

Era Baru Perancangan Struktur Baja Berbasis Komputer Memakai *Direct Analysis Method* (AISC 2010)

Wiryanto Dewobroto

Jurusan Teknik Sipil,
Universitas Pelita Harapan, Tangerang

Abstract: Steel material has high strength to volume weight ratio, so it can be made building with a slender structural elements for optimization or aesthetics. Consequently it is highly risk for experiencing the condition of elastic non-linear, due to instability. The source of instability are buckling ($P-\delta$ and $P-\Delta$) and initial imperfection. In the design, it is anticipated with an effective length method and magnification factor, whose value is different for each element, sometimes depend on engineering judgment. Therefore, calculating the exact buckling capacity of structure is not easy. Parameter stability of the structure varies depending on the condition of the foundation, connection, loading, and overall structural geometry. Therefore the design of existing procedures (AISC 2005) contains a slightly inaccurate condition. Currently, the development of computer program for second-order elastic analysis and their strategies in considering other stability parameters have reached the mature conditions for practical application, with the announcement of Direct Analysis Method (DAM) as the primary method of new AISC code (2010). DAM does not require "K" factor for each element. In this paper, DAM will be reviewed and be explained its background, also be evaluated the condition of existing our infrastructure, whether it is sufficient or not to follow the latest development trend. It is expected that this paper can be a kind of introduction to use DAM.

Keywords: structural analysis, steel design; Direct Analysis Method (DAM).

Abstrak: Material baja mempunyai kuat ratio yang tinggi terhadap berat volumenya, sehingga dapat dibuat bangunan dengan elemen struktur yang langsing akibat optimalisasi maupun estetika. Akibatnya beresiko tinggi mengalami kondisi non-linier elastis, akibat stabilitas. Hal yang mempengaruhinya adalah tekuk internal ($P-\delta$), tekuk global ($P-\Delta$) dan faktor *initial imperfection*. Pada perancangan dapat diantisipasi dengan metode panjang efektif dan faktor pembesaran, yang nilainya berbeda untuk tiap batang, bahkan kadangkala perlu *engineering judgement*. Oleh sebab itu, menghitung kapasitas tekuk struktur secara tepat adalah tidak mudah. Parameter stabilitas struktur bervariasi tergantung kondisi tumpuan, sambungan, pembebahan, maupun geometri struktur menyeluruh. Oleh karena itu prosedur desain yang ada (AISC 2005) mengandung ketidak-telitian. Saat ini, perkembangan program komputer analisa struktur orde ke-2 dan strategi memperhitungkan parameter stabilitas lain telah mencapai kondisi matang untuk penerapan praktis, dengan ditetapkannya *Direct Analysis Method* (DAM) sebagai metode utama AISC code terbaru (2010). DAM tidak memerlukan faktor "K" atau "pembesaran" untuk masing-masing elemen. Selanjutnya akan diulas DAM dan latar belakangnya sehingga dijadikan pilihan baru, serta mengevaluasi kondisi infrastruktur yang ada, apakah sudah mencukupi jika kita pada akhirnya juga akan mengarah pada trend yang berkembang tersebut. Diharapkan tulisan ini dapat menjadi semacam pengantar memahami lebih jauh tentang DAM tersebut.

Kata kunci: analisis struktur, desain penampang baja; *Direct Analysis Method* (DAM).

Era Baru Perancangan Struktur Baja Berbasis Komputer Memakai *Direct Analysis Method* (AISC 2010)

Wiryanto Dewobroto

Jurusan Teknik Sipil,
Universitas Pelita Harapan, Tangerang

1. PENDAHULUAN

Meskipun perkembangan pengetahuan dan penggunaan baja di dunia semakin maju, tetapi di Indonesia ternyata masih kalah populer dibandingkan beton. Peraturan baja untuk bangunan gedung, yaitu SNI 03 - 1729 – 2002, hanya berlaku pada baja *hot-rolled* atau yang sejenis, sedangkan peraturan perencanaan struktur baja *cold-formed* belum ada, meskipun keberadaannya di Indonesia ini sudah ada dimana-mana. Peraturan baja yang adapun relatif tertinggal dibanding dari manca negara. Tidak populernya konstruksi baja di sini umumnya cukup dijawab “karena harganya yang relatif lebih mahal”. Padahal perilaku mekaniknya relatif sempurna dibanding material lainnya, sehingga mempunyai banyak segi keunggulan. Memang untuk mengimplementasikannya tidak sederhana, banyak hal yang perlu dipenuhi agar hasilnya memuaskan (Dewobroto 2011). Kondisi ini telah memicu pihak berwenang mulai mewacanakan akan diterbitkannya peraturan baru, yang konon akan berubah total dan berkiblat ke *code* Amerika, yaitu AISC.

Berkaitan itu dan juga telah diterbitkannya *code* AISC terbaru (2010), tentu menarik dibahas. Salah satu materi yang cukup signifikan pengaruhnya adalah ditetapkannya *Direct Analysis Method* (DAM) untuk analisis stabilitas menggantikan metode KL/r atau *Effective Length Method* (ELM), yang populer selama ini. Itu nanti menjadi alternatif saja. Selanjutnya akan diulas DAM dan latar belakangnya sehingga dijadikan pilihan baru, serta mengevaluasi kondisi infrastruktur yang ada, apakah sudah mencukupi jika kita pada akhirnya juga akan mengarah pada trend yang berkembang tersebut.

2. PERANCANGAN STABILITAS “DIRECT ANALYSIS METHOD”

2.1 Umum

Perancangan stabilitas struktur baja adalah kombinasi analisis untuk menentukan kuat perlu penampang struktur dan mendesainnya agar mempunyai kekuatan mencukupi (AISC 2010). Untuk itu telah disyaratkan memakai Direct Analysis Method (DAM), yang sebelumnya adalah cara perancangan alternatif pada *code* lama (AISC 2005).

DAM diperlukan untuk mengatasi keterbatasan analisa struktur elastik yang tidak bisa mengakses stabilitas. Analisa struktur elastik adalah analisa struktur yang selama ini diajarkan pada tingkat S1 di jurusan teknik sipil dan dipakai untuk perancangan struktur pada umumnya. Jika memakai DAM maka pengaruh pembebanan pada struktur dapat ditentukan teliti karena telah memperhitungkan pengaruh ***geometry imperfection*** dan ***reduksi kekakuan*** selama proses analisa struktur itu sendiri.

Cara perancangan struktur baja yang saat ini dipakai, yaitu *Effective Length Method*, didasarkan analisa struktur elastik. Pemakaiannya terbatas pada struktur dengan rasio pembesaran momen akibat perpindahan titik nodal, $\Delta_{2nd\ order} / \Delta_{1st\ order} \leq 1.5$ (AISC 2005). Jika melebihi batasan tersebut berarti strukturnya relatif sangat langsing, yang mana pengaruh geometri non-linier akan menjadi signifikan. Sedangkan cara DAM tidak ada pembatasan, sehingga cocok untuk perancangan struktur baja modern, yang umumnya langsing akibat proses optimasi maupun memenuhi estetika bangunan.

2.2 Parameter yang menentukan stabilitas struktur baja

Jika mempelajari parameter perancangan batang tekan yang telah memperhitungkan kekuatan material (F_y) dan stabilitas (*buckling*), maka dengan mudah diketahui bahwa kekuatan batang tekan ditentukan oleh parameter E , F_y , KL/r dan A_g . Dua yang pertama merujuk bahan material, sedangkan dua yang terakhir merujuk kondisi geometrinya.

Ternyata setelah mempelajari lebih dalam, parameter tersebut bukanlah faktor utama. Itu hanya akan cocok jika dikaitkan dengan rumus atau kurva kapasitas yang terdapat pada *code* yang memakai parameter tersebut (Galambos 1998, Salmon et.al 2009). Jadi digunakannya parameter tersebut merupakan strategi jitu penyederhanaan penyelesaian dalam memprediksi kapasitas batang tekan. Meskipun parameternya sederhana tetapi pada kasus tertentu terbukti dapat memberikan korelasi yang memuaskan dengan data empiris hasil uji eksperimental. Strategi penyederhanaan itu diperlukan karena waktu penyusunan rumus belum dapat mengandalkan teknologi komputer, umumnya masih tergantung pada cara penyelesaian manual dengan kalkulator.

Adanya dukungan kemajuan di bidang teknologi komputer, maka cara penyederhanaan menjadi tidak relevan lagi. Perlu ditinjau langsung sumber permasalahan sehingga dapat dihasilkan metode baru lain yang memang sesuai dengan kemajuan teknologi yang ada.

Menurut AISC (2005) ada tiga (3) aspek penting yang mempengaruhi perilaku stabilitas elemen, yaitu [1] non-linieritas geometri; [2] sebaran plastisitas; dan [3] kondisi batas elemen. Ketiganya sangat berpengaruh pada deformasi struktur ketika dibebani, dan itu akan berdampak pada gaya-gaya internal yang terjadi.

Non-linieritas geometri : Pada struktur yang langsing, deformasi akibat pembebaan tidak dapat diabaikan. Pada era modern saat ini, diatasi dengan analisa struktur orde-2 dimana keseimbangan struktur akan memenuhi kondisi geometri setelah berdeformasi. Faktor yang dievaluasi adalah pengaruh *second-order-effect* yaitu $P-\delta$ dan $P-\Delta$, dimana dalam penyelesaian tradisionil itu diatasi dengan faktor pembesaran momen B_1 dan B_2 (Chapter C - AISC 2005). Bila pengaruh non-linier geometri signifikan maka kondisi cacat atau ketidak-sempurnaan geometri (*initial geometric imperfection*), yang berupa ketidak-lurusinan batang (*member out-of-straightness*), ketidak-tepatan rangka (*frame out-of-plumbness*), akibat kesalahan fabrikasi / toleransi pelaksanaan menjadi berpengaruh.

Sebaran plastisitas : Elemen struktur baja umumnya berbentuk profil yang dihasilkan dari proses *hot-rolled* maupun pengelasan. Keduanya meninggalkan tegangan sisa pada penampang yang diakibatkan oleh proses pendinginan dan adanya restraint. Kondisi itu mengurangi kekuatan elemen akibat stabilitas.

Kondisi batas elemen: Kekuatan batas elemen struktur ditentukan oleh satu atau lebih kondisi batasnya, seperti terjadinya kelelahan material, tekuk lokal, tekuk global berupa tekuk lentur, tekuk torsi maupun tekuk torsi-lentur yang tergantung kondisi penampang.

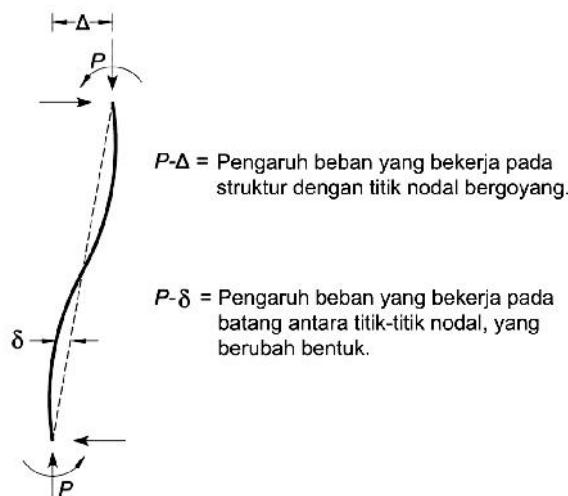
2.3 Persyaratan analisis struktur dalam DAM

Direct Analysis Method (DAM) adalah suatu metode untuk mengantisipasi keterbatasan metode *Effective Length Method* (ELM) yang merupakan strategi penyederhanaan untuk analisis cara manual. Akurasi dapat diharapkan karena akan dipakai teknologi komputer. Oleh karena itu DAM mensyaratkan bahwa program analisis struktur yang akan dipakai, seperti :

- Memperhitungkan **deformasi komponen-komponen struktur dan sambungannya** yang mempengaruhi deformasi struktur secara keseluruhan. Deformasi komponen yang dimaksud adalah berupa deformasi akibat lentur, aksial dan geser. Persyaratan ini cukup mudah dipenuhi karena hampir sebagian besar program analisa struktur

berbasis metoda matrik kekakuan apalagi ‘metoda elemen hingga’ yang merupakan algoritma dasar analisa struktur berbasis komputer sudah memasukkan pengaruh deformasi pada elemen formulasinya (Dewobroto 2007).

- **Pengaruh Orde ke-2 ($P-\Delta$ & $P-\delta$)**. Program komputer yang dapat menghitung gaya-gaya batang dengan analisa struktur orde ke-2 yang mempertimbangkan pengaruh $P-\Delta$ dan $P-\delta$ adalah sangat penting dan menentukan. Umumnya program komputer komersil bisa melakukan analisa struktur orde ke-2, meskipun kadang-kadang bisa berbeda satu dengan lainnya. Oleh karena itu diperlukan verifikasi akan kemampuan program komputer yang akan dipakai. Ketidak-sempurnaan terjadi ketika program ternyata hanya mampu memperhitungkan pengaruh $P-\Delta$ saja, dan tidak $P-\delta$. Adapun yang dimaksud $P-\Delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat terjadinya perpindahan titik nodal elemen, sedangkan $P-\delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat deformasi elemen (di antara dua nodal), lihat gambar di bawah.



Gambar 1. Pengaruh Orde ke-2 (AISC 2010)

2.4 Pengaruh cacat bawaan (initial imperfection)

Perancangan stabilitas struktur modern didasarkan pada anggapan bahwa perhitungan gaya-gaya batang diperoleh dengan analisa struktur elastik orde-2, yang memenuhi kondisi keseimbangan struktur setelah pembebanan, yaitu mengalami deformasi. Cacat atau ketidak-sempurnaan struktur, seperti ketidak-lurusinan batang akibat adanya cacat bawaan dari pabrik maupun akibat konsekuensi adanya toleransi pelaksanaan lapangan akan menghasilkan dengan apa yang disebut efek *destabilizing*.

Adanya cacat bawaan (initial imperfection) yang mengakibatkan efek *destabilizing* dalam direct analysis method (DAM) diselesaikan dengan cara [1] pemodelan langsung adanya cacat tersebut pada geometri struktur yang dianalisis atau [2] memberi beban *notional* atau beban lateral ekivalen dari sebagian prosentasi beban yang bekerja.

Cara pemodelan langsung dapat diberikan pada titik nodal batang yang digeser untuk sejumlah tertentu perpindahan, yang besarnya diambil dari toleransi maksimum yang diperbolehkan dalam perencanaan maupun pelaksanaan. Pola penggeseran titik nodal pada pemodelan langsung harus dibuat sedemikian sehingga memberi efek *destabilizing* terbesar. Pola yang dipilih dapat mengikuti **pola lendutan dari pembebanan** atau **pola tekuk** yang mungkin terjadi.

Beban *notional* merupakan **beban lateral** yang diberikan pada titik nodal di semua level, berdasarkan prosentasi beban vertikal yang bekerja di level tersebut, yang diberikan pada sistem struktur penahan beban gravitasi melalui rangka atau kolom vertikal, atau dinding, untuk mensimulasi pengaruh adanya cacat bawaan (*initial imperfection*).

Beban *notional* harus ditambahkan bersama-sama beban lateral lain, juga pada semua kombinasi, kecuali untuk kasus tertentu yang memenuhi kriteria pada Section 2.2b(4) (AISC 2010). Besarnya beban *notional* (AISC 2010) adalah

dimana

N_i adalah beban *notional* di level i

Y_i adalah beban gravitasi di level i dari hasil beban kombinasi cara LRFD

Nilai 0.002 pada rumus C2-1 di atas merepresentasikan nilai nominal rasio kemiringan tingkat (*story out of plumbness*) sebesar 1/500, yang mengacu *AISC Code of Standard Practice*. Jika struktur yang direncanakan mempunyai nilai yang berbeda, tentunya yang mempunyai kemiringan tingkat lebih besar, maka nilai tersebut perlu diatur ulang.

Beban *notional* pada level tersebut didistribusikan sebagaimana halnya beban gravitasi, pada arah lateral yang dapat menimbulkan efek *destabilizing* terbesar. Pada bangunan gedung, jika kombinasi bebannya belum memasukkan efek lateral maka beban *notional* diberikan dalam dua arah alternatif ortogonal, masing-masing dalam arah positif dan negatif, yang sama di setiap levelnya. Sedangkan pada kombinasi dengan beban lateral, maka beban *notional* diberikan pada arah yang sama dengan arah resultan kombinasi beban lateral yang ada pada level tersebut.

2.5 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 *geometry imperfection*. Dalam Direct Analysis Method (DAM) itu diatasi dengan penyesuaian kekakuan struktur, yaitu memberi faktor reduksi kekakuan yang sesuai, nilainya diperoleh dari kalibrasi dengan cara membandingkannya dengan analisa distribusi plastisitas maupun hasil uji test empiris (Galambos 1998).

Faktor reduksi kekakuan ($El^*=0.8\tau_b El$ dan $EA^*=0.8EA$) dipilih DAM dengan dua alasan.

Pertama: Portal dengan elemen batang langsing, yang kondisi batasnya ditentukan oleh stabilitas elastis, maka faktor 0.8 pada kekakuan dapat menghasilkan kuat batas sistem sebesar 0.8 batas stabilitas elastis. Hal ini ekivalen dengan batas aman yang ditetapkan pada perencanaan kolom langsing cara *Effective Length Method*, persamaan E3-3 (AISC 2010), yaitu $\phi P_n = 0.9 (0.887 P_e) = 0.79 P_e$.

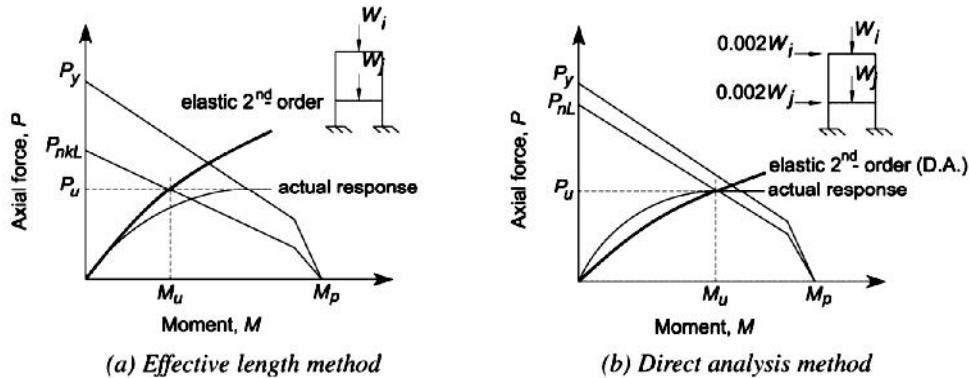
Kedua: Portal dengan elemen batang tidak langsing (kaku / stocky dan sedang) maka faktor $0.8\tau_b$ mengurangi kekakuan lentur untuk memperhitungkan pelemahan inelastis yang mendahului saat batang mendekati kuat batas rencananya. Faktor τ_b mirip dengan faktor reduksi kekakuan inelastis kolom untuk memperhitungkan hilangnya kekakuan batang dengan gaya tekan besar $\alpha P_r > 0.5P_y$ adapun faktor 0.8 memperhitungkan penambahan pelemahan (*softening*) akibat kombinasi aksial tekan dan lentur. Adalah kebetulan jika ternyata faktor reduksi kolom langsing dan kolom kaku mempunyai nilai yang saling mendekati atau sama, sehingga satu faktor reduksi bernilai $0.8\tau_b$, dapat dipakai bersama untuk semua nilai kelangsungan batang (AISC 2010).

Pemakaian reduksi kekakuan di atas hanya berlaku untuk memperhitungkan kondisi batas kekuatan dan stabilitas struktur baja, dan tidak digunakan pada perhitungan drift (pergeseran), lendutan, vibrasi dan penentuan periode getar.

Untuk kemudahan praktis, dimana $\tau_b = 1$, reduksi EI^* dan EA^* dapat diberikan dengan cara memodifikasi nilai E dalam analisis. Tetapi pada komputer program yang bekerja semi otomatis, perlu dipastikan bahwa reduksi E hanya diterapkan pada analisa order-2. Sedangkan nilai modulus elastis untuk perhitungan kuat nominal penampang tidak boleh dikurangi, seperti saat menghitung tekuk torsional pada balok tanpa tumpuan lateral.

2.6 Perbandingan kerja ELM dan DAM

Dengan menggunakan program analisa struktur order-2 yang sama, maka ketika metode ELM (Efective Length Method) dan DAM (Direct Analysis Method) dibandingkan dalam menghasilkan perbandingan interaksi check balok-kolom, antara gaya internal ultimate (terfaktor) terhadap kapasitas nominal penampang (Gambar 2) maka terlihat bahwa cara yang dipakai DAM dapat mendekati gaya internal **aktual** struktur pada kondisi batas.



Gambar 2. Hasil interaksi check antara ELM dan DAM (AISC 2010)

Untuk alasan itu pula interaksi balok-kolom pada bidang tekuknya dievaluasi terhadap kuat tekan, P_{nL} , yang dihitung berdasarkan kurva kolom dengan $KL=L$ atau $K=1$.

2.7 Beban *notional* untuk pelemahan inelastis

Strategi dengan beban *notional* dapat juga digunakan untuk mengantisipasi pelemahan kekakuan lentur, τ_b akibat kondisi inelastis adanya tegangan sisa penampang. Strategi ini cocok untuk menyederhanakan perhitungan DAM pada batang dengan gaya tekan besar $\alpha P_r > 0.5P_y$ dimana nilai $\tau_b < 1.0$. Jika strategi ini akan dipakai maka $\tau_b = 1.0$ dan diperlukan beban *notional* tambahan sebesar

$$N_i = 0.001Y_i \dots \text{Chapter C2.3.(3) (AISC 2010)}$$

Beban tersebut diberikan sekaligus dengan beban *notional* yang merepresentasikan cacat geometri bawaan sebelumnya, dan karena sifatnya memperbesar maka beban *notional* akhir menjadi $N_i=0.003Y_i$ sedangkan $\tau_b = 1.0$ untuk semua kombinasi beban.

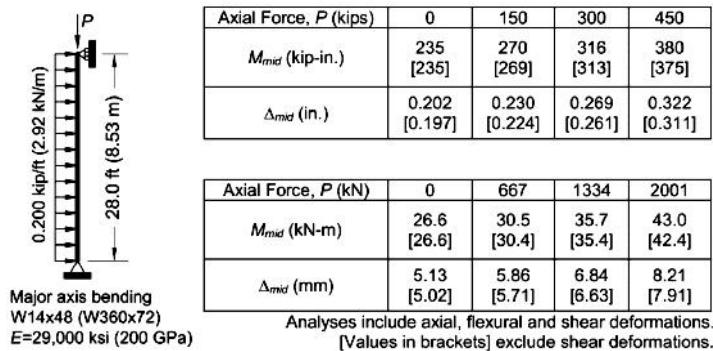
2.8 Kuat nominal penampang

Jika digunakan analisa stabilitas struktur dengan cara DAM maka untuk menghitung kuat struktur nominal adalah memakai prosedur biasa seperti yang digunakan pada cara ELM yaitu Chapter E ~ I untuk penampang nominal, maupun Chapter J ~ K untuk sambungan pada AISC code (2005 dan 2010), kecuali nilai faktor K pada kelangsungan batang (KL/r) diambil konstan sebesar $K=1$.

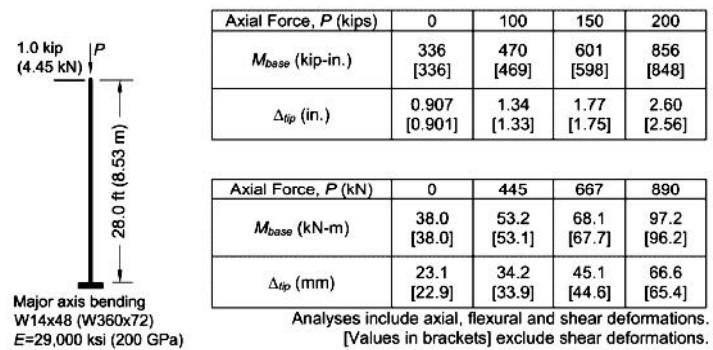
3. KETERSEDIAAN PROGRAM ANALISA STRUKTUR ORDE-2

Direct Analysis Method (DAM) perlu program analisa struktur orde-2 untuk menghitung efek $P-\Delta$ dan $P-\delta$ secara teliti. Umumnya program analisa struktur komersil di pasaran mampu menyediakannya, meskipun demikian adalah tanggung jawab insinyur untuk memastikan sendiri bahwa program yang digunakannya memang telah memenuhi persyaratan tersebut (AISC 2010). Untuk itu, AISC (2005, 2010) memberikan *benchmark* uji pembanding mengevaluasi apakah program analisa struktur yang dipakai mampu menghitung secara efek $P-\Delta$ dan $P-\delta$. Dalam pengujian digunakan beberapa beban aksial berbeda sesuai dengan beban tekuknya. Pengaruh pembagian batang (*meshing*) perlu dilakukan untuk mengetahui ketelitian terhadap perhitungan $P-\delta$.

Benchmark uji yang dimaksud adalah:



a) Case 1



b) Case 2

Gambar 3. Benchmark uji program analisa struktur order-2 (AISC 2010)

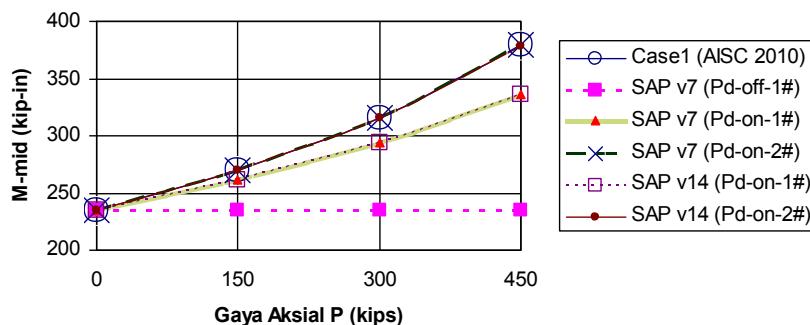
Benchmark uji terdiri dari dua kasus, Case-1 untuk uji efek $P-\delta$ saja, disini *meshing* pada model struktur perlu dievaluasi apakah hal itu mempengaruhi ketelitian program. Adapun Case-2 untuk menguji ketelitian perhitungan efek $P-\Delta$ dan $P-\delta$ sekaligus.

Untuk mengetahui ketersediaan program komputer yang sesuai DAM, diuji SAP2000 ver 7.4 yang dianggap kuno (release 2000) tetapi sudah bisa memperhitungkan efek $P-\Delta$ (Dewobroto 2007), juga SAP2000 ver 14 yang dianggap baru (release 2009). Adapun versi program yang secara resmi menyatakan diri mendukung perancangan DAM adalah SAP2000 versi 11.0 release Desember 2006 (CSI 2007).

Uji benchmark pertama kali terhadap Case-1 (lihat Gambar 3) untuk melihat algoritma program lama dan baru dalam memperhitungkan pengaruh $P-\delta$ seperti terlihat berikut.

Tabel 1. Uji Benchmark CASE-1 terhadap Pengaruh $P-\delta$

Case-1 (AISC 2010)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -off-1#)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -on-1#)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -on-2#)		SAP v14.0 ($P\Delta$ -on-1#)		SAP v14.0 ($P\Delta$ -on-2#)	
P	M-mid	P	M-mid	P	M-mid	P	M-mid	P	M-mid	P	M-mid
0	235	0	235.2	0	235.20	0	235.20	0	235.20	0	235.20
150	270	150	235.2	150	261.43	150	269.63	150	261.41	150	269.56
300	316	300	235.2	300	294.25	300	315.39	300	294.23	300	315.31
450	380	450	235.2	450	336.48	450	379.12	450	336.42	450	378.71



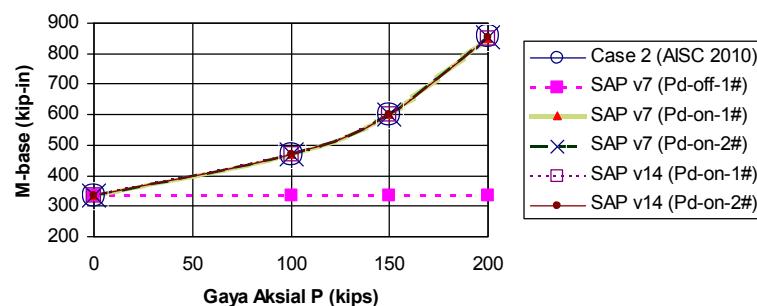
Gambar 4. CASE-1: gaya aksial terhadap momen tengah bentang

Program SAP2000 kuno (ver 7.4) dan baru (ver 14.0) memberikan hasil mirip satu sama lain. Algoritma kedua program dianggap tidak ada pembaharuan, masih belum mampu memprediksi efek $P-\delta$ di tengah elemen berdasarkan elemen tunggal. Ketika dibagi jadi dua elemen hasilnya menjadi lebih teliti, sama dengan hasil benchmark. Perbedaannya, pada versi kuno dibaginya secara manual, sedangkan versi baru secara otomatis.

Uji benchmark Case-2 menunjukkan pentingnya gaya lateral (1 kips) diberikan di ujung tiang untuk menimbulkan efek *destabilizing*. Tanpa itu, meskipun opsi P -delta program diaktifkan tidak menghasilkan efek $P-\Delta$. Inilah yang mendasari prinsip beban *notional*.

Tabel 2. Uji Benchmark CASE-2 terhadap Pengaruh $P-\delta$ dan $P-\Delta$

Case-2 (AISC 2010)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -off-1#)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -on-1#)		SAP v7.4 ($P\Delta$ -on-2#)		SAP v14.0 ($P\Delta$ -on-1#)		SAP v14.0 ($P\Delta$ -on-2#)	
P	M-base	P	M-base	P	M-base	P	M-base	P	M-base	P	M-base
0	336	0	336	0	336.00	0	336.00	0	336.00	0	336.00
100	470	100	336	100	469.77	100	469.92	100	469.602	100	469.41
150	601	150	336	150	599.82	150	600.69	150	599.815	150	599.79
200	856	200	336	200	849.77	200	854.35	200	849.766	200	854.35



Gambar 5. CASE-2: gaya aksial terhadap momen dasar

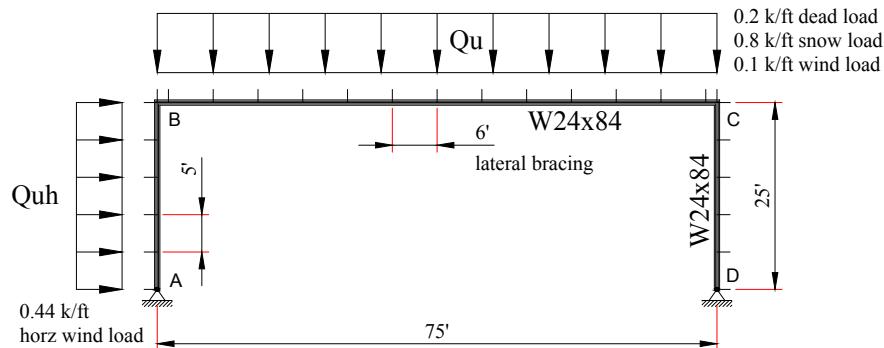
Uji benchmark Case-2 melibatkan efek $P-\Delta$ dan $P-\delta$ sekaligus, ternyata hasilnya lebih baik dibanding uji benchmark Case-1 yang hanya melibatkan $P-\delta$ saja. Semua program SAP2000 dari versi lama sampai versi memberi hasil yang memuaskan, bahkan tanpa perlu membagi elemen (*meshing*) sebagaimana perlu dilakukan pada uji benchmark Case-1 untuk mendapatkan hasil yang lebih teliti.

Program SAP2000 versi 7.4 dapat dianggap program analisa struktur yang *out-of-dated*, kuno dan tidak secara eksplisit mendukung DAM. Maklum, program di-release jauh hari sebelum DAM dinyatakan (AISC 2005), tetapi terbukti secara mudah menyelesaikan uji benchmark yang diberikan (AISC 2010). Ini dapat menjadi indikator bahwa modal utama yaitu infrastruktur untuk mengaplikasikan DAM di Indonesia sudah tersedia.

4. APLIKASI DIRECT ANALYSIS METHOD

Pemakaian *Direct Analysis Method* menyederhanakan proses perancangan. Selanjutnya akan dievaluasi portal di Example 15.3.1 hal.805 (Salmon 2009).

Contoh I: Bangunan portal baja bentang 75 ft, tinggi 25 ft memiliki beban merata vertikal terdiri dari *dead load* 0.2 kip/ft, *snow load* 0.8 kip/ft dan *wind load* 0.1 kip/ft. Juga diberi beban merata horizontal akibat angin sebesar 0.44 kip/ft. *Lateral bracing* diberikan pada kolom tiap jarak 5 ft dan balok tiap jarak 6 ft. Mutu baja A992 $F_y = 50$ ksi $E = 29000$ ksi.



Gambar 6. Contoh I: Portal Baja dari Salmon (2009)

Kombinasi beban digunakan ASCE 7, dan dari 3 kombinasi yang ditinjau dapat diketahui bahwa kombinasi di atas yang dianggap menentukan, sehingga beban terfaktor adalah:

$$Qu = 1.2D + 1.6S + 0.8W = 1.2(0.2) + 1.6(0.8) + 0.8(0.1) = 1.60 \text{ kip/ft} \quad (\downarrow)$$

$$Quh = 0.8W = 0.8(0.44) = 0.352 \text{ kip/ft} \quad (\rightarrow)$$

Notional load sesuai AISC (2010) Chapter C – C2.2b :

$$\text{Diambil dari beban gravitasi, } Y_i = Qu * L_{BC} = 1.6 * 75 = 120 \text{ kips}$$

$$N_i = 0.002 Y_i = 0.002 * 120 = 0.24 \text{ kip} \quad \text{Eq.C2-1 (AISC 2010)}$$

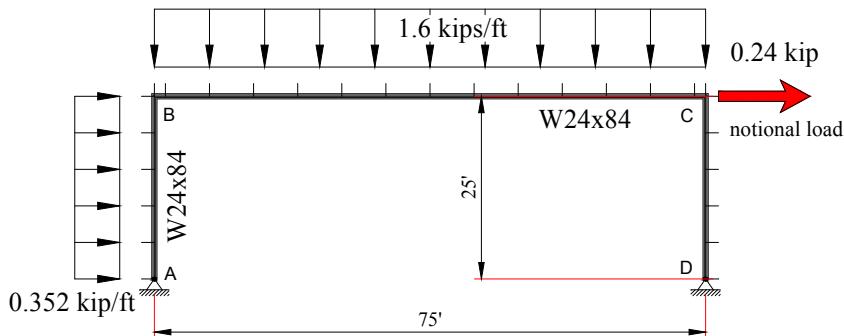
Penyesuaian kekakuan sesuai AISC (2010) Chapter C – C2.3 :

Dari perhitungan awal dapat diketahui bahwa $P_r / P_y \leq 0.5$ sehingga

$$\tau_b = 1.0 \quad \text{Eq.C2-2a (AISC 2010)}$$

Faktor reduksi 0.8 diberikan pada semua kekakuan ($EI^* = 0.8EI$ dan $EA^* = 0.8EA$)

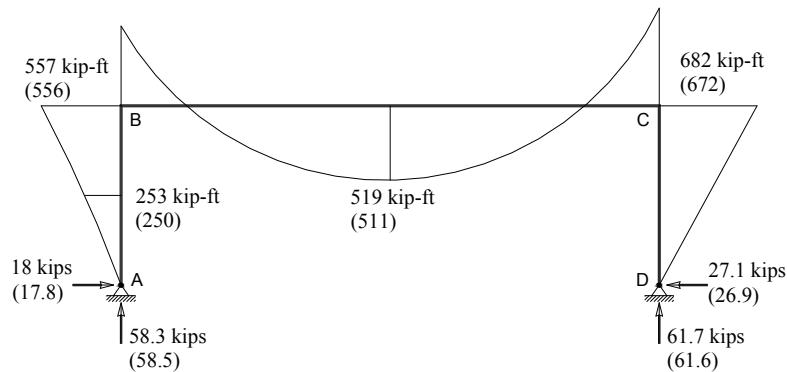
Berdasarkan ketentuan-ketentuan di atas selanjutnya dapat disusun model struktur dan beban-bebannya, adapun faktor reduksi 0.8 diberikan pada data E untuk mempermudah.



Gambar 7. Model dan Pembebaan untuk Analisa Struktur Orde-2

Program komputer yang dipakai adalah SAP2000 v 7.40 yang dianggap telah memenuhi kriteria persyaratan analisa struktur orde-2, meskipun program dibuat jauh hari sebelum cara DAM dideklarasikan. Ini juga membuktikan bahwa cara DAM tidak memerlukan algoritma khusus pemrograman komputer kecuali analisa struktur orde-2 tersebut.

Untuk menyamakan dengan referensi (Salmon 2009) maka berat sendiri profil diabaikan sedangkan opsi P- Δ diaktifkan. Bending momen diagram dan gaya reaksi tumpuan yang dihasilkan adalah sebagai berikut.



Gambar 8. Bending Momen Diagram dan gaya reaksi tumpuan

Nilai dalam tanda kurung adalah momen (kip-ft) tanpa P- Δ sehingga terlihat bahwa efek P-delta tersebut tidak signifikan pengaruhnya pada struktur yang dianalisis. Karena semua elemen memakai profil W24 x 84 maka dipilih kolom CD untuk dievaluasi berdasarkan cara DAM dan dibandingkan cara lama perhitungan Salmon (2009).

Ditinjau kolom CD profil W24x84 $F_y = 50$ ksi; $E = 29000$ ksi sehingga $4.71\sqrt{E/F_y} = 113$

** Kapasitas aksial **

$$\phi_c = 0.9; A_g = 24.7 \text{ in.}^2; L = L_{DC} = 25 \text{ ft} = 300 \text{ in.}; r_{\min} = r_x = 9.79 \text{ in.}$$

$$\text{Untuk DAM maka } K=1 \rightarrow \frac{KL}{r_{\min}} = \frac{1 * 300}{9.79} = 30.6 \text{ dan } F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{(30.6)^2} = 306 \text{ ksi}$$

$$KL/r_{\min} = 30.6 < 4.71\sqrt{E/F_y} = 113 \rightarrow F_{cr} = [0.658^{F_y/F_e}] F_y = [0.658^{50/306}] 50 = 46.7 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0.9 * 46.7 * 24.7 = 1038 \text{ Kips}$$

** Kapasitas lentur **

$F_y = 36 \text{ ksi}$					Z_x in. ³	Shape	$F_y = 50 \text{ ksi}$				
BF	L_r	L_p	$\phi_b M_r$	$\phi_b M_p$			$\phi_b M_p$	$\phi_b M_r$	L_p	L_r	BF
Kips	Ft	Ft	Kip-ft	Kip-ft			Kip-ft	Kip-ft	Ft	Ft	Kips
13.6	24.5	8.1	382	605	224	W24x84	840	588	6.9	18.6	21.5

Karena $L_b(5 \text{ ft}) < L_p(6(9.1 \text{ ft}))$, untuk $F_y = 50 \text{ ksi}$ maka $\phi_b M_n = \phi_b M_p = 840 \text{ Kip - ft}$

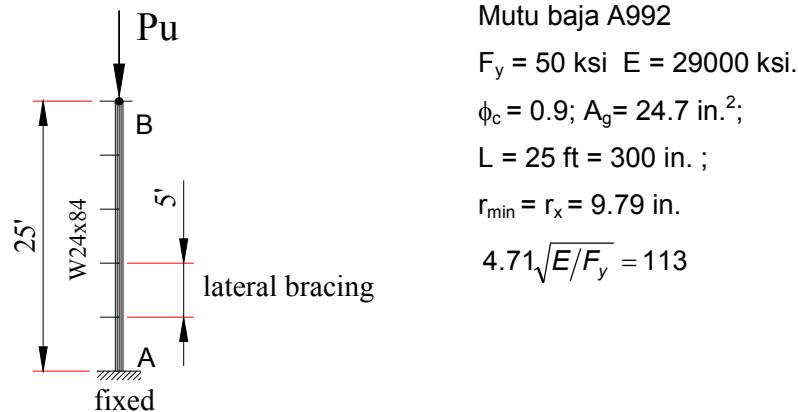
$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{61.7}{1038} = 0.06 < 0.2 \rightarrow \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1.0$$

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = \frac{0.06}{2} + \frac{682}{840} = 0.842 << 1.0 \rightarrow \text{ok.}$$

Note: cara lama (*Effective Length Method*) dari hitungan Salmon (2009) halaman 813

$$\text{diperoleh nilai } \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = \frac{0.078}{2} + \frac{687}{840} = 0.857 \text{ atau berbeda } \pm 1.75\%$$

Contoh II: Kasus sebelumnya beban aksial tidak dominan, berikutnya ditinjau kolom dengan beban aksial saja. Jika cara ELM (pakai faktor K) maka kapasitasnya langsung dihitung tanpa adanya momen (yang memang tidak didefinisikan). Sedangkan cara DAM yang mengandalkan analisa struktur orde-2 maka keberadaan momen sangat penting. Itu bisa terjadi karena adanya *initial imperfection*. Struktur yang ditinjau kolom jepit dan atasnya bebas. *Lateral bracing* tiap jarak 5 ft sehingga tekuk bidang saja yang ditinjau.



Gambar 9. Contoh II: Kolom bebas

** Kapasitas aksial – Cara ELM (*Effective Length Method*) **

$$\text{Untuk ELM maka } K=2 \rightarrow \frac{KL}{r_{\min}} = \frac{2 * 300}{9.79} = 61.3 \text{ dan } F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{(61.3)^2} = 76.2 \text{ ksi}$$

$$KL/r_{\min} = 61.3 < 4.71\sqrt{E/F_y} = 113 \rightarrow F_{cr} = [0.658^{F_y/F_e}] F_y = [0.658^{50/76.2}] 50 = 38 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0.9 * 38 * 24.7 = 844.7 \text{ Kips} \rightarrow P_u \leq \phi_c P_n = 844.7 \text{ Kips}$$

Analisa stabilitas dengan cara DAM (Direct Analysis Method) (AISC 2010)

Anggap $P_u = \phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0.9 * 38 * 24.7 = 844.7$ Kips

Notional load sesuai AISC (2010) Chapter C – C2.2b :

Diambil dari beban gravitasi, $Y_i = P_u = 844.7$ kips

$N_i = 0.002 Y_i = 0.002 * 844.7 = 1.69$ kip Eq.C2-1 (AISC 2010)

Penyesuaian kekakuan sesuai AISC (2010) Chapter C – C2.3 :

Karena $P_r / P_y > 0.5$ maka

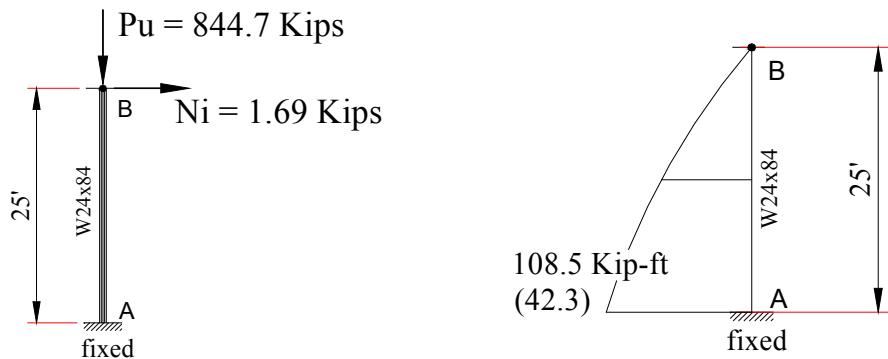
$\tau_b = 4(P_r/P_y)[1 - (P_r/P_y)]$ Eq.C2-2a (AISC 2010)

$P_y = 24.7 * 50 = 1235$ Kips $\rightarrow P_r/P_y = 844.7/1235 = 0.684$

$\tau_b = (4 * 0.684)[1 - 0.684] = 0.86$

Jadi faktor reduksi untuk memperhitungkan adanya distribusi inelastis pada penampang diberikan sebagai ($EI^* = 0.8 \tau_b EI$ dan $EA^* = 0.8EA$)

Selanjutnya pemodelan dan hasil analisis struktur orde-2 adalah sebagai berikut:



a) Model struktur dan beban

b) BMD hasil analisis struktur orde-2

Gambar 10. Analisis stabilitas dengan SAP2000 v 7.4

Segmen AB untuk analisis struktur orde-2 dibagi menjadi dua bagian (*meshing*), adapun nilai dalam tanda kurung adalah momen apabila opsi $P-\Delta$ dinon-aktifkan. Faktor reduksi untuk A = 0.8 sedangkan faktor reduksi untuk I = $0.8 * 0.86 = 0.688$.

Evaluasi kuat penampang dengan DAM pada prinsipnya tidak mengalami perubahan kecuali nilai $K = 1$. Besarnya kapasitas terhadap komponen beban aksial:

$\phi_c = 0.9$; $A_g = 24.7 \text{ in.}^2$; $L = L_{DC} = 25 \text{ ft} = 300 \text{ in.}$; $r_{min} = r_x = 9.79 \text{ in.}$

$$K=1 \rightarrow \frac{KL}{r_{min}} = \frac{1 * 300}{9.79} = 30.6 \text{ dan } F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} = \frac{\pi^2 * 29000}{(30.6)^2} = 306 \text{ ksi}$$

$$KL/r_{min} = 30.6 < 4.71\sqrt{E/F_y} = 113 \rightarrow F_{cr} = [0.658^{F_y/F_e}] F_y = [0.658^{50/306}] 50 = 46.7 \text{ ksi}$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0.9 * 46.7 * 24.7 = 1038 \text{ Kips}$$

** Kapasitas lentur **

$F_y = 36 \text{ ksi}$					Z_x	Shape	$F_y = 50 \text{ ksi}$				
BF	L_r	L_p	$\phi_b M_r$	$\phi_b M_p$			$\phi_b M_p$	$\phi_b M_r$	L_p	L_r	BF
Kips	Ft	Ft	Kip-ft	Kip-ft	in. ³		Kip-ft	Kip-ft	Ft	Ft	Kips
13.6	24.5	8.1	382	605	224	W24x84	840	588	6.9	18.6	21.5

Karena $L_b(5 \text{ ft}) < L_p(6(9.1 \text{ ft}))$, untuk $F_y = 50 \text{ ksi}$ maka $\phi_b M_n = \phi_b M_p = 840 \text{ Kip - ft}$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{844.7}{1038} = 0.814 \geq 0.2 \rightarrow \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} \leq 1.0$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} = 0.814 + \frac{8}{9} * \frac{108.5}{840} = 0.93$$

Note: cara ELM (*Efective Length Method*) tidak ada momennya maka ratio kuat kolom adalah $\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{844.7}{844.7} = 1$ atau selisih $\pm 7\%$ (cara DAM rationya = 0.93),

dari dua kasus di atas terlihat bahwa rancangan kolom cara DAM menghasilkan kapasitas profil yang lebih tinggi (hemat) dibanding rancangan kolom cara ELM.

5. PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN

Perancangan struktur baja LRFD terbaru (AISC 2010), yaitu DAM (*Direct Analysis Method*) membutuhkan program komputer dengan kemampuan analisa struktur orde-2. Teknologinya, ternyata sudah ada pada program komersil yang dianggap sudah lama (kuno), seperti SAP2000 versi 7.40 release tahun 2000 atau 11 tahun lalu. Jadi mestinya program serupa yang lebih *up-to-dated* pasti telah mendukungnya.

Perancangan struktur baja cara DAM menunjukkan prosedur yang lebih sederhana dan konsisten. Adanya program komputer analisa struktur orde-2, maka selain tidak perlu menghitung faktor K untuk kelangsungan elemen, juga langsung bisa memperhitungkan efek P-delta tanpa perlu menghitung faktor pembesaran B1 dan B2 (AISC 2005).

Cara ELM (*Efective Length Method*) dan DAM (*Direct Analysis Method*) menghasilkan kondisi yang mirip satu dengan yang lain, meskipun strategi penyelesaiannya berbeda. Pada ELM dimungkinkan menghitung elemen aksial murni (Contoh II), sedangkan DAM selalu menghitung sebagai elemen balok-kolom. Momen internal dihasilkan oleh adanya kondisi *initial imperfection*. Jadi untuk struktur yang menerima gaya aksial saja, seperti rangka batang (*truss*) maka diyakini tidak ada perbedaan yang berarti antara cara ELM (lama) maupun cara DAM (baru). Jadi perancangan DAM hanya memberi perbedaan hasil yang signifikan jika strukturnya berupa portal bergoyang dan semacamnya saja.

Adanya dukungan teknologi komputer dan kesederhanaan strategi perencanaan merupakan alasan kuat, mengapa AISC (2010) memilihnya sebagai metode utama menggantikan metode Efective Length Method (ELM) yang saat statusnya telah dipindahkan ke Appendix sebagai metode alternatif, khususnya jika tidak tersedia komputer pendukung. Karena alasan itu pula maka dalam rangka mengejar ketertinggalan pengetahuan dan kompetensi dalam perancangan struktur baja di Indonesia, disarankan pada penyusunan SNI baja yang terbaru nantinya diharapkan telah dapat mengadopsi cara DAM, baik sebagai metode utama (AISC 2010) atau hanya sebagai metode alternatif (AISC 2005).

6. DAFTAR PUSTAKA

- AISC. (2005). "ANSI/AISC 360-05: An American National Standard – Specification for Structural Steel Building", American Institute of Steel Construction, One East Wacker Drive, Suite 700, Chicago, Illinois
- AISC. (2010). "ANSI/AISC 360-10: An American National Standard – Specification for Structural Steel Building", American Institute of Steel Construction, One East Wacker Drive, Suite 700, Chicago, Illinois
- Dewobroto, W. (2007). "Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000 – Edisi Baru", Elex Media Komputindo, Jakarta
- Dewobroto, W. (2011). "Prospek dan Kendala pada Pemakaian Material Baja untuk Konstruksi Bangunan di Indonesia", Invited Speaker pada Seminar & Exhibition "Future Prospects of Steel for Construction in Indonesia", oleh PT. Krakatau Steel dan Nippon Steel Corporation, di Gran Melia Hotel, Jakarta, 7 April 2011
- CSI. (2007). "Steel Frame Design Manual AISC 360-05 / IBC2006 - For SAP2000 and ETABS", Computer and Structure, Inc., Berkeley, California
- CSI. (2007). "Practical How-to guide - Technical Note : 2005 AISC Direct Analysis Method", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California
- Galambos, T.V. (1998). "Guide Stability Design Criteria for Metal Structures 5th Ed.", John Wiley & Sons, Inc.
- Salmon, C.G., John E. Johnson and Faris A. Malhas. (2009). "Steel Structures : Design and Behavior – Emphasizing Load and Resistance Factor Design 5th Ed", Pearson Education, Inc.

BIODATA PENULIS

Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, MT., adalah Lektor Kepala pada mata kuliah Struktur Baja di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Desain dan Teknik Perencanaan, Universitas Pelita Harapan, Lippo Karawaci, Tangerang. Sarjana teknik sipil UGM, Yogyakarta (1989), magister teknik sipil UI, Jakarta (1998) dan doktor teknik sipil UNPAR, Bandung (2009). Pengalaman profesional sebagai *structural engineer* PT. Wiratman & Associates Jakarta (1989–1994), *chief structural engineer* PT. Pandawa Swasatya Putra, Jakarta (1994–1998). Sejak 1998 meniti karir sebagai pengajar, peneliti dan penulis, dengan bidang peminatan struktur baja – beton – kayu, analisa struktur, simulasi numerik berbasis komputer. Software yang dikuasai Visual Basic, Pascal, Fortran, Photoshop, AutoCAD, SAP2000, Etabs, SAFE, ABAQUS dan SolidWorks. Mengelola blog pribadi beralamat di

<http://wiryanto.wordpress.com>.