

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Propertis dan Desain Baja Sebagai Elemen Struktur

2.1.1. Pendahuluan

Baja adalah logam hasil campuran dari beberapa elemen logam. Elemen yang paling utama sebagai penyusun baja adalah besi dan karbon. Besi adalah elemen yang paling utama, dengan kandungan sekitar 98% dari total kandungan elemen yang ada dalam baja. Secara umum, kandungan karbon lebih kecil dari 0,5%, akan tetapi sangat penting karena pengaruhnya terhadap kekuatan dan kekerasan baja. Pada baja lunak, kandungan karbon yang semakin besar akan membuat baja semakin keras dan kuat, tetapi akan mengurangi daktilitas baja tersebut, yang bukan merupakan suatu keadaan yang menguntungkan sebagai elemen struktur. Bahan lain yang terkandung dalam baja adalah silikon, mangan, nikel dan tembaga dalam jumlah yang bervariasi, yang dapat ditambahkan pada campuran tersebut untuk mendapatkan beberapa sifat baja yang lain, seperti kekuatan, kekerasan, atau ketahanan terhadap karat.

2.1.2. Sifat-sifat Baja yang Penting Dalam Desain

Sifat baja yang paling penting diperhitungkan dalam desain adalah perilaku tegangan-regangan yang dimilikinya. Sebuah kurva ideal yang menggambarkan

hubungan antara tegangan dan regangan baja ditunjukkan oleh gambar 2.1. yang diambil dari uji tarik baja tipikal. Pada gambar dapat dilihat bahwa kurva tersebut dapat dibagi atas 3 bagian, yaitu daerah elastis, plastis dan strain hardening.



Gambar 2.1. Diagram tegangan-regangan tipikal baja lunak

Pada daerah elastis, kurva menunjukkan bahwa dengan bertambahnya tegangan maka regangan akan bertambah dengan perbandingan lurus. Pada daerah ini, apabila tegangan dihilangkan, maka regangan juga akan hilang atau dengan kata lain, elemen baja akan kembali ke bentuk semula. Nilai modulus elastisitas diambil dari gradien garis singgung pada kurva di daerah ini, yang nilainya sekitar $2,9 \times 10^6$ psi, atau sekitar 200.000 MPa.

Setelah batas proporsional yaitu tegangan leleh terlewati, maka kurva tegangan-regangan mencapai daerah yang kedua yaitu daerah plastis. Sekali baja tersebut diberikan tegangan sehingga meregang melebihi batas proporsional atau memasuki daerah plastis, maka akan terjadi deformasi plastis yang permanen atau tidak akan kembali ke bentuk semula. Deformasi plastis ini akan sangat berbahaya bagi struktur, dimana deformasi yang bersifat permanen ini akan membuat struktur

dapat kehilangan fungsi layanannya. Secara umum, baja tidak didesain sampai dengan fase plastis ini, tapi sifat ini merupakan aset yang sangat penting untuk memberikan tanda akan terjadinya keruntuhan yang potensial, karena besarnya deformasi yang dihasilkan sebelum keruntuhan terjadi, dan masalah struktural dapat segera ditanggulangi setelah *overstress* pada elemen struktur diketahui.

Untuk jenis baja lunak, setelah melewati daerah plastis, maka kurve tegangan-regangannya akan memasuki daerah yang ketiga yaitu daerah *strain hardening*. Pada fase ini baja mampu meningkatkan kapasitas tegangan yang dapat ditahannya, sampai mencapai suatu titik tegangan tertinggi pada kurva, yaitu tegangan tarik ultimit (F_u), yang merupakan sifat yang penting. Titik ini merupakan titik tegangan tertinggi sebelum putus. Nilai ini juga dipakai sebagai suatu dasar perhitungan desain struktur baja disamping nilai batas proporsional (F_y).

Tabel 2.1. Sifat mekanis baja struktural

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, f_u (MPa)	Tegangan leleh minimum, f_y (MPa)
BJ 34	340	210
BJ 37	370	240
BJ 41	410	250
BJ 50	500	290
BJ 55	550	410
$E = 200.000 \text{ MPa}$ $G = 80.000 \text{ MPa}$ $\mu = 0,3$ $\alpha = 12 \times 10^6 / ^\circ\text{C}$		

Sifat mekanis baja yang berlaku sesuai dengan spesifikasi yang diatur dalam kode desain yang berlaku di Indonesia harus memenuhi persyaratan yang diberikan pada tabel 2.1. dengan nilai F_y , F_u dan propertis lainnya terlampir.

2.1.3. Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah tegangan awal yang terjadi akibat pendinginan yang tidak seragam dari sebuah profil tempa (*hot rolled*). Terjadinya tegangan sisa dimulai ketika bagian yang terluar dan lebih mudah dingin pada sebuah profil, misalkan pada ujung-ujung flens serta tengah badan pada profil I, lebih dulu menerima pendinginan. Hal ini menyebabkan pada daerah-daerah tersebut proses penyusutan atau pemendekan serat terhenti. Sedangkan pada bagian yang lebih lambat menerima pendinginan, misalnya pada daerah pertemuan antara flens dan web, proses penyusutan tetap berlanjut. Hal ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan dimensi pada serat-serat yang menerima pendinginan yang tidak seragam. Sedangkan pada sisi lain, serat-serat pada suatu tampang profil merupakan suatu kesatuan yang saling berhubungan. Sehingga terjadi tegangan akibat usaha serat-serat tersebut untuk tetap menjadi suatu kesatuan. Pada serat yang lebih cepat menerima pendinginan, akan menderita tegangan sisa tekan, sedangkan pada serat yang lebih lambat dalam menerima pendinginan akan menderita tegangan sisa tarik.

Tegangan sisa juga dapat terjadi pada profil *built up* yang disambung dengan pengelasan. Panas dari pengelasan akan menimbulkan pendinginan yang tidak seragam, dan akibatnya sama sebagaimana telah dijelaskan diatas.

Besarnya tegangan sisa ini bervariasi antara 15-20 ksi (69 – 103 MPa), atau bahkan ada yang mencapai lebih dari 20 ksi. Dari sini dapat dilihat bahwa besarnya tegangan cukup signifikan, bila dibandingkan dengan tegangan leleh baja yang umum

digunakan, antara 210 sampai 410 MPa. Untuk peraturan baja Indonesia, besarnya tegangan sisa ditentukan 70 MPa untuk profil tempa dan 115 MPa untuk penampang dilas.

2.1.4. Tekuk Lokal

Salah satu hal yang perlu diperhatikan pada elemen yang menderita gaya aksial tekan adalah penampang tidak mengalami kegagalan sebelum elemen tersebut mencapai kapasitasnya akibat tekuk. Tekuk terhadap elemen individual pada elemen tertekan (badan dan/atau sayap) disebut tekuk lokal. Hal ini tidak hanya berlaku pada kolom yang secara teoritis menderita gaya aksial murni, akan tetapi juga pada balok, dimana salah satu sisi seratnya menerima gaya aksial tekan akibat pelenturan, sebagaimana elemen sayap pada profil I yang tertekan dan berperilaku sebagaimana kolom. Persamaan dan teori yang memperhitungkan tekuk lokal diturunkan dari analisis stabilitas pelat.

Kriteria yang mengkatagorikan tekuk lokal adalah kompak, tidak kompak dan langsing. Profil kompak adalah profil yang rasio antara panjang elemen pelat terhadap tebalnya tidak melebihi λ_p , dan mampu mencapai plastisitas penuh tanpa terjadi tekuk lokal. Pada penampang tidak kompak, nilai rasio antara panjang elemen pelat terhadap tebalnya berada pada batasan lebih besar dari λ_p tetapi lebih kecil dari λ_r . Penampang tidak kompak ini setidaknya mampu mencapai kuat leleh tanpa terjadi tekuk. Sedangkan elemen dari penampang langsing akan tertekuk sebelum tegangan leleh tercapai dimanapun pada seratampang.

Pada elemen kolom, terjadinya tekuk lokal dicegah dengan adanya pembatasan nilai rasio antara lebar dan tebal pelat yang tidak boleh lebih besar dari λ_r . Sedangkan pada elemen balok yang menerima momen lentur, faktor kelangsingan elemen pelat akan membatasi kapasitas momen dari profil berdasarkan tekuk lokal, walaupun jarak pengaku lateral yang diberikan mencukupi untuk terjadinya momen plastis.

Nilai-nilai yang membatasi kriteria penampang kompak, tidak kompak dan langsing (λ_p dan λ_r) untuk masing-masing jenis elemen pada profil I dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perbandingan maksimum lebar terhadap tebal untuk elemen tertekan

Jenis Elemen	Perbandingan lebar terhadap tebal (λ)	Perbandingan maksimum lebar terhadap tebal	
		λ_p kompak	λ_r tak kompak
Elemen yang tidak diperkaku	b/t	-	$200/\sqrt{f_y}$
Elemen yang diperkaku dalam tekan murni	b/t	-	$665/\sqrt{f_y}$
Pelat sayap balok I dan kanal dalam lentur	b/t	$\frac{170}{\sqrt{f_y}}$	$\frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}}$
Bagian-bagian pelat badan dalam kombinasi tekan dan lentur	h/t_w	<p>untuk $\frac{Nu}{\phi_b Ny} \leq 0,125$</p> $\frac{1680}{\sqrt{f_y}} \left[1 - \frac{2,75 Nu}{\phi_b Ny} \right]$ <p>untuk $\frac{Nu}{\phi_b Ny} > 0,125$</p> $\frac{500}{\sqrt{f_y}} \left[2,33 - \frac{Nu}{\phi_b Ny} \right] \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$	$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} \left[1 - \frac{0,74 Nu}{\phi_b Ny} \right]$

2.1.5. Jenis Profil yang Umum Dipakai Sebagai Elemen Kolom dan Balok

Secara teoritis, semua jenis profil dapat digunakan sebagai elemen struktur dan mampu menahan beban yang bekerja, selama elemen tersebut didesain sesuai dengan perilaku masing-masing profil. Akan tetapi untuk keperluan praktis, masih banyak hal lain selain propertis tampang yang harus dimasukkan sebagai bahan pertimbangan dalam memilih profil yang akan dipakai, misalnya pemasangan sambungan, *availability*, jenis struktur, estetika, ekonomi, dan lain-lain.

Pertimbangan utama dalam memilih jenis profil yang akan digunakan sebagai elemen kolom adalah angka kelangsingan, dan kekakuan yang diperlukan. Hal ini disebabkan oleh kekuatan kolom yang berbanding terbalik dengan angka kelangsingan tersebut. Dengan kata lain, stabilitas kolom sangat tergantung pada kedua hal tadi. Sehingga memilih profil yang langsing, misalnya profil baja bulat semacam tulangan baja, akan memberikan tahanan yang lebih kecil daripada profil jenis lain dalam menahan beban aksial tekan, walaupun memiliki luas tampang yang sama akibat perbedaan angka kelangsingan.

Profil baja yang biasanya digunakan pada elemen tekan antara lain profil siku (*angle*) atau siku ganda (*double angle*) untuk batang tekan pada rangka batang ringan, atau diganti dengan profil T apabila diperlukan pengelasan pada sambungan. Profil kanal (*channel*) biasanya kurang memberikan hasil yang memuaskan apabila digunakan sebagai batang tekan, karena nilai radius girasi (r) terhadap sumbu minor yang sangat kecil, sehingga angka kelangsingannya menjadi sangat besar. Profil ini

dapat dipakai apabila diberikan pengaku lateral yang cukup pada sumbu lemahnya, sehingga angka kelangsingan dapat direduksi. Profil jenis I adalah profil yang paling sering dipakai sebagai elemen kolom karena nilai radius girasi terhadap kedua sumbu yang dimiliki oleh profil jenis ini jauh lebih seimbang dibandingkan profil jenis lain, sehingga jumlah pengaku lateral terhadap sumbu yang lebih lemah dapat dikurangi. Jenis profil pipa (*pipe*) juga sering digunakan pada beban aksial yang kecil atau menengah. Profil jenis ini mempunyai kelebihan yaitu mempunyai kekakuan yang sama pada segala arah. Profil lain adalah profil jenis persegi, akan tetapi sangat jarang digunakan, karena kesulitan dalam penyambungan, baik dengan baut maupun dengan paku keling. Akan tetapi dengan semakin berkembangnya teknologi pengelasan, kemungkinan profil jenis ini akan lebih sering digunakan pada masa akan datang. Sedangkan untuk keperluan yang lebih spesifik, berdasarkan pertimbangan-pertimbangan yang lain serta pengalaman, dapat digunakan kombinasi dari profil-profil yang telah dijabarkan diatas.

Pada elemen balok, profil bentuk I terbukti sebagai profil yang paling ekonomis, yang menggantikan profil kanal dan S untuk keperluan balok. Profil kanal masih dipakai untuk balok yang menerima beban kecil, misalnya gording, atau di tempat yang mengharuskan sayap profil yang dipakai sempit, tetapi tidak memiliki ketahanan yang cukup besar terhadap tekuk lateral. Profil I memiliki sayap yang lebih besar dibanding profil S, sehingga momen inersianya lebih besar dan mampu

menahan momen lentur yang lebih besar untuk berat profil yang sama, dan memiliki kekakuan terhadap tekuk lateral yang cukup.

2.1.6. Filosofi Desain

Filosofi desain LRFD yang juga diadopsi oleh kode desain Indonesia memiliki keunikan karena memberikan kehandalan yang seragam pada semua elemen struktur, berdasarkan pendekatan probabilitas pada faktor beban dan resistansi. Metode ini berusaha untuk mencapai penekanan yang pantas pada pembebanan dan perilaku struktur yang berbeda agar hasil desain dapat lebih mengefektifkan biaya dan handal.

Metode desain LRFD berdasar pada satu persamaan umum:

Kekuatan yang didesain \geq resistansi yang dibutuhkan.

atau

$$\phi P_n \geq \sum \delta_i Q_i \quad (2.1)$$

Resistansi yang dibutuhkan diambil dari kombinasi beban yang menghasilkan sistem pembebanan dengan nilai tertinggi, yang berupa momen, aksial dan geser terfaktor yang bekerja pada elemen struktur tertentu.

2.2. Kolom

2.2.1. Umum

Batang tekan terdiri dari beberapa jenis, dan kolom merupakan jenis yang paling sering ditemui. Beberapa jenis batang tekan yang lain antara lain batang/elemen atas dari suatu rangka batang (*truss*), elemen pengaku (*bracing*) dan flens tekan pada profil balok tempa dan profil balok built-up. Kolom biasanya diasumsikan sebagai

elemen vertikal yang lurus, dengan rasio antara panjang dan ketebalan profil relatif besar. Elemen vertikal yang pendek dan menderita gaya tekan biasanya dinamakan *struts*, atau secara sederhana disebut batang tekan.

2.2.2. Kolom Panjang, Pendek dan Moderat.

Kekuatan sebuah kolom, yaitu gaya aksial tekan maksimum yang mampu ditahan sampai kolom tersebut gagal, merupakan fungsi dari panjang kolom karena panjang kolom merupakan fungsi dari kelangsingan. Semakin panjang suatu kolom, maka semakin berkurang kekuatannya. Pada kolom yang sangat pendek, beban dapat terus ditambah sampai tegangan leleh baja tercapai, dan bahkan sampai fase *strain hardening*. Akan tetapi kekuatan kolom semakin berkurang seiring dengan pertambahan panjangnya, sehingga pada suatu titik dimana tegangan tekuk yang terjadi pada kolom tersebut lebih kecil daripada batas proporsional baja. Pada kondisi ini, kegagalan kolom dinamakan kegagalan elastik, dimana kekuatan kolom bergantung kepada kekakuannya (EI), dan tidak tergantung pada mutu bajanya.

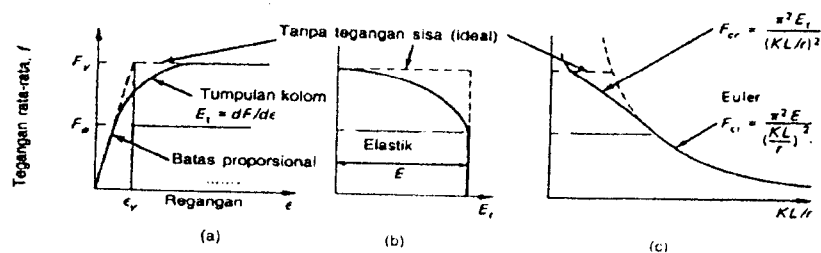
Kolom biasanya diklasifikasikan kedalam tiga katagori yaitu kolom panjang, pendek dan moderat, yang masing-masing diuraikan sebagai berikut :

1. Kolom panjang adalah kolom dimana tegangan tekuk aksial berada dibawah batas proporsional. Kolom jenis ini akan mengalami tekuk elastik, dan persamaan tekuk Euler memberikan hasil yang sangat memuaskan dalam perhitungan kekuatan kolom jenis ini.

2. Kolom pendek adalah kolom yang mampu menahan beban sampai tegangan yang terjadi mencapai batas proporsional tanpa terjadi tekuk. Kolom yang masuk pada jenis ini biasanya sangat pendek, sehingga sangat jarang digunakan pada keperluan praktis.
3. Kolom moderat adalah kolom dimana kekuatan batasnya tercapai bila tegangan pada sebagian dari serat pada tampangnya telah mencapai tegangan leleh dan sebagian yang lain belum leleh. Kolom jenis ini akan mengalami kegagalan selain akibat tekuk juga akibat pelelehan, dan jenis perilaku tekuknya disebut tekuk inelastik. Persamaan tekuk Euler dapat dipakai untuk memprediksikan kekuatan dari kolom jenis ini, akan tetapi dengan memodifikasikan nilai I menjadi I_e yaitu inersia efektif, dengan hanya memperhitungkan bagian dari tampang melintang yang belum leleh, atau dengan memodifikasi nilai modulus elastisitas (E) menjadi nilai modulus elastisitas tangen (E_t), akibat grafik tegangan-regangan yang telah menjadi nonlinier ketika batas proporsional belum tercapai. Sebagian besar kolom yang ada termasuk pada kategori ini.

2.2.3. Pengaruh Tegangan Sisa pada Kolom

Akibat dari tegangan sisa pada kekuatan kolom adalah adanya reduksi kekuatan



Gambar 2.2. Pengaruh tegangan sisa terhadap kekuatan kolom

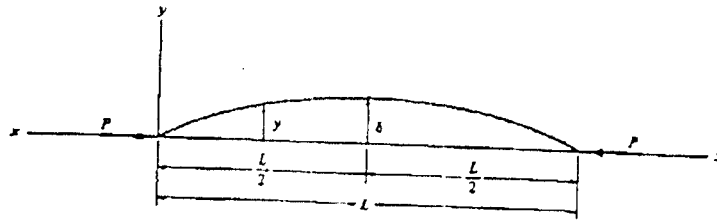
sebelum batas proporsional tercapai. Dapat dilihat pada gambar 2.2, bahwa garis putus-putus yang melengkung dibawah garis yang menunjukkan batas proporsional dan daerah plastis, merupakan reduksi dari kekuatan kolom. Sehingga perhitungan atau analisis kolom yang dilakukan pada tegangan yang terjadi di daerah ini harus dimodifikasi, menggunakan modulus tangent (M_t) atau momen inersia efektif (I_e) sebagaimana telah dijelaskan diatas.

2.2.4. Angka Kelangsingan Maksimum

Pada spesifikasi AISC (B7), juga pada draft peraturan baja Indonesia pada butir 9.1. ayat 2, dinyatakan bahwa nilai angka kelangsingan (KL/r) diharapkan tidak melebihi 200. Hal ini karena tegangan ijin kolom yang angka kelangsingannya melampaui 200 menjadi sangat kecil. Sebagai contoh, suatu kolom dari baja dengan modulus elastisitas 29000 ksi, akan memiliki tegangan ijin sebesar 3,76 ksi tanpa tergantung pada tegangan leleh baja tersebut. Sehingga dapat dilihat bahwa tegangan ijin yang dimiliki hanyalah sebuah fraksi kecil dari tegangan leleh baja, misalnya 36 ksi untuk baja A-36.

2.2.5. Tekuk Elastik Euler

Teori Euler menyatakan bahwa pada sebuah batang yang semula lurus kemudian mendapat pembebanan aksial tekan konsentrik, dimana semua serat dari tampang batang tersebut tetap dalam keadaan elastik sampai terjadinya tekuk, akan sedikit bengkok, sebagaimana digambarkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Batang tekan yang membengkok akibat gaya aksial konsentrik

Pada sembarang lokasi z , momen lentur M_z pada batang yang sedikit membengkok adalah:

$$M_z = Py \quad (2.2.a)$$

dan karena:

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (2.2.b)$$

maka:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -Py \quad (2.2.c)$$

Dengan mengalikan kedua ruas dengan $2dy$ diikuti dengan mengintegrasinya, maka persamaan tersebut menjadi:

$$EI 2 \frac{dy}{dx} d \frac{dy}{dx} = -2Py dy \quad (2.2.d)$$

$$EI \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = -Py^2 + C_1 \quad (2.2.e)$$

Dengan memberikan kondisi batas $y = \delta$, $dy/dx = 0$ (yaitu pada titik dimana defleksi bernilai maksimum, garis singgung kurvturnya mempunyai gradien = 0), konstanta C_1 akan bernilai $P\delta^2$ dan

$$EI \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = -Py^2 + P\delta^2 \quad (2.2.f)$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = \frac{P}{EI}(\delta^2 - y^2) \quad (2.2.g)$$

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{\frac{P}{EI}}\sqrt{\delta^2 - y^2} \quad (2.2.h)$$

$$\frac{dy}{\sqrt{\delta^2 - y^2}} = \sqrt{\frac{P}{EI}}dx \quad (2.2.i)$$

Apabila persamaan diatas diintegrasikan, maka akan menghasilkan

$$\arcsin \frac{y}{\delta} = \sqrt{\frac{P}{EI}}x + C_2 \quad (2.2.j)$$

Dengan memberikan kondisi batas $y = 0$ pada $x = 0$ (yaitu nilai defleksi = 0 pada ujung batang), maka $C_2 = 0$. Kolom tertekuk dalam bentuk kurva sinus yang digambarkan oleh persamaan

$$\arcsin \frac{y}{\delta} = \sqrt{\frac{P}{EI}}x \quad (2.2.k)$$

Pada kondisi batas $x = L/2$, $y = \delta$ (pada tengah bentang, nilai defleksi mencapai maksimum), akan menghasilkan persamaan

$$\frac{\pi}{2} = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (2.2.l)$$

Pada persamaan diatas, P adalah beban kritis yang menyebabkan tekuk, atau beban maksimum yang mampu didukung oleh kolom sebelum tekuk terjadi atau menjadi tidak stabil. Dengan mengeksplisitkan variabel P , didapatkan persamaan

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.2.m)$$

Karena

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.2.n)$$

$$r^2 = \frac{I}{A} \quad (2.2.o)$$

dan

$$I = r^2 A \quad (2.2.p)$$

maka

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (2.2.q)$$

Persamaan ini merupakan persamaan Euler, yang dapat menentukan gaya atau tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh kolom sesaat sebelum tekuk terjadi. Dari persamaan diatas, dapat diperhatikan bahwa beban tekuk atau tegangan tekuk tidak tergantung pada mutu bahan yang digunakan. Dan persamaan ini hanya dapat digunakan pada kolom dengan kondisi tahanan ujung berupa sendi-sendi, dimana tidak ada tahanan rotasional. Untuk kolom dengan kondisi tidak terdukung oleh sendi-sendi secara ideal, maka diperlukan modifikasi untuk mendapatkan hasil yang realistis. Modifikasi dilakukan dengan menambah faktor panjang efektif pada penyebut di ruas kanan persamaan tersebut atau dengan kata lain mengganti panjang aktual yang dipakai sebelumnya dengan panjang efektif, sehingga persamaan yang berlaku umum menjadi:

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad (2.2.r)$$

Untuk kolom dengan katagori kolom langsing, dimana faktor stabilitas lebih menentukan, tegangan ijin yang diperbolehkan dihitung dengan persamaan Euler ini, dengan menambahkan faktor keamanan. Sedangkan untuk kolom yang lebih pendek (moderat), maka persamaan ini dapat digunakan, dengan catatan diberikan modifikasi

pada nilai modulus elastisitas menjadi modulus elastisitas tangen (E_t) atau dengan menggunakan inersia efektif (I_{ef}) sebagaimana telah dibahas pada subbab 2.2.2.

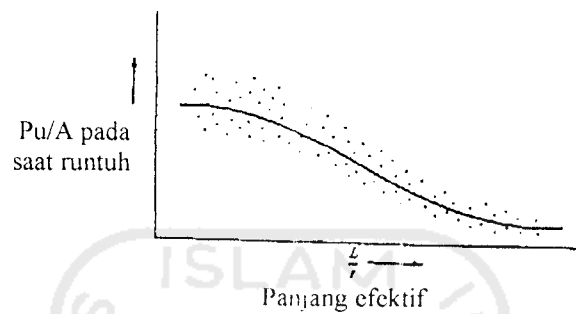
2.2.6. Pengembangan Rumus-rumus Kolom

Usaha-usaha telah banyak dilakukan untuk mengembangkan rumus-rumus yang akan digunakan dalam mendesain atau menganalisis kolom. Diantaranya rumus yang telah diturunkan oleh Leonhard Euler, sebagaimana telah diuraikan sebelumnya. Namun persamaan tersebut, hanya efektif digunakan pada kolom langsing, dimana faktor stabilitas lebih menentukan, dan terjadi tekuk elastis, dimana semua serat penampang masih dalam keadaan elastis, sehingga tidak ada masalah dalam menentukan nilai modulus elastisitas maupun inersia yang harus digunakan. Pada kolom yang lebih pendek, selain faktor stabilitas, faktor pelelehan baja juga memegang peranan yang cukup signifikan. Hal ini menimbulkan masalah, apabila akan menerapkan persamaan Euler dalam menentukan nilai E maupun I , karena nilai E pada keadaan dibawah batas proporsional sudah tidak memberikan hasil yang memuaskan, dan nilai I dimana sebagian serat telah leleh juga tidak sama dengan I ketika semua serat dalam penampang masih dalam keadaan elastis.

Usaha-usaha yang lain untuk menurunkan atau memodifikasi persamaan Euler juga telah dilakukan, namun hasil yang diberikan dari analisis dengan menggunakan persamaan-persamaan tersebut tidak memberikan hasil yang memuaskan atau memenuhi kondisi aktual. Sehingga desain kolom untuk keperluan praktis didasarkan

pada persamaan yang diturunkan secara empirik dari kurva hasil test dilaboratorium dengan akurasi yang cukup memuaskan.

Hasil test kolom di laboratorium dengan kelangsingan yang bervariasi tersebar



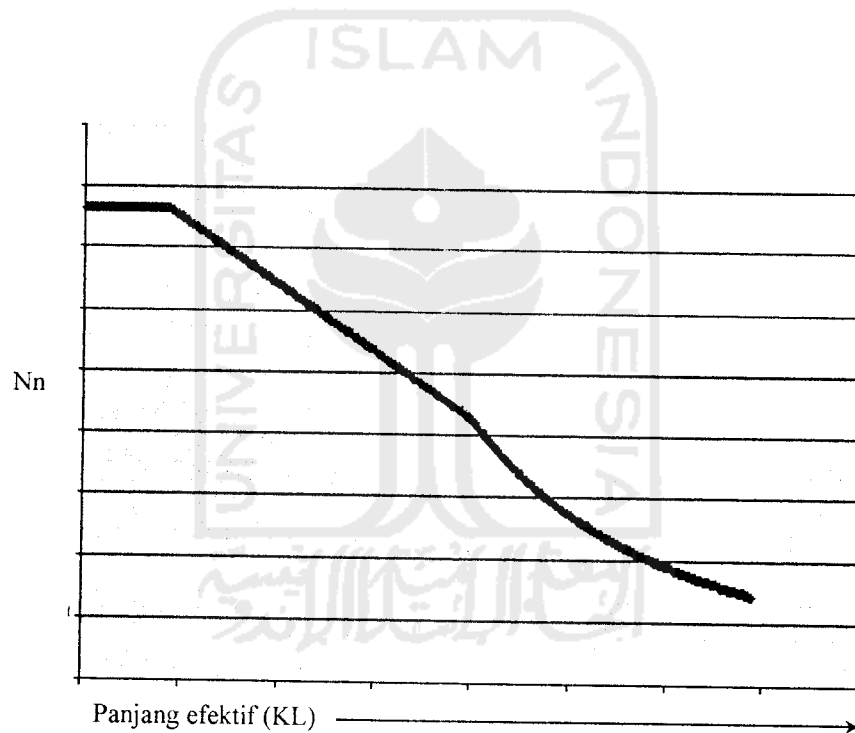
Gambar 2.4. Kurva kekuatan kolom

dalam range nilai yang digambarkan oleh titik-titik pada gambar 2.4. Hasil test ini tidak dalam kurva yang halus/beraturan karena adanya keterbatasan-keterbatasan dalam melakukan pengujian, misalnya sukarnya membuat pembebanan yang benar-benar sentris secara sempurna, kurang seragamnya mutu bahan yang diuji, variasi tegangan sisa, kondisi tahanan ujung yang tidak sama dan lain-lain. Cara yang paling umum digunakan adalah dengan menurunkan persamaan yang memberikan kurva yang mendekati rata-rata dari hasil-hasil pengujian tersebut.

Besarnya tegangan leleh penampang baja merupakan faktor yang penting pada kolom pendek, karena tegangan yang menyebabkan kegagalan (failure) kolom pendek tersebut mendekati tegangan leleh. Untuk kolom dengan kelangsingan moderat pengaruh tegangan leleh pada tegangan yang menyebabkan kegagalan sedikit berkurang. Pada kolom jenis ini, faktor tegangan sisa lebih berpengaruh pada

kemampuan kolom, sementara pada kolom langsing, tegangan leleh penampang sama sekali tidak berpengaruh. Pada kolom langsing kondisi tahanan ujung adalah pemegang peranan yang paling penting dalam penentuan kemampuan kolom.

Untuk rumus-rumus dari kode desain yang dianut di Indonesia juga didapatkan dari hasil empirik, sebagaimana telah dijelaskan diatas. Persamaan-persamaan tersebut didasarkan pada grafik yang telah diperhalus yang bernilai mendekati rata-



Gambar 2.5. Kurva kekuatan kolom yang telah diperhalus rata hasil test di laboratorium, sebagaimana gambar 2.5. Pada grafik tersebut jelas terlihat 3 segmen yang berbeda, masing-masing mewakili kolom pendek, moderat dan langsing.

Rumus-rumus yang digunakan adalah :

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} \quad (2.3)$$

$$f_{cr} = \frac{f_y}{\omega} \quad (2.4)$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \frac{kL}{r} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (2.5)$$

$$\lambda_c \leq 0.25 \rightarrow \omega = 1 \quad (2.6)$$

$$0.25 < \lambda_c < 1.2 \rightarrow \omega = \frac{1.43}{1.6 - 0.67\lambda_c} \quad (2.7)$$

$$\lambda_c \geq 1.2 \rightarrow \omega = 1.25\lambda_c^2 \quad (2.8)$$

N_n = daya dukung nominal komponen struktur tekan

A_g = luas brutto komponen struktur tekan

f_{cr} = tegangan kritis penampang

f_y = tegangan leleh material

2.3. Balok

2.3.1. Umum

Balok secara umum didefinisikan sebagai elemen yang meneruskan gaya yang bekerja padanya kepada elemen yang lain melalui tegangan lentur. Biasanya beban atau gaya yang bekerja padanya adalah gaya transversal, atau momen, baik berupa kopel maupun momen ujung. Posisi yang paling umum ditemui pada balok adalah horizontal. Jenis-jenis balok yang umum ditemui antara lain *joist*, *lintel*, *spandrel*, *stringer* dan balok lantai.

2.3.2. Tekuk Lateral

Sebagian besar balok baja yang digunakan, diberikan tumpuan atau pengaku lateral pada sayap tekannya, untuk mencegah atau meminimalisasikan kemungkinan

terjadinya tekuk lateral. Pada balok yang ditumpu lateral secara kontinu, misalnya pada struktur balok lantai, dimana pelat lantai dianggap dapat berfungsi sebagai pengaku lateral, maka tegangan yang mampu ditahan pada serat tekan maupun tariknya akan sama. Apabila jarak antara tumpuan lateral semakin diperbesar, maka permasalahan yang akan ditemui akan sama dengan permasalahan yang ditemui pada kasus kolom, yang telah diketahui bahwa semakin langsing suatu kolom, maka semakin kecil gaya aksial yang mampu ditahannya. Demikian juga pada sayap tekan pada balok baja, apabila sayap tekan tersebut cukup panjang dan cukup langsing, maka kemungkinan terjadinya tekuk akan semakin besar, kecuali tumpuan lateral diberikan dengan mencukupi.

Ditinjau dari kemampuan dalam menahan momen sebelum terjadinya tekuk lateral, balok dibagi dalam tiga katagori atau zone yang tergantung pada kondisi tumpuan atau pengaku lateralnya, masing-masing kondisi tekuk plastis, tekuk inelastis, dan tekuk elastis.

2.3.3. Tekuk elastis, inelastis dan plastis.

Pada kondisi tekuk plastis, momen plastis penuh dapat dicapai tanpa terjadinya tekuk lateral, dengan syarat balok tersebut mempunyai dukungan lateral yang kontinu, atau terdapat dalam jarak yang kurang dari yang telah dispesifikasikan (L_p) dan penampang profil kompak. Pada kondisi ini, analisis plastis dapat diterapkan dalam desain atau analisis kekuatan balok.

Batasan jarak antara dukungan lateral agar kondisi tekuk elastis dapat tercapai yang berlaku untuk profil I dan kanal ganda adalah:

$$L_b \leq L_p \quad (2.9)$$

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2.10)$$

L_b = jarak antara dukungan lateral atau panjang bentang tanpa dukungan lateral.

Sedangkan apabila kondisi ini terpenuhi, maka kuat nominal komponen struktur terhadap lentur adalah

$$M_n = M_p \quad (2.11)$$

Apabila jarak dari dukungan lateral diperbesar dari nilai yang telah dispesifikasikan tadi, maka sifat tekuk balok tersebut jatuh pada katagori tekuk inelastis. Pada kondisi ini, balok dapat dibebani sampai beberapa bagian serat tampang tekan mencapai tegangan leleh. Analisis plastis tidak dapat diterapkan disini, karena rotasi yang terjadi tidak mencukupi agar terjadi redistribusi momen. Apabila jarak dukungan lateral semakin diperbesar, maka tahanan (resistansi) momen semakin menurun, sampai dengan jarak antara dukungan lateral dimana tekuk terjadi sebelum tegangan leleh dicapai oleh serat tampang (L_r), yang disebut zone tekuk elastis.

Nilai L_r untuk profil I dan kanal ganda dapat dihitung dengan persamaan:

$$L_r = r_y \left[\frac{X_1}{f_L} \right] \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 f_L^2}} \quad (2.12)$$

$$f_L = f_y - f_r \quad (2.13)$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} \quad (2.14)$$

$$X_2 = 4 \left(\frac{S}{GJ} \right)^2 \frac{I_w}{I_y} \quad (2.15)$$

I_w = konstanta puntir lengkung

J = konstanta puntir torsi

Dan kuat nominal komponen struktur terhadap momen apabila $L_p \leq L \leq L_r$ dapat dihitung dengan persamaan:

$$M_u = C_b \left[M_r + (M_p - M_r) \frac{(L_r - L)}{(L_r - L_p)} \right] \leq M_p \quad (2.16)$$

C_b = koefisien lentur (*bending coefficient*)

Ketika tekuk terjadi pada saat tegangan lentur belum mencapai tegangan leleh dimanapun pada seratampang, maka kondisi ini disebut kondisi tekuk elastis, dimana jarak tumpuan lateral relatif besar ($L \geq L_r$), sehingga resistensi momen relatif kecil dibandingkan dengan resistensi dari profil yang sama namun mendapatkan dukungan lateral yang lebih mencukupi. Apabila momen terus diperbesar, maka balok akan terdefleksi secara transversal, sampai dengan tercapainya momen kritis M_{cr} yang dihitung menggunakan persamaan

$$C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L} \right)^2 I_y I_w} \quad (2.17)$$

Pada titik ini, profil balok baja tersebut akan terpuntir dan sayap tekan akan berdefleksi secara lateral.

2.3.4. Pengaruh tekuk lokal

Selain pengaruh tekuk lateral, tekuk lokal juga memegang peranan penting dalam menentukan besarnya kuat lentur nominal suatu komponen struktur. Kuat lentur nominal berdasarkan tekuk lokal ini tergantung pada kondisi pelat penyusun elemen komponen struktur, yang persamaannya diturunkan dari persamaan stabilitas pelat. Nilai-nilai kuat lentur nominal ini juga dibagi dalam tiga zone, yaitu zone penampang kompak, tak kompak dan penampang langsing, sebagaimana telah dibahas pada sub bab 2.1.4.

Untuk penampang kompak ($\lambda \leq \lambda_p$), kapasitas momen penampang adalah

$$M_n = M_p \quad (2.18)$$

Untuk penampang tidak kompak, yang memenuhi $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, maka kapasitas momen penampang adalah

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (2.19)$$

sedangkan untuk penampang langsing dimana $\lambda_r < \lambda$, kapasitas momen dihitung menggunakan persamaan:

$$M_n = M_r \left(\frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.20)$$

2.3.5. Pengaruh tegangan residu pada perilaku lentur.

Pada umumnya, kita mengasumsikan bahwa pada elemen yang menderita tegangan lentur, leleh pertama terjadi ketika serat terluar telah mencapai tegangan

leleh dan perilaku lentur diatas tegangan leleh bersifat nonlinier. Akan tetapi berdasarkan kondisi yang sebenarnya, perilaku nonlinear tersebut mulai terjadi lebih awal akibat pengaruh tegangan residu atau tegangan sisa (F_r), sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Variasi dalam besarnya tegangan sisa merupakan hal yang sangat umum, mengingat besarnya tegangan tersebut merupakan fungsi dari dimensi pelat komponen yang ditinjau.

Leleh pertama dan titik awal perilaku lentur nonlinier dimulai pada tegangan yang terjadi mencapai tegangan leleh awal / *initial yield stress* (F_{yi}), yang didefinisikan secara matematis sebagai:

$$F_{yi} = F_y - F_r \quad (2.21)$$

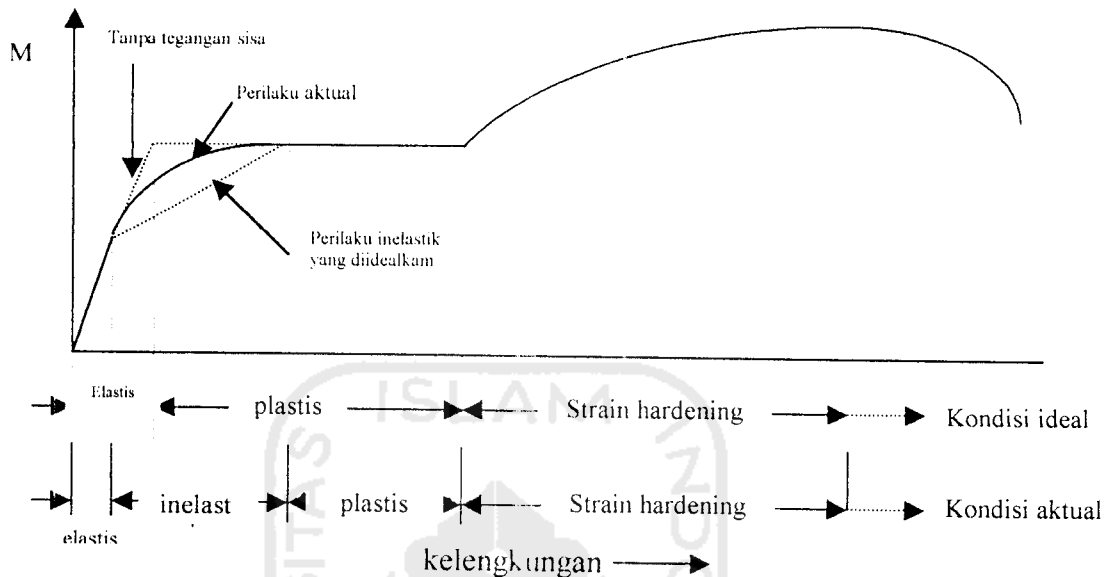
Walaupun perubahan kelengkungan dipengaruhi secara signifikan oleh keberadaan tegangan residu, kekuatan lentur profil baja yang diidealisasikan pada batas leleh tidak akan terpengaruh karena tegangan leleh yang seragam akan tercapai pada suatu nilai kelengkungan yang terjadi pada serat terluar sebagaimana terlihat pada gambar 2.6. Dan walaupun secara analitis tidak terlalu tepat, adalah sangat beralasan untuk mendeskripsikan hubungan momen yang mampu ditahan dengan tegangan pada saat leleh sebagai:

$$M_y = F_y \cdot S \quad (2.22)$$

Akan tetapi perlu diingat bahwa:

1. Pelelehan telah terjadi dalam elemen, dimana momen yang terjadi kemungkinan masih dibawah M_y

2. Perilaku balok diatas F_{yi} (tegangan leleh awal) tidak linier



Gambar 2.6. Kurva hubungan momen-kelengkungan yang diidealkan

Tegangan sisa bukanlah merupakan pertimbangan utama dalam teori lentur akan tetapi memainkan peranan yang sangat penting dalam analisis stabilitas. Batasan yang menandai mulainya perilaku nonlinier dinamakan sebagai batas proporsional (F_p), dan dalam teori stabilitas hal ini diasumsikan terjadi ketika tegangan lentur pada serat terluar mencapai nilai sekitar $0,5 F_y$.

2.3.6. Pelenturan terhadap sumbu lemah

Pada kasus-kasus pelenturan, ada dua faktor yang diperhitungkan dan akan mempengaruhi kapasitas momen nominal pada profil tempa, yaitu kekompakan maupun kondisi dukungan lateral pada sayap tekan. Akan tetapi, kedua kasus ini hanya dipertimbangkan apabila kita meninjau pelenturan terhadap sumbu kuat saja.

Apabila pelenturan terjadi terhadap sumbu lemah, yang mempunyai faktor bentuk (*shape factor*) yang lebih tinggi, kegagalan yang terjadi akibat tekuk lateral torsional tidak akan terjadi pada profil simetris. Sehingga kondisi batas pada pelenturan terhadap sumbu lemah adalah tercapainya kapasitas momen plastis dan tekuk lokal akibat instabilitas pelat penyusun elemen balok tersebut, tergantung pada kondisi yang tercapai lebih dahulu.

2.4. Balok kolom

2.4.1. Umum

Elemen-elemen struktur menahan berbagai jenis kombinasi tegangan yang diberikan padanya pada kondisi pembebanan normal, dan yang paling umum diantaranya adalah kombinasi tegangan aksial dan tegangan lentur. Pada kombinasi ini juga masih terbagi dua, yaitu aksial tarik dan lentur serta aksial tekan dan lentur. Sedangkan yang paling penting dan merupakan perhatian utama adalah kombinasi tegangan aksial tekan dan lentur. Hal ini disebabkan oleh tendensi dari kombinasi gaya-gaya ini untuk memperbesar tegangan, dimulai dengan adanya defleksi akibat momen lentur, kemudian terjadinya eksentrisitas pada gaya aksial yang pada gilirannya akan memperbesar momen akibat momen sekunder. Apabila momen diperbesar, maka defleksi yang menyebabkan eksentrisitas semakin besar juga, dan momen terus membesar, seterusnya sampai terjadi keseimbangan atau struktur runtuh.

Mengingat kembali ke kasus kolom, dimana ada kecenderungan sebuah kolom untuk tertekuk secara lateral, maka penekanan pada kombinasi gaya aksial tekan dan momen lentur sangat beralasan.

2.4.2. Mode Keruntuhan Potensial pada Balok Kolom

Karena balok kolom merupakan campuran dari elemen balok dan kolom, maka mode kegagalan pada balok kolom merupakan gabungan dari mode kegagalan pada balok dan kolom. Apabila gaya aksial lebih mendominasi, maka mode keruntuhan lebih mendekati mode keruntuhan kolom, demikian juga bila momen yang mendominasi, maka mode keruntuhan lebih mendekati mode keruntuhan balok murni.

Didasari kenyataan bahwa mekanisme keruntuhan yang umum pada balok dan kolom dipengaruhi oleh tekuk pada elemen yang menderita tegangan tekan, maka stabilitas lateral pada balok kolom merupakan penekanan utama pada desain dan analisis.

Karena adanya penambahan momen yang potensial akibat momen sekunder, maka diperlukan analisis orde kedua yang digunakan dalam analisis dan desain. Akan tetapi cara ini mempunyai kelemahan karena prosedur perhitungan menjadi sangat panjang dan bertele-tele. Sehingga dicari pemecahan untuk menyederhanakan prosedur dengan persamaan interaksi, yang telah memperhitungkan faktor perbesaran / amplifikasi yang mewakili analisis orde kedua.

2.4.3. Pengembangan Persamaan Interaksi

Dibawah tegangan kombinasi, prinsip superposisi dapat diberlakukan dimana telah diketahui bahwa tegangan yang mempunyai tipe sama dapat dijumlahkan atau disubstraksikan secara numeris. Dengan meninjau kombinasi dari tegangan aksial dan tegangan lentur, penggunaan prinsip superposisi akan menghasilkan persamaan tegangan kombinasi sebagai:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I} \quad (2.23)$$

Persamaan ini diterima secara meluas, dan merupakan dasar dari pengembangan persamaan interaksi.

Permasalahan yang timbul adalah persamaan ini tidak dapat digunakan untuk mengkalkulasi jumlah tegangan atau mendesain menggunakan metode LRFD, karena adanya perbedaan faktor resistansi pada kapasitas gaya aksial maupun kapasitas momen. Sehingga persamaan dimodifikasi menjadi:

$$\frac{Pu}{\phi_c Pn} + \frac{Mu}{\phi_b Mn} \leq 1,0 \quad (2.24)$$

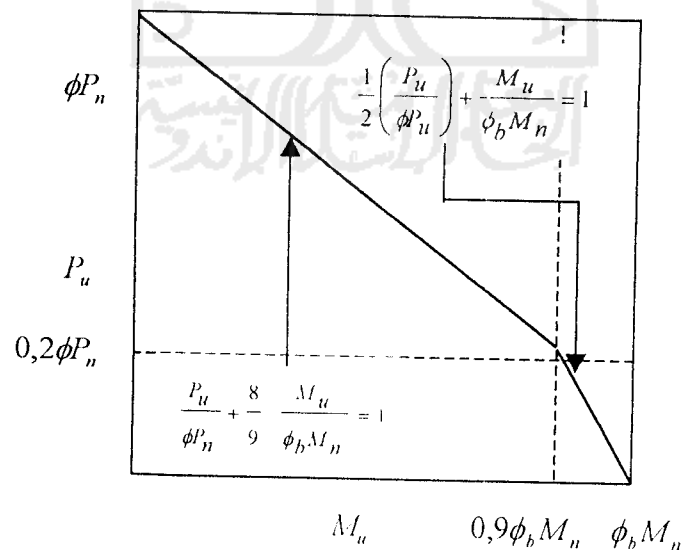
Untuk menangani elemen struktur yang menderita gaya kombinasi aksial tekan dan lentur, dua persamaan interaksi yang memperhitungkan perilaku balok kolom adalah:

$$\frac{Pu}{\phi_c Pn} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mu_x}{\phi_b Mn_x} + \frac{Mu_y}{\phi_b Mn_y} \right) \leq 1,0 \quad (2.25)$$

Persamaan ini diperuntukkan bagi elemen yang menerima tegangan kombinasi, dimana tegangan aksial bekerja secara signifikan (ketika rasio $\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 2,0$). Apabila rasio tegangan aksial yang dibutuhkan untuk mendesain kapasitas aksial menurun ($\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 2,0$), maka persamaan interaksi yang digunakan adalah:

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{u_x}}{\phi_b M_{n_x}} + \frac{M_{u_y}}{\phi_b M_{n_y}} \right) \leq 1,0 \quad (2.26)$$

Persamaan yang pertama memeriksa stabilitas di dekat tengah bentang dan juga kekuatan yang dibutuhkan pada ujung balok kolom. Sedangkan persamaan yang kedua mengutamakan pemeriksaan stabilitas balok kolom, karena balok kolom ini didominasi oleh tegangan lentur sehingga perilakunya yang telah mendekati balok murni. Penggunaan persamaan-persamaan ini diilustrasikan pada gambar 2.11.



Gambar 2.7. Penggunaan persamaan interaksi balok kolom