

Kaji Perbandingan Hasil Komputasi Kekuatan Kritis Struktur Kolom Baja akibat Beban Tekan Aksial dengan Standar-Standar Perancangan

Eka Satria, Mulyadi Bur, dan Satria Rizki

Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, 25163
e-mail: ekasatria@ft.unand.ac.id

Abstrak

Makalah ini membahas perbandingan hasil komputasi perancangan struktur kolom baja akibat beban tekan aksial dengan standar-standar perancangan. Secara teknis, struktur kolom yang dipilih memiliki rasio kelangsingan yang bervariasi antara 20 sampai dengan 200, yang mewakili beragam bentuk penggunaan struktur kolom di lapangan. Penghitungan kekuatan kritis struktur akibat beban tekan aksial dilakukan dengan menggunakan analisa numerik berbasis metode elemen hingga yang memperhitungkan pengaruh ketidaklinearan geometri dan material. Hasil-hasil komputasi kemudian diperbandingkan dengan hasil yang diperoleh dari standar-standar perancangan, seperti CRC (Column Research Council), SSRC (Structural Stability Research Council) dan AISC (American Institute of Steel Construction). Pemilihan standar-standar perancangan ini sebagai pembanding didasari pada fakta lapangan dimana keberadaan mereka yang cukup membantu proses perancangan struktur kolom dalam beberapa dasawarsa terakhir ini. Dalam proses penghitungan kekuatan, beberapa faktor di lapangan yang berpotensi mampu mereduksi kekuatan kritis struktur secara signifikan dilibatkan dalam pemodelan. Pertama, bentuk ketidaksempurnaan (cacat) geometri yang sering terdapat pada struktur kolom. Cacat ini ditandai dengan adanya ketidaklurusan geometri dari struktur kolom. Kedua, seringkali beban tekan yang bekerja tidak segaris dengan sumbu struktur kolom (beban essentris). Ketiga, faktor ketidaklinearan material yang biasanya sangat berpengaruh pada kolom-kolom dalam kategori pendek dan menengah (intermediate). Proses penghitungan dilakukan terhadap beberapa model yang memperhitungkan keberadaan ketiga faktor di atas secara bersamaan. Dari hasil perbandingan diperoleh suatu panduan sederhana dan praktis dalam merancang struktur kolom akibat beban tekan aksial. Panduan praktis ini meliputi dua area. Pertama, informasi praktis tentang standar-standar perancangan, sehingga untuk kasus-kasus tertentu para perancang dapat menentukan persamaan desain mana yang paling efektif digunakan dalam perancangan. Kedua, informasi tentang harga faktor reduksi (P_{cr}/P_y) yang disarankan dalam perancangan kolom untuk berbagai kondisi di lapangan. Dengan diketahuinya faktor reduksi ini, maka kekuatan kritis struktur kolom dapat diprediksi secara mudah hanya dengan mengalikan harga faktor reduksi tersebut dengan harga kekuatan luluh material dari kolom.

Keywords: Kekuatan Kritis, Kolom, Cacat Geometri, Beban Essentris, Faktor Reduksi

Pendahuluan

Kolom merupakan salah satu contoh struktur dengan dimensi panjang jauh lebih besar dibandingkan ukuran penampang melintangnya. Penggunaannya yang beragam membuat perancangan kolom mendapat perhatian yang cukup serius oleh para perancang sejak dahulu. Masalah terpenting yang terjadi pada kolom adalah geometrinya yang langsing akan berpotensi menimbulkan ketidakstabilan, dimana akibat suatu pembebanan kolom akan mengalami perpindahan yang cukup besar (tertekuk atau *buckling*) secara tiba-tiba.

Analisa kestabilan pada struktur kolom dijelaskan pertama kali dipecahkan oleh *Euler* pada tahun 1744 [Chen, 1987]. Dengan menggunakan persamaan yang

diberikan *Euler* ini, perancang dapat menentukan besarnya beban kritis suatu kolom yang menyebabkan *buckling* dengan mudah. Akan tetapi penggunaan persamaan ini terbatas pada suatu kondisi dimana kolom dianggap homogen, memiliki geometri lurus sempurna (tidak terdapat cacat geometri), lokasi beban yang segaris sumbu kolom. Diluar batasan tersebut persamaan *Euler* tidak akan memberikan hasil yang diharapkan. Kenyataan di lapangan memperlihatkan bahwa sangat sulit sekali bagi perancang untuk membuat dan merancang kolom dalam kondisi ideal yang dijelaskan di atas. Walaupun ketelitian dari mesin-mesin produksi telah bisa dibuat dengan begitu baik, akan tetapi tetaplah sulit untuk menghindarkan keberadaan cacat geometri pada struktur, apalagi untuk struktur kolom yang memiliki geometri yang panjang. Kesulitan lain

timbul pada waktu proses konstruksi, dimana lokasi dari pembebanan tidak segaris lagi dengan garis sumbu kolom itu sendiri (timbulnya essentrisitas). Kondisi-kondisi seperti ini akan mempengaruhi besarnya beban kritis kolom akibat *buckling*. Harga yang diberikan akan tereduksi jauh dibawah harga yang diberikan oleh Persamaan Euler.

Saat ini sebenarnya telah ada persamaan desain yang diberikan untuk mengatasi faktor-faktor di atas, seperti persamaan *Secant* untuk menghitung beban kritis kolom akibat pembebanan essentris, dan persamaan *Perry-Robertson* untuk menentukan beban kritis suatu kolom yang memiliki cacat geometri, akan tetapi penggunaan persamaan tersebut dalam desain dibatasi oleh asumsi-asumsi tertentu. Lebih lanjut, kedua persamaan tersebut hanya dapat dilakukan untuk kasus masing-masing. Ini berarti, persamaan *Secant* tidak dapat digunakan jika struktur memiliki cacat geometri, sebaliknya persamaan *Perry-Robertson* juga tidak dapat digunakan jika beban yang diberikan memiliki jarak essentrisitas. Di sisi lain, untuk struktur kolom dalam kategori pendek, pengaruh ketidaklinearan material terhadap kekuatan kritis juga sangat dominan. Sampai saat ini hanya sedikit referensi yang membahas perhitungan suatu kolom yang memiliki cacat geometri dan beban essentris dengan menggunakan material inelastik secara bersamaan. Beberapa metode analitik telah diperkenalkan seperti teori *Modulus Tangent* atau *Inelastik Shanley*, akan tetapi kedua metode ini membatasi perhitungan mereka hanya pada kolom memiliki geometri yang lurus sempurna.

Untuk penghitungan praktis di lapangan, penggunaan standar-standar perancangan cukup efektif untuk mengatasi hal-hal diatas. Beberapa standar perancangan seperti CRC (*Column Research Council*), SSRC (*Structural Stability Research Council*) dan AISC (*American Institute of Steel Construction*) telah melibatkan ketiga faktor di atas dalam proses penghitungan kekuatan kritis struktur kolom. Hanya saja masing-masing standar perancangan memiliki asumsi yang berbeda dalam penurunan persamaan desain mereka. Tidak ada informasi praktis bagi pengguna dalam bentuk perbandingan standar perancangan yang nantinya memperlihatkan daerah penggunaan efektif dari masing-masing standar.

Makalah ini menampilkan proses penghitungan kekuatan kritis faktor reduksi terhadap kekuatan *buckling* kolom akibat beban tekan dibawah pengaruh ketiga jenis faktor yang disebutkan di atas; cacat geometri, beban essentris, serta ketidaknonlinearan material (inelastik) dengan menggunakan pendekatan

komputasi numerik berbasis metode elemen hingga. Hasil yang diperoleh nantinya akan diperbandingkan dengan standar-standar perancangan yang disebutkan sebelumnya. Ada 2 informasi yang diharapkan; *pertama*, informasi praktis tentang standar-standar perancangan, sehingga untuk kasus-kasus tertentu para perancang dapat menentukan persamaan desain mana yang paling efektif digunakan, *kedua*, informasi tentang harga faktor reduksi (P_{cr}/P_y) yang disarankan dalam perancangan kolom untuk berbagai kondisi di lapangan. Dengan diketahuinya faktor reduksi ini, maka kekuatan kritis struktur kolom dapat diprediksi secara mudah hanya dengan mengalikan harga faktor reduksi tersebut dengan harga kekuatan luluh material dari kolom.

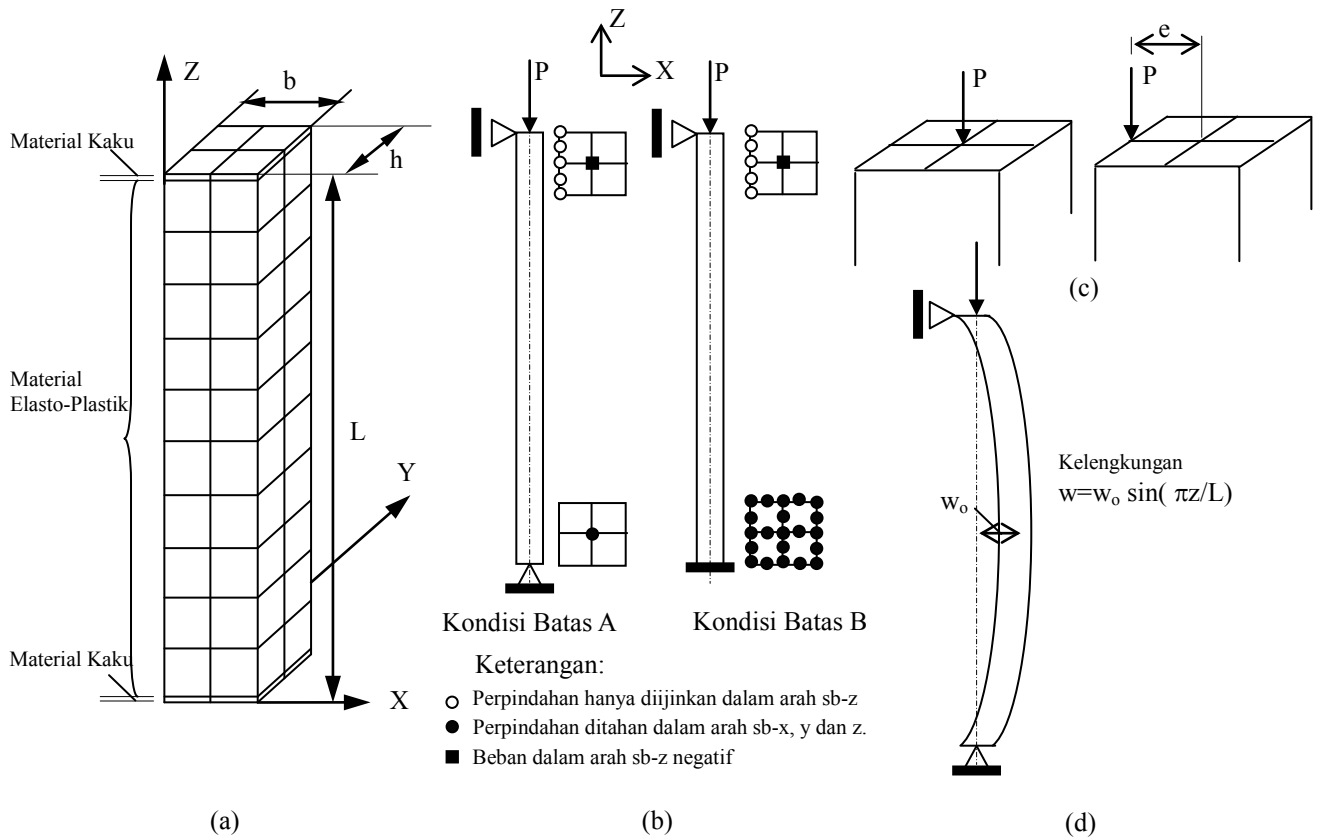
Metode Penelitian

Proses penghitungan kekuatan kritis struktur kolom ini dihitung secara numerik dengan memanfaatkan program komputasi in-house [Kato, et.al (2005), Satria, et.al (2007)] berbasis metode elemen hingga yang memperhitungkan ketidaklinearan geometri dan material. Untuk pemodelan, struktur kolom dibuat dengan menggunakan elemen solid *hexahedron* 20 nodal. Ketidaklinearan geometri dihitung berdasarkan *Updated Lagrangian Jaumann* dengan mempertimbangkan perpindahan dan rotasi yang besar. Ketidaklinearan material dihitung berdasarkan teori kriteria luluh *Von Misses*, *Associated Flow Rule*, dan *Hardening Rule* untuk material baja karbon rendah. Sedangkan solusi numerik untuk persamaan kesetimbangan nonlinear diselesaikan dengan metoda pengontrolan perpindahan (*displacement control method*).

Pemodelan Numerik

Seperti yang diperlihatkan pada Gbr.1a, suatu struktur kolom dengan panjang, L , dan penampang persegi ($b \times h$) dimodelkan dalam variasi rasio kelangsingan (*slenderness ratio*, λ , dimana $\lambda = L/\sqrt{I/A}$) seperti yang diberikan oleh Tabel 1. Rasio kelangsingan dipilih dari selang $15 \leq \lambda \leq 180$, yang dianggap cukup mewakili beragam aplikasi struktur kolom di lapangan.

Dalam pemodelan numerik, elemen sebelah atas dan bawah, yang berkontak langsung dengan beban dan tumpuan diasumsikan sangat kaku, $E_{rigid} = 1000 \times E$ (lihat Gbr.1a), sedangkan bagian struktur lainnya dimodelkan dengan elemen yang dapat terdeformasi plastis.



Gambar 1. (a) Pemodelan Struktur Kolom, (b). Pemodelan Kondisi Batas (c). Beban Essentrisitas (d). Cacat Geometri

Hal ini ditujukan untuk menghindari terjadinya deformasi plastis lokal yang akan mempengaruhi perhitungan di sekitar beban terkonsentrasi pada bagian atas struktur dan di sekitar tumpuan pada bagian bawah struktur.

Pemilihan Geometri dan Material

Geometri dan sifat material yang digunakan dalam analisa numerik diperlihatkan pada Tabel 1 dan 2 berikut.

Tabel 1. Geometri Struktur Kolom

Model	b=h (mm)	L (mm)	I (mm ⁴)	A (mm ²)	λ
M1	100	500	8.33×10 ⁶	10 ⁴	17.3
M2	100	1000	8.33×10 ⁶	10 ⁴	34.6
M3	100	1500	8.33×10 ⁶	10 ⁴	51.9
M4	100	2000	8.33×10 ⁶	10 ⁴	69.2
M5	100	2500	8.33×10 ⁶	10 ⁴	86.6
M6	100	3000	8.33×10 ⁶	10 ⁴	103.9
M7	100	3500	8.33×10 ⁶	10 ⁴	121.2
M8	100	4000	8.33×10 ⁶	10 ⁴	138.6
M9	100	4500	8.33×10 ⁶	10 ⁴	155.9
M10	100	5000	8.33×10 ⁶	10 ⁴	173.2

Tabel 2. Sifat Material

Modulus Elastisitas (E) – (N/mm ²)	210000
Rasio Poisson (ν)	0.3
Tegangan Luluh (σ _v) – (N/mm ²)	270

Model Tegangan-Regangan	Bi-Linear
Kriteria Luluh	Von-Misses
Flow Rule	Associated
Hardening Rule	Isotropic
Hardening Parameter	E/100

Pemodelan Kondisi Batas

Dua jenis kondisi batas diterapkan ke struktur, seperti yang terlihat pada Gbr.1b. Pemilihan dua jenis kondisi tumpuan ini didasari pada kenyataan bahwa kondisi tumpuan seperti inilah yang hampir mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Secara teknis, kondisi batas pertama (Kondisi Batas A) memodelkan tumpuan bawah sebagai tumpuan pin dan tumpuan atas sebagai roller. Sedangkan kondisi batas kedua (Kondisi Batas B) menjadikan tumpuan bawah sebagai tumpuan jepit dan tumpuan atas juga sebagai roller.

Pemodelan Beban

Untuk kasus yang mengharuskan beban diterapkan pada garis sumbu struktur, maka beban awal sebesar P₀ diterapkan pada lokasi titik berat penampang, akan tetapi untuk kasus yang melibatkan beban essentris, maka beban tersebut diletakan sejauh e dari titik berat penampang, dimana e=b/2 (seperti terlihat pada Gbr.1c).

Pemodelan Cacat Geometri

Cacat geometri didefinisikan sebagai perubahan geometri struktur dalam arah sb-z terhadap garis sumbu struktur kolom. Perubahan geometri ini diasumsikan sebagai suatu fungsi sinus [Chen, 2007] sebagai berikut:

$$w = w_0 \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{L}\right) \tag{1}$$

dimana w menyatakan simpangan, w_0 menyatakan amplitudo simpangan pada $z=L/2$, dan L adalah panjang struktur (lihat Gbr.1d).

Pada makalah ini harga w_0 yang dipilih adalah sebesar $L/1000$, $L/500$ dan $L/100$.

Standar Perancangan

Tabel 3 berikut menginformasikan persamaan desain dari tiga buah standar perancangan; CRC (*Column Research Council*), SSRC (*Structural Stability Research Council*) dan AISC (*American Institute of Steel Construction*).

Tabel 3. Persamaan Desain Standar Perancangan Kolom [Chen, 2007]

Standar	Persamaan Desain
CRC	$\frac{P}{P_y} = 1 - \frac{\lambda_c^2}{4}$ untuk $\lambda_c \leq \sqrt{2}$ $\frac{P}{P_y} = \frac{1}{\lambda_c^2}$ untuk $\lambda_c > \sqrt{2}$
AISC ASD (Allowable Stress Design)	$\frac{P}{P_y} = \frac{1 - \lambda_c^2/4}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8}\left(\frac{\lambda_c}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{8}\left(\frac{\lambda_c}{\sqrt{2}}\right)^3}$ untuk $\lambda_c \leq \sqrt{2}$ $\frac{P}{P_y} = \left(\frac{12}{23}\right) \frac{1}{\lambda_c^2}$ untuk $\lambda_c > \sqrt{2}$
SSRC Curve-1	$\frac{P}{P_y} = 1$ untuk $(0 \leq \lambda_c \leq 0.15)$ $\frac{P}{P_y} = 0.990 + 0.122\lambda_c - 0.367\lambda_c^2$ untuk $(0.15 \leq \lambda_c \leq 1.2)$ $\frac{P}{P_y} = 0.051 + 0.801\lambda_c^{-2}$ untuk $(1.2 \leq \lambda_c \leq 1.8)$ $\frac{P}{P_y} = 0.008 + 0.942\lambda_c^{-2}$ untuk $(1.8 \leq \lambda_c \leq 2.8)$ $\frac{P}{P_y} = \lambda_c^{-2}$ untuk $(\lambda_c \geq 2.8)$
SSRC Curve-2	$\frac{P}{P_y} = 1$ untuk $(0 \leq \lambda_c \leq 0.15)$ $\frac{P}{P_y} = 1.035 - 0.202\lambda_c - 0.222\lambda_c^2$ untuk $(0.15 \leq \lambda_c \leq 1.0)$ $\frac{P}{P_y} = -0.111 + 0.636\lambda_c^{-1} + 0.087\lambda_c^{-2}$ untuk $(1.0 \leq \lambda_c \leq 2.0)$ $\frac{P}{P_y} = 0.009 + 0.877\lambda_c^{-2}$ untuk $(2.0 \leq \lambda_c \leq 3.6)$ $\frac{P}{P_y} = \lambda_c^{-2}$ untuk $(\lambda_c \geq 3.6)$
SSRC Curve-3	$\frac{P}{P_y} = 1$ untuk $(0 \leq \lambda_c \leq 0.15)$ $\frac{P}{P_y} = 1.093 - 0.622\lambda_c$ untuk $(0.15 \leq \lambda_c \leq 0.8)$

$\frac{P}{P_y} = -0.128 + 0.707\lambda_c^{-1} + 0.102\lambda_c^{-2}$ untuk $(0.8 \leq \lambda_c \leq 2.2)$ $\frac{P}{P_y} = 0.008 + 0.792\lambda_c^{-2}$ untuk $(2.2 \leq \lambda_c \leq 5.0)$ $\frac{P}{P_y} = \lambda_c^{-2}$ untuk $(\lambda_c \geq 5.0)$
--

Parameter Kelangsingan

Parameter kelangsingan, λ_c , diperoleh dari persamaan berikut:

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} K \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \tag{2}$$

Untuk kasus dengan kondisi batas tipe A (roller-pin) diperoleh $K=1.0$ sedangkan untuk kondisi batas tipe B (roller-jepit) diperoleh $K=0.7$.

Tabel 4 berikut memperlihatkan harga parameter kelangsingan λ_c untuk tiap-tiap model yang digunakan.

Tabel 4. Parameter Kelangsingan

Model	Λ	$\lambda_{c, \text{Tipe A}}$	$\lambda_{c, \text{Tipe B}}$
M1	17.3	0.20	0.14
M2	34.6	0.40	0.28
M3	51.9	0.60	0.42
M4	69.2	0.80	0.56
M5	86.6	1.00	0.70
M6	103.9	1.20	0.83
M7	121.2	1.40	0.97
M8	138.6	1.60	1.11
M9	155.9	1.80	1.25
M10	173.2	2.00	1.38

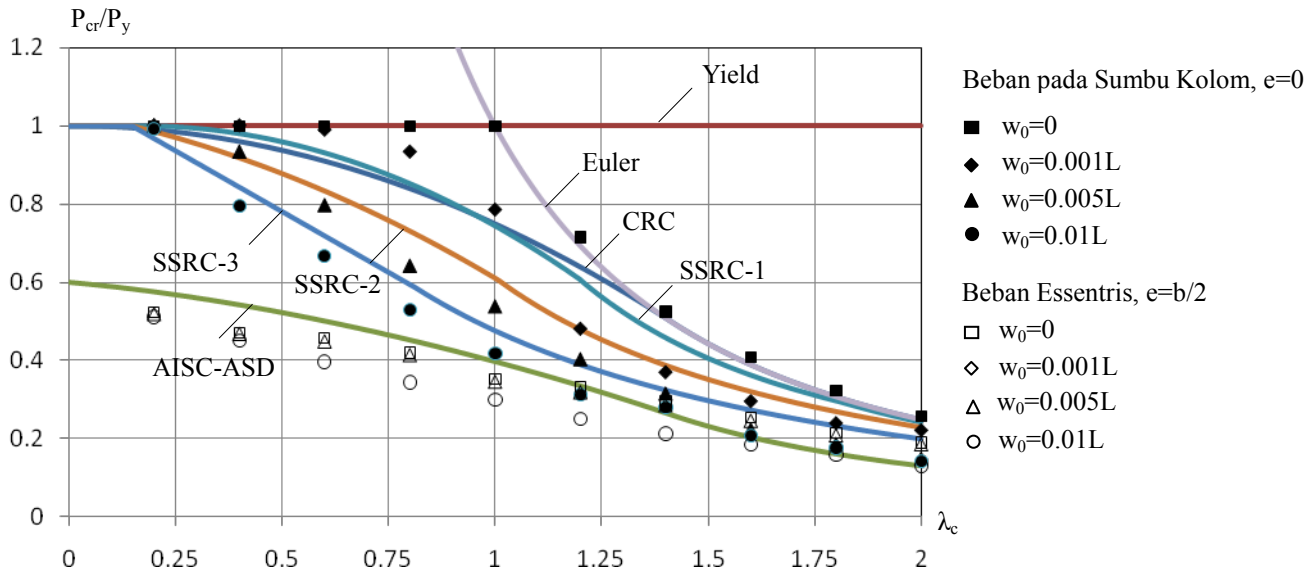
Hasil dan Pembahasan

Gbr.2 dan 3 dan Tabel 5 m emperlihatkan hasil penghitungan beban kritis struktur kolom akibat beban tekan aksial secar numerik untuk struktur dengan kondisi batas tipe A dan B dalam perbandingan dengan persamaan desain yang diberikan oleh standar-standar perancangan.

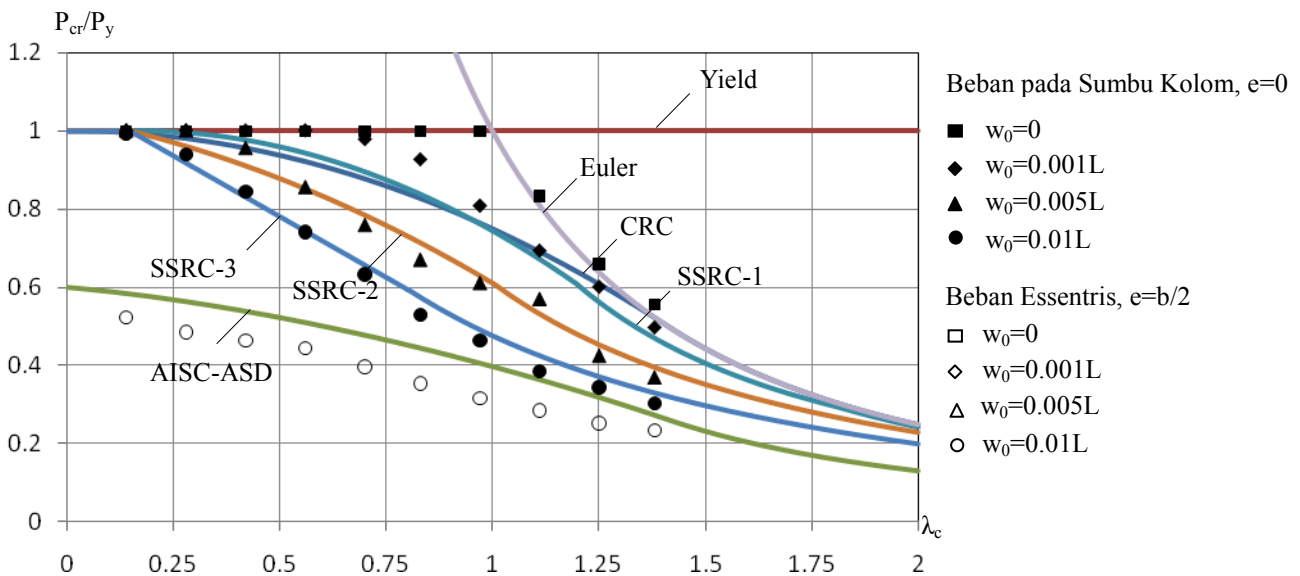
Verifikasi Numerik

Dari Gbr.2 dan 3 dapat dilihat bahwa untuk struktur kolom sempurna (tidak ada cacat geometri) dan akibat pembebanan tepat pada garis sumbu kolom ($e=0$), diperoleh bahwa untuk struktur dengan parameter kelangsingan $\lambda_c < 1$, seluruh kolom akan gagal karena peluluhan (beban kritis yang diperoleh sama dengan beban luluh ($P_{cr}/P_y=1$)). Sementara untuk struktur dengan $\lambda_c > 1$, struktur akan gagal karena *buckling* dimana beban kritis yang diperoleh sama dengan beban yang diberikan oleh persamaan Euler seperti yang diberikan oleh Pers.(3) berikut:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{3}$$



Gambar 2. Hasil Perbandingan Beban Kritis Struktur Kolom dibawah Beban Tekan Aksial dengan Standar-Standar Perancangan untuk Kondisi Batas Tipe A



Gambar 3. Hasil Perbandingan Beban Kritis Struktur Kolom dibawah Beban Tekan Aksial dengan Standar-Standar Perancangan untuk Kondisi Batas Tipe B

Sebagaimana yang telah disebutkan sebelumnya, untuk kondisi batas tipe A, harga $K=1$ sedangkan untuk kondisi batas tipe B, harga $K=0.7$. Hasil ini menunjukkan hasil komputasi dari program yang dikembangkan dapat diverifikasi dengan baik oleh hasil teoritis.

Perbandingan Standar Perancangan

Standar CRC membagi area perhitungannya menjadi dua bagian. Pertama, untuk daerah elastis, persamaan desain yang diberikan akan menghasilkan harga yang sama dengan persamaan Euler. Kedua, untuk daerah

inelastik, persamaan desain yang diberikan adalah $P_{cr}/P_y = 1 - 0.25\lambda_c^2$. Titik batasan antara daerah elastis dan inelastik dipilih sekitar $P_{cr}/P_y = 0.5$ atau sama dengan $\lambda_c = \sqrt{2}$. Persamaan desain CRC ini tidak melibatkan pengaruh dari cacat geometri dan beban essentris yang sebenarnya tidak terelakan keberadaannya di lapangan. Untuk mengatasi permasalahan ini, AISC-ASD memberikan harga faktor keamanan untuk mengatasi kedua pengaruh ini dalam perhitungannya. Untuk daerah inelastik digunakan faktor keamanan sebesar $(5/3) + (3/8) \times (\lambda_c/\sqrt{2}) - (1/8) \times (\lambda_c/\sqrt{2})^3$, sedangkan daerah

elastis menggunakan faktor keamanan sebesar (23/12). Kedua faktor keamanan ini kemudian diterapkan ke dalam persamaan CRC. Akan tetapi hal ini yang kemudian menjadi kelemahan dari persamaan AISC-ASD. Kondisi cacat geometri yang terjadi di lapangan sangat beragam. Hal ini dipengaruhi oleh banyak hal, seperti proses fabrikasi dan manufaktur, ukuran, kandungan baja, perbedaan sumbu pembebanan, dll. Tentu saja harga faktor keamanan yang dipatok oleh AISC-ASD tidak akan bisa diterapkan untuk keseluruhan kasus yang berbeda. Untuk itu SSRC membagi 3 buah persamaan desainnya tergantung kepada sensitivitasnya terhadap cacat geometri. Persamaan yang diberikan SSRC-1 hampir sama dengan persamaan CRC yang menunjukkan beban kritis yang diberikan hampir tidak dipengaruhi oleh cacat geometri. SSRC-2 digunakan jika level cacat geometri yang ditemukan dalam kategori menengah, dan SSRC-3 digunakan jika cacat geometri yang ada sangat sensitif terhadap ketidakstabilan kolom.

Perbandingan Hasil Komputasi dengan Standar Perancangan

Sebagaimana yang terlihat pada Gbr.2 dan 3, seluruh hasil numerik dapat diverifikasi dengan baik oleh standar-standar perancangan yang diperkenalkan. Ketika struktur kolom memiliki cacat geometri yang kecil ($w_0=0.001L$) yang ditunjukkan oleh tanda "♦" pada kedua gambar di atas, standar perancangan CRC dan SSRC-1 dapat memverifikasi hasil numerik model tersebut dengan baik, terutama untuk model-model dengan kondisi batas tipe B (Gbr.3). Sebagai contoh model-8 ($\lambda_c=1.11$) dengan kondisi batas tipe B memberikan perbandingan $P_{cr}/P_y=0.693$. Harga ini tidak jauh berbeda dengan yang diberikan oleh CRC dan SSRC-1. CRC memberikan perbandingan $P_{cr}/P_y=0.691$ sedangkan SSRC-1 memberikan harga $P_{cr}/P_y=0.673$. Selanjutnya ketika struktur kolom memiliki cacat geometri dalam kategori menengah, misal simpangan $w_0=0.005L$ (ditandai dengan notasi "▲"), SSRC-2 secara umum dapat digunakan sebagai persamaan bantu perancangan. Sedangkan jika kolom memiliki cacat geometri dengan simpangan yang besar misal $w_0=0.01L$ (ditandai dengan notasi "●"), maka SSRC-3 atau AISC-ASD secara umum dapat digunakan untuk membantu perancangan. Terakhir, jika beban esentrisitas terjadi dalam pembebanan, standar desain AISC-SD sangat baik untuk digunakan. Untuk daerah inelastik, jika jarak esentrisitas yang terjadi cukup besar, maka faktor keamanan (23/12) yang diberikan masih dapat digunakan, akan tetapi jika jaraknya tidak terlampaui besar faktor keamanan lain yang lebih kecil dipertimbangkan dapat digunakan.

Faktor Reduksi yang Direkomendasikan

Secara umum untuk perancangan praktis, geometri struktur kolom dapat dibagi dalam 4 kelompok.

Pertama, untuk kelompok daerah inelastik dengan $0 \leq \lambda_c \leq 0.5$. Untuk daerah ini faktor reduksi yang disarankan dalam perancangan adalah $P_{cr}/P_y=0.9$ untuk kolom dengan simpangan cacat geometri kecil dari 0.001L dan $P_{cr}/P_y=0.8$ untuk simpangan cacat geometri lebih dari 0.05L.

Kedua, masih untuk kelompok daerah inelastik dengan $0.5 \leq \lambda_c \leq 1.0$. Untuk daerah ini faktor reduksi yang disarankan adalah $P_{cr}/P_y=0.8$ untuk kolom dengan simpangan cacat geometri kecil dari 0.001L dan $P_{cr}/P_y=0.5$ untuk simpangan cacat geometri lebih dari 0.05L. Sedangkan jika cacat geometri yang besar ini diikuti dengan jarak esentrisitas yang juga besar, maka faktor reduksi yang disarankan adalah $P_{cr}/P_y=0.25$.

Ketiga, untuk kelompok elastis dengan dengan $1.0 \leq \lambda_c \leq 1.5$. Untuk daerah ini faktor reduksi yang disarankan adalah $P_{cr}/P_y=0.4$ untuk kolom dengan simpangan cacat geometri kecil dari 0.001L dan $P_{cr}/P_y=0.3$ untuk simpangan cacat geometri lebih dari 0.05L. Sedangkan jika cacat geometri yang besar ini juga diikuti dengan jarak esentrisitas yang juga besar, maka faktor reduksi yang disarankan adalah $P_{cr}/P_y=0.20$.

Keempat, untuk kelompok elastik dengan dengan $1.5 \leq \lambda_c \leq 2.0$. Untuk daerah ini faktor reduksi yang disarankan adalah $P_{cr}/P_y=0.2$ untuk kolom dengan simpangan cacat geometri kecil dari 0.001L dan $P_{cr}/P_y=0.1$ untuk simpangan cacat geometri lebih dari 0.05L. Harga faktor reduksi yang sama juga dapat diadopsi jika kolom dibebani dengan beban esentrisitas dengan jarak yang cukup besar.

Kesimpulan

Beberapa hal yang bisa disimpulkan dari makalah ini adalah:

1. Masing-masing standar perancangan memiliki batasan yang berbeda dalam menentukan harga beban kritis struktur kolom akibat beban tekan. Pemahaman yang baik tentang masing-masing konsep standar perancangan ini akan membuat pemilihan standar perancangan menjadi lebih efektif.
2. Dari hasil perbandingan hasil komputasi dengan standar-standar perancangan disarankan untuk menggunakan standar CRC atau SSRC-1 untuk kasus kolom yang memiliki cacat geometri kecil ($w_0=0.001L$) dengan jarak esentrisitas beban $e=0$. Kemudian standar SSRC-2 dan SSRC-3 untuk penghitungan beban kritis struktur kolom dengan cacat geometri $0.005L \leq w_0 \leq 0.01L$ dengan jarak esentrisitas beban yang kecil.

Terakhir standar AISC-ASD untuk penghitungan beban kritis struktur kolom dengan cacat geometri besar $w_0 \geq 0.01L$ dengan jarak esentrisitas beban yang juga besar.

3. Direkomendasikan penggunaan faktor reduksi P_{cr}/P_y dengan harga sebagai berikut dalam perancangan kolom akibat beban tekan:
 - (a). $P_{cr}/P_y=0.9$ untuk daerah $0 \leq \lambda_c \leq 0.5$ yang memiliki cacat geometri $w_0 \leq 0.001L$ dan $e=0$.
 - (b). $P_{cr}/P_y=0.8$ untuk daerah $0 \leq \lambda_c \leq 0.5$ yang memiliki cacat geometri $0.001L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=0$.
 - (c). $P_{cr}/P_y=0.8$ untuk daerah $0.5 \leq \lambda_c \leq 1.0$ yang memiliki cacat geometri $w_0 \leq 0.001L$ dan $e=0$.
 - (d). $P_{cr}/P_y=0.5$ untuk daerah $0.5 \leq \lambda_c \leq 1.0$ yang memiliki cacat geometri $0.005L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=0$.
 - (d). $P_{cr}/P_y=0.25$ untuk daerah $0.5 \leq \lambda_c \leq 1.0$ yang memiliki cacat geometri $0.005L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=\text{besar}$.
 - (e). $P_{cr}/P_y=0.4$ untuk daerah $1.0 \leq \lambda_c \leq 1.5$ yang memiliki cacat geometri $w_0 \leq 0.001L$ dan $e=0$.
 - (f). $P_{cr}/P_y=0.3$ untuk daerah $1.0 \leq \lambda_c \leq 1.5$ yang memiliki cacat geometri $0.005L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=0$.
 - (g). $P_{cr}/P_y=0.2$ untuk daerah $1.0 \leq \lambda_c \leq 1.5$ yang memiliki cacat geometri $0.005L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=\text{besar}$.
 - (g). $P_{cr}/P_y=0.2$ untuk daerah $1.5 \leq \lambda_c \leq 2.0$ yang memiliki cacat geometri $w_0 \leq 0.001L$ dan $e=0$.
 - (h). $P_{cr}/P_y=0.1$ untuk daerah $1.5 \leq \lambda_c \leq 2.0$ yang memiliki cacat geometri $0.001L \leq w_0 \leq 0.01L$ dan $e=0$ atau besar.

Greek letters

λ	Rasio Kelangsingan
λ_c	Parameter Kelangsingan
ν	Rasio Poison

Subscripts

cr	Kritis
sb	Sumbu

Referensi

- Chen, W.F; Lui, E.M (1987), Structural Stability, Theory and Implementation, Elsevier Science Pub, New York.
- Kato, S; Kim, Y.B (2005), "Simulation of the cyclic behavior of J-Shaped Steel Hysteresis Devices and Study on the Efficiency for Reducing Earthquake Responses of Space Structures, Journal Constructional Steel Structures, Vol 61, pp.1457-1473.
- Satria, E; Kato, S; Kim, Y.B (2007), "Comparison of Design Formula for Buckling Cylindrical Steel Shells under Axial Compression", Journal of Steel Construction Engineering, Vol.14(54), pp.27-41.

Nomenklatur

I	Momen Inersia (mm^4)
A	Luas Penampang (mm^2)
$b \times h$	Panjang \times Lebar Penampang (mm)
w_0	Amplitudo simpangan (mm)
W	Simpangan cacat geometri dalam f(sb-z) (mm)
L	Panjang Kolom (m)
P	Beban (N)
E	Essentrisitas (mm)
E	Elastisitas (N/mm^2)
P_y	Beban Luluh (N)
P_{cr}	Beban Kritis (N)
K	Faktor Kondisi Tumpuan