeluruh. Mutu baja untuk balok dan kolom diasumsikan Bj. 37 ( $F_y = 240 \text{ MPa}$  dan  $F_u = 370 \text{ MPa}$ ). Kekuatan leleh  $F_y$  tersebut mendekati baja A573 Grade 58 (ASTM, 2020). Faktor  $B_2$  dan  $B_3$  dihitung di awal desain dengan mengasumsikan rangka yang didesain mempunyai kekakuan yang diperlukan untuk mencapai batas drift untuk beban lateral yang sesuai, termasuk tinjauan efek orde kedua.



Gambar 2. Elevasi rangka struktur yang ditinjau (Tumena, 2022)

Tabel 2 menyajikan informasi untuk evaluasi terhadap layan. Batas drift diasumsikan  $L/400$  yang merupakan batas untuk drift orde kedua. Kekakuan yang diperlukan ( $K_{required}$ ) pada tabel tersebut didasarkan atas beban lateral dan batas drift dengan memperhitungkan efek orde kedua, yaitu:

$$K_{required} = \frac{H}{\Delta_{allowable}} + \frac{P_{story}}{R_M L} \quad (21)$$

Kekakuan yang diperlukan ini digunakan untuk menghitung drift orde pertama  $\Delta_1$ , yang kemudian digunakan untuk menghitung  $B_2$ . Perhitungan faktor  $B_2$  dilakukan menggunakan Persamaan 8. Meskipun

efek orde kedua diperhitungkan di dalam perhitungan ini dengan penentuan kekakuan yang diperlukan, belum ada pemilihan penampang yang dilakukan, dan hanya informasi pra-desain yang digunakan. Karena faktor  $B_2 > 1,5$  (Tabel 2), maka penerapan beban nosional perlu dilakukan.

Tabel 3 dan 4 juga disusun menggunakan informasi pra-desain. Drift orde pertama dihitung menggunakan kekakuan dan beban lateral pada level kekuatan. Faktor  $B_2$  pada level kekuatan dihitung berdasarkan beban vertikal yang diperhitungkan di dalam evaluasi kekuatan. Nilai-nilai  $B_2$  ini kemudian digunakan untuk menentukan nilai  $B_3$  dengan mengasumsikan  $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0,5$ . Rangka momen dua dimensi (lihat Gambar 3) dianalisis menggunakan perangkat lunak SAP2000. Dengan memperhitungkan efek orde kedua terhadap beban lateral dan beban vertikal pada kondisi layan, penampang balok dan kolom dipilih agar menghasilkan nilai drift orde kedua pada level layan mendekati namun tidak melampaui batas drift pada Tabel 2. Rasio antara drift orde kedua akibat beban lateral dalam kondisi layan dan batas drift ditunjukkan pada Tabel 5.

Beban angin diasumsikan seragam di seluruh tinggi tingkat dan diterapkan terpusat pada setiap tingkat. Karena tingkat paling atas hanya memikul setengah dari tinggi tingkat untuk beban angin, maka beban angin pada tingkat tersebut besarnya setengah dari tingkat di bawahnya (Tabel 3).

Tabel 1. Informasi desain pra-analisis (umum)

Tingkat	L (mm)	Beban Mati (kN)	Beban Hidup (kN)	$P_{mf}/P_{story}$	$R_M$
8	4500	993,16	0,00	0,5	0,925
7	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
6	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
5	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
4	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
3	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
2	4500	1953,90	595,96	0,5	0,925
1	4500	1967,66	595,96	0,5	0,925

Tabel 2. Informasi desain pra-analisis (evaluasi drift)

Tingkat	$H_{service}$ (kN)	$\Delta_{allowable}$ (mm)	$P_{story}$ (kN)	$K_{required}$ (kN/mm)	$\Delta_I$ (mm)	$B_2$
8	4,41	11,25	993,16	0,63	6,996	1,61
7	13,24	11,25	3394,03	1,99	6,646	1,69
6	22,07	11,25	5794,90	3,35	6,581	1,71
5	30,90	11,25	8195,77	4,72	6,553	1,72
4	39,73	11,25	10596,65	6,08	6,537	1,72
3	48,56	11,25	12997,52	7,44	6,528	1,72
2	57,39	11,25	15398,39	8,80	6,521	1,73
1	66,22	11,25	17813,02	10,17	6,514	1,73



Tabel 3. Informasi desain pra-analisis (evaluasi kekuatan)

Tingkat	$H$ (kN)	$F$ (kN)	$K=K_{required}$ (kN/mm)	$\Delta_1$ (mm)	$P_{story}$ (kN)	$B_2$	$\theta$	$B_3$	$B_3F$ (kN)
8	9,81	9,81	0,63	15,547	1191,79	1,83	0,42	1,26	12,54
7	29,43	19,62	1,99	14,770	3834,45	1,86	0,43	1,27	25,09
6	49,05	19,62	3,35	14,624	6477,12	1,87	0,43	1,28	25,09
5	68,67	19,62	4,72	14,562	9119,78	1,87	0,43	1,28	25,09
4	88,29	19,62	6,08	14,528	11762,44	1,87	0,43	1,28	25,09
3	107,91	19,62	7,44	14,506	14405,11	1,87	0,43	1,28	25,09
2	127,53	19,62	8,80	14,491	17047,77	1,87	0,43	1,28	25,09
1	147,15	19,62	10,17	14,476	19706,94	1,87	0,43	1,28	25,09

Tabel 4. Penampang yang digunakan pada tiap tingkat

Tingkat	Kolom	Balok	Balok Anak
8	H200x200	IWF 450x200	IWF150x75
7	H250x250	IWF 500x200	IWF150x75
6	H250x250	IWF 500x200	IWF150x75
5	H300x300	IWF 500x200	IWF150x75
4	H300x300	IWF 500x200	IWF150x75
3	H350x350	IWF 500x200	IWF150x75
2	H350x350	IWF 500x200	IWF150x75
1	H350x350	IWF 600x200	IWF150x75

Tabel 5. Hasil analisis dan pemeriksaan desain terhadap batas layan

Tingkat	$\Delta_2/\Delta_{all}$
8	0,25
7	0,39
6	0,64
5	0,66
4	0,84
3	0,77
2	0,76
1	0,51



Gambar 3. Rangka momen yang ditinjau dan penampang balok dan kolom yang dipilih (Tumena, 2022)

Di dalam SAP2000 (CSI, 2016) tidak ada pilihan IAM sehingga pada *Steel Frame Design Preferences*, metode analisis diubah dari “*Direct Analysis*” menjadi “*Limited 1st Order*” dan reduksi kekakuan menjadi “*No Modification*” agar sesuai dengan IAM. Setelah pemodelan dan analisis selesai dilakukan, nilai drift orde pertama dan orde kedua diperoleh. Selain itu juga diperoleh gaya aksial dan momen lentur, untuk digunakan dalam perhitungan rasio *demand-to-capacity* (DCR) pada balok dan kolom. Untuk balok, ditinjau balok pada bagian kiri, dan kolom yang ditinjau adalah kolom pada as 5 pada Gambar 3.

Untuk membandingkan hasil analisis IAM dan DAM, dilakukan analisis menggunakan DAM pada model yang sama. Pada kajian ini dilakukan analisis IAM menggunakan tiga cara penerapan faktor  $B_3$ . Yang pertama adalah cara yang direkomendasikan Rafael Sabelli (Sabelli, 2020), dimana faktor  $B_3$  terbesar diterapkan terhadap gaya lateral yang bekerja pada struktur untuk semua tingkat. Yang kedua adalah penggunaan faktor  $B_3$  yang dapat berbeda per tingkat, sehingga menghindari overestimasi pada tingkat atas. Yang terakhir adalah penerapan faktor  $B_3$  pada gaya dalam per tingkat.

### Hasil dan Pembahasan

Faktor  $B_3$  terbesar diterapkan terhadap gaya lateral yang bekerja pada struktur untuk semua tingkat.

Evaluasi terhadap daya layan

Dalam penggunaan IAM, pemilihan ukuran penampang yang digunakan dalam struktur



didasarkan atas batas drift. Rasio perbandingan antara drift orde kedua pada kondisi layan dengan batas drift tidak melebihi nilai 1,0. Pemilihan penampang sudah dioptimalkan sehingga drift orde kedua pada kombinasi beban layan yang terjadi tidak melebihi batas drift.

Evaluasi terhadap kekuatan

Kelebihan IAM adalah penggunaan metodenya yang sederhana serta hasil yang konservatif. Untuk memahami hal ini lebih baik lagi, maka nilai  $B_2'$  dan  $B_3'$  dihitung dan ditunjukkan dalam kajian ini, walaupun kedua nilai tersebut tidak digunakan dalam evaluasi (lihat Tabel 6). Kedua faktor tersebut didapatkan dari nilai drift orde pertama dan orde kedua dengan kombinasi beban untuk desain kekuatan, yang diperoleh dari analisis dengan SAP2000. Karena semua rasio  $\alpha P_r/P_{ns}$  bernilai lebih kecil dari 0,5, maka  $\tau_b = 1,0$  untuk semua tingkat (lihat Tabel 6).

Untuk menghitung rasio *demand-to-capacity*, (DCR) atau disebut juga rasio interaksi, digunakan persamaan interaksi dari AISC 360-16 (AISC, 2016), yaitu Persamaan H1-1a dan H1-1b. Dalam menghitung rasio interaksi, diperlukan informasi mengenai gaya aksial dan momen lentur. Kekuatan aksial dan kekuatan-lentur-perlu didapatkan dari perangkat lunak SAP2000, sementara kekuatan aksial dan kekuatan-lentur-tersedia harus dihitung berdasarkan data penampang yang telah dipilih berdasarkan syarat layan.

Faktor  $B_3$  diterapkan pada beban lateral per tingkat

Untuk perbandingan, struktur yang sama dianalisis menggunakan IAM dengan faktor  $B_3$  diterapkan pada beban lateral tingkat per tingkat yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 8 dan 9. Dengan membandingkan DCR pada Tabel 7 dan 9, terlihat bahwa penerapan  $B_3$  maksimum pada semua tingkat sedikit mengoverestimasi DCR.

**Tabel 6. Hasil analisis dan pemeriksaan desain terhadap batas kekuatan**

Tingkat	$\alpha P_r/P_{ns}$	$\tau_b$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$B_2'$	$B_3'$
8	0,06	1,00	4,30	6,11	1,42	1,12
7	0,13	1,00	7,00	9,54	1,36	1,10
6	0,22	1,00	13,40	15,68	1,17	1,04
5	0,24	1,00	14,28	16,04	1,12	1,03
4	0,31	1,00	18,71	20,39	1,09	1,02
3	0,27	1,00	17,67	18,87	1,07	1,02
2	0,33	1,00	17,64	18,57	1,05	1,01
1	0,38	1,00	12,07	12,52	1,04	1,01

**Tabel 7. Perbandingan rasio *demand-to-capacity* (DCR) IAM dan DAM**

Tingkat	IAM Balok (DCR)	DAM Balok (DCR)	Rasio IAM/DM	IAM Kolom (DCR)	DAM Kolom (DCR)	Rasio IAM/DM
8	0,47	0,47	1,01	0,67	0,65	1,02
7	0,70	0,69	1,02	0,74	0,72	1,03
6	0,73	0,71	1,03	0,88	0,85	1,04
5	0,79	0,76	1,05	0,82	0,79	1,04
4	0,85	0,81	1,06	0,90	0,85	1,05
3	0,92	0,86	1,07	0,70	0,67	1,05
2	0,97	0,90	1,07	0,81	0,77	1,06
1	0,77	0,72	1,07	0,85	0,78	1,08

**Tabel 8. Hasil analisis dan pemeriksaan desain**

Tingkat	Layan $\Delta_2/\Delta_{all}$	Evaluasi kekuatan					
		$\alpha P_r/P_{ns}$	$\tau_b$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$B_2'$	$B_3'$
8	0,25	0,06	1,00	4,23	6,03	1,43	1,12
7	0,39	0,13	1,00	6,92	9,44	1,36	1,10
6	0,64	0,22	1,00	13,32	15,56	1,17	1,04
5	0,65	0,24	1,00	14,22	15,95	1,12	1,03
4	0,83	0,31	1,00	18,64	20,31	1,09	1,02
3	0,77	0,27	1,00	17,62	18,81	1,07	1,02
2	0,76	0,33	1,00	17,60	18,52	1,05	1,01
1	0,51	0,38	1,00	12,04	12,49	1,04	1,01

Tabel 9. Perbandingan rasio *demand-to-capacity* (DCR) IAM dan DAM

Tingkat	IAM Balok (DCR)	DAM Balok (DCR)	Rasio IAM/DM	IAM Kolom (DCR)	DAM Kolom (DCR)	Rasio IAM/DM
8	0,47	0,47	1,01	0,67	0,65	1,02
7	0,70	0,69	1,01	0,74	0,72	1,03
6	0,73	0,71	1,03	0,88	0,85	1,04
5	0,79	0,76	1,04	0,82	0,79	1,04
4	0,85	0,81	1,06	0,90	0,85	1,05
3	0,92	0,86	1,07	0,70	0,67	1,05
2	0,97	0,90	1,07	0,81	0,77	1,06
1	0,77	0,72	1,07	0,85	0,78	1,08

Tabel 10. Hasil analisis dan pemeriksaan desain dengan  $B_3$  diterapkan pada gaya dalam tingkat per tingkat

Tingkat	Layan $\Delta_2/\Delta_{all}$	Evaluasi kekuatan					
		$\alpha P_r/P_{ns}$	$\tau_b$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$B_2'$	$B_3'$
8	0,20	0,08	1,00	3,39	4,81	1,42	1,12
7	0,31	0,16	1,00	5,51	7,51	1,36	1,10
6	0,51	0,27	1,00	10,55	12,35	1,17	1,04
5	0,52	0,30	1,00	11,25	12,64	1,12	1,03
4	0,66	0,39	1,00	14,74	16,06	1,09	1,02
3	0,61	0,34	1,00	13,92	14,87	1,07	1,02
2	0,61	0,40	1,00	13,89	14,63	1,05	1,01
1	0,41	0,47	1,00	9,51	9,86	1,04	1,01

Tabel 11. Perbandingan rasio *demand-to-capacity* (DCR) IAM dan DAM

Tingkat	IAM Balok (DCR)	DAM Balok (DCR)	Rasio IAM/DM	IAM Kolom (DCR)	DAM Kolom (DCR)	Rasio IAM/DM
8	0,58	0,47	1,25	0,80	0,65	1,22
7	0,86	0,69	1,25	0,90	0,72	1,25
6	0,88	0,71	1,24	1,04	0,85	1,23
5	0,94	0,76	1,24	0,98	0,79	1,24
4	1,00	0,81	1,24	1,06	0,85	1,24
3	1,07	0,86	1,24	0,83	0,67	1,25
2	1,12	0,90	1,24	0,96	0,77	1,25
1	0,89	0,72	1,25	0,97	0,78	1,24

Tabel 12. Penampang yang digunakan pada setiap tingkat

Tingkat	Kolom	Balok	Balok Anak
8	H200x200	IWF 450x200	IWF150x75
7	H250x250	IWF 500x200	IWF150x75
6	H300x300	IWF 500x200	IWF150x75
5	H300x300	IWF 500x200	IWF150x75
4	H350x350	IWF 500x200	IWF150x75
3	H350x350	IWF 600x200	IWF150x75
2	H350x350	IWF 600x200	IWF150x75
1	H350x350	IWF 600x200	IWF150x75

Tabel 13. Hasil analisis dan pemeriksaan desain

Tingkat	Layan $\Delta_2/\Delta_{all}$	Evaluasi kekuatan					
		$\alpha P_r/P_{ns}$	$\tau_b$	$\Delta_1$ (mm)	$\Delta_2$ (mm)	$B_2'$	$B_3'$
8	0,20	0,08	1,00	3,64	4,79	1,32	1,09
7	0,31	0,16	1,00	6,68	7,47	1,12	1,03
6	0,37	0,21	1,00	8,91	8,97	1,01	1,00
5	0,50	0,30	1,00	12,15	12,33	1,02	1,00
4	0,44	0,27	1,00	10,60	10,80	1,02	1,00
3	0,47	0,34	1,00	11,30	11,59	1,03	1,01
2	0,52	0,41	1,00	12,62	12,92	1,02	1,01
1	0,40	0,48	1,00	9,65	9,90	1,03	1,01

**Tabel 14. Perbandingan rasio *demand-to-capacity* (DCR) IAM dan DAM**

Tingkat	IAM Balok (DCR)	DAM Balok (DCR)	Rasio IAM/DM	IAM Kolom (DCR)	DAM Kolom (DCR)	Rasio IAM/DM
8	0,59	0,47	1,25	0,79	0,65	1,23
7	0,88	0,70	1,26	0,84	0,64	1,31
6	0,88	0,70	1,26	0,83	0,65	1,28
5	0,94	0,74	1,27	0,92	0,72	1,29
4	1,00	0,78	1,27	0,75	0,58	1,29
3	0,78	0,61	1,27	0,82	0,64	1,29
2	0,85	0,67	1,27	0,96	0,74	1,29
1	0,90	0,70	1,27	1,00	0,77	1,30

Faktor  $B_3$  diterapkan pada gaya per tingkat

Pada Tabel 10 dan 11 ditunjukkan hasil analisis, pemeriksaan desain (daya layan dan kekuatan), serta DCR untuk struktur yang sama, namun faktor  $B_3$  diterapkan pada gaya dalam tingkat per tingkat. Terlihat bahwa rasio *demand-to-capacity* (DCR) yang dihasilkan lebih besar dibanding penerapan  $B_3$  pada gaya lateral. Pada Tabel 11 ditunjukkan adanya rasio interaksi yang melebihi 1,0, sehingga pendesainan ulang diperlukan. Profil kolom dan balok dengan nilai rasio interaksi lebih besar dari 1,0 diperbesar, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 12 dan analisis kembali dilakukan. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 13 dan Tabel 14. Terlihat bahwa DCR balok dan kolom lebih kecil dari 1,0.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian penerapan DAM dan IAM pada struktur gedung baja, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

Hasil analisis menunjukkan bahwa IAM memberikan hasil yang konservatif dibandingkan dengan DAM, dimana hal tersebut dibuktikan dari perbedaan nilai  $B_3$  pra-desain dan  $B_3'$  aktual. Adanya perbedaan dalam rasio *demand-to-capacity* (DCR) antara DAM dan IAM disebabkan adanya dua pengukuran konservatif pada IAM. Yang pertama adalah digunakannya drift izin dalam menentukan faktor  $B_3$  yang menyebabkan overestimasi terhadap faktor tersebut. Hal itu dapat dihindari dengan penggunaan faktor  $B_3'$  yang dihasilkan dari analisis. Kedua, yaitu penggunaan nilai terbesar dari  $B_3$  untuk semua tingkat sehingga mengoverestimasi efek di tingkat-tingkat teratas. Penerapan faktor  $B_3$  (atau  $B_3'$ ) per tingkat dapat mengatasi hal ini.

Penerapan faktor  $B_3$  pada gaya dalam per tingkat mengoverestimasi beban yang diterima oleh struktur sehingga desain penampang profil perlu diperbesar. Penerapan faktor  $B_3$  pada beban lateral per tingkat dapat mengurangi overestimasi terhadap

gaya yang bekerja, sehingga dapat menjadi solusi untuk menghemat desain. Penerapan faktor  $B_3$  terbesar pada beban lateral tiap tingkat menghasilkan nilai yang konservatif dan hemat dibandingkan metode penerapan lainnya yang telah dikaji. Dengan demikian, berdasarkan kajian yang sudah dilakukan, aplikasi faktor  $B_3$  terbesar pada gaya lateral per tingkat menjadi cara yang paling optimal untuk digunakan. Dari hasil kajian secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan IAM mempermudah proses desain dan memberikan hasil yang konservatif. Penggunaan IAM dalam desain terhadap stabilitas dianjurkan sepanjang persyaratan penggunaan IAM dipenuhi.

## Saran

Penelitian selanjutnya disarankan mencakup hal lain yang belum dibahas di dalam kajian ini, antara lain: kombinasi pembebanan yang mengandung beban gempa, denah bangunan maupun variasi tingkat yang tidak beraturan, dan sebagainya, sepanjang persyaratan penggunaan IAM dipenuhi.

## Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan atas lisensi SAP2000.

## Daftar Pustaka

- AISC (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-16. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- ASCE (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE/SEI 7-16. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- ASTM (2020). *Standard Specification for Structural Carbon Steel Plates*, ASTM A573/A573M-20. American Standard for Testing Material, West Conshohocken, PA.

CSI (2016). *CSI Analysis Reference Manual*, Computer & Structures, Inc., Berkeley, CA.

Geschwindner, L.F. (2002). A Practical Look at Frame Analysis, Stability and Leaning Columns. *Engineering Journal*, AISC, 39(4), 167–181.

Griffis, L.G. & White, D.W. (2013). *Stability Design of Steel Buildings, Design Guide 28*, AISC, Chicago, IL.

Nair, R.S. (2009). A Model Specification for Stability Design by Direct Analysis. *Engineering Journal*, AISC, 46(1), 28–38.

Segui, W.T. (2018). *Steel Design 6<sup>th</sup> Edition*, Cengage Learning, Boston, MA.

Sabelli, R. (2020). The Indirect Analysis Method of Design for Stability: An Amplifier to Address Member Inelasticity, Member Imperfections, and Uncertainty in Member Stiffness. *Engineering Journal*, AISC, 57(2), 109-133.

SNI 1727-2020, (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

SNI 1729-2020, (2020). *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

Tumena, F.M, (2022). Studi Analisis Tidak Langsung (*Indirect Analysis Method*) pada Desain Terhadap Stabilitas Gedung Baja Delapan Tingkat. Skripsi. Universitas Katolik Parahyangan.

White, D.W., Maleck, A.E., & Kim, S.-C. (2007). Direct Analysis and Design Using Amplified First-Order Analysis, Part 1: Combined Braced and Gravity Framing Systems. *Engineering Journal*, AISC, 44(4), 305–322.

Wilson, E.L. & Habibullah, A. (1987). Static and Dynamic Analysis of Multi-Story Buildings Including P-Delta Effects. *Earthquake Spectra*, EERI, 3(2), 289-298.