

Pengaruh Kelangsingan Portal Baja terhadap Efektivitas DAM (*Direct Analysis Method*) dibanding Metode Lama (KL/r)

Wiryanto Dewobroto dan Eddiek Ruser

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Lippo Karawaci, Tangerang
Email: wiryanto.dewobroto@uph.edu

ABSTRAK

Perencanaan baja terhadap tekan sesuai SNI (2002) atau AISC (2005) harus memperhitungkan KL/r, yang dianggap parameter penting (utama) menentukan kapasitas nominal penampang. Saat ini telah disusun RSNI 03-1729.1-201X dan tinggal menunggu pengesahaan sebagai SNI baja terbaru. RSNI disusun mengacu kepada AISC (2010), metode lama (pakai KL/r) yang disebut *Effective Length Method* (ELM) tidak lagi akan dipakai dan dimuat pada Appendix (metode alternatif). Metode ELM tersebut selanjutnya digantikan dengan metode baru, yaitu *Direct Analysis Method* (DAM).

DAM unggul karena mengatasi keterbatasan ELM, yang terbatas untuk drift rasio analisis orde ke-2 terhadap analisis orde ke-1, kurang 1.5 (AISC 2005). Ketentuan tersebut cukup abstrak (umum), sisi lain diakui juga bahwa di era sekarang, struktur baja umumnya lebih langsing akibat proses optimasi atau memenuhi persyaratan estetika. Pada struktur langsing, pengaruh orde-2 akan lebih dominan. Pada penelitian ini akan dievaluasi konfigurasi dan kondisi-kondisi tertentu, dimana strukturnya akan mendekati batas validitas ELM sehingga diperlukan untuk beralih ke cara perhitungan DAM.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur dengan elemen langsing ($KL/r > 100$) akan memberi perbedaan signifikan, bahkan untuk struktur portal langsing, bergoyang, dimana pengaruh orde ke-2 signifikan, maka DAM memberikan hasil yang lebih teliti sebesar $\pm 20\%$ dibandingkan cara lama. Itu terjadi karena cara lama memakai pendekatan dalam memperhitungkan pengaruh stabilitas.

Kata kunci: KL/r, DAM (*Direct Analysis Method*), struktur baja, portal, batang tekan

1. PENDAHULUAN

Perencanaan penampang baja terhadap tekan menurut SNI (2002) atau AISC (2005) dimulai dari menghitung KL/r, yang merupakan parameter utama kapasitas tekan nominal. Terkait hal itu telah disusun RSNI 03-1729.1-201X yang keberadaannya tinggal menunggu pengesahaannya saja menjadi SNI baja terbaru, yang disusun berdasarkan AISC (2010). Pada RSNI cara perencanaan memakai KL/r disebut juga *Effective Length Method* (ELM) akan dipindah ke Appendix, tidak lagi dipakai sebagai metode utama dan keberadaannya telah digantikan dengan metode baru yang disebut sebagai metode analisis langsung atau *Direct Analysis Method* (DAM).

DAM unggul karena mengatasi keterbatasan ELM, yang hanya valid jika hasil analisa strukturnya mempunyai rasio pembesaran momen akibat perpindahan nodal yang diperhitungkan (2nd order analisis) jika dibagi dengan hasil momen tanpa memperhitungkan perpindahan nodal (1st order analisis) maka nilainya kurang dari 1.5 (AISC 2005). Ketentuan tersebut cukup abstrak (umum), meskipun di sisi lain diakui bahwa struktur baja saat ini cenderung semakin langsing akibat tuntutan optimasi atau persyaratan estetika. Pada struktur langsing, *second order effect* akan lebih dominan. Oleh sebab itu penting untuk dijabarkan, pada kondisi struktur yang seperti apa, DAM dapat terlihat unggul dibandingkan ELM. Untuk itu, akan dilakukan penelitian parametrik pada suatu konfigurasi struktur, untuk mendapatkan struktur yang mendekati batas validitas pemakaian cara ELM, dan bagaimana jika dipakai cara DAM.

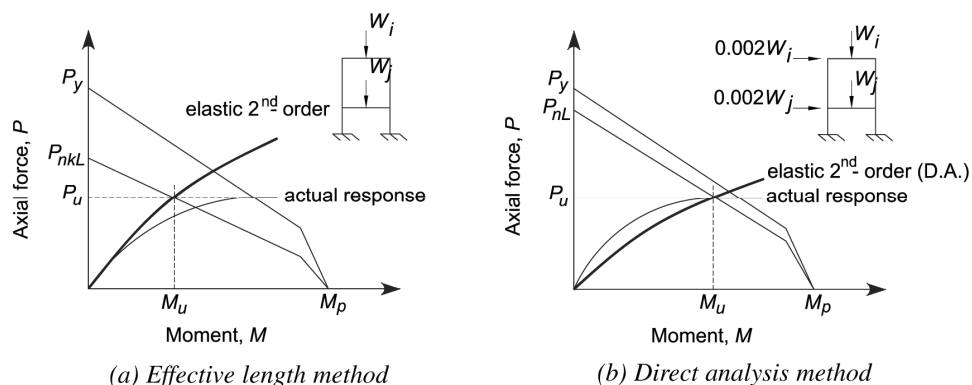
2. PERENCANAAN STABILITAS (ELM DAN DAM)

Pada perencanaan struktur baja diperlukan evaluasi terhadap stabilitas, baik dalam hal komponen (lokal) maupun struktur secara keseluruhan (global). Adapun stabilitas struktur baja itu sendiri dipengaruhi oleh: [1] Deformasi lentur, geser, aksial atau semua deformasi yang mempengaruhi geometri; [2] *Second-order-effect*; [3] Geometri *imperfections*; [4] Reduksi kekakuan akibat inelastis; [5] Ketidak-pastian terhadap kekakuan dan kekuatan. Itu menyebabkan evaluasi terhadap stabilitas bukanlah sesuatu yang sederhana. Untuk elemen profil terhadap tekuk lokal diatasi dengan membuat klasifikasi penampang (kompak, nonkompak dan langsing) (AISC 2005 Section B4); dan elemen batang terhadap tekuk global diatasi dengan kapasitas tekan nominal yang dikalibrasi terhadap hasil empiris dan faktor **K** atau *effective length* untuk memperhitungkan pengaruh kekakuan elemen lain (AISC 2005 Chapter E).

Sedangkan stabilitas tingkat struktur keseluruhan diatasi dengan analisa struktur orde ke-2 atau metode pendekatan yaitu analisa elastis-linier orde ke-1 yang dikalikan dengan faktor pembesaran momen. Tetapi itu hanya terbatas jika drift rasio orde ke-2 terhadap orde ke-1 atau nilai pembesaran momen B_2 kurang dari 1.5 (AISC 2005 Chapter C). Jika lebih AISC (2005) meminta untuk memakai *Direct Analysis Method* (DAM) pada Appendix 7 (AISC 2005).

AISC (2010) memuat DAM sebagai prosedur utama perencanaan baja terhadap stabilitas. Pada dasarnya, prosedur-nya mirip dengan cara sebelumnya (AISC 2005), hanya saja faktor K atau *effective length* tidak perlu dihitung, telah ditetapkan $K = 1$. Selanjutnya pengaruh orde-2 harus dianalisis secara rasional, tidak boleh dengan cara pendekatan. Untuk itu *software* analisis struktur elastis yang dapat memperhitungkan pengaruh orde ke-2, baik P- Δ maupun P- δ telah menjadi persyaratan mutlak. Bahkan tersedia *benchmark* uji untuk memastikan apakah *software* dapat dipakai. Pengaruh geometri *imperfection* dimanipulasi dengan beban notional, $N_i = 0.002 Y_i$ (AISC 2010 rumus C2-1), sedangkan terjadinya inelastisitas diberikan melalui reduksi kekakuan sebesar $0.8\tau_b$ (AISC 2010 Section C2.3).

Strategi perencanaan stabilitas, antara ELM dan DAM, dapat diperbandingkan seperti terlihat pada Gambar 1, yaitu dikaitkan dengan cara bagaimana mereka melakukan check-interaksi kolom. Dalam hal ini, kurva *elastic 2nd order* atau analisa elastis orde ke-2 adalah tahap analisis untuk mendapatkan gaya-momen-perlu (P_u dan M_u), sedangkan kurva interaksi-kolom terdapat pada tahap desain untuk menghitung gaya-momen-tersedia (P_y dan M_p). Jika ditinjau titik pada struktur yang sebenarnya (*actual response*) dan dianggap mempunyai kapasitas yang bertepatan antara yang gaya-momen-perlu dan gaya-momen-tersedia, untuk kemudian dibandingkan dengan hasil ELM dan DAM. Gambar 1.a memperlihatkan kurva gaya-momen-perlu hasil analisa struktur elastis orde ke-2 cara ELM yang nilainya relatif lebih kecil dari respons aktualnya. Agar sesuai kondisi real, kurva gaya-momen-tersedia (tahap desain penampang) dimodifikasi memakai faktor K atau *effective length* yang sesuai. Adapun hasil analisa struktur elastis orde ke-2 cara DAM mampu menghasilkan gaya-momen-perlu mendekati respons aktual. Oleh sebab itu modifikasi dengan faktor K tidak diperlukan atau ditetapkan $K = 1$ (netral).



Gambar 1. Perbandingan check-interaksi kolom cara ELM dan DAM (AISC 2010).

Cara pendekatan ELM, yaitu dengan faktor K yang diberikan pada tahap desain (AISC 2005 Chapter E), tentunya hanya efektif untuk tingkat elemen batang (lokal) dan bukan struktur secara keseluruhan (global). Itulah mengapa ELM mempunyai keterbatasan pemakaian dibanding cara DAM yang saat ini yang menjadi andalan AISC (2010).

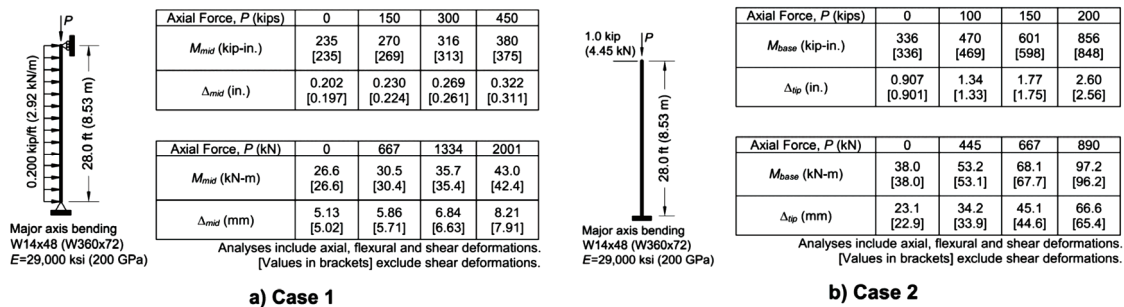
3. VALIDITAS PROGRAM KOMPUTER YANG DIGUNAKAN

Direct Analysis Method (DAM) perlu program komputer analisa struktur orde-2 untuk menghitung efek P- Δ , secara teliti. Umumnya program komersial yang ada memenuhi syarat, termasuk SAP2000 yang akan digunakan. Untuk memastikannya, akan dilakukan uji validitas memakai *benchmark* uji (AISC 2010). Untuk mengevaluasi ketelitiannya, akan digunakan berbagai variasi beban aksial dan *meshing* atau pembagian elemen yang berbeda.

Benchmark ujinya sendiri terdiri dari dua kasus, Case-1 untuk uji efek P- Δ saja, disini *meshing* pada elemen model struktur perlu dievaluasi apakah berpengaruh pada ketelitian program. Sedangkan Case-2 untuk menguji ketelitian dalam memperhitungkan efek P- Δ (global) dan P- δ (lokal) secara sekaligus.

Program komputer SAP2000 yang diujipun terdiri dari dua versi, yaitu ver 7.4 yang dianggap kuno (release 2000) yang sudah diperlengkapi opsi untuk menghitung efek P- Δ (Dewobroto 2007), dan juga SAP2000 ver 14 yang relatif baru (release 2009). Adapun versi SAP2000 yang resmi menyatakan diri mendukung perancangan DAM adalah SAP2000 versi 11.0 release Desember 2006 (CSI 2007).

Benchmark uji yang dimaksud adalah:

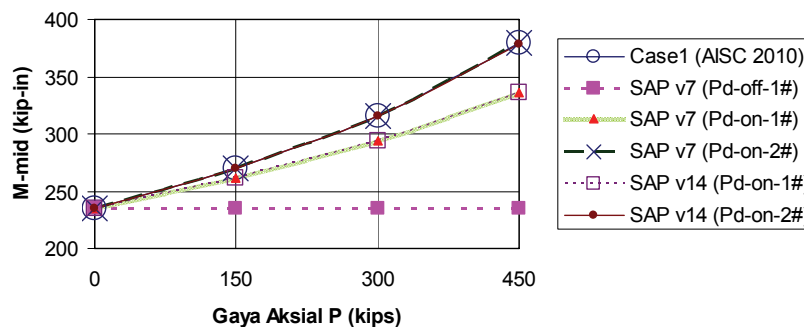


Gambar 2. Benchmark uji program analisa struktur order-2 (AISC 2010)

Uji *benchmark* yang pertama adalah terhadap Case-1 (lihat Gambar 2) sehingga dapat diketahui cara kerja program versi lama maupun yang baru dalam memperhitungkan pengaruh P- Δ dan hasilnya adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Uji Benchmark CASE-1 terhadap Pengaruh P- Δ

Case-1 (AISC 2010)		SAP v7.4 (P Δ -off-1#)		SAP v7.4 (P Δ -on-1#)		SAP v7.4 (P Δ -on-2#)		SAP v14.0 (P Δ -on-1#)		SAP v14.0 (P Δ -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



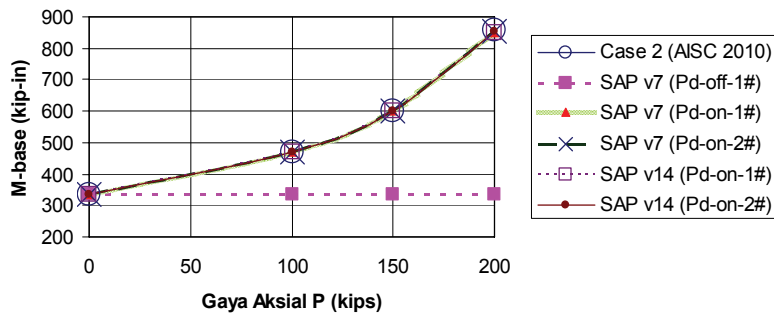
Gambar 3. CASE-1: hubungan gaya aksial terhadap momen di tengah bentang (Dewobroto 2011 dan 2013)

Program SAP2000 yang kuno (ver 7.4) dan yang baru (ver 14.0) memberikan hasil yang mirip satu sama lainnya. Itu menunjukkan bahwa cara kerja atau algoritma dari ke dua program tersebut, dianggap tidak berbeda. Keduanya belum mampu memprediksi efek P- Δ di tengah-tengah elemen berdasarkan elemen tunggal. Jadi ketika dibagi menjadi dua elemen (meshing) hasilnya menjadi lebih teliti, atau sama dengan hasil uji *benchmark*. Perbedaan, pada versi kuno, meshing harus dikerjakan secara manual. Sedangkan program versi baru, opsi meshing dilakukan dengan langkah-langkah yang lebih mudah, bahkan terkesan serba otomatis. Itu menunjukkan bahwa perkembangan program komputer antara versi lama dan baru lebih kepada *human interface*-nya saja, lebih *user friendly*.

Uji benchmark Case-2 memberi petunjuk tentang pentingnya penempatan gaya lateral (1 kips) pada ujung tiang, yaitu untuk menghasilkan efek *destabilizing*. Tanpa itu, meskipun “opsi P-delta” telah diaktifkan, tetapi tetap tidak terlihat efek P- Δ secara signifikan, seakan-akan tidak ada pengaruhnya. Ini yang mendasari prinsip beban *notional*.

Tabel 2. Uji Benchmark CASE-2 terhadap Pengaruh P- Δ dan P- δ

Case-2 (AISC 2010)		SAP v7.4 (P Δ -off-1#)		SAP v7.4 (P Δ -on-1#)		SAP v7.4 (P Δ -on-2#)		SAP v14.0 (P Δ -on-1#)		SAP v14.0 (P Δ -on-2#)	
P	M	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M
0	336	0	336	0	336.0	0	336.0	0	336.0	0	336.0
100	470	100	336	100	469.8	100	469.9	100	469.6	100	469.4
150	601	150	336	150	599.8	150	600.7	150	599.8	150	599.8
200	856	200	336	200	849.8	200	854.4	200	849.8	200	854.4



Gambar 4. CASE-2: gaya aksial terhadap momen dasar (Dewobroto 2011 dan 2013)

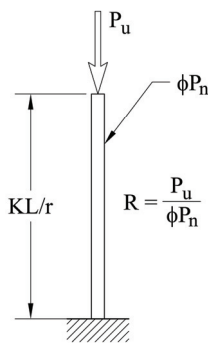
Uji *benchmark* Case-2 melibatkan efek P- Δ dan P- δ sekaligus, ternyata yang dihasilkan program lebih baik dibandingkan hasil uji *benchmark* Case-1, yang hanya melibatkan P- δ saja. Semua program SAP2000 dari versi lama maupun versi terbaru, dapat memberikan hasil yang memuaskan, bahkan tanpa perlu pembagian elemen (*meshing*) sebagaimana yang perlu dilakukan pada uji *benchmark* Case-1 untuk mendapatkan hasil yang teliti.

Dari verifikasi ini dapat diketahui bahwa SAP2000 versi 7.4 yang dianggap *out-of-dated* sekalipun, dan juga belum secara eksplisit mendukung DAM (program *release* jauh hari sebelum terbitnya AISC 2005), terbukti dapat lolos uji *benchmark* AISC (2010). Jadi, tidak ada keraguan untuk menggunakannya pada penelitian DAM (AISC 2010).

4. PENGARUH BESARNYA KELANGSINGAN DAN PEMBEBANANNYA

DAM (*Direct Analysis Method*) unggul dan mengatasi keterbatasan ELM (*Effective Length Method*), yang hanya valid untuk hasil analisa struktur yang rasio momen akibat 2nd order analisis terhadap momen 1st order analisis, nilainya kurang dari 1.5 (AISC 2005). Jika lebih dari itu, maka DAM adalah alternatif analisis yang diijinkan. Itu berarti DAM akan sangat efektif untuk struktur yang dipengaruhi oleh stabilitas, dan dalam kaca mata metode ELM itu menyangkut parameter KL/r (kelangsingan batang); faktor pembesaran momen B1 dan B2 yang dipakai sebagai pendekatan dalam memperhitungkan pengaruh P-Delta. Selanjutnya akan ditinjau beberapa kasus sehingga dapat diketahui parameter pada konfigurasi struktur yang menghasilkan perbedaan dalam memakai ELM dan DAM.

Kasus 1: Akan ditinjau tiang baja profil W8x28 untuk beberapa macam kelangsingan KL/r (Gambar 1). Untuk tiap kelangsingan akan dihitung dengan cara ELM sedemikian sehingga $P_u = \phi P_n$ atau ratio $R = P_u / \phi P_n = 1.0$. Dengan konfigurasi beban seperti itu, selanjutnya dihitung ratio R dengan cara DAM. Hasilnya disajikan sebagai berikut.



Tabel 3. Hasil ELM dan DAM pada berbagai kelangsingan

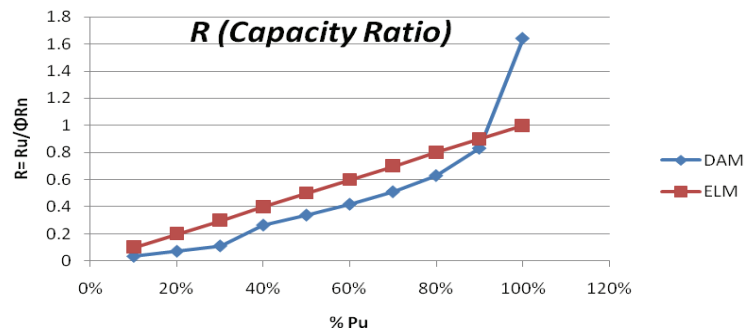
KL/r	Rasio ($R = P_u / \phi P_n$)		Keterangan
	ELM	DAM	
20	1	0.997	OK
50	1	0.945	
75	1	0.915	
100	1	1.640	Not OK
150	1	5.570	
200	1	4.750	

Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa untuk kelangsingan kolom KL/r > 100, akan memberikan perbedaan hasil antara ELM dan DAM yang cukup signifikan. Bahkan ketentuan aman yang diperoleh berdasarkan cara ELM menjadi tidak aman (tidak konservatif) jika ditinjau dengan cara DAM. Dengan mengulang perhitungan untuk kolom dengan kelangsingan KL/r = 100, tetapi besarnya beban dikurangi secara proporsional mulai dari 100% P_u – 10 % P_u , maka dapat diketahui perbedaan hasil antara cara ELM dan DAM dalam tabel berikut.

Tabel 4. Pengaruh pengurangan beban terhadap hasil cara ELM dan DAM

%P	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
Rasio DAM	1.64	0.83	0.63	0.51	0.42	0.34	0.27	0.11	0.07	0.04
Rasio ELM	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Besarnya pembebanan mempengaruhi hasil analisis dengan cara DAM, khususnya untuk yang langsing.



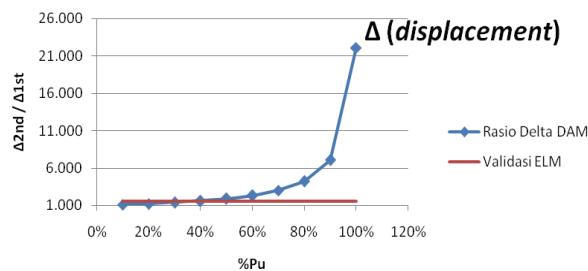
Gambar 5. Pengaruh pengurangan beban terhadap hasil analisis (Ruser 2012)

Dari Gambar 6, untuk nilai $KL/r = 100$, dan dengan pembebanan sebesar 90% beban ultimate (hasil cara ELM), jika dihitung ulang dengan cara DAM maka ratio $R = P_u / \phi P_n$ adalah lebih besar atau kapasitas profilnya tidak memenuhi persyaratan. Itu berarti pembebanan pada kondisi maksimum berperilaku **nonlinier** dan **harus dihindari**.

Jika ditinjau lendutan atau deformasi (Δ), karena tidak ada gaya lateral (momen) maka cara ELM tidak memperhitungkan pengaruh pembesaran momen ($B2 = 0$). Sehingga perbandingan Δ yang terlampir merupakan akibat adanya *notional load* pada prosedur perhitungan DAM yang dalam hal ini dianggap sebagai *imperfection* pada perencanaan stabilitas. Pada tabel disajikan hasil perbandingan SAP2000 v.7.4 antara Δ dengan opsi P- Δ on dan P- Δ off. Opsi off dianggap mewakili *1st order analysis*, sedangkan opsi on mewakili *2nd order analysis*.

Tabel 5. Pengaruh pemakaian 2nd order analysis terhadap deformasi

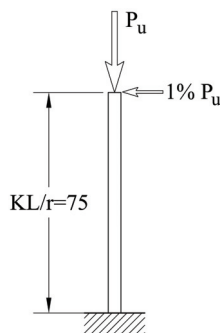
%P	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
δ jika P- Δ off	0.271	0.244	0.217	0.190	0.163	0.136	0.109	0.082	0.054	0.027
δ jika P- Δ on	5.995	1.720	0.911	0.568	0.379	0.258	0.175	0.114	0.067	0.030



Gambar 6. Rasio pengaruh 2nd order analysis (Ruser 2012)

Gambar 7 memperlihatkan bahwa pada pembebanan 30% ϕP_n maks, nilai $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} > 1.5$, sehingga perhitungan dengan cara ELM tidak valid untuk digunakan (AISC 2005). Oleh karena itu untuk Kasus 1, dengan $KL/r = 100$, dan pembebanan lebih besar dari 30% ϕP_n maka penggunaan cara DAM menjadi suatu keharusan.

Kasus 2: Hanya meninjau kolom dengan kelangsingan $KL/r = 75$, konfigurasinya masih sama seperti Kasus 1 hanya ada tambahan beban lateral 1% beban aksial P, untuk menimbulkan efek P- Δ . Pada cara ELM pengaruhnya dihitung dengan cara pendekatan (B1 dan B2), sedangkan DAM akan memakai opsi P-Delta pada SAP2000 v.7.4.



Gambar 7. Kasus 2

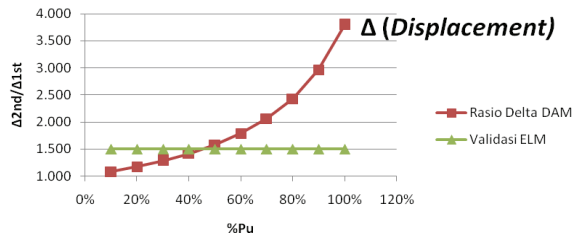
Adanya tambahan beban lateral 1% menyebabkan perencanaan harus meninjau-nya sebagai struktur *beam-column*. Sehingga rasio yang digunakan memakai rumus interaksi dan hasilnya adalah sebagai berikut :

Tabel 6. Beam-column dengan cara ELM dan DAM

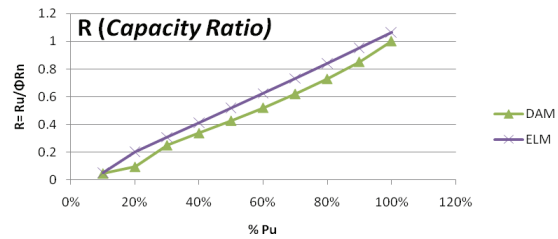
% P_u	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
Rasio ELM	1.06	0.95	0.84	0.73	0.62	0.52	0.41	0.31	0.21	0.05
Rasio DAM	1.00	0.85	0.73	0.62	0.52	0.43	0.34	0.25	0.09	0.05

Kolom dengan kelangsingan $KL/r = 75$ memberikan rasio DAM yang lebih kecil daripada ELM. Pada kasus ini, cara DAM memberikan profil yang lebih hemat.

Kecuali rasio kekuatan $R = P_u / \phi P_n$ (lihat Tabel 6), dibandingkan juga rasio perpindahan titik nodal ($\Delta 2^{nd} / \Delta 1^{st}$) akibat pengaruh $P-\Delta$, jika dihitung dengan komputer (DAM) maupun manual (ELM), cara pembesaran momen.



a). Rasio kekakuan

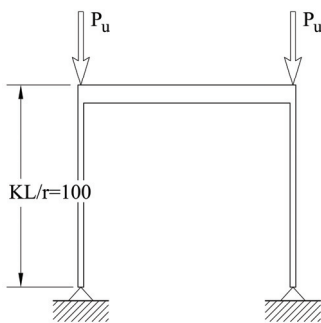


b). Rasio kekuatan

Gambar 8. Penyelesaian Kasus 2 berdasarkan cara DAM vs ELM (Ruser 2012)

Dari kurva rasio perpindahan titik nodal diketahui bahwa pada pembebanan $\gg 40\% \phi P_n$, hitungan cara ELM telah melampaui batas validitas pemakaian yang ditetapkan AISC (2005). Meskipun dari kurva rasio kekuatannya, perbedaan antara cara ELM maupun DAM tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Ditinjau dari segi kekuatan cara DAM menghasilkan profil yang lebih irit dan mampu memberikan prediksi deformasi yang lebih konservatif.

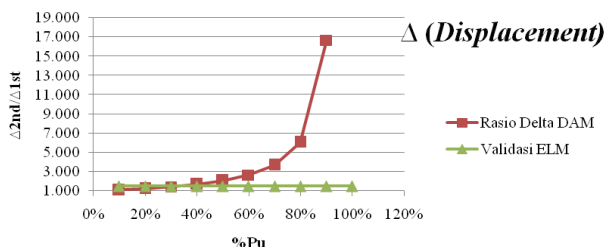
Kasus 3: Struktur portal sederhana dengan beban aksial di tiap titik nodal.



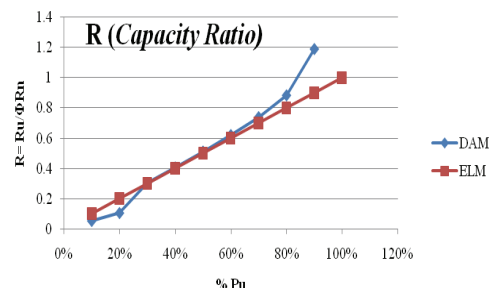
Kelangsingan kolom portal yang ditinjau adalah $KL/r = 100$. Besarnya beban rencana atau P_u divariasi terhadap ϕP_n dan faktor $K = 2$ untuk kolom AB.

Pada kasus ini, terlihat bahwa untuk $KL/r = 100$, maka untuk pembebanan di atas $30\% \phi P_n$, maka desain dengan memakai cara ELM, sudah tidak valid digunakan karena telah melewati batasan yang ditetapkan AISC, nilai $\Delta 2^{nd} / \Delta 1^{st} > 1.5$.

Perilaku struktur Kasus 3 sama seperti Kasus 1, semakin langsing dan besarnya beban aksialnya semakin besar, maka hitungan DAM memberikan rasio persamaan interaksi lebih besar dari ELM. Jadi bisa saja pada perancangan ELM terlihat aman (memenuhi syarat) tetapi jika dihitung ulang dengan cara DAM bisa tidak memenuhi persyaratan, atau dengan kata lain DAM lebih konservatif.



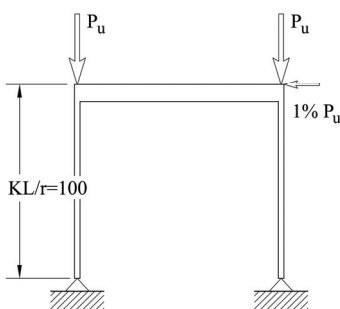
a). Rasio kekakuan



b). Rasio kekuatan

Gambar 9. Penyelesaian Kasus 3 berdasarkan cara DAM vs ELM (Ruser 2012)

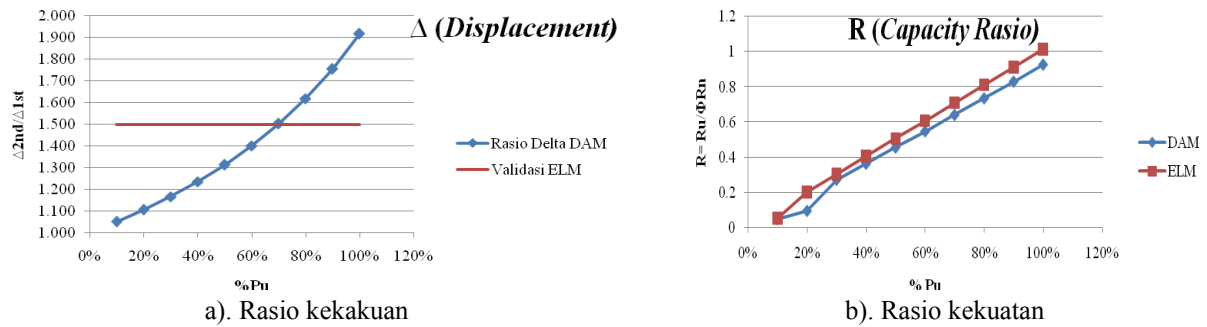
Kasus 4: Struktur portal seperti Kasus 3 tetapi ditambahkan beban lateral 1% P_u pada elevasi nodal bebas.



Besarnya beban rencana atau P_u divariasi terhadap ϕP_n . Untuk memperhitungkan stabilitas pada cara ELM diambil faktor $K = 2$ untuk kolom AB. Adapun kelangsingan kolom yang ditinjau adalah $KL/r = 50$.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perilaku kekakuan maupun kekuatannya sama seperti Kasus 2. Tambahan gaya lateral akan memberikan rasio kekuatan cara ELM pada Kasus 4 yang lebih besar daripada Kasus 3. Perlu diperhatikan, bahwa tinjauan kekakuan (deformasi) perlu karena bisa saja dari segi kekuatan masih memenuhi persyaratan (Gambar 10b), tetapi memberikan kondisi deformasi yang tidak sesuai lagi jika digunakan cara perencanaan dengan ELM (Gambar 10a).

Pada Kasus 4 ini juga terlihat bahwa perencanaan dengan cara DAM (baru) untuk portal dengan kekakuan kolom $KL/r = 50$ memberikan hasil yang konservatif (lebih aman) dibanding cara ELM (lama).



Gambar 10. Penyelesaian Kasus 3 berdasarkan cara DAM vs ELM (Ruser 2012)

Pada perencanaan kolom baik struktur portal maupun tunggal, salah satu faktor yang menentukan adalah nilai K yang diambil. Pada portal tumpuan sendi-sendi dan bagian atas bebas bertranslasi (dianggap jepit bebas atau balok kaku sekali), kenyataannya tentu tidak seperti itu. Ada ketidak-telitian dalam penentuan stabilitas global. Adapun cara DAM, nilai $K = 1.0$ (tidak berpengaruh), tetapi ada antisipasi lain seperti geometri imperfection (*notional load*) dan non-linier material (*reduksi kekakuan*), yang pengaruhnya diperhitungkan secara global. Jadi stabilitas struktur global dapat diperhitungkan secara lebih teliti pada cara DAM dibanding cara ELM.

5. PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN

Telah dilakukan analisa struktur bergoyang dan tidak bergoyang, dengan memodifikasi beberapa parameter seperti KL/r dan P sehingga dapat diketahui perbandingan perhitungan cara DAM dan ELM.

Struktur *non-sway* seperti rangka batang (Effective Length Factor, $K \leq 1.0$) dan dengan nilai $KL/r = 100$, rasio dari delta akibat second order dibagi dengan delta akibat first order memang telah melewati batasan 1.5 bahkan mencapai 4. Tetapi nilai absolute delta jika dibandingkan dengan panjang struktur relative sangat kecil ($L/860$). Nilai rasio kekuatan, cara DAM memberikan hasil lebih conservative sebesar 10-20% dibandingkan cara ELM. Itu karena adanya tambahan beban *notional load* sehingga bidang momen keduanya berbeda. Mengacu hal-hal ini maka disimpulkan bahwa struktur truss atau rangka batang tidak bergoyang maka baik cara ELM maupun DAM tidak memberikan perbedaan yang signifikan, hampir sama.

Struktur bergoyang (*sway frame*) dengan nilai kelangsingan (KL/r) yang kecil, maka perencanaan cara DAM akan memberikan nilai rasio ($R_u/\phi R_n$) lebih kecil dibandingkan ELM, tetapi ini terbatas pada konfigurasi yang ditinjau.

DAM perlu program komputer analisa orde-2 dan untuk itu tidak perlu dipermasalahakan. Terbukti program komputer lama, yaitu SAP2000 ver 7.4 yang di-release tahun 2000 sehingga tidak mencantumkan kemampuannya mendukung DAM, ternyata terbukti lolos uji benchmark yang ditetapkan AISC (2010). Juga diketahui, bahwa keberadaan opsi P-Delta secara otomatis memperhitungkan stabilitas struktur. Perlu *notional load* yang tepat.

Dari contoh kasus yang ditinjau, dapat diketahui pada struktur kaku atau nilai kelangsingan yang kecil, hasil cara DAM tidak berbeda jauh dari cara ELM, baik terkesan lebih ekonomis. Meskipun demikian, pada **struktur langsing** dan jika beban menghasilkan gaya aksial elemen **mendekati kapasitas nominalnya** maka hasil perencanaan DAM akan lebih konservatif, bisa mengindikasikan strukturnya tidak memenuhi syarat, meskipun jika dievaluasi dengan cara ELM terkesan tidak ada masalah. Itu berarti pada kondisi seperti itu, struktur langsing dan pembebanan yang besar maka cara DAM akan memberi hasil yang lebih aman.

DAFTAR PUSTAKA DAN RUJUKAN

- AISC. (2005). *ANSI/AISC 360-05 : Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, Illinois
- AISC. (2010). *ANSI/AISC 360-10 : Specification for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, Illinois
- Dewobroto, W. (2013). *Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000*. Lumina Press, Jakarta
- Dewobroto, W. (2011). "The Effect of Structural Modelling on The Analysis of P-Delta Effect - Case study: second-order analysis by a commercial computer program, SAP2000", The 3rd International Conference of European Asian Civil Engineering Forum (EACEF), 20-22 September 2011, at UAJY, Yogyakarta
- Dewobroto, W. (2011). "Era Baru Perancangan Struktur Baja berbasis Komputer memakai DAM – AISC 2010", Seminar Nasional HAKI, 26-27 Juli 2011, Hotel Borobudur, Jakarta Pusat
- Ruser, E. (2012). *Pengaruh Kekakuan Rangka Terhadap Efektifitas Direct Analysis Method (DAM) Dengan Bantuan SAP2000 v.7.4*, Tugas akhir (S1) di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Desain dan Teknik Perencanaan, Universitas Pelita Harapan, Tangerang (tidak dipublikasikan)