

TUGAS AKHIR
STUDI LITERATUR
KEKUATAN KOLOM BAJA
TERHADAP PEMBEBANAN EKSENTRIS
PADA KONDISI TEKUK INELASTIS



Disusun oleh :

AKBAR HARI SUSANTO

No. Mhs. : 92310089

NIRM : 920051013114120089

DEZY PATWOKO

No. Mhs. : 92310261

NIRM : 920051013114120261

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
1998

TUGAS AKHIR

STUDI LITERATUR

KEKUATAN KOLOM BAJA

TERHADAP PEMBEBANAN EKSENTRIS

PADA KONDISI TEKUK INELASTIS

Diajukan untuk melengkapi tugas-tugas dan memenuhi syarat-syarat guna mencapai gelar sarjana Teknik Sipil

Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh :

Akbar Hari Susanto

No. Mhs. : 92310089
NIRM : 920051013114120089

Dezy Patwoko

No. Mhs. : 92310261
NIRM : 920051013114120261

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

STUDI LITERATUR

KEKUATAN KOLOM BAJA TERHADAP PEMBEBANAN

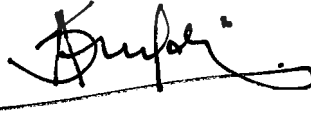
EKSENTRIS PADA KONDISI TEKUK INELASTIS

Disusun oleh :


1. Nama : Akbar Hari Susanto
No. Mhs. : 92310089
NIRM : 920051013114120089
2. Nama : Dezy Patwoko
No. Mhs. : 92310261
NIRM : 920051013114120261

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

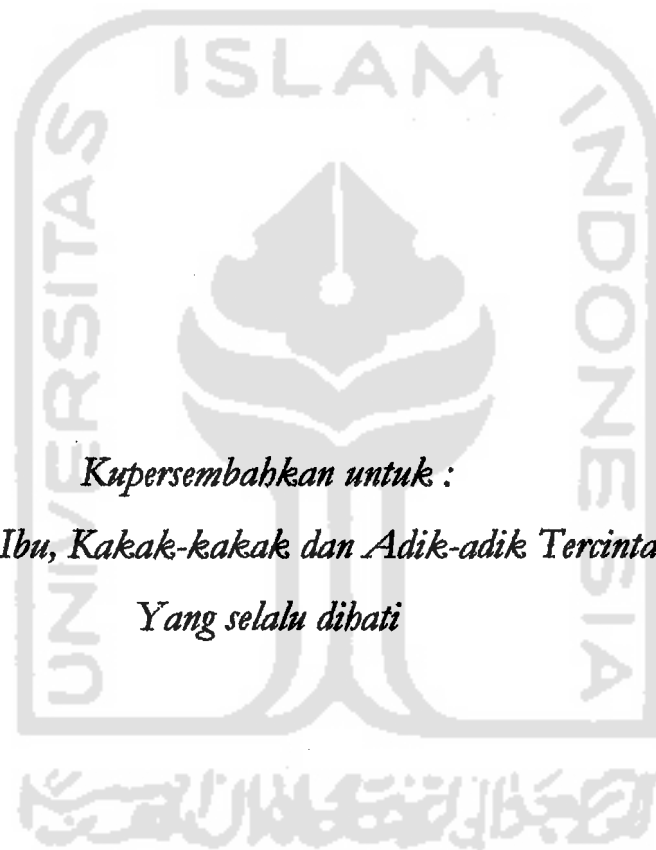
1. Ir. H. M. Samsudin, MT
Dosen Pembimbing I


Tanggal : 15 - 08 - '98

2. Ir. Suharyatmo, MT
Dosen Pembimbing II


Tanggal : 15/8/98

LEMBAR PERSEMBAHAN



Kupersembahkan untuk :

Bapak, Ibu, Kakak-kakak dan Adik-adik Tercinta

Yang selalu dihati

*Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), kerjakanlah dengan
sungguh-sungguh urusan yang lain.*

Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap.

(Q.S. Alam Nasyroh : 7,8)

Tiada daya dan upaya melainkan dengan kekuatan Allah SWT.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr. wb.

Syukur alhamdulillah dipanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusunan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan sesuai dengan yang diharapkan.

Tugas Akhir merupakan salah satu tugas wajib yang ditentukan dalam kurikulum Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, dan merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar kesarjanaan.

Tugas Akhir yang mengambil topik analisa kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis disusun dengan harapan dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan suatu masukan dalam bidang struktur.

Pada kesempatan ini kami ucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Atas jasa-jasa beliau tersebut di bawah ini diucapkan terima kasih kepada yang terhormat :

1. Bapak Ir. Widodo, MSCE, PhD., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. Tadjuddin BMA, MS., selaku Ketua Jurusan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
3. Bapak Ir. H. M. Samsudin, MT., selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir.

4. Bapak Ir. Suharyatmo, MT, selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir.
5. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya Tugas Akhir dari awal pencarian judul hingga terselesaikan penyusunannya.

Semoga amal baik yang telah diberikan, diterima oleh Allah SWT serta mendapatkan balasan yang berlimpah, Amin.

Disadari sepenuhnya bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga diharapkan adanya masukan berupa kritik dan saran yang dapat lebih menyempurnakan. Akhirnya, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak pada umumnya dan mahasiswa teknik sipil pada khususnya.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, Juli 1998

Penyusun,

DAFTAR ISI

	halaman :
Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan.....	ii
Lembar Persembahan.....	iii
Kata Pengantar.....	iv
Daftar Isi.....	vi
Daftar Gambar.....	ix
Daftar Tabel.....	xi
Daftar Notasi.....	xii
Intisari.....	xiii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Metodologi Penelitian.....	5
1.5. Tinjauan Pustaka.....	5
BAB II. LANDASAN TEORI.....	9
2.1. Kolom.....	9
2.2. Tekuk Inelastis.....	12

2.2.1. Hubungan tegangan-regangan.....	14
2.2.2. Hubungan tegangan-angka kelangsingan.....	16
2.3. Kekuatan Kolom Baja.....	18
2.3.1. Tegangan residu.....	18
2.3.2. Kurva kolom.....	20
2.3.3. Kurva kekuatan dasar dari SSRC.....	20
2.3.4. Perilaku pembebanan.....	31
2.4. Prinsip Perencanaan Kolom Inelastis.....	32
2.4.1. Teori Tangen Modulus.....	33
2.4.2. Faktor $\tau = E_t / E$	37
2.5. Kolom dengan Pembebanan Eksentris.....	38
2.6. Daerah Kern.....	42
BAB III. METODOLOGI.....	45
3.1. Umum.....	45
3.2. Langkah Perhitungan.....	45
BAB IV. PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1. Umum.....	49
4.2. Perhitungan.....	49
4.3. Pembahasan.....	76
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	82

5.1. Umum.....	82
5.2. Kesimpulan.....	82
5.3. Saran.....	84

Daftar Pustaka

Lampiran



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Perilaku kolom.....	7
Gambar 2.1. Tekuk Euler pada kolom panjang.....	11
Gambar 2.2. Batas keadaan kolom sedang dan kolom pendek.....	12
Gambar 2.3. Hubungan tegangan-regangan.....	14
Gambar 2.4. Grafik hubungan tegangan-angka kelangsingan.....	17
Gambar 2.5. Distribusi tegangan residu.....	19
Gambar 2.6. Pengaruh tegangan residu pada kurva tegangan-regangan rata-rata.....	21
Gambar 2.7. Bagian penampang yang telah meleleh.....	23
Gambar 2.8. Diagram tegangan pada penampang yang mengandung tegangan residu pada kondisi inelastis.....	27
Gambar 2.9. Kurva kekuatan kolom profil yang memiliki tegangan residu pada ujung sayap.....	28
Gambar 2.10. Distribusi tegangan akibat beban eksentris.....	32
Gambar 2.11. Prinsip kerja Teori Tangan Modulus.....	34
Gambar 2.12. Mekanisme kerja Teori Tansen Modulus.....	36
Gambar 2.13. Distribusi tegangan akibat beban eksentris.....	39
Gambar 2.14. Penampang lintang profil W.....	40
Gambar 2.15. Daerah kern penampang segiempat.....	43
Gambar 2.16. Batas daerah kern penampang profil W.....	44

Gambar 4.1. Batas daerah kern profil W 18 x 35.....50

Gambar 4.2. Grafik hubungan tegangan kritis-angka kelangsingan.....74

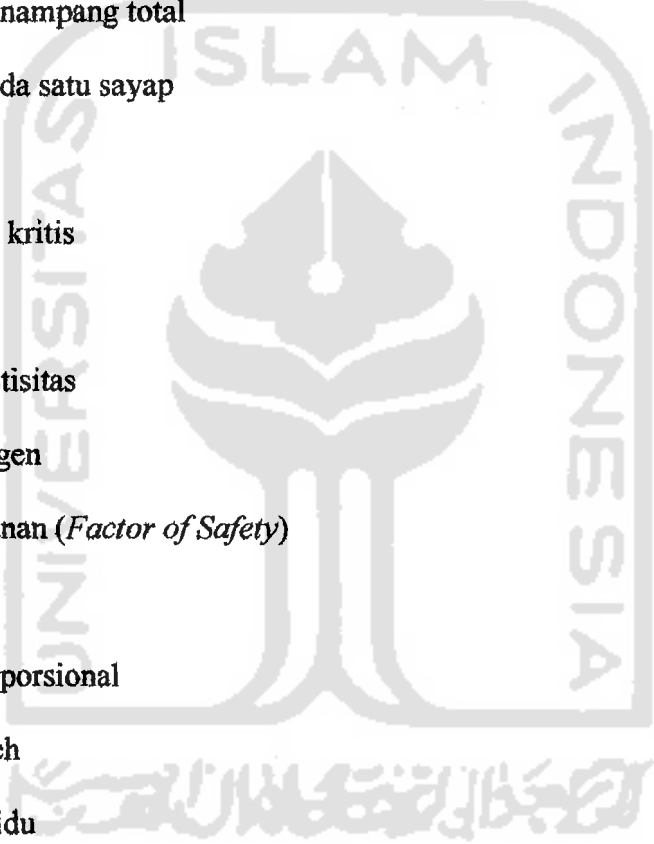
Gambar 4.3. Grafik hubungan beban kritis-angka kelangsingan.....75



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Koefisien k untuk beberapa kondisi ujung.....	46
Tabel 4.1. Perhitungan modulus tangen (E_t).....	52
Tabel 4.2. Perhitungan angka kelangsingan terjadi.....	53
Tabel 4.3. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,00b = 0$ cm.....	64
Tabel 4.4. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,001b = 0,01524$ cm.....	65
Tabel 4.5. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,002b = 0,03048$ cm.....	66
Tabel 4.6. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,003b = 0,04572$ cm.....	67
Tabel 4.7. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,004b = 0,06960$ cm.....	68
Tabel 4.8. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,005b = 0,07620$ cm.....	69
Tabel 4.9. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,1b = 1,524$ cm.....	70
Tabel 4.10. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,12b = 1,8288$ cm.....	71
Tabel 4.11. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,14b = 2,1336$ cm.....	72
Tabel 4.12. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,1667b = 2,54$ cm.....	73

DAFTAR NOTASI



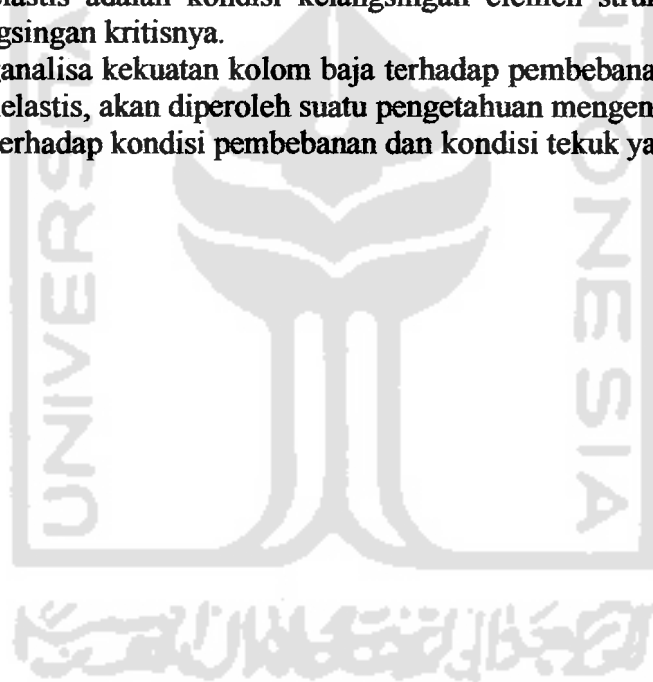
A	= Luas penampang
A_e	= Luas daerah penampang yang belum mencapai tegangan leleh
A_g	= Luas bruto penampang total
A_f	= Luas bruto pada satu sayap
A_w	= luas badan
C_c	= Kelangsingan kritis
e	= eksentrisitas
E	= Modulus Elastisitas
E_t	= Modulus Tangen
FS	= Angka keamanan (<i>Factor of Safety</i>)
F_a	= Tegangan ijin
F_p	= Tegangan proporsional
F_y	= Tegangan leleh
F_r	= Tegangan residu
F_{cr}	= Tegangan kritis
I	= Inersia
I_e	= Inersia penampang efektif
k	= Kondisi ujung perletakan
l	= Panjang kolom
r	= Jari-jari kelembaman (<i>Radius of Gyration</i>)

INTISARI

Penggunaan baja sebagai elemen struktur dewasa ini mengalami perkembangan yang pesat. Terbukti dengan banyaknya konstruksi bangunan gedung-gedung bertingkat dan konstruksi sederhana lainnya yang menggunakan baja sebagai elemennya.

Kolom pada bangunan merupakan elemen struktur yang memikul beban utama. Adakalanya beban yang bekerja pada kolom tidak bekerja secara terpusat atau konsentris, melainkan terdapat eksentrisitas. Dengan demikian, perlu adanya pemahaman tersendiri mengenai kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris ini. Disamping itu, menurut AISC, kolom baja akan mengalami tekuk, yakni kondisi tekuk elastis dan kondisi tekuk inelastis. Kondisi tekuk ini dipengaruhi oleh angka kelangsingan kolom. Dimana tekuk elastis adalah kondisi kelangsingan elemen struktur kolom lebih besar dari pada kelangsingan kritisnya, sedangkan tekuk inelastis adalah kondisi kelangsingan elemen struktur kolom lebih kecil dari kelangsingan kritisnya.

Dengan menganalisa kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis, akan diperoleh suatu pengetahuan mengenai sifat dan perilaku kolom baja terhadap kondisi pembebanan dan kondisi tekuk yang terjadi.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Baja merupakan bahan bangunan yang sudah lama digunakan untuk elemen suatu struktur. Seiring dengan perkembangan jaman dan kemajuan ilmu pengetahuan serta penguasaan teknologi, penggunaan baja sebagai bahan bangunan ataupun konstruksi-konstruksi yang lain, telah mengalami perkembangan yang pesat.

Penggunaan baja sebagai elemen struktur dewasa ini, lebih sering diterapkan pada struktur-struktur tertentu seperti bangunan bertingkat banyak, hangar pesawat terbang, gudang penyimpanan barang, menara transmisi listrik, jaringan pipa, rel kereta api, jembatan dengan bentang yang panjang, dan lain-lain. Dibandingkan dengan bahan bangunan yang lain seperti beton atau kayu, pemilihan baja sebagai elemen suatu struktur tertentu adalah sesuai dengan kebutuhan. Sehingga penggunaan baja sebagai bahan bangunan ataupun konstruksi-konstruksi yang lain ini, terdapat pertimbangan-pertimbangan tertentu mengenai mengapa dipilihnya bahan baja sebagai elemen struktur.

Keuntungan yang diperoleh dari penggunaan baja sebagai elemen struktur bangunan ataupun konstruksi-konstruksi yang lain adalah :

- a) Baja mempunyai kekuatan yang cukup tinggi dan merata sehingga dapat menghasilkan struktur bangunan yang mempunyai penampang relatif kecil dan ringan dibanding dengan struktur dengan bahan yang lain.
- b) Baja mempunyai sifat praktis baik dalam pemasangan maupun pengangkutan. Struktur baja dapat dibongkar dan dipasang kembali tanpa mengurangi kekuatan bahan yang berarti.
- c) Baja mempunyai sifat elastisitas yang tinggi sehingga setelah terjadi pembebanan sampai batas tertentu, struktur masih dapat kembali ke bentuk semula.
- d) Baja mempunyai sifat daktilitas yang tinggi sehingga struktur baja mempunyai kemampuan berdeformasi secara nyata baik dalam tegangan maupun kompresi sebelum terjadi kegagalan.
- e) Baja dapat dibuat dengan presisi dan akurasi ukuran yang tinggi sehingga tidak terlalu menemui kesulitan dalam pemasangan yang tentunya akan terdapat penghematan waktu dan biaya.

Penggunaan baja sebagai bahan struktur bangunan dibagi menjadi tiga kategori umum, yaitu :

- a) Struktur rangka (*frame structure*)
- b) Struktur selaput (*shell structure*)
- c) Struktur gantung (*suspension structure*)

Struktur baja yang sering digunakan adalah sebagai struktur rangka. Konstruksi rangka jembatan, rangka atap, rangka menara dan konstruksi bangunan dengan sistem rangka (*frame*) lainnya terdapat batang desak. Suatu

elemen struktur yang memikul atau menerima beban aksial yang bekerja mendesak batang tersebut pada arah memanjang sumbu batang, maka batang tersebut adalah batang desak.

Kolom dari suatu bangunan merupakan salah satu elemen dari struktur rangka yang mengalami desak dan pemakaiannya selalu dihubungkan dengan elemen struktur yang lain yaitu balok sebagai satu kesatuan baik sebagai portal ruang maupun portal bidang. Kolom berfungsi menahan gaya-gaya yang bekerja pada kolom itu sendiri dan menyalurkan gaya-gaya yang bekerja pada balok ke fondasi. Sehingga desain dan perencanaan kolom sangat perlu diperhatikan karena berhubungan erat dengan kestabilan bangunan.

Akibat beban yang bekerja pada batang desak yang ditahan oleh luasan tampang dari batang desak tersebut akan terjadi tegangan pada bahan. Tegangan yang terjadi ini harus lebih kecil dari tegangan dasar atau tegangan ijin bahan yang digunakan. Biasanya sebelum tegangan ijin tercapai, batang tersebut mengalami pembengkokan atau tekuk, dan tekuk inilah yang biasanya merusak suatu elemen struktur yang mengalami gaya desak. Hal ini disebabkan karena batang desak yang bekerja pada umumnya cukup langsing sehingga memungkinkan terjadinya bahaya tekuk.

Disamping itu, perilaku pembebanan pada kolom akan menentukan gaya-gaya yang bekerja pada penampang kolom. Pembebanan aksial konsentris akan menghasilkan gaya-gaya yang merata pada penampang kolom. Sedangkan pembebanan aksial yang eksentris akan menimbulkan gaya yang lain selain gaya aksial tersebut, yaitu gaya momen yang akan mempengaruhi gaya-gaya pada

penampang kolom. Perilaku kolom yang menerima beban aksial baik konsentris maupun eksentris akan mengalami deformasi tegangan dan regangan, selain itu kolom akan mengalami ragam kehancuran akibat beban yang bekerja terhadapnya seperti bahaya tekuk (*buckling*). Oleh karena itu perlu diketahui sifat-sifat dan perilaku kolom sebagai elemen suatu struktur dengan pembebanan tertentu dan kondisi tertentu.

1.2. Tujuan

Pada penulisan Tugas Akhir ini akan diadakan analisis dan perhitungan mengenai sifat dan perilaku baja pada kondisi tekuk inelastis dengan pembebanan eksentris yang mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui sifat dan perilaku kolom baja.
2. Mengetahui perilaku inelastis pada kolom baja.
3. Mengetahui Teori Modulus Tangen untuk menentukan kekuatan kolom baja.
4. Mengetahui pengaruh eksentrisitas pembebanan pada kolom baja.

1.3. Batasan Masalah

Dalam menganalisis sifat dan perilaku kolom baja yang mengalami tekuk inelastis dan pengaruh eksentrisitas pembebanan perlu diadakan pembatasan masalah dan anggapan sebagai berikut :

1. Kolom menggunakan baja profil W tunggal.
2. Beban yang bekerja adalah aksial desak.
3. Beban bekerja secara eksentrisitas terhadap sumbu lemah.

4. Harga eksentrisitas berada di dalam daerah kern.
5. Jenis tumpuan adalah sendi-sendii ($k = 1$).
6. Baja yang digunakan adalah $F_y = 36 \text{ ksi} = 2400 \text{ kg/cm}^2$
7. Analisa kekuatan kolom pada kondisi kolom sedang.

1.4. Metodologi Penelitian

Penulisan Tugas Akhir ini dilaksanakan dengan cara :

1. Studi pustaka dari beberapa buku/ literatur.
2. Analisa kekuatan kolom dengan memakai profil W yang ada di pasaran menggunakan Spesifikasi AISC dengan metode ASD.

1.5. Tinjauan Pustaka

Batang-batang lurus yang mengalami tekanan akibat bekerjanya gaya-gaya aksial dikenal dengan sebutan kolom. Untuk kolom-kolom yang pendek ukurannya, kekuatannya ditentukan berdasarkan kekuatan bahan. Untuk kolom-kolom yang sedang, kekuatannya berdasarkan tekuk plastis dan untuk kolom-kolom yang panjang ukurannya, kekuatannya ditentukan berdasarkan tekuk elastis atau inelastis (Amon, Rene; dkk, 1996).

Ketika sebuah beban bekerja pada jarak eksentris dari pusat (*centroid*) potongan kolom, kolom tersebut dinamakan dibebani secara eksentris (Ram Chandra, 1992).

Apabila beban bekerja eksentris (yaitu tidak bekerja pada pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata.

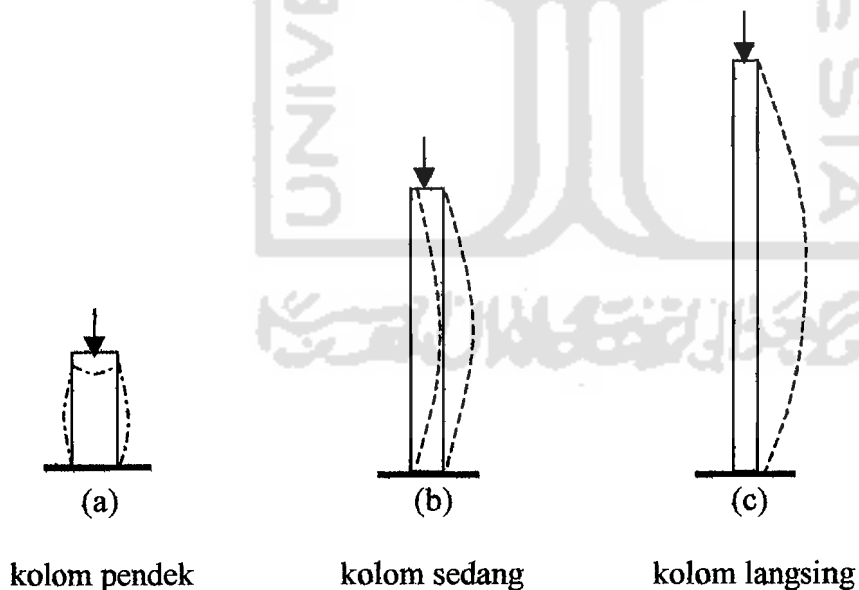
Efek beban eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka diseluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik (Schodek, Daniel L. ; 1991).

Semua beban kolom sejauh ini diasumsikan bekerja secara konsentris. Asumsi ini tepat ketika beban bekerja secara seragam sampai puncak kolom dimana ketika sebuah pertemuan balok-kolom terdapat balok di keempat sisi kolom. Tetapi jika pada pertemuan balok-kolom hanya terdapat tiga balok pada pertemuan balok-kolom tersebut, maka terdapat ketidaksimetrisan potongan kolom dan akan terjadi kondisi pembebanan eksentris pada kolom bangunan gedung (Crawly, Stanley W, M. Arch; dkk, 1977).

Perilaku kolom dapat dikategorikan berdasarkan panjangnya. *Kolom pendek* adalah jenis kolom yang kegagalannya berupa kegagalan material atau ditentukan oleh kekuatan material. Kegagalan akan terjadi apabila tegangan langsung aktual melebihi tegangan hancur material ($f_a \geq F_y$). Batang tekan pendek dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan sampai daerah pengerasan regangan. *Kolom panjang* adalah kolom yang kegagalannya ditentukan oleh tekuk (*buckling*), jadi kegagalannya adalah kegagalan karena ketidakstabilan, bukan karena kekuatan. Pada kolom panjang, dimensi dalam arah memanjang jauh lebih besar dibandingkan dengan dimensi pada arah lateral. Karena adanya potensi menekuk pada jenis kolom ini, maka kapasitas pikul bebannya menjadi lebih kecil. Elemen struktur tekan yang semakin panjang akan semakin langsing yang disebabkan oleh proporsinya. Perilaku kolom langsing ini

mengalami beban tekan yang sangat berbeda dengan perilaku kolom pendek. Apabila bebannya kecil, elemen masih dapat mempertahankan bentuk linearnya, begitu pula apabila bebannya bertambah. Pada saat beban mencapai taraf tertentu, elemen tersebut tiba-tiba tidak stabil dan terjadilah tekuk, maka kolom tersebut tidak mempunyai kemampuan lagi untuk menerima beban tambahan. Sedikit saja penambahan beban sudah akan dapat menyebabkan elemen struktur (kolom) itu runtuh. Dengan demikian, kapasitas pikul beban untuk elemen struktur kolom itu adalah besar beban yang menyebabkan kolom tersebut mengalami tekuk awal. Struktur kolom yang telah mengalami tekuk tidak mempunyai kemampuan layan lagi.

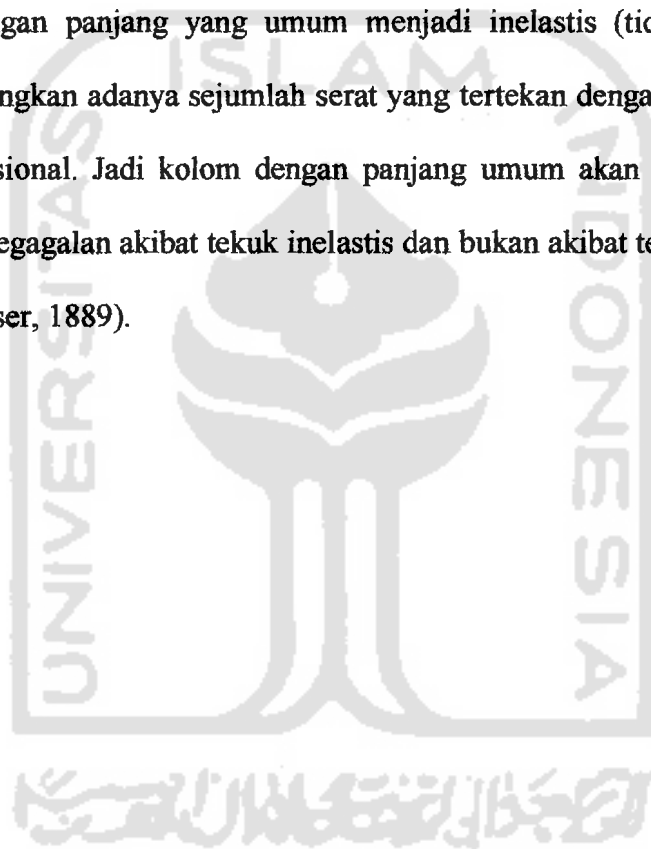
Perilaku kolom langsing dan kolom sedang atau pendek ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Perilaku Kolom

Pada keadaan yang umum, kehancuran material akibat tekuk terjadi setelah sebagian dari serat penampang melintang material meleleh yang disebut dengan kondisi tekuk inelastis (Salmon, C. G.; dkk, 1980).

Pendekatan Euler umumnya tidak digunakan dalam perencanaan karena tidak sesuai dengan hasil percobaan. Pada kenyataannya atau praktek di lapangan sebagian kolom dengan panjang yang umum menjadi inelastis (tidak elastis) sebelum memperhitungkan adanya sejumlah serat yang tertekan dengan regangan di atas batas proporsional. Jadi kolom dengan panjang umum akan mengalami kehancuran/ ragam kegagalan akibat tekuk inelastis dan bukan akibat tekuk elastis (Consider and Engesser, 1889).



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Kolom

Kolom merupakan batang desak karena beban yang bekerja adalah aksial desak sepanjang sumbu bahan. Kolom merupakan elemen struktur yang harus direncanakan dan dihitung secara cermat mengenai kekuatan terhadap beban yang bekerja karena elemen struktur ini berhubungan erat dengan kestabilan bangunan.

Ada beberapa hal yang menyebabkan kehancuran pada kolom sebagai elemen struktur bangunan, diantaranya adalah sifat kolom yang mengalami tekuk elastis atau tekuk inelastis maupun kondisi pembebanan yang terjadi. Sifat kolom yang mengalami suatu tekuk tertentu dipengaruhi oleh angka kelangsingan (*slenderness ratio*). Sedangkan kondisi pembebanan pada kolom adalah konsentris dan eksentris.

Kolom suatu bangunan gedung selalu menyatu dengan elemen struktur yang lain yaitu balok dan pelat. Anggapan bahwa kolom ideal yang mengasumsikan terjadinya beban secara konsentris tidak dapat terpenuhi. Berdasarkan kondisi pembebanan yang terjadi pada kolom dan kondisi kolom yang mengalami suatu tekuk tertentu perlu diadakan studi untuk memahami kedua kondisi tersebut.

Pada keadaan yang umum, ada tiga kategori kolom yaitu kolom panjang, kolom sedang dan kolom pendek. Tiap kategori kolom memiliki perilaku yang berbeda-beda, yaitu perilaku kolom ketika beban bekerja terhadapnya.

Leonard Euler adalah orang pertama yang memformulasikan ekspresi beban tekuk kritis pada kolom. Beban kritis tekuk untuk kolom yang ujung-ujungnya sendi, yang disebut sebagai beban tekuk Euler adalah :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L^2} \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana :

E = modulus elastisitas

I = momen inersia

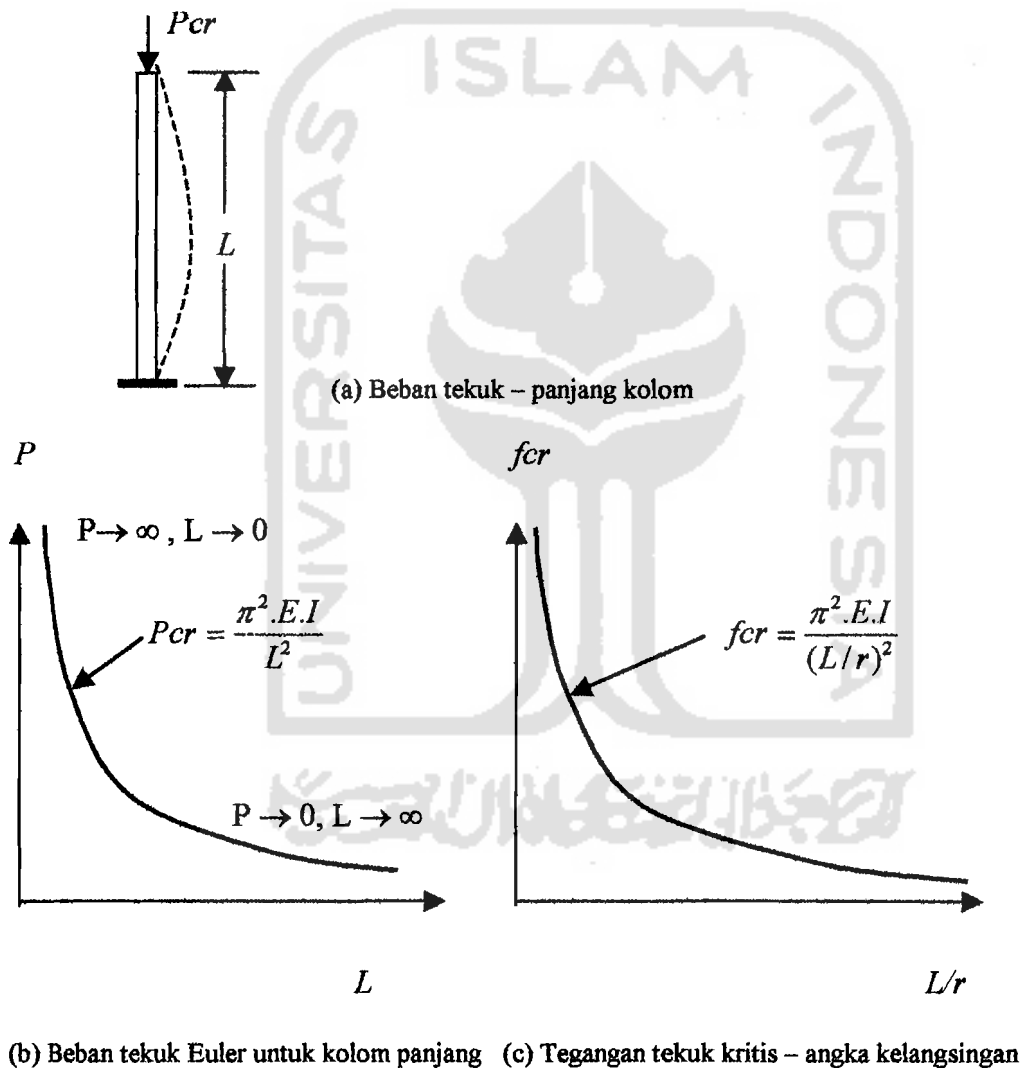
L = panjang kolom di antara kedua ujung sendi

π = konstanta pi = 3,1416

Persamaan di atas memperlihatkan dengan jelas bahwa kapasitas pikul beban suatu kolom selalu berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen, sebanding dengan modulus elastisitas material, dan sebanding dengan momen inersia penampang melintang. Momen inersia yang dimaksud adalah yang minimum terhadap sumbu berat penampang apabila kolom tersebut tidak dikekang secara khusus.

Dengan menggunakan persamaan tekuk Euler kita dapat memprediksi bahwa apabila suatu kolom menjadi sangat panjang, beban yang dapat menimbulkan tekuk pada kolom menjadi semakin kecil menuju nol. Sebaliknya, apabila panjang kolom semakin menuju nol, maka beban yang diperlukan untuk

menyebabkan kolom itu menekuk semakin besar. Apa yang sebenarnya terjadi, tentu saja apabila kolom semakin pendek, ragam kegagalan yang akan terjadi bukanlah tekuk, melainkan hancurnya material. Dengan demikian, persamaan Euler tidak berlaku lagi untuk kolom pendek. Pada kolom pendek ini yang lebih menentukan adalah tegangan hancur material.

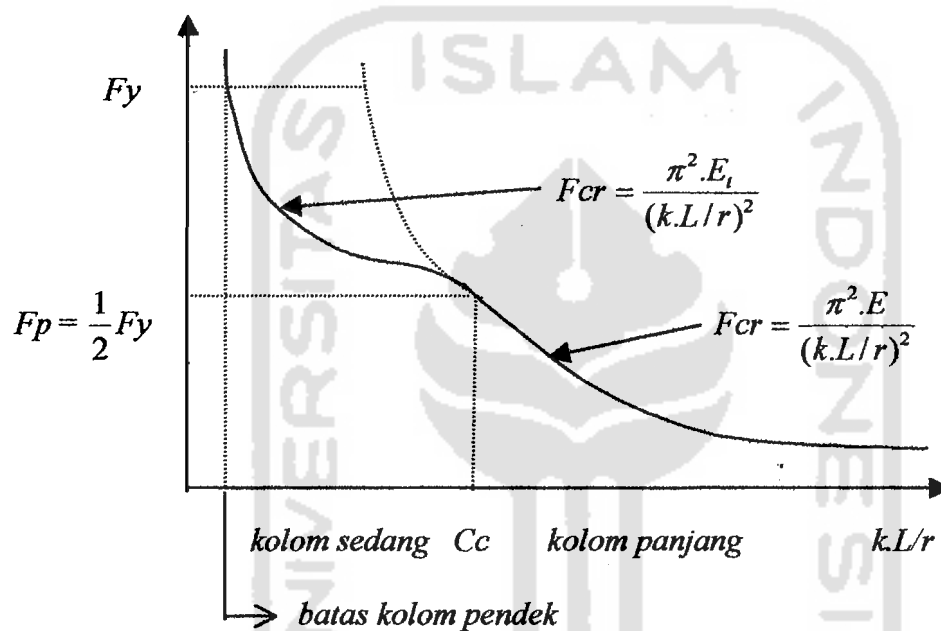


Gambar 2.1. Tekuk Euler pada kolom panjang.

Sumber : Struktur

Untuk kolom sedang, elastisitas pada persamaan Euler tidak berlaku lagi, sehingga digunakan modulus elastisitas tangen. Gambar di atas adalah Gambar 2.1 yang menunjukkan tekuk Euler pada kolom panjang.

Sedangkan berikut ini adalah Gambar 2.2 yang menunjukkan batas keadaan kolom sedang dan kolom panjang.



Gambar 2.2. Batas keadaan kolom sedang dan kolom panjang.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

2.2. Tekuk Inelastis

Kondisi inelastis suatu bahan adalah merupakan kondisi ragam kegagalan yang terjadi pada kolom baja pada saat sebagian dari serat profil mengalami tegangan leleh.

Batang tekan yang panjang akan runtuh akibat tekuk elastis, dan batang tekan pendek yang buntak dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan sampai daerah pengerasan regangan (*strain hardening*). Pada keadaan yang

umum, kehancuran akibat tekuk terjadi setelah sebagian penampang lintang meleleh, keadaan ini disebut *tekuk inelastis*.

Tekuk inelastis adalah ragam kegagalan yang terjadi pada kolom baja. Kondisi tekuk inelastis ini adalah kondisi dimana angka kelangsingan kolom baja sebagai suatu elemen struktur yang ditinjau ($k.l/r$) adalah lebih kecil jika dibandingkan dengan angka kelangsingan kritisnya (C_c) yang dihitung dengan rumus :

$$k.l/r < C_c \text{ (American Institute of Steel Construction, 1980)}$$

Dimana, k = Kondisi tumpuan kolom

l = Panjang elemen struktur kolom

r = Radius of Gyration profil kolom

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot E}{F_y}} \dots\dots\dots(2.2)$$

didapat dari :

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}, \text{ atau } \dots\dots\dots(2.3)$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left[\frac{k.l}{r}\right]^2} \Rightarrow \left[\frac{k.l}{r}\right]^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{F_{cr}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Tegangan kritis maksimum untuk batang elastis adalah 50 % dari tegangan leleh.

$$F_{cr} = 50 \% \cdot F_y \Rightarrow F_{cr} = 0,5 \cdot F_y \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\left[\frac{k.l}{r}\right]^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{0,5 \cdot F_y} \dots\dots\dots(2.6)$$

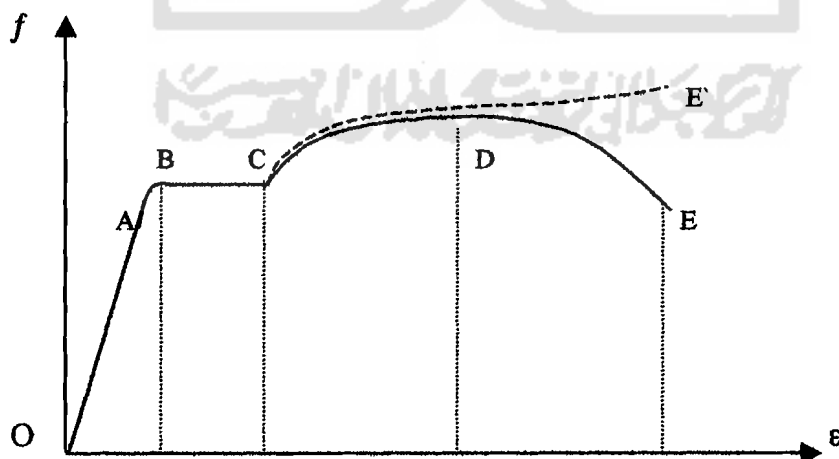
$$\frac{k.l}{r} = \sqrt{\frac{2.\pi^2.E}{F_y}} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\frac{k.l}{r} = C_c = \text{kelangsingan kritis.}$$

2.2.1. Hubungan tegangan-regangan

Suatu batang yang terbuat dari logam apabila bekerja oleh gaya aksial tertentu pada kondisi temperatur ruang, akan mengalami perubahan bentuk. Hubungan yang menggambarkan perilaku bahan berupa hubungan tegangan-regangan dalam bentuk diagram tegangan-regangan. Diagram tegangan-regangan linier pada daerah elastis dan diikuti kurva non linier pada daerah non-elastis.

Diagram tegangan-regangan menunjukkan terdapat dua fungsi yang berbeda. Pertama adalah fungsi yang bekerja di bawah batas tegangan leleh dan fungsi yang bekerja di atas batas tegangan leleh. Hal ini disebabkan karena pada kondisi di bawah batas tegangan leleh perilaku bahan mengikuti hukum Hooke.



Gambar 2.3. Hubungan tegangan-regangan.

Sumber : Pengetahuan Dasar Struktur Baja.

Tetapi setelah melewati batas tegangan leleh, bahan akan bersifat inelastis. Hubungan tegangan-regangan ditunjukkan pada Gambar 2.3 di atas.

Pada diagram tegangan-regangan normal tipikal di atas tampak bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada OA adalah linear, sedangkan di atas A diagram tidak linear lagi, sehingga titik A disebut sebagai batas sebanding (*proportional limit*). Tegangan yang terjadi pada titik A ini disebut tegangan batas sebanding, F_p . Sedikit di atas A terdapat titik batas elastis bahan. Hal ini berarti bahwa batang yang dibebani sedemikian rupa sehingga tegangan yang timbul tidak melampaui tegangan elastis, panjangnya akan kembali ke panjang semula jika beban dihilangkan. Pada umumnya tegangan batas sebanding dan tegangan elastis relatif cukup dekat, sehingga seringkali kedua tegangan tersebut dianggap sama, yaitu sebesar tegangan elastis. Regangan (ϵ) yang timbul pada saat bahan putus, pada umumnya berkisar antara 150 sampai 200 kali regangan elastis. Di atas tegangan elastis, pada titik B baja mulai leleh. Tegangan di titik B ini disebut sebagai tegangan leleh. Pada saat leleh ini baja masih mempunyai kekuatan. Hal ini berarti bahwa pada saat leleh baja masih mampu menghasilkan gaya perlawanan. Bentuk kurva pada bagian leleh ini, mula-mula mendekati datar, berarti tidak ada tambahan tegangan, sekalipun regangan bertambah. Hal ini berakhir pada saat mulai terjadi pengerasan regangan (*strain hardening*) di titik C, kurva naik ke atas lagi sampai dicapai kuat tarik (*tensile strength*) di titik D. Setelah itu, kurva turun dan bahan akan retak (*fracture*) di titik E. Diagram tegangan-regangan ini beranggapan bahwa luas tampang bahan tidak mengalami perubahan selama pembebanan. Menurut hukum Hooke, suatu batang yang

dibebani secara aksial luas tampangnya akan berubah. Sebelum titik C perubahan luas tampang itu cukup kecil sehingga pengaruhnya dapat diabaikan. Tetapi setelah pada fase pengerasan regangan hukum Hooke tidak berlaku lagi.

Fungsi pertama yang bekerja di bawah batas tegangan leleh adalah $F_p = E \cdot \epsilon_p$. Untuk fungsi yang bekerja di atas batas tegangan leleh di mana bahan bersifat inelastis, maka fungsi tersebut tidak berlaku.

2.2.2. Hubungan tegangan-angka kelangsingan

Angka kelangsingan merupakan faktor yang sangat mempengaruhi ragam kegagalan yang terjadi pada kolom. Kolom dengan angka kelangsingan kecil akan mengalami ragam kegagalan berupa kehancuran material sedangkan kolom dengan angka kelangsingan besar akan mengalami ragam kegagalan berupa tekuk.

Semua kolom memiliki lengkungan awal dan eksentrisitas yang tak terduga, maka faktor keamanan harus memperhitungkan kondisi ini. Untuk kolom pendek dengan eksentrisitas beban dan tegangan residu yang dapat diabaikan, faktor keamanan tidak perlu lebih besar dari yang ditetapkan untuk batang tarik, yaitu sebesar 1,67 menurut Spesifikasi AISC. Semakin besar angka kelangsingan, semakin tinggilah pengaruh eksentrisitas tak terduga, bengkokan awal, dan faktor panjang efektif k akibat kondisi ujung. Atas dasar ini, AISC menetapkan FS yang meningkat sesuai dengan angka kelangsingan sampai maksimum sebesar 15 % di atas harga dasar, dengan kata lain faktor maksimum 1,92. Untuk mendapatkan transisi yang berangsur-angsur dari FS = 1,67 bagi $k.l/r = 0$ ke FS = 1,92 bagi $k.l/r = C_c$, persamaan FS tersebut dapat dihitung dengan rumus :

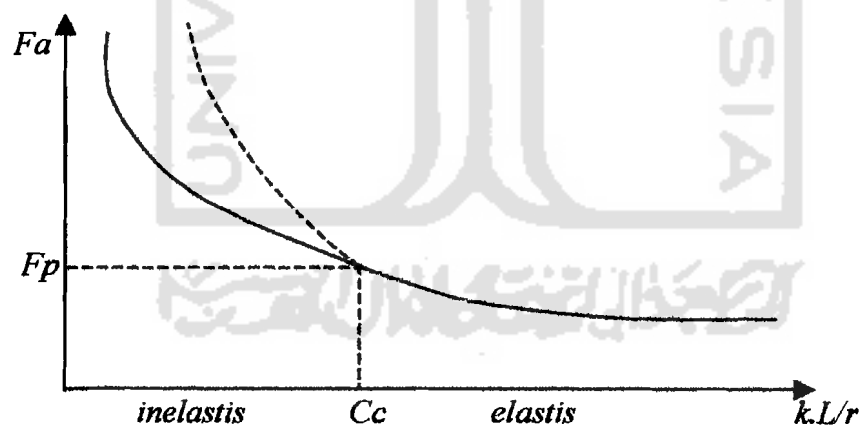
$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \frac{[k.l/r]}{Cc} - \frac{1}{8} \frac{[k.l/r]^3}{[Cc]^3} \dots\dots\dots(2.8)$$

Hubungan tegangan dengan angka kelangsingan akan menunjukkan perilaku bahan di mana terjadinya kondisi tekuk elastis dan inelastis.

Untuk batang desak tekuk tidak elastis (inelastis), maka tegangan ijin yang terjadi adalah :

$$Fa = \frac{\left[1 - \frac{(k.l/r)^2}{2.Cc^2}\right]}{FS} \cdot Fy < 0,6 \cdot Fy \dots\dots\dots(2.9)$$

Grafik di bawah memperlihatkan hubungan antara tegangan (F) dan angka kelangsingan ($k.l/r$).



Gambar 2.4. Grafik hubungan tegangan-angka kelangsingan.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Pada saat angka kelangsingan sama dengan angka kelangsingan kritis, $(k.l/r) = (Cc)$, maka $Fa = Fp = 0,5 \cdot Fy$ atau disebut dengan batas antara kondisi elastis dengan kondisi inelastis.

Dari Gambar 2.4. dapat dilihat bahwa tekuk inelastis terjadi pada kolom dengan angka kelangsingan kecil dimana tegangan yang terjadi akan melampaui batas proporsional bahan sebelum mencapai harga tegangan pada kurva Euler, yaitu sebelum mencapai tegangan leleh (F_y) bahan.

2.3. Kekuatan Kolom Baja

Kekuatan kolom baja dipengaruhi oleh sifat bahan, sifat kolom ataupun yang berhubungan dengan perilaku pembebanan terhadap kolom.

2.3.1. Tegangan residu

Tegangan residu adalah tegangan yang tetap berada pada profil setelah dibentuk menjadi produk akhir. Tegangan residu diakibatkan karena terjadinya deformasi plastis, yang pada profil baja tegangan residu dapat disebabkan oleh :

1. Pendinginan yang tidak bersamaan pada semua bagian profil yang dibentuk dengan penggilingan panas.
2. Lenturan atau lendutan dingin selama fabrikasi.
3. Proses pelubangan dan pemotongan selama fabrikasi.
4. Pengelasan selama pelaksanaan.

Dari beberapa penyebab terjadinya tegangan residu diberikan suatu persamaan pendapat bahwa secara umum tegangan residu ditimbulkan karena pendinginan yang tidak bersamaan pada semua bagian penampang profil. Pada profil bersayap lebar (*wide flange*) atau profil H yang digiling panas, sayap merupakan bagian yang lebih tebal dari pada badan sehingga akan mengalami

pendinginan yang lebih lambat. Bagian ujung sayap yang lebih terbuka terhadap udara akan mengalami pendinginan lebih cepat dari pada bagian tengah.

Tegangan residu ini akan mempengaruhi batas tegangan proporsional dari kolom dan akan mempengaruhi kekuatan kolom tersebut. Pada saat tegangan leleh penampang kolom baja tercapai, maka tegangan proporsional dari kolom adalah menjadi :

$$F_p = F_y - F_r \dots \dots \dots (2.10)$$

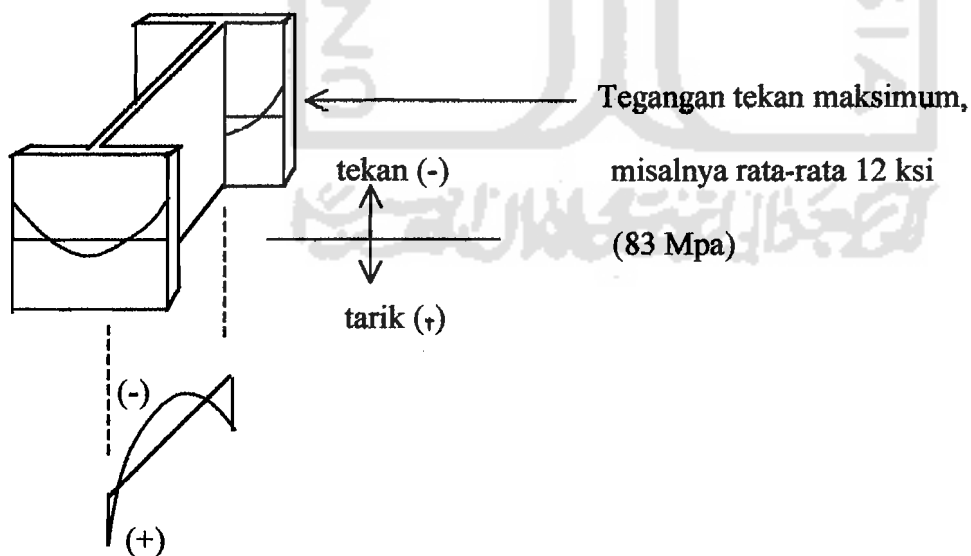
Di mana :

F_p = tegangan proporsional

F_y = tegangan leleh

F_r = tegangan residu

Tegangan residu di atas adalah tegangan residu maksimum pada penampang.



Gambar 2.5. Distribusi tegangan residu.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Tegangan residu yang terdapat pada profil didistribusikan secara parabolik seperti pada Gambar 2.5 di atas.

2.3.2. Kurva kolom

Dalam kondisi tekuk inelastis nilai modulus elastisitas (E) pada kondisi elastis yang konstan tidak dapat digunakan sehingga harus digunakan modulus tangen (E_t) yang mempunyai nilai berubah-ubah menurut fungsi variabel dari kurva tegangan-regangan. Untuk menggambarkan tegangan pada kolom inelastis adalah dengan menggunakan kurva kolom yang menggambarkan hubungan tegangan dengan faktor kelangsingan kolom. Dalam menggambarkan kurva kolom diperlukan nilai modulus tangen (E_t) dan tegangan kritis (F_{cr}) yang dinyatakan dalam bentuk tabel. Dari setiap harga E_t dan F_{cr} pada tabel dihitung besarnya nilai :

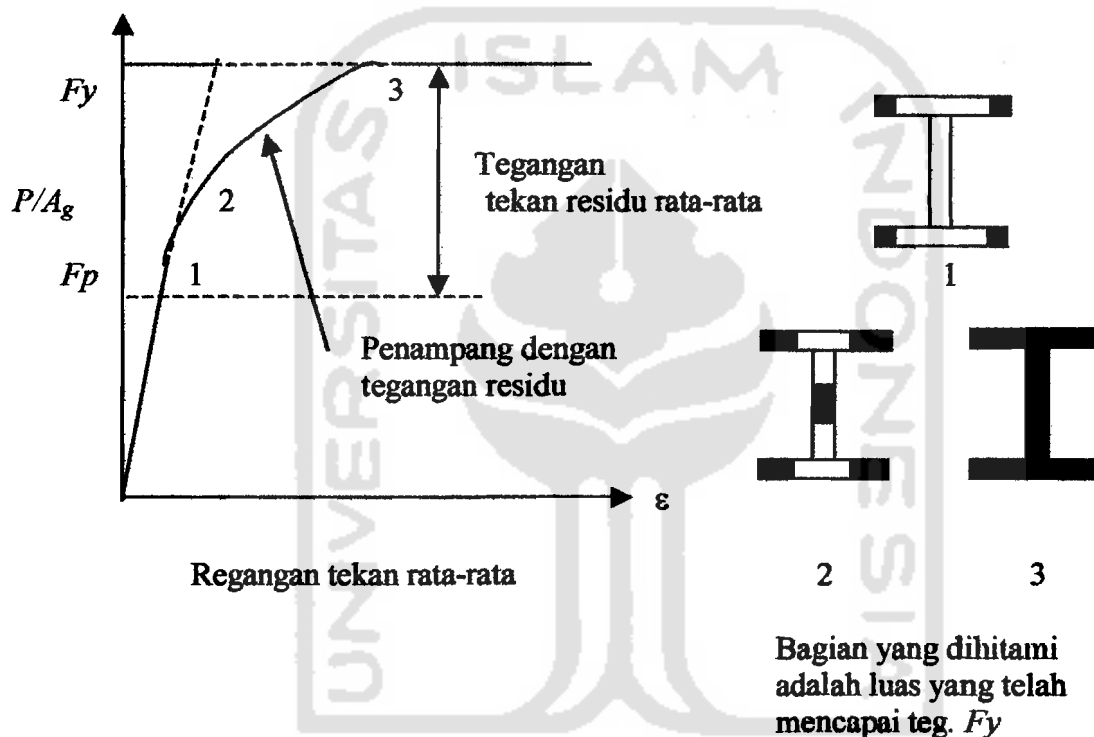
$$\pi \sqrt{\frac{E_t}{F_{cr}}} = \frac{k.l}{r} \dots\dots\dots (2.11)$$

Hubungan nilai-nilai dari tegangan dengan nilai kelangsingan $k.l/r$ digambarkan pada grafik. Nilai modulus tangen (E_t) diperoleh dari grafik hubungan antara modulus tangen (E_t) dengan tegangan-regangan.

2.3.3. Kurva kekuatan dasar dari SSRC

Kurva kekuatan kolom dasar SSRC (*Structural Stability Research Council*) digunakan untuk mengetahui batas di mana terjadinya tekuk elastis dan inelastis. Tegangan residu tekan terjadi pada ujung sayap dan tegangan residu tarik terjadi pada daerah pertemuan sayap dan badan. Besar tegangan residu

maksimum adalah 0,3. F_y yang akan mempengaruhi terjadinya leleh pada bagian serat tertentu pada profil pada saat terjadi tegangan yang besarnya melampaui batas proporsional. Kurva yang menggambarkan pengaruh tegangan residu terhadap terjadinya leleh pada suatu penampang profil dapat terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Pengaruh tegangan residu pada kurva tegangan-regangan rata-rata

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Pengaruh tegangan residu akan mempengaruhi harga modulus tangen E_t . Apabila luas daerah penampang yang belum mencapai tegangan leleh adalah A_e , maka nilai modulus tangen E_t adalah :

$$E_t = \frac{dFy}{d\varepsilon} = \frac{d\frac{P}{A}}{d\frac{P}{A_e \cdot E}} = \frac{E \cdot A_e}{A} \dots \dots \dots (2.12)$$

Pada saat penampang kolom mulai leleh, maka beban yang dicapai adalah sebagai berikut :

$$P = (A - A_e) \cdot Fy + \int_{A_e} F dA$$

Atau :

$$F_{cr} = \frac{P}{A} = \frac{A - A_e}{A} \cdot Fy + \frac{1}{A} \int_{A_e} F dA \dots \dots \dots (2.13)$$

Dari persamaan di atas terlihat jelas bahwa besarnya tegangan kritis yang terjadi tergantung pada fungsi dari distribusi tegangan residu yang terdapat pada penampang kolom. Apabila tidak terjadi regangan balik, maka momen tahanan dalam hanya dihasilkan oleh bagian yang elastis. Berdasarkan kondisi tersebut, maka beban kritis yang terjadi pada bagian penampang yang tidak elastis identik dengan beban Euler, hanya nilai inersia penampang (I) harus diganti dengan nilai I_e (inersia penampang efektif), menjadi :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_e}{(k \cdot l)^2} \dots \dots \dots (2.14)$$

atau :

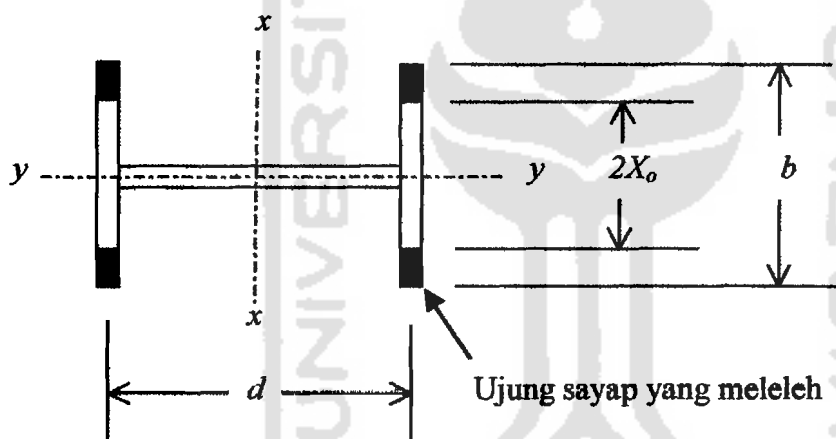
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_e}{A \cdot (k \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(k \cdot l / r)^2} * \frac{I_e}{I} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot E}{(k \cdot l / r)^2} * f(\eta) \dots \dots \dots (2.16)$$

Harga dari $\frac{I_e}{I}$ pada persamaan di atas merupakan suatu fungsi yang dapat digunakan untuk menghitung beban yang dapat didukung oleh kolom yang mengandung tegangan residu terhadap perilaku tekuk arah sumbu kuat (x-x) dan sumbu lemah (y-y).

Kasus A. Tekuk terhadap sumbu lemah

Anggapan yang logis ialah bagian sayap menjadi plastis penuh sebelum bagian badan meleleh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Bagian penampang yang telah meleleh.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Misalkanlah k = proporsi bagian sayap yang tetap elastis

$$= \frac{2X_0}{b} = \frac{A_e}{A_f}$$

Jika badan diabaikan dalam menghitung I , maka persamaannya adalah :

$$E \frac{I_e}{I} = E \frac{t_f (2X_0)^3}{12} \left(\frac{12}{t_f b^3} \right) = Ek^3 \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan menggunakan definisi modulus tangen :

$$E_t = \frac{\text{Pertambahan tegangan nominal}}{\text{Pertambahan regangan elastis}}$$

$$= \frac{\frac{dP/A}{dP/A_e} = \frac{Ae.E}{A}}{E} \dots\dots\dots(2.18)$$

$$E_t \cdot A = A_e \cdot E$$

$$= E \cdot (A_w + 2k \cdot A_f) \dots\dots\dots(2.19)$$

Keterangan :

A_w = luas badan

A_f = luas bruto pada satu sayap

A = luas bruto penampang total

Penyelesaian persamaan (2.19) untuk k dan substitusi persamaan (2.17) ke persamaan (2.1) menghasilkan :

$$k = \frac{E_t \cdot A}{2 \cdot F \cdot A_f} - \frac{A_w}{2 \cdot A_f} \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Fcr = \frac{\pi^2 E \cdot k^3}{(kI/r)^2} = \frac{\pi^2 E}{(kI/r)^2} \left[\frac{A \cdot E_t}{2 A_f \cdot E} - \frac{A_w}{2 A_f} \right]^3 \dots\dots\dots(2.21)$$

yang mencakup pengaruh badan yang elastis untuk tekuk terhadap sumbu lemah ($y-y$).

Kasus B. Tekuk terhadap sumbu kuat

Bila badan dianggap elastis dan sumbangannya pada momen inersia diabaikan, maka secara pendekatan :

$$E \frac{I_e}{I} \approx E \frac{2A_e \cdot (d/2)^2}{2A_f \cdot (d/2)^2} = Ek \dots\dots\dots(2.22)$$

Jika badan yang elastis disetarakan, maka :

$$E \frac{I_e}{I} = E \left[\frac{2kA_f(d^2/4) + t_w d^3/12}{2A_f(d^2/4) + t_w d^3/12} \right] \dots\dots\dots(2.23)$$

$$= E \left[\frac{2kA_f + A_w/3}{2A_f + A_w/3} \right] \dots\dots\dots(2.24)$$

Dengan memakai definisi modulus tangen dan persamaan (2.19),

$$2kA_f = \frac{E_t A}{E} - A_w \dots\dots\dots(2.25)$$

Eliminasi suku $2kA_f$ dalam persamaan (2.25). akan menghasilkan :

$$E \frac{I_e}{I} = \left[\frac{E_t A/E - 2A_w/3}{2A_f + A_w/3} \right] E \dots\dots\dots(2.26)$$

Jadi,

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot Ek}{(kI/r)^2} \dots\dots\dots(2.27)$$

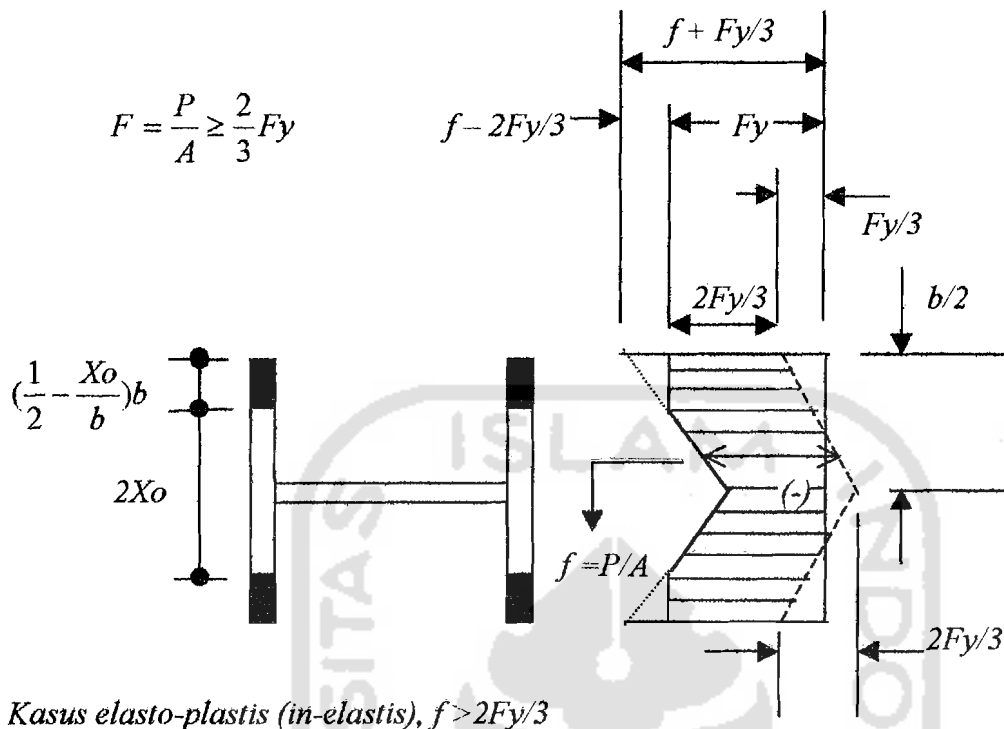
adalah persamaan pendekatan untuk k yang ditentukan oleh persamaan (2.20), persamaan yang lebih tepat diperoleh dengan memasukkan persamaan (2.26) ke persamaan (2.1), menghasilkan :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(k.l/r)^2} \left[\frac{E_t A / E - 2A_w / 3}{2A_f + A_w / 3} \right] \dots\dots\dots(2.28)$$

untuk tekuk terhadap sumbu kuat ($x-x$).

Dari pembahasan di atas jelas bahwa dua persamaan diperlukan untuk menentukan kekuatan kolom secara tepat, yaitu satu untuk tekuk terhadap sumbu kuat dan tekuk terhadap sumbu lemah. Harga I_e/I tidak merupakan fungsi dari distribusi tegangan residu bila harga ini memenuhi syarat geometris umum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, namun tegangan kritis F_{cr} , yang dihitung sebagai beban tekuk dibagi oleh luas bruto, berkaitan dengan $k.l/r$ yang tergantung pada tegangan residu.

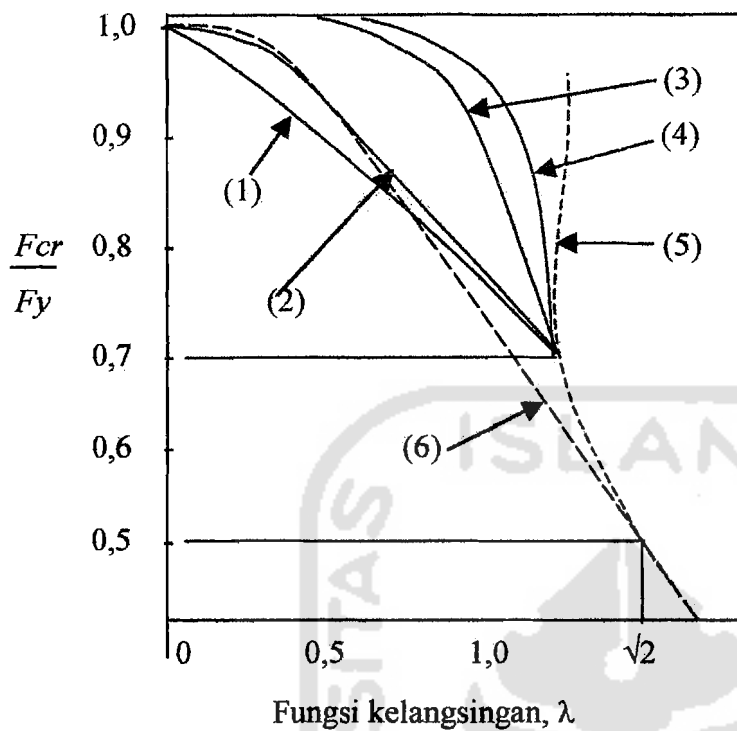
Penggunaan fungsi I_e/I dalam analisis kekuatan penampang kolom ditentukan oleh besarnya tegangan residu dan pola distribusi tegangan residu yang terkandung. Kolom baja dengan profil penampang H atau I dalam analisis kekuatan terhadap perilaku tekuk inelastis mengabaikan sumbangan kekuatan dari tebal badan yang bersifat elastis. Sebagai contoh diberikan analisis kekuatan kolom dengan tegangan residu maksimum sebesar $0,3.F_y$ dan pola distribusi tegangan residu linier seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Perilaku inelastis terjadi akibat beban luar lebih besar dari 2 kali tegangan residu.



Gambar 2.8 Diagram Tegangan pada Penampang yang mengandung Tegangan Residu pada Kondisi inelastis.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Pada keadaan tersebut ujung sayap telah meleleh sehingga I_e lebih kecil daripada I . Penentuan harga I_e dilakukan dengan menentukan besarnya bagian serat penampang yang telah mengalami leleh dan yang masih elastis. Hal ini sulit dilakukan sehingga analisis kekuatan kolom dengan perilaku tekuk inelastis dilakukan dengan menggunakan kurva kekuatan kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



$$\lambda = \frac{k.l}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 \cdot E}}$$

Gambar 2.9. Kurva kekuatan kolom Profil I yang memiliki tegangan residu pada ujung sayap

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Keterangan kurva :

1. Sumbu lemah tegangan residu linier
2. Sumbu lemah tegangan residu parabolis
3. Sumbu kuat tegangan residu linier
4. Sumbu kuat tegangan residu parabolis
5. Kurva Euler
6. Kurva kekuatan dasar SSRC

Kurva kekuatan kolom dengan distribusi tegangan residu yang berupa distribusi tegangan parabolis dan linier sepanjang sayap diperlihatkan pada Gambar 2.9. Kurva (2), (3), (4) pada Gambar 2.9. sesungguhnya berbentuk parabola. Dikarenakan hasil percobaan pada penelitian umumnya menunjukkan variasi yang hampir sama, maka pemakaian kurva pada gambar 2.9. dapat diterima.

Kurva kekuatan kolom yang digunakan oleh Column Research Council pada Gambar 2.9. adalah berupa parabola dalam bentuk persamaan :

$$F_{cr} = A - B \left[\frac{kI}{r} \right]^2 \dots \dots \dots (2.29)$$

Harga konstanta A dan B di dapat dari keadaan di mana $F_{cr} = F_y$ pada $kI/r = 0$, sehingga persamaan (2.29) menjadi :

$$F_{cr} = F_y - \frac{F_p}{\pi^2 \cdot E} (F_y - F_p) \left(\frac{kI}{r} \right)^2 \dots \dots \dots (2.30)$$

Di mana harga F_p adalah tegangan pada batas proporsional. Dengan adanya tegangan residu pada penampang terjadi deviasi dari kekakuan elastis pada kurva tegangan regangan rata-rata, maka harga $F_p = F_y - F_r$ dan persamaan (2.30) menjadi :

$$F_{cr} = F_y \left[1 - \frac{F_r}{\pi^2 \cdot E} \left(\frac{F_y - F_r}{F_y} \right) \left(\frac{kI}{r} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2.31)$$

Persamaan (2.30) digunakan untuk menentukan terjadinya gabungan tekuk terhadap sumbu kuat dan tekuk terhadap sumbu lemah, dengan mengambil harga tegangan residu sebesar $0,5 \cdot F_y$. Penentuan harga tegangan residu tersebut

dilakukan untuk menghasilkan perubahan yang berangsur-angsur dari kurva Euler bagi tekuk elastis parabolis yang menyatakan tekuk inelastis. Kedua kurva bersinggungan pada harga $F_{cr}/F_y = 0,5$, oleh karena itu persamaan (2.31) menjadi :

$$F_{cr} = F_y \left[1 - \frac{F_y}{4\pi^2 E} \left(\frac{k.l}{r} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2.32)$$

Kurva kekuatan kolom SSRC pada Gambar 2.9 terletak jauh di atas kurva (1) pada hampir seluruh jangkauannya, karena secara umum pola tegangan residu berada di antara linier dan parabolis. Jadi, kekuatan kolom tekuk sumbu lemah lebih mendekati dengan kurva SSRC.

Menggunakan tegangan kritis sebesar $0,5.F_y$ yang merupakan tegangan batas proporsional ke dalam persamaan (2.32), diperoleh angka kelangsingan kritis (C_c).

$$F_{cr} = 0,5.F_y = F_y \left[1 - \frac{F_y}{4\pi^2 E} \left(\frac{k.l}{r} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2.33)$$

$$C_c = \frac{k.l}{r} = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \dots\dots\dots (2.34)$$

Angka kelangsingan kritis (C_c) merupakan batas antara daerah elastis dan daerah inelastis yang dapat dinyatakan :

$\frac{k.l}{r} < C_c$ berarti tekuk yang terjadi pada daerah *inelastis*.

$\frac{k.l}{r} > C_c$ berarti tekuk yang terjadi pada daerah *elastis*.

2.3.4. Perilaku pembebanan

Perilaku pembebanan yang bekerja pada kolom mempengaruhi timbulnya gaya-gaya yang bekerja pada penampang kolom. Beban aksial yang bekerja konsentris terhadap sumbu koordinat penampang kolom akan menimbulkan tegangan yang sama dan merata pada setiap permukaan penampang kolom. Beban aksial yang bekerja secara eksentris akan menimbulkan gaya lain yang berupa gaya momen yang disebabkan oleh eksentrisitas. Distribusi tegangan pada penampang kolom menjadi tidak seragam pada setiap penampang kolom.

Prinsip tegangan yang dihasilkan oleh perilaku beban yang bekerja secara eksentris ditunjukkan pada Gambar 2.9. Tegangan yang terjadi adalah tegangan seragam akibat gaya aksial dan tegangan yang diakibatkan oleh momen.

$$f_a = \frac{P}{A}$$

$$f_b = \frac{M.c}{I}, \text{ di mana } M = P \cdot e$$

c = letak garis netral ($d/2$)

$$f_b = \frac{(P.e).c}{I}$$

Didapatkan tegangan kombinasi,

$$f_{\text{aktual}} = f_a + f_b$$

$$f_{\text{aktual}} = \frac{P}{A} + \frac{(P.e).c}{I} \dots\dots\dots(2.35)$$

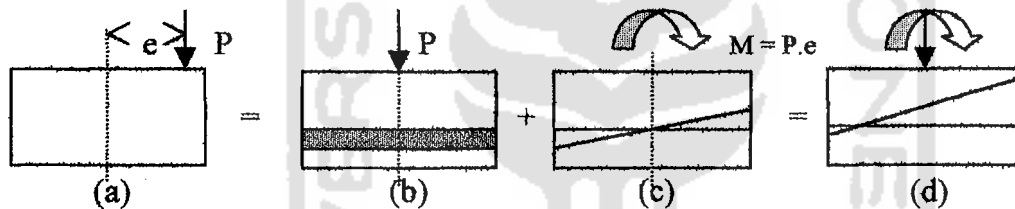
$c = \text{letak garis netral } (d/2)$

$$f_b = \frac{(P \cdot e) \cdot c}{I}$$

Didapatkan tegangan kombinasi,

$$f_{\text{aktual}} = f_a + f_b$$

$$f_{\text{aktual}} = \frac{P}{A} + \frac{(P \cdot e) \cdot c}{I} \dots \dots \dots (2.35)$$



Gambar 2.10. Distribusi tegangan akibat beban eksentris

Sumber : Struktur

Gambar 2.10. (a) menunjukkan perilaku pembebanan yang bekerja secara eksentris.

Gambar 2.10.(b) menunjukkan tegangan yang terjadi akibat beban aksial didistribusikan merata ke seluruh penampang.

Tegangan yang tidak seragam pada seluruh penampang akibat perilaku eksentris pembebanan ditunjukkan Gambar 2.10.(c).

Tegangan kombinasi dari tegangan akibat gaya aksial tekan dan akibat eksentrisitas gaya aksial tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.10.(d).

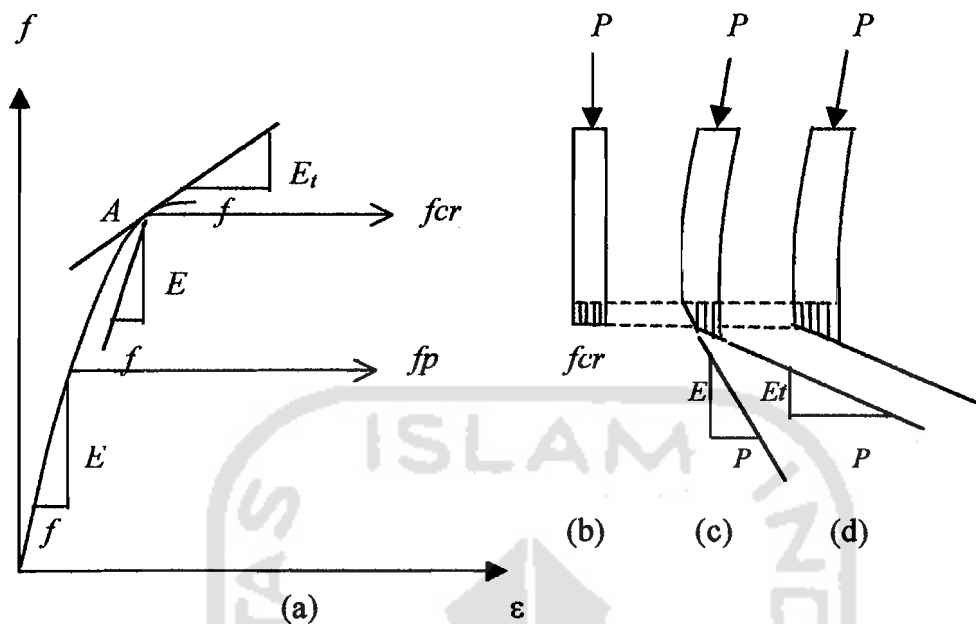
pada kurva Euler. Pemakaian nilai modulus elastisitas pada persamaan Euler yang mempunyai harga tetap tidak berlaku.

2.4.1. Teori Tangen Modulus

Perencanaan dan analisis kekuatan suatu kolom yang mengalami tekuk di atas batas proporsional memerlukan beberapa asumsi terhadap perilaku kolom. Prinsip kolom ideal dan batasan-batasan mengenai sifat bahan dan gaya-gaya yang terjadi diberikan untuk perencanaan kolom inelastis. Batasan terhadap perilaku kolom ditentukan sebagai berikut :

1. Kolom lurus sempurna dan prismatis.
2. Resultante beban kerja melalui sumbu bahan kolom sampai kolom mulai melendut.
3. Kondisi ujung merupakan statis tertentu sehingga panjang tekuk dapat ditentukan.
4. Sifat tegangan-regangan desak sama di seluruh bagian penampang.
5. Tegangan internal akibat pendinginan setelah panggilingan dan akibat pengelasan.
6. Lendutan yang kecil seperti pada lendutan yang umum berlaku dan gaya geser dapat diabaikan.
7. Tidak terjadi puntiran atau torsi pada penampang selama melentur.

Mekanisme kerja kolom menurut teori tangen modulus ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Prinsip kerja teori Tangen Modulus.

Sumber : Design of Steel Structure

Beban kritis pada teori tangen modulus ditentukan dengan mengasumsikan beban aksial bertambah selama terjadi perubahan bentuk dari keadaan lurus sampai keadaan mulai melendut. Distribusi tegangan yang terjadi pada penampang sampai keadaan mulai melendut dianggap merata, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11(b).

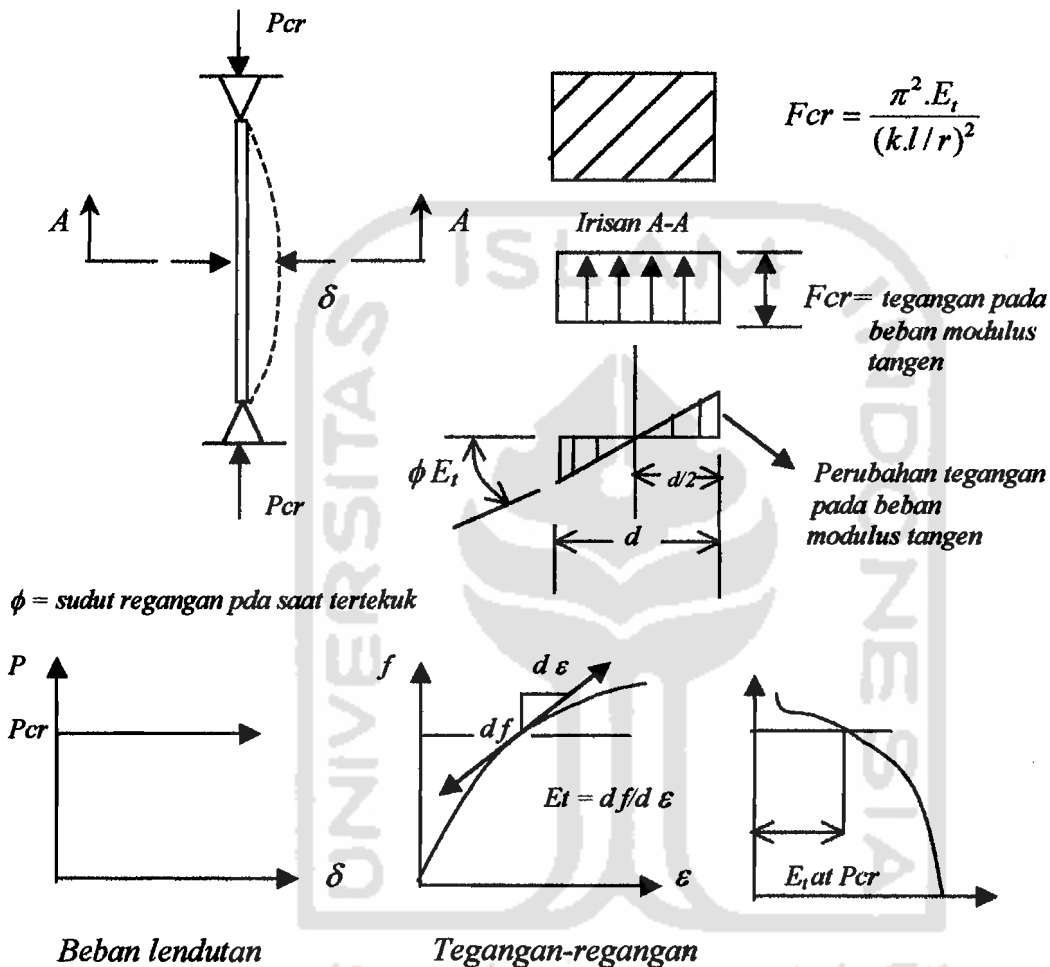
Anggapan kolom pada kondisi inelastis mencapai beban kritis di atas batas proporsional ditunjukkan gambar selanjutnya. Penambahan beban aksial pada saat kolom mulai melendut mengakibatkan penambahan tegangan lebih besar dari pada penurunan tegangan selama proses melendut pada bagian sisi luar yang cembung, sehingga tidak terjadi regangan balik pada bagian sisi cembung. Tegangan tekan bertambah untuk seluruh penampang dan hubungan antara

tegangan – regangan untuk seluruh penampang ditentukan oleh nilai modulus tangen (E_t).

Teori tangen modulus memberikan perlakuan bahwa beban aksial bertambah selama kolom mulai melendut sampai tercapai beban kritis, sehingga kolom akan tetap setimbang pada beban di atas beban maksimum menurut teori Euler. Hal ini menunjukkan definisi mengenai beban kritis yang menganggap beban tercapainya kesetimbangan kolom dari keadaan lurus sampai mulai melendut tidak tepat lagi. Teori tangen modulus mendefinisikan beban kritis sebagai beban terkecil terjadinya keseimbangan antara dua keadaan (kolom pada saat mulai melendut), atau beban terkecil di mana pola deformasi kolom tiba-tiba berubah. Definisi ini digunakan dalam pembahasan mengenai tekuk inelastis.

Kolom dengan keadaan awal lurus akan tetap lurus sampai beban aksial P setara dengan beban kritis. Kolom mulai berubah dari keadaan lurus ke keadaan sedikit melendut dengan beban aksial P bertambah sebesar ΔP menjadi $P + \Delta P$ (Gambar 2.11.d). Harga ΔP ditentukan lebih besar dari harga momen lentur pada penampang balok sehingga tegangan pada setiap bagian penampang kolom bertambah selama kolom melendut. Jika deformasi yang terjadi pada saat beban kritis terlampaui sangat kecil, penambahan tegangan ΔF yang terjadi selama kolom melendut sangat kecil dibandingkan dengan tegangan kritis (F_{cr}). Modulus elastisitas yang terjadi pada saat tercapainya tegangan kritis (F_{cr}) disebut Modulus Tangen (E_t), yang berlaku untuk seluruh penampang kolom. Hal ini memberikan suatu pernyataan bahwa kenaikan tegangan pada kondisi tekuk inelastis bukan tergantung pada harga modulus elastisitas (E), akan tetapi

tergantung pada kenaikan harga regangan modulus tangen. Mekanisme kerja teori tangen modulus ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Mekanisme kerja teori tangen modulus.

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku

Gambar 2.12 tersebut menunjukkan kolom tetap lurus sampai sesaat sebelum runtuh dan modulus elastisitas pada saat runtuh adalah tangen sudut garis singgung pada kurva tegangan-regangan. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa pada tegangan tertentu, $F_{cr} = P_{cr}/A$, batang akan mengalami bentuk

lendutan yang tak stabil dan deformasi pada F_{cr} ditentukan oleh $E_t = df/d\varepsilon$. Maka persamaan menjadi :

$$F_{cr} = \frac{P_t}{A} = \frac{\pi^2 E_t}{(k.l/r)^2} \dots\dots\dots (3.36)$$

dengan P_t adalah beban modulus tangen.

2.4.2. Faktor $\tau = E_t / E$

Faktor $\tau = E_t / E$ merupakan faktor yang penting dalam menganalisis masalah tekuk terutama perencanaan kolom yang menggunakan kurva kolom.

Dari persamaan (2.29) sebagai berikut :

$$F_{cr} = A - B \left[\frac{k.l}{r} \right]^2 \dots\dots\dots (2.37)$$

Dengan harga A dan B tergantung pada F_y dan F_p . Nilai F_{cr} dapat juga dinyatakan sebagai berikut :

$$F_{cr} = \frac{P_t}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E_t}{\left(\frac{l}{r} \right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \tau}{\left(\frac{l}{r} \right)^2} \dots\dots\dots (2.38)$$

Mensubstitusikan harga (l/r) dari persamaan (2.29) ke dalam persamaan (2.37) diperoleh :

$$\tau = \frac{F_{cr} (A - F_{cr})}{\pi^2 \cdot E \cdot B} \dots\dots\dots (2.39)$$

Mengganti nilai A dengan F_y dan nilai $\pi^2 EB$ dengan $F_p(F_y - F_p)$ diperoleh persamaan :

$$\tau = \frac{(F_y - F_{cr}) \cdot F_{cr}}{(F_y - F_p) \cdot F_p} \dots \dots \dots (2.40)$$

Dimana : $\tau = \frac{E_t}{E} = \frac{\text{modulus tangen}}{\text{modulus elastis}}$

F_y = Tegangan leleh bahan

F_{cr} = Tegangan kritis

F_p = Tegangan proporsional

2.5. Kolom dengan Pembebanan Eksentris

Analisa perilaku kolom yang mengalami kombinasi tegangan kerja perlu dilakukan disebabkan kenyataan di lapangan kondisi ideal kolom tidak dapat terpenuhi.

Pembebanan eksentris adalah merupakan salah satu perilaku kolom yang menghasilkan beban kerja kombinasi yaitu berupa tegangan akibat gaya aksial dan momen akibat eksentrisitas.

Apabila beban bekerja secara eksentris (yaitu tidak bekerja di pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek bebab eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka di seluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik.

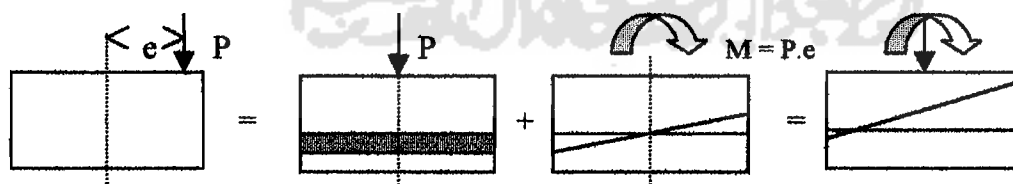
Perilaku kolom dengan pembebanan eksentris dipengaruhi oleh sifat kolom. Untuk kolom pendek lendutan yang terjadi relatif kecil sehingga dapat

Pembebanan eksentris adalah merupakan salah satu perilaku kolom yang menghasilkan beban kerja kombinasi yaitu berupa tegangan akibat gaya aksial dan momen akibat eksentrisitas.

Apabila beban bekerja secara eksentris (yaitu tidak bekerja di pusat berat penampang melintang), maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek beban eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka di seluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tarik.

Perilaku kolom dengan pembebanan eksentris dipengaruhi oleh sifat kolom. Untuk kolom pendek lendutan yang terjadi relatif kecil sehingga dapat diabaikan dalam hubungannya dengan eksentrisitas, sedangkan lendutan pada kolom panjang/ langsing harus diperhitungkan.

Eksentrisitas pada kolom adalah beban yang bekerja di luar sumbu bahan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.13 berikut ini :



Gambar 2.13. Distribusi tegangan akibat beban eksentris.

Sumber : Struktur

Dari gambar 2.13 di atas terlihat dengan jelas bahwa eksentrisitas beban eksentris yang bekerja pada penampang melintang bahan mengakibatkan distribusi

mengikuti perilaku linier Euler, maka harus dimasukkan pengaruh tekuk inelastis sehingga persamaan (2.41) dan (2.42) berubah menjadi :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{l^2}$$

$$F_{\max} = -\frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{Al^2} \pm \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I \cdot e \cdot x}{l^2 \cdot I}$$

atau,

$$F_{\max} = -\frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{Al^2} \pm \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I \cdot e \cdot y}{l^2 \cdot I} \dots \dots \dots (2.43)$$

Di mana :

E_t = modulus tangen

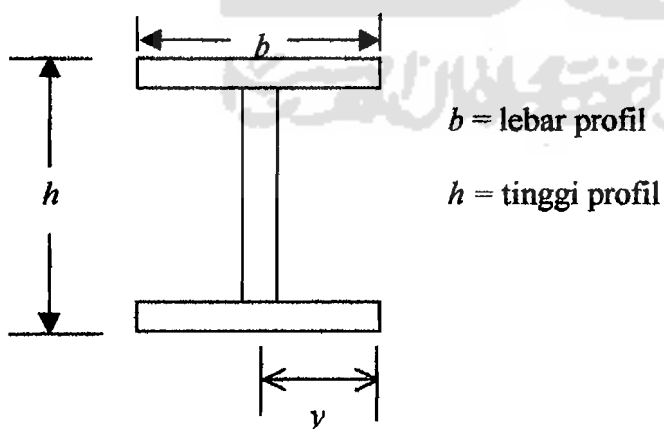
I = momen inersia penampang

e = eksentrisitas pembebanan

y = jarak serat terluar dari penampang terhadap sumbu lemah

l = panjang efektif

r = jari-jari girasi penampang



Gambar 2.14. Penampang lintang profil W.

Sumber : Struktur.

Persamaan (2.43) menunjukkan perilaku pembebanan eksentris yang akan penambahan tegangan kerja pada salah satu sisi penampang dan pengurangan beban kerja pada sisi yang lain seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Kolom akan mengalami keruntuhan pada saat tegangan leleh bahan terlampaui.

Persamaan (2.43) harga tegangan maksimum yang akan terjadi dengan asumsi harga eksentrisitas.

Analisis kolom tekuk inelastis menggunakan kurva kekuatan kolom sehingga harga tegangan kritis telah diketahui dengan penentuan harga modulus tangen terjadi. Beban maksimum yang dapat didukung kolom ditentukan dengan persamaan (2.44).

$$F_{cr} = -\frac{P}{A} - \frac{P.e.y}{I}$$

$$F_{cr} = -P \left[\frac{1}{A} + \frac{e.y}{I} \right]$$

$$P_{cr} = F_{cr} / \left[\frac{1}{A} + \frac{e.y}{I} \right] \dots \dots \dots (2.44)$$

Besarnya harga eksentrisitas pembebanan maksimal pada perilaku pembebanan eksentris di mana pengaruh tegangan yang diakibatkan oleh momen lentur akibat eksentrisitas cenderung lebih kecil dan tidak mempengaruhi kestabilan struktur dibandingkan dengan tegangan akibat beban aksial adalah sama dengan jarak sumbu kern maksimum penampang. Mengasumsikan harga eksentrisitas dengan perbandingan terhadap lebar penampang (b) profil akan memberikan harga-harga beban aksial maksimum yang dapat didukung oleh kolom.

2.6. Daerah Kern

Daerah kern adalah batas eksentrisitas beban yang apabila beban tersebut bekerja pada batas itu, tegangan di seluruh penampang hanya tegangan tekan, seperti yang terlihat pada distribusi tegangan pada Gambar 2.13.

Tegangan aktual tentunya merupakan kombinasi dari kedua distribusi tegangan.

$$\text{Tegangan merata} = f_a = \frac{P}{A}$$

$$\text{Tegangan lentur} = f_b = \frac{Mc}{I}$$

Karena,

$$M = P \cdot e$$

$$F_b = \frac{(P \cdot e) \cdot y}{I}$$

$$\text{Maka tegangan gabungan} = f_{\text{aktual}} = f_a + f_b = \pm \frac{P}{A} \pm \frac{(P \cdot e) \cdot y}{I}$$

Dengan memperhatikan distribusi tegangan yang diilustrasikan pada Gambar 2.13, terlihat bahwa besar tegangan lentur sebanding dengan eksentrisitas (e) beban. Pada gambar tersebut, beban vertikal (P) dapat menimbulkan tegangan tarik pada satu bagian penampang apabila eksentrisitasnya besar (yaitu tegangan lentur f_b dominan dibandingkan dengan tegangan aksial). Apabila $e = 0$, jelas hanya akan terjadi tegangan f_a . Oleh karena itu, tentu ada suatu batas eksentrisitas beban yang apabila beban bekerja pada batas itu, tegangan di seluruh penampang hanya berupa tegangan tekan. Dengan mudah titik itu dapat diperoleh dengan menuliskan kombinasi kedua jenis tegangan sama dengan nol ($f_a + f_b = 0$) dan menghitung eksentrisitasnya.

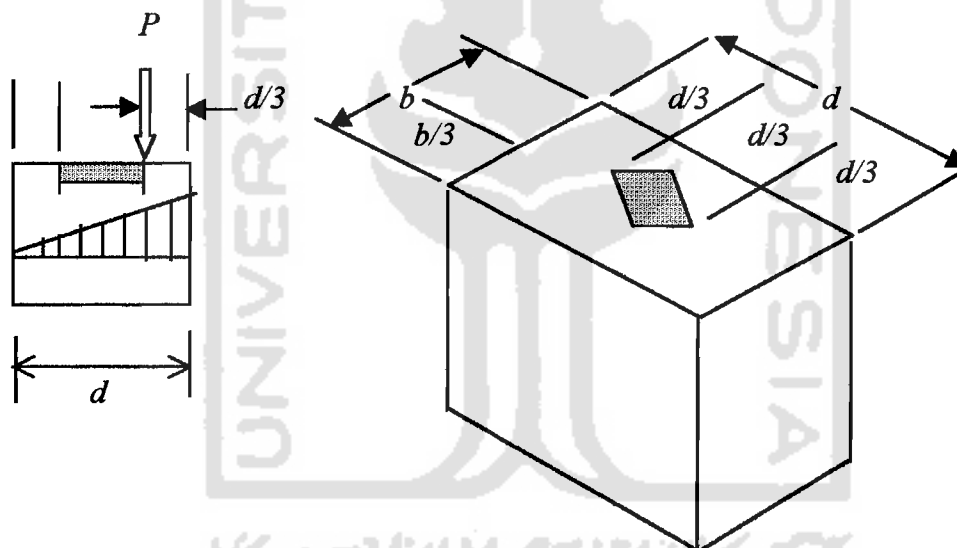
Jadi,

$$\frac{P}{A} + \frac{(P.e).y}{I} = 0$$

atau,

$$e = \frac{I}{Ac}$$

Maka untuk penampang segi empat seperti gambar berikut ini :

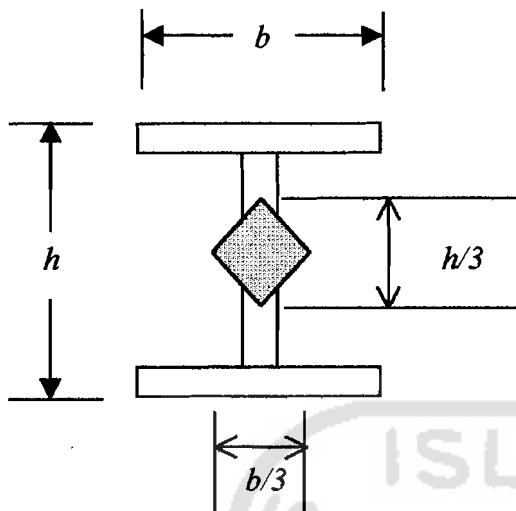


Gambar 2.15. Daerah kern penampang segi empat.

Sumber : Struktur

Daerah kern-nya adalah :

$$\frac{P}{bd} = \frac{P.e(d/2)}{b.d^3/12} \quad \text{dan} \quad e = \frac{d}{6}$$



Gambar 2.16. Batas daerah kern penampang profil W.

Sumber : *Strength of Materials*

Dengan cara yang sama untuk penampang profil W akan didapat batas daerah kern seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.15 di atas.

Dengan demikian, apabila beban bekerja di dalam daerah yang dibatasi ini, tegangan yang akan timbul hanyalah tegangan tekan, tidak ada tegangan tarik. Dengan menempatkan beban tepat pada titik batas tersebut, maka tegangan di tepi sisi lawannya akan sama dengan nol. Apabila eksentrisitasnya melampaui batas itu, akan timbul tegangan tarik pada sisi lawannya. Oleh karena beban dapat mempunyai titik tangkap di kedua sisi penampang, maka titik kern juga ada di kedua bagian. Lokasinya adalah pada titik sepertiga penampang. Oleh karena itu, aturan sepertiga tengah diterapkan pada batas daerah kern tampang profil W, yang berarti mengusahakan agar beban mempunyai titik tangkap di dalam sepertiga tengah penampang agar tidak terjadi tegangan tarik atau dengan kata lain, kolom tetap berperilaku sebagai kolom dan bukannya berperilaku sebagai balok-kolom.

BAB III

METODOLOGI

3.1. Umum

Pada penyusunan Tugas Akhir ini akan diadakan analisis mengenai kekuatan kolom baja dengan pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis dengan menggunakan dasar teori Modulus Tangen yang menyatakan bahwa perilaku kolom di luar batas proporsional bahan tidak akan mengikuti hukum Hooke. Modulus elastisitas (E) pada rumus kekuatan Euler harus diganti dengan modulus tangen (E_t) yang terjadi karena sebagian serat penampang bahan telah mencapai batas proporsional bahan. Pemakaian kurva kekuatan kolom digunakan untuk menentukan besarnya harga dari modulus tangen dan tegangan kritis yang dapat terjadi pada kondisi inelastis.

3.2. Langkah Perhitungan

Perhitungan dan analisis kekuatan kolom baja dengan pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis dilakukan dengan langkah-langkah perhitungan sebagai berikut :

1. Menentukan data profil baja yang akan dianalisis.



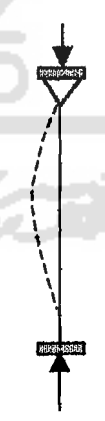






Data profil itu berupa :



- a) Luas penampang
 - b) Momen inersia terhadap sumbu lemah
 - c) Momen inersia terhadap sumbu kuat
 - d) Jari-jari girasi terhadap sumbu lemah
 - e) Jari-jari girasi terhadap sumbu kuat
2. Menentukan panjang kolom baja.
 3. Menentukan kondisi kedua perletakan ujung.

Kondisi ujung perletakan akan mempengaruhi besarnya harga angka kelangsingan terjadi berupa koefisien k , di mana angka kelangsingan terjadi. = $k.l/r$. Harga koefisien k untuk beberapa macam kondisi ujung kolom ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Koefisien k untuk beberapa kondisi ujung

Kondisi ujung	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Jepit : 						
Sendi : 						
Bebas : 						
Faktor koefisien, k	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0

Sumber : Struktur Baja 2 Desain dan Perilaku.

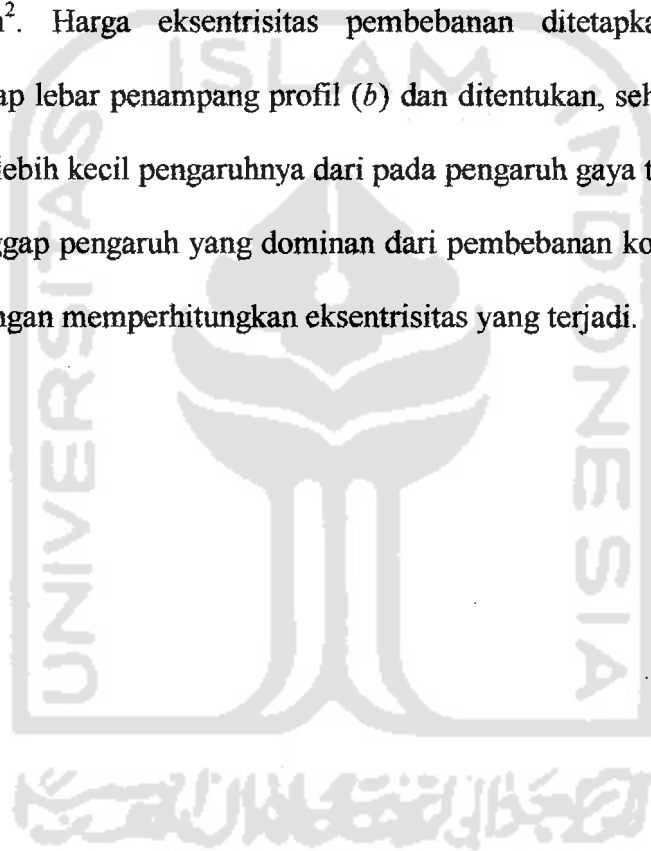
4. Menentukan harga tegangan kritis.

Harga tegangan kritis (F_{cr}) diambil dengan interval tertentu dimulai pada harga tegangan proporsional (F_p) sampai harga tegangan leleh bahan (F_y). Dalam analisis kekuatan kolom terhadap perilaku tekuk inelastis tegangan proporsional (F_p) merupakan faktor yang terjadi pada serat penampang kolom dengan angka kelangsingan kecil dapat terjadi sampai mendekati tegangan leleh bahan (F_y). Tegangan ijin (F_a) yang digunakan dalam desain dan perencanaan adalah tegangan yang mengakibatkan dalam analisis kekuatan kolom pada perilaku tekuk inelastis dipakai tegangan kritis (F_{cr}) yang terjadi adalah di atas tegangan proporsional bahan (F_p) dan mungkin lebih besar dari tegangan ijin (F_a). Tegangan proporsional (F_p) adalah tegangan pertama di mana kolom mengalami perilaku di luar batas proporsional dan terjadi perubahan harga modulus elastisitas (E) yang berangsur-angsur menjadi modulus tangen (E_t). Harga tegangan proporsional (F_p) menurut teori kurva kekuatan kolom dari SSRC (*Structural Stability Research Council*) adalah sebesar setengah dari harga tegangan leleh (F_y) yaitu : $F_p = 0,5.F_y$.

5. Membuat tabel tegangan kritis (F_{cr}) untuk menentukan harga modulus tangen (E_t) dan harga angka kelangsingan ($k.l/r$).
6. Melakukan interpolasi untuk mencari harga modulus tangen (E_t) dan tegangan kritis (F_{cr}) pada panjang tekuk yang terjadi ($k.l/r$).
7. Menentukan harga eksentrisitas pembebanan.
8. Menentukan beban maksimum yang dapat diterima oleh kolom.

9. Menentukan harga kelangsingan kolom ($k.l/r$) yang bervariasi pada kondisi kolom yang umum dengan harga eksentrisitas dalam berbagai keadaan.

Perhitungan kekuatan kolom baja yang mengalami pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis dilakukan terhadap profil dengan mutu baja $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$. Harga eksentrisitas pembebanan ditetapkan sebagai perbandingan terhadap lebar penampang profil (b) dan ditentukan, sehingga gaya momen yang terjadi lebih kecil pengaruhnya dari pada pengaruh gaya tekan aksial sehingga dapat dianggap pengaruh yang dominan dari pembebanan kolom adalah gaya desak aksial dengan memperhitungkan eksentrisitas yang terjadi.



BAB IV

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Perhitungan kekuatan kolom baja pada kondisi tekuk inelastis dengan pembebanan eksentris dilakukan dengan menggunakan metode kurva kekuatan kolom. Kurva kekuatan kolom digunakan untuk menentukan harga dari modulus tangen (E_t) dan tegangan kritis (F_{cr}) yang terjadi pada angka kelangsingan kolom yang terjadi.

Menggunakan harga tegangan kritis yang terjadi dan harga eksentrisitas tertentu dihitung beban aksial tekan maksimum yang dapat ditahan kolom baja.

4.2. Perhitungan

Berdasarkan pembatasan masalah, perhitungan kolom baja pada kondisi tekuk inelastis dengan pembebanan eksentris dilakukan terhadap baja profil W tunggal mutu $F_y = 36$ ksi. Ketentuan yang digunakan adalah :

- a) Panjang kolom (l) = 400 cm.
- b) Kondisi ujung sendi-sendi, koefisien $k = 1$.
- c) Modulus Elastisitas (E) = $2,1 \times 10^6$ kg/cm²
- d) Mutu baja (F_y) = 2400 kg/cm²

- e) Tegangan proporsional $F_{cr} = F_p = 0,5 \cdot F_y = 0,5 \cdot 2400 = 1200 \text{ kg/cm}^2$
- f) Eksentrisitas terjadi terhadap sumbu lemah (y-y) dan besarnya diasumsikan sebesar $0,00b$; $0,001b$; $0,002b$; $0,003b$; $0,004b$; $0,005b$; $0,1b$; $0,12b$; $0,14b$; $0,1667b$.

Kolom baja profil W 18 x 35

Data profil :

$$A = 10,3 \text{ in}^2 = 66,452 \text{ cm}^2$$

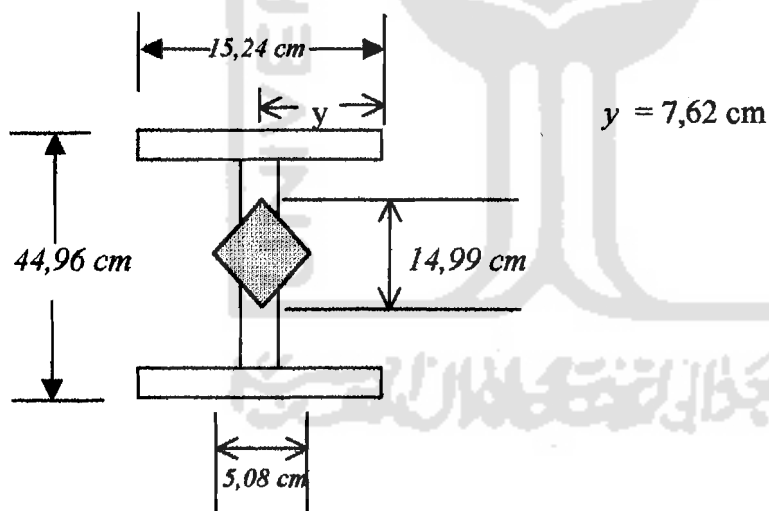
$$I_x = 610 \text{ in}^4 = 25390,117 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 15,3 \text{ in}^4 = 636,834 \text{ cm}^4$$

$$r_x = 7,04 \text{ in} = 17,8816 \text{ cm}$$

$$r_y = 1,22 \text{ in} = 3,0988 \text{ cm}$$

Penentuan batas daerah kern profil W 18 x 35



Gambar 4.1. Batas daerah kern penampang profil W 18 x 35.

Menurut aturan sepertiga tengah, batas daerah kern penampang profil adalah :

Horisontal sebesar 5,08 cm dan vertikalnya sebesar 14,99 cm, sehingga besarnya eksentrisitas yang diasumsikan ($e_{max} = 0,1667b = 2,54 \text{ cm}$) adalah berada di dalam daerah kern tersebut.

Perhitungan angka kelangsingan :

$$\frac{k.l}{r} = \frac{1.(400 : 2,54)}{1,22} = 129,082$$

Perhitungan kelangsingan kritis (C_c) :

$$C_c = \sqrt{\frac{2.\pi^2.E}{F_y}} = \sqrt{\frac{2.\pi^2.2,1.10^6}{2400}}$$

$$= 131,422$$

Diperoleh angka kelangsingan terjadi $(\frac{k.l}{r}) < C_c$, maka kolom dalam kondisi tekuk inelastis.

Perhitungan modulus tangen menggunakan faktor $\tau = \frac{E_t}{E}$:

$$\tau = \frac{(F_y - F_{cr}).F_{cr}}{(F_y - F_p).F_p}$$

$$= \frac{(2400 - 1200).1200}{(2400 - 1200).1200} = 1$$

sehingga harga $E_t = 1 \times 2,1.10^6 \text{ kg/cm}^2 = 2,1.10^6 \text{ kg/cm}^2$

Selanjutnya perhitungan modulus tangen untuk harga-harga tegangan kritis yang telah ditetapkan, disajikan dalam tabel :

Tabel 4.1. Perhitungan Modulus Tangen (E_t).

F_{cr} (kg/cm ²)	$\tau = E_t / E$	E_t (kg/cm ²)
1200	1	$2,100 \times 10^6$
1300	0,993	$2,085 \times 10^6$
1400	0,972	$2,042 \times 10^6$
1500	0,938	$1,969 \times 10^6$
1600	0,889	$1,867 \times 10^6$
1700	0,826	$1,735 \times 10^6$
1800	0,750	$1,575 \times 10^6$
1900	0,660	$1,385 \times 10^6$
2000	0,556	$1,167 \times 10^6$
2100	0,438	$0,919 \times 10^6$
2200	0,306	$0,642 \times 10^6$
2300	0,160	$0,335 \times 10^6$
2400	0	0

Harga-harga tegangan kritis (F_{cr}) yang telah ditentukan dan harga modulus tangen (E_t) yang dihasilkan digunakan untuk menentukan angka kelangsingan kolom. Hubungan antara tegangan kritik dengan modulus tangen akan menghasilkan besarnya angka kelangsingan yang terjadi :

$$\frac{kI}{r} = \pi \sqrt{\frac{E_t}{F_{cr}}}$$

Untuk harga tegangan kritis $F_{cr} = 1200 \text{ kg/cm}^2$, modulus tangen $E_t = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$, maka besarnya angka kelangsingan terjadi adalah :

$$\frac{k.l}{r} = \pi \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^6}{1200}} = 131,422$$

Perhitungan angka kelangsingan terjadi selanjutnya dalam bentuk tabel :

Tabel 4.2. Perhitungan angka kelangsingan terjadi.

$F_{cr} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$E_t \text{ (} 10^6 \text{ kg/cm}^2\text{)}$	E_t / F_{cr}	$\sqrt{E_t / F_{cr}}$	$\pi \sqrt{E_t / F_{cr}}$
1200	2,100	1750	41,833	131,422
1300	2,085	1604,167	40,052	125,827
1400	2,042	1458,333	38,188	119,972
1500	1,969	1312,500	36,228	113,815
1600	1,867	1166,667	34,157	107,306
1700	1,735	1020,833	31,950	100,375
1800	1,575	875,000	29,580	92,930
1900	1,385	728,167	26,999	84,819
2000	1,167	583,500	24,155	75,888
2100	0,919	437,619	20,917	65,720
2200	0,642	291,818	17,083	53,667
2300	0,335	145,652	12,069	37,915
2400	0	0	0	0

Perhitungan tegangan kritis dan modulus tangen untuk kolom dengan angka kelangsingan tertentu digunakan harga-harga tegangan kritis, modulus tangen, dan angka kelangsingan yang terjadi dengan cara interpolasi.

Angka kelangsingan kolom pada contoh 1 = 129,082 terletak di antara harga angka kelangsingan 131,422 dan 125,827 pada tabel diatas.

Perhitungan modulus tangen dan tegangan kritis :

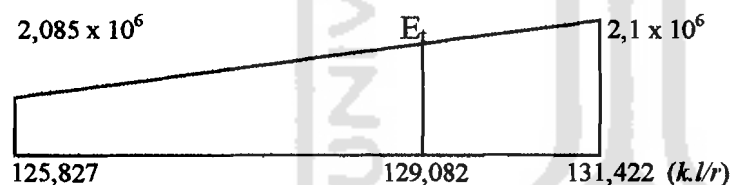
$$k.l/r = 131,422$$

$$F_{cr} = 1200 \text{ kg/cm}^2$$

$$k.l/r = 125,827$$

$$F_{cr} = 1300 \text{ kg/cm}^2$$

Perhitungan Modulus Tangen dengan interpolasi :



Interpolasi Modulus Tangen pada $l/r = 129,082$

$$E_t = 2,085 \cdot 10^6 + \frac{(129,082 - 125,827) \times (2,1 \cdot 10^6 - 2,085 \cdot 10^6)}{(131,422 - 125,827)}$$

$$= 2,0937 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

Menentukan harga F_{cr} dan P_{cr} :

Untuk harga $e = 0,00b$:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(k.l/r)^2}$$

$$= \frac{\pi^2 2,0937 \cdot 10^6}{129,082^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + 0 \right)$$

$$= 1240,1746 \times 66,452 = 82412,0825 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,001b$ $e = 0,01524 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A I^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,01524 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1240,1746 / 0,01523 = 81425,3905 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,002b$ $e = 0,03048 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A I^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,03048 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1240,1746 / 0,01540 = 80530,8182 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,003b$ $e = 0,04572 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,04572 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1240,1746 / 0,01559 = 79549,3650 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,004b$ $e = 0,0696 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,0696 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1240,1746 / 0,01588 = 78096,6373 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,005b$ $e = 0,0762 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,0762 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1240,1746 / 0,01596 = 77705,1754 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,1b$

$$e = 1,524 \text{ cm}$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A I^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{1,524 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 37260,619 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,12b$

$$e = 1,8288 \text{ cm}$$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A I^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{1,8288 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 33580,9876 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,14b$ $e = 2,1336 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{2,1336 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 30562,792 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,1667b$ $e = 2,54 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1240,1746 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1240,1746 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{2,54 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 27292,1679 \text{ kg}$$

Untuk perhitungan selanjutnya, diambil kondisi umum dengan mengabaikan kondisi ujung dan panjang kolom, jadi langsung mengambil harga angka kelangsingan yang bervariasi dengan interval 10 pada kondisi eksentrisitas tertentu, yang selanjutnya akan ditabelkan dan akan ditampilkan dalam grafik hubungan antara tegangan kritis (F_{cr}) dengan angka kelangsingan ($k \cdot l/r$) dan juga grafik hubungan antara beban kritis (P_{cr}) dengan angka kelangsingan ($k \cdot l/r$).

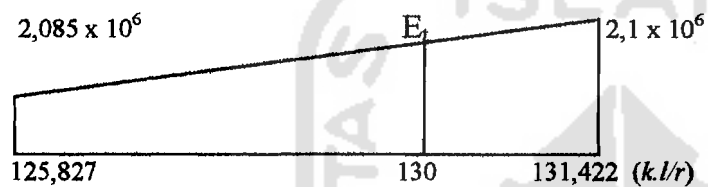
Perhitungan modulus tangen dan tegangan kritis pada kondisi yang umum

$k.l/r = 130$, terletak di antara :

$$k.l/r = 131,422 \quad E_t = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$k.l/r = 125,827 \quad E_t = 2,085 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

Interpolasi modulus tangen :



Interpolasi Modulus Tangen pada $k.l/r = 130$

$$E_t = 2,085 \cdot 10^6 + \frac{(130 - 125,827) \times (2,1 \cdot 10^6 - 2,085 \cdot 10^6)}{(131,422 - 125,827)}$$

$$= 2,096 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

Menentukan harga Pcr :

Untuk harga $e = 0,00b$:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(k.l/r)^2}$$

$$= \frac{\pi^2 2,096 \cdot 10^6}{130^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + 0 \right)$$

$$= 1224,1741 \times 66,452 = 81348,8173 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,001b$ $e = 0,01524 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,01524 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1224,1741 / 0,01523 = 80379,1267 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,002b$ $e = 0,03048 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,03048 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1224,1741 / 0,01541 = 79440,2401 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,003b$ $e = 0,04572 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,04572 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1224,1741 / 0,01559 = 78523,0340 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,004b$ $e = 0,0696 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,0696 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1224,1741 / 0,01588 = 77089,0491 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,005b$ $e = 0,0762 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{0,0762 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 1224,1741 / 0,01596 = 76702,6378 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,1b$ $e = 1,524 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot l^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{1,524 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 36779,8901 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,12b$ $e = 1,8288 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot I^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{1,8288 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 33147,7319 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,14b$ $e = 2,1336 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot I^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{2,1336 \times 7,62}{636,834} \right)$$

$$= 30168,4768 \text{ kg}$$

Untuk harga $e = 0,1667$ $e = 2,54 \text{ cm}$

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{A \cdot I^2}$$

$$= 1224,1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$\begin{aligned} Pcr &= 1224,1741 / \left(\frac{1}{66,452} + \frac{2,54 \times 7,62}{636,834} \right) \\ &= 26940,0495 \text{ kg} \end{aligned}$$

Selanjutnya hasil perhitungan dicantumkan ke dalam tabel di bawah ini :



Tabel 4.3. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,00b = 0$ cm

Keadaan $e = 0,00b$			
$k.l/r$	E_t ($\times 10^6$ kg/cm ²)	Fcr (kg/cm ²)	Pcr (kg)
40	0,376	2319,357	154125,9114
50	0,571	2252,2437	149666,0984
60	0,788	2160,3467	143559,3589
70	1,023	2060,5317	136926,4525
80	1,267	1953,8732	129838,7819
90	1,506	1835,0153	121940,4367
100	1,727	1704,4807	113266,1515
110	1,909	1557,1136	103474,642
120	2,042	1399,7057	93013,2430
130	2,096	1224,1741	81348,8173
131,422	2,100	1200,0000	79742,4000

Tabel 4.4. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,001b = 0,01524 \text{ cm}$

Keadaan $e = 0,001b$		$e = 0,01524 \text{ cm}$	
$k.l/r$	$E_t \text{ (x}10^6 \text{ kg/cm}^2\text{)}$	$F_{cr} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$P_{cr} \text{ (kg)}$
40	0,376	2319,357	152288,7065
50	0,571	2252,2437	147882,0552
60	0,788	2160,3467	141848,1090
70	1,023	2060,5317	135294,2639
80	1,267	1953,8732	128291,0834
90	1,506	1835,0153	120486,8877
100	1,727	1704,4807	111916,0013
110	1,909	1557,1136	102239,8949
120	2,042	1399,7057	87964,9179
130	2,096	1224,1741	80379,1267
131,422	2,100	1200,0000	78791,8582

Tabel 4.5. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,002b = 0,03048$ cm

Keadaan $e = 0,002b$ $e = 0,03048$ cm			
$k.l/r$	E_t ($\times 10^6$ kg/cm ²)	F_{cr} (kg/cm ²)	P_{cr} (kg)
40	0,376	2319,357	150607,5974
50	0,571	2252,2437	146249,5909
60	0,788	2160,3467	140282,2532
70	1,023	2060,5317	133800,7597
80	1,267	1953,8732	126874,8831
90	1,506	1835,0153	119156,8377
100	1,727	1704,4807	110680,5649
110	1,909	1557,1136	101111,2727
120	2,042	1399,7057	90889,9805
130	2,096	1224,1741	79491,8247
131,422	2,100	1200,0000	77922,0779

Tabel 4.6. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,003b = 0,04572 \text{ cm}$

$k.l/r$	Keadaan $e = 0,003b$		$e = 0,04572 \text{ cm}$
	$E_t (\times 10^6 \text{ kg/cm}^2)$	$F_{cr} (\text{kg/cm}^2)$	$P_{cr} (\text{kg})$
40	0,376	2319,357	148772,0975
50	0,571	2252,2437	144467,2033
60	0,788	2160,3467	138572,5914
70	1,023	2060,5317	132170,0898
80	1,267	1953,8732	125328,6209
90	1,506	1835,0153	117704,6376
100	1,727	1704,4807	109331,6677
110	1,909	1557,1136	99878,9994
120	2,042	1399,7057	89782,2771
130	2,096	1224,1741	78523,0340
131,422	2,100	1200,0000	76972,4182

Tabel 4.7. Perhitungan Fcr dan Pcr pada keadaan $e = 0,004b = 0,0696 \text{ cm}$

$k.l/r$	Keadaan $e = 0,004b$		$e = 0,0696 \text{ cm}$
	E_t ($\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)	Fcr (kg/cm^2)	Pcr (kg)
40	0,376	2319,357	146055,2267
50	0,571	2252,2437	141828,9484
60	0,788	2160,3467	136041,9836
70	1,023	2060,5317	129756,4043
80	1,267	1953,8732	123039,8741
90	1,506	1835,0153	115555,1196
100	1,727	1704,4807	107335,0567
110	1,909	1557,1136	98055,0126
120	2,042	1399,7057	88142,6763
130	2,096	1224,1741	77089,0491
131,422	2,100	1200,0000	75566,7506

Tabel 4.8. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,005b = 0,0762 \text{ cm}$

Keadaan $e = 0,005b$ $e = 0,0762 \text{ cm}$			
$k.l/r$	$E_t \text{ (x}10^6 \text{ kg/cm}^2\text{)}$	$F_{cr} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$P_{cr} \text{ (kg)}$
40	0,376	2319,357	145323,1203
50	0,571	2252,2437	141118,0263
60	0,788	2160,3467	135360,0689
70	1,023	2060,5317	129105,9962
80	1,267	1953,8732	122423,1328
90	1,506	1835,0153	114975,8960
100	1,727	1704,4807	106797,0363
110	1,909	1557,1136	97563,5088
120	2,042	1399,7057	87700,8584
130	2,096	1224,1741	76702,6378
131,422	2,100	1200,0000	75187,9699

Tabel 4.9. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,1b = 1,524$ cm

Keadaan $e = 0,1b$ $e = 1,524$ cm			
$k.l/r$	E_t ($\times 10^6$ kg/cm ²)	F_{cr} (kg/cm ²)	P_{cr} (kg)
40	0,376	2319,357	69684,2839
50	0,571	2252,2437	67667,8879
60	0,788	2160,3467	64906,8742
70	1,023	2060,5317	61907,9668
80	1,267	1953,8732	58703,4488
90	1,506	1835,0153	55132,4041
100	1,727	1704,4807	51210,5369
110	1,909	1557,1136	46782,9429
120	2,042	1399,7057	42053,6767
130	2,096	1224,1741	36779,8901
131,422	2,100	1200,0000	36053,5876

Tabel 4.10. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,12b = 1,8288 \text{ cm}$

Keadaan $e = 0,12b$ $e = 1,8288 \text{ cm}$			
$k.l/r$	$E_t (x10^6 \text{ kg/cm}^2)$	$F_{cr} (\text{kg/cm}^2)$	$P_{cr} (\text{kg})$
40	0,376	2319,357	62802,6881
50	0,571	2252,2437	60985,4191
60	0,788	2160,3467	58497,0662
70	1,023	2060,5317	55794,3127
80	1,267	1953,8732	52906,2209
90	1,506	1835,0153	49687,8633
100	1,727	1704,4807	46153,2958
110	1,909	1557,1136	42162,9442
120	2,042	1399,7057	37900,7115
130	2,096	1224,1741	33147,7319
131,422	2,100	1200,0000	32493,1547

Tabel 4.11. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,14b = 2,1336 \text{ cm}$

Keadaan $e = 0,14b$ $e = 2,1336 \text{ cm}$			
$k.l/r$	E_t ($\times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)	F_{cr} (kg/cm^2)	P_{cr} (kg)
40	0,376	2319,357	57158,1017
50	0,571	2252,2437	55504,1654
60	0,788	2160,3467	53239,4609
70	1,023	2060,5317	50779,6258
80	1,267	1953,8732	48151,1398
90	1,506	1835,0153	45222,0124
100	1,727	1704,4807	42005,1252
110	1,909	1557,1136	38373,4188
120	2,042	1399,7057	34494,2675
130	2,096	1224,1741	30168,47676
131,422	2,100	1200,0000	29572,7316

Tabel 4.12. Perhitungan F_{cr} dan P_{cr} pada keadaan $e = 0,1667b = 2,54$ cm

Keadaan $e = 0,1667b$ $e = 2,54$ cm			
$k.l/r$	E_t ($\times 10^6$ kg/cm ²)	F_{cr} (kg/cm ²)	P_{cr} (kg)
40	0,376	2319,357	51041,4264
50	0,571	2252,2437	49564,4832
60	0,788	2160,3467	47542,5789
70	1,023	2060,5317	45345,5321
80	1,267	1953,8732	42998,3289
90	1,506	1835,0153	40382,6571
100	1,727	1704,4807	37510,0195
110	1,909	1557,1136	34266,9538
120	2,042	1399,7057	30802,9232
130	2,096	1224,1741	26940,0495
131,422	2,100	1200,0000	26408,0569

4.3. Pembahasan

Hasil perhitungan dan analisis kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris menunjukkan bahwa kekuatan kolom baja pada kondisi tekuk inelastis ditentukan dengan memperhitungkan sebagian serat penampang yang telah meleleh, sehingga modulus elastisitas bahan (E) pada persamaan kekuatan Euler untuk kondisi elastis tidak dapat digunakan dan harus diganti dengan modulus tangen (E_t). Nilai $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ dan nilai F_p (tegangan proporsional) didapatkan dari grafik kekuatan kolom yang merupakan batas antara kondisi elastis dan kondisi inelastis. Nilai $F_p = 0,5 \cdot F_y$. Sedangkan F_{cr} (tegangan kritis) ditentukan dari tegangan kritis maksimum untuk batang elastis yaitu 50 % dari tegangan leleh yang berangsur-angsur nilainya berubah secara konstan (interval 100) sampai pada nilai F_y .

Selanjutnya perhitungan harga modulus tangen (E_t) ditabelkan pada Tabel 4.1. Dengan tegangan kritis (F_{cr}) yang bervariasi akan didapatkan nilai modulus tangen yang bervariasi juga.

Penentuan batas kolom panjang dan kolom sedang (batas daerah elastis dan inelastis) yang didasarkan atas angka kelangsingan kritis (C_c). Angka kelangsingan kritis (C_c) akan terjadi pada saat tegangan mencapai batas tegangan kritis untuk batang elastis. Pada hasil analisa perhitungan di atas $F_{cr} = 0,5 \cdot F_y = 1200 \text{ kg/cm}^2$, sehingga didapatkan $C_c = 131,422$ yang merupakan batas elastis-inelastis. Apabila angka kelangsingan ($k.l/r$) lebih besar dari 131,422, maka kolom baja akan bersifat elastis (berperilaku sebagai kolom langsing) dan angka kelangsingan ($k.l/r$) lebih kecil 131,422 kolom baja akan bersifat inelastis (kolom

berperilaku sebagai kolom sedang). Dalam penentuan batas daerah elastis dan daerah inelastis faktor yang menentukan adalah besarnya F_y (tegangan leleh bahan), dengan F_y yang sama akan didapatkan batas kelangsingan yang sama juga. Sehingga untuk semua profil baja dengan tegangan leleh bahan 2400 kg/cm^2 akan mempunyai batas kelangsingan kritis (C_c) = 131,422.

Menentukan kondisi ujung perletakan kolom adalah didasarkan atas daftar perletakan ujung untuk kondisi ujung sendi-sendi dengan nilai $k = 1$ (dari Tabel 3.1). Dengan kondisi perletakan ujung yang demikian didapatkan angka kelangsingan ($k.l/r$) sebesar 129,082 yang mana angka kelangsingan kolom baja tersebut terletak di bawah angka kelangsingan kritisnya. Angka kelangsingan di sini diperoleh dari kondisi perletakan ujung, panjang kolom dan radius (jari-jari) bahan.

Analisa dan perhitungan kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis diadakan penentuan angka kelangsingan yang didasarkan pada tegangan kritis (F_{cr}) dan modulus tangen (E_t).

Perhitungan angka kelangsingan ($k.l/r$) yang terjadi pada setiap tegangan kritis (F_{cr}) dan modulus tangen (E_t) yang berubah-ubah yang kemudian disajikan ke dalam tabel. Kegunaan dari tabel ini adalah menunjukkan daerah/ batas angka kelangsingan profil yang berada pada interval tertentu. Pada analisa dan perhitungan kolom baja profil W 18x 35 dengan angka kelangsingan 129,082 adalah berada di antara angka kelangsingan 131,422 dengan nilai modulus tangen (E_t) $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ dan angka kelangsingan 125,827 dengan nilai modulus tangen (E_t) $2,085 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$. Dengan interpolasi linier didapatkan nilai

modulus tangen (E_t) $2,0937 \times 10^6$ kg/cm² pada angka kelangsingan 129,082. Dengan tabel perhitungan modulus tangen tersebut, nilai F_{cr} hanya dipergunakan sebagai pedoman untuk mencari angka kelangsingan terjadi, dan tidak dapat dipergunakan untuk mencari F_{cr} yang terjadi pada profil (interpolasi F_{cr} tidak dapat digunakan), sehingga pada perhitungan harus didasarkan pada besarnya modulus tangen (E_t) yang terjadi. Dengan demikian akan didapatkan harga tegangan kritis (F_{cr}) profil yang terjadi sebesar 1240,1746 kg/cm².

Dalam perhitungan diasumsikan eksentrisitas sebesar 0,00b sampai dengan 0,005b yang masih terdapat di dalam daerah kern, untuk arah sumbu lemah batas kern adalah sebesar 5,08 cm dan untuk arah sumbu kuat sebesar 17,63 cm. Dasar pengambilan eksentrisitas terhadap lebar sayap (b) adalah diperhitungkan bahwa kolom hanya akan mengalami tekuk terhadap sumbu lemah. Perilaku kolom yang menerima beban dengan eksentrisitas kecil (eksentrisitas dalam daerah kern, $e_{max} = 2,54$ cm) merupakan kolom murni. Sedangkan apabila eksentrisitas relatif besar (eksentrisitas di luar daerah kern, $e > 2,54$ cm), maka perilaku kolom akan berubah menjadi balok-kolom. Tegangan kritis (F_{cr}) yang terjadi merupakan tegangan maksimum yang bekerja pada penampang profil kolom. Terlihat di dalam tabel yang kemudian diplotkan ke dalam grafik hubungan antara tegangan kritis (F_{cr}) dengan angka kelangsingan ($k.l/r$) pada kondisi tanpa eksentrisitas. Beban kritis (P_{cr}) merupakan beban maksimum yang dapat ditahan oleh kolom sebelum kolom mengalami kehancuran akibat tekuk. Beban kritis ini akan berubah-ubah menurut besarnya eksentrisitas. Semakin besar nilai

eksentrisitas, maka semakin kecil beban yang dapat dipikul oleh kolom. Dengan kata lain, nilai eksentrisitas sangat berpengaruh bagi penentuan beban kritis.

Dalam perhitungan selanjutnya kondisi perletakan ujung diabaikan dan langsung diambil nilai angka kelangsingan (dalam kondisi yang umum). Hal ini dimaksudkan agar analisa dan perhitungan tidak hanya berlaku pada kondisi perletakan ujung sendi-sendi melainkan pada semua jenis tumpuan.

Analisa dan perhitungan kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis dalam kondisi yang umum ini dilakukan dengan cara :

- a) Menentukan interval angka kelangsingan.
- b) Menentukan nilai modulus tangen (E_t) dari hasil interpolasi.
- c) Menentukan nilai tegangan kritis (F_{cr}) dan beban kritis (P_{cr}) dalam berbagai kondisi eksentrisitas.
- d) Pembuatan tabel nilai tegangan kritis (F_{cr}), beban kritis (P_{cr}) dan angka kelangsingan ($k.l/r$) terjadi.
- e) Pembuatan grafik hubungan tegangan kritis – angka kelangsingan dan hubungan beban kritis – angka kelangsingan.

Selanjutnya nilai tegangan kritis (F_{cr}) dan angka kelangsingan ($k.l/r$) diplotkan sebagai grafik hubungan tegangan kritis dan angka kelangsingan, yang mana terlihat pada grafik tersebut bahwa semakin kecil angka kelangsingan kolom baja, maka akan semakin besar tegangan yang terjadi pada penampang profil kolom baja tersebut. Demikian juga pada grafik hubungan beban kritis – angka kelangsingan, bahwa makin kecil angka kelangsingan makin besar beban yang

dapat ditahan oleh kolom dan semakin besar nilai eksentrisitas maka beban yang dapat ditahan kolom semakin kecil.

Pada grafik hubungan tegangan dan angka kelangsingan di atas juga terlihat adanya batas antara kolom pendek dengan kolom sedang. Pada angka kelangsingan 40, terjadi nilai tegangan kritis (F_{cr}) sebesar $2319,357 \text{ kg/cm}^2$ yang nilainya mendekati tegangan leleh bahan (F_y) sebesar 2400 kg/cm^2 . Hal ini menunjukkan bahwa kolom sudah berada pada daerah kolom pendek.

Pada kolom pendek beban maksimum yang dapat dipikul ditentukan oleh hancurnya material bukan oleh tekuk, sehingga tegangan kritis yang terjadi akan mendekati tegangan lelehnya ($F_{cr} \approx F_y$).

Terlihat di dalam Tabel 4.3 bahwa harga tegangan kritis yang terjadi (F_{cr}) sebesar $2319,357 \text{ kg/cm}^2$ adalah mendekati harga tegangan leleh bahan (F_y) dalam hal ini sebesar 2400 kg/cm^2 .

Harga tegangan kritis yang terjadi pada kolom baja yang mendekati harga tegangan leleh bahan baja tersebut menunjukkan bahwa pada saat itu kehancuran kolom ditentukan oleh kekuatan kolom baja dan bukan lagi ditentukan oleh tekuk yang terjadi. Dengan kata lain, batas kolom pendek dan kolom sedang adalah pada saat harga tegangan kritis yang terjadi (F_{cr}) adalah mendekati harga tegangan leleh bahannya (F_y).

Ditunjukkan di dalam tabel-tabel di atas, bahwa pada saat harga tegangan kritis yang terjadi telah mendekati harga tegangan leleh bahannya ($F_{cr} \approx F_y$), angka kelangsingan yang terjadi ($k.l/r$) adalah sebesar 40. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa pada saat harga tegangan kritis yang terjadi mendekati harga

tegangan leleh bahannya, angka kelangsingan bahan adalah minimum yaitu sebesar $k.l/r = 40$, yang sekaligus merupakan batas kolom pendek dan kolom sedang. Apabila angka kelangsingan kolom lebih kecil dari 40, maka kolom tersebut merupakan kolom pendek. Apabila angka kelangsingan kolom lebih besar dari 40 dan lebih kecil dari angka kelangsingan batas (C_c), maka kolom tersebut merupakan kolom sedang.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Umum

Perhitungan dan pembahasan analisa kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis memberikan penjelasan tentang bagaimana perilaku kolom baja pada kondisi tekuk inelastis, pengaruh eksentrisitas pembebanan, dan harga tegangan kritis (F_{cr}) yang dapat terjadi sehingga kekuatan kolom dapat ditentukan.

Perhitungan-perhitungan dan analisa dilakukan secermat mungkin dengan memberikan perhitungan untuk suatu ukuran profil baja pada tegangan leleh bahannya, sehingga hasil perhitungan dan analisa dapat menunjukkan hubungan-hubungan yang menunjukkan perilaku dan kekuatan kolom baja dengan pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis.

5.2. Kesimpulan

Kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis merupakan suatu fenomena perilaku kolom baja di lapangan yang dipengaruhi oleh sifat baja dan tidak mungkin tercapainya perilaku kolom ideal.

Kesimpulan yang diperoleh dari analisa kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis adalah sebagai berikut :

1. Harga angka kelangsingan kolom ($k.l/r$) yang dipengaruhi oleh koefisien kondisi perletakan ujung (k) dan jari-jari girasi (r) akan menentukan perilaku kolom, yaitu apabila harga angka kelangsingan ($k.l/r$) lebih kecil dari kelangsingan batas (Cc) perilaku kolom bersifat inelastis dan bila harga angka kelangsingan ($k.l/r$) lebih besar dari kelangsingan batas (Cc) perilaku kolom bersifat elastis.
2. Modulus tangen (E_t) adalah modulus bahan untuk menentukan kekuatan kolom baja pada daerah inelastis yang mempunyai harga berubah-ubah karena adanya sebagian serat penampang telah mengalami leleh.
3. Eksentrisitas pembebanan merupakan faktor yang harus diperhatikan dalam analisa kekuatan kolom karena akan mempengaruhi tegangan yang terjadi pada penampang kolom, apabila harga eksentrisitas masih berada di dalam batas daerah kern penampang profil kolom, maka tegangan yang dihasilkan adalah hanya tegangan tekan.
4. Hasil perhitungan dan analisa kekuatan kolom baja terhadap pembebanan eksentris pada kondisi tekuk inelastis yang menunjukkan perubahan harga modulus tangen (E_t), tegangan kritis yang terjadi (F_{cr}), dan beban maksimum yang dapat didukung oleh kolom dengan harga eksentrisitas pembebanan tertentu pada angka kelangsingan ($k.l/r$) ditunjukkan dalam tabel perhitungan.
5. Rumus-rumus yang digunakan di dalam analisa dan perhitungan hanya berlaku pada saat kolom berperilaku sebagai kolom sedang, sehingga pada

saat kolom berperilaku sebagai kolom pendek, rumus-rumus yang dipakai pada perhitungan sebelumnya tidak dapat dipergunakan lagi.

5.3. Saran

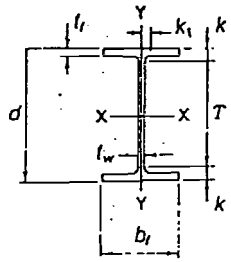
Memperhatikan hasil analisa dan perhitungan yang telah dilakukan, menarik untuk lebih dikembangkan dan diperdalam. Saran yang diberikan untuk menindaklanjuti hasil perhitungan dan analisa ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan analisa kolom baja pada kondisi inelastis dengan eksentrisitas pembebanan yang terjadi pada sumbu gabungan.
2. Diadakan analisa kolom dengan perilaku kolom sebagai balok-kolom pada kondisi tekuk inelastis.

DAFTAR PUSTAKA

1. _____, *Pengetahuan Dasar Struktur Baja (Struktur Baja I)*, Padosbajayo, Yogyakarta, 1991
2. Gaylord. EH, Gaylord.CN, *Design of Steel Structures*, Mc Graw Hill Ltd, 1972.
3. *Manual of Steel Construction*, Eight Edition, AISC Inc, USA, 1980.
4. Mc Cormac. Jack, *Structural Steel Design*, Harper and Row, Publisher, New York, 1981.
5. Salmon. CG, Johnson. JE, *Struktur Baja Desain dan Perilaku*, Restu Agung, 1988.
6. SK. Duggal, *Design of Steel Structures*, Tata Mc Graw Hill Company, 1993
7. W. Crawley. Stanley, M. Dillon. Robert, *Steel Buildings*, John Willey and Sons, New York, 1977.



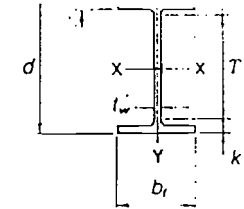


W SHAPES
Dimensions

Designation	Area A	Depth d	Web		Flange		Distance						
			Thickness L	L/2	Width b _f	Thickness t _f	T	k	k ₁				
										In.	In.	In.	In.
W 18x311	91.5	22.32	22%	1.520	1 1/2	3/4	12.005	12	2.740	2%	15%	3 1/8	1 1/8
x283	83.2	21.85	21%	1.400	1 1/4	1 1/8	11.890	11 1/4	2.500	2 1/2	15%	3 3/8	1 1/8
x258	75.9	21.46	21%	1.280	1 1/4	1 1/8	11.770	11 1/4	2.300	2 1/4	15%	3	1 1/8
x234	66.8	21.06	21	1.160	1 1/4	1 1/8	11.650	11 1/4	2.110	2 1/4	15%	2 3/4	1
x211	62.1	20.67	20%	1.060	1 1/4	1 1/8	11.555	11 1/4	1.910	1 3/4	15%	2 1/2	1
x192	56.4	20.35	20%	0.960	1	1 1/2	11.455	11 1/2	1.750	1 1/2	15%	2 1/4	1 1/8
x175	51.3	20.04	20	0.890	1	1 1/2	11.375	11 1/2	1.590	1 1/4	15%	2 1/4	1 1/8
x158	46.3	19.72	19%	0.810	1	1 1/2	11.300	11 1/2	1.440	1 1/4	15%	2 1/4	1 1/8
x143	42.1	19.49	19%	0.730	1	1 1/2	11.220	11 1/2	1.320	1 1/4	15%	2	1 1/8
x130	38.2	19.25	19%	0.670	1	1 1/2	11.160	11 1/2	1.200	1 1/4	15%	1 3/4	1 1/8
W 18x119	35.1	18.97	19	0.655	1	1 1/2	11.265	11 1/2	1.060	1 1/4	15%	1 3/4	1 1/8
x106	31.1	18.73	18%	0.590	1	1 1/2	11.200	11 1/2	0.940	1 1/4	15%	1 3/4	1 1/8
x97	28.5	18.59	18%	0.535	1	1 1/2	11.145	11 1/2	0.870	1 1/4	15%	1 3/4	1 1/8
x86	25.3	18.39	18%	0.480	1	1 1/2	11.090	11 1/2	0.770	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x76	22.3	18.21	18%	0.425	1	1 1/2	11.035	11	0.680	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
W 18x71	20.8	18.47	18%	0.495	1	1 1/2	7.635	7 1/4	0.810	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x65	19.1	18.35	18%	0.450	1	1 1/2	7.590	7 1/4	0.750	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x60	17.6	18.24	18%	0.415	1	1 1/2	7.555	7 1/4	0.695	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x55	16.2	18.11	18%	0.390	1	1 1/2	7.530	7 1/4	0.630	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x50	14.7	17.99	18	0.355	1	1 1/2	7.495	7 1/4	0.570	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
W 18x46	13.5	18.06	18	0.360	1	1 1/2	6.060	6	0.605	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x40	11.8	17.90	17%	0.315	1	1 1/2	6.015	6	0.525	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
x35	10.3	17.70	17%	0.300	1	1 1/2	6.000	6	0.425	1 1/4	15%	1 1/2	1 1/8
W 16x100	29.4	16.97	17	0.585	1	1 1/2	10.425	10 1/4	0.985	1	13%	1 1/2	1 1/8
x89	26.2	16.75	16%	0.525	1	1 1/2	10.365	10 1/4	0.875	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x77	22.6	16.52	16%	0.455	1	1 1/2	10.295	10 1/4	0.760	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x67	19.7	16.33	16%	0.395	1	1 1/2	10.235	10 1/4	0.665	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
W 16x57	16.8	16.43	16%	0.430	1	1 1/2	7.120	7 1/4	0.715	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x50	14.7	16.26	16%	0.380	1	1 1/2	7.070	7 1/4	0.630	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x45	13.3	16.13	16%	0.345	1	1 1/2	7.035	7	0.565	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x40	11.8	16.01	16	0.305	1	1 1/2	6.995	7	0.505	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8
x36	10.6	15.86	15%	0.295	1	1 1/2	6.985	7	0.430	1 1/4	13%	1 1/2	1 1/8

*For application refer to Notes in Table 2.
Shapes in shaded rows are not available from domestic producers.

W SHAPES
Properties



Nom- inal Wt. per Ft	Compact Section Criteria					r _r	d A _v	Elastic Properties						Plastic Modulus	
	b _f 2t _f	F _y	d L	F _y	r _r			Axis X-X			Axis Y-Y			Z _x	Z _y
								I	S	r	I	S	r		
	Lb.	Ksi	Ksi	In.	In. ⁴			In. ³	In.	In. ⁴	In. ³	In.	In. ³	In. ³	In. ³
311	2.2	—	74.7	—	3.26	0.68	6960	624	8.72	795	132	2.95	753	207	
283	2.4	—	15.6	—	3.23	0.74	6190	564	8.61	704	113	2.91	676	185	
258	2.6	—	16.8	—	3.19	0.79	5510	514	8.53	628	107	2.88	611	166	
234	2.8	—	18.2	—	3.16	0.86	4900	466	8.44	558	95.8	2.85	549	149	
211	3.0	—	19.5	—	3.13	0.94	4330	419	8.35	493	85.3	2.82	490	132	
192	3.3	—	21.2	—	3.10	1.02	3870	380	8.28	440	76.8	2.79	442	119	
175	3.6	—	22.5	—	3.07	1.11	3450	344	8.20	391	68.8	2.76	398	106	
158	3.9	—	24.3	—	3.05	1.21	3060	310	8.12	347	61.4	2.74	356	94.8	
143	4.2	—	26.7	—	3.03	1.32	2750	282	8.09	311	55.5	2.72	322	85.4	
130	4.6	—	28.7	—	3.01	1.44	2460	256	8.03	278	49.9	2.70	291	76.7	
119	5.3	—	29.0	—	3.02	1.59	2190	231	7.90	253	44.9	2.69	261	69.1	
106	6.0	—	31.7	—	3.00	1.78	1910	204	7.84	220	39.4	2.66	230	60.5	
97	6.4	—	34.7	54.7	2.99	1.92	1750	188	7.82	201	36.1	2.65	211	55.3	
86	7.2	—	38.3	45.0	2.97	2.15	1530	166	7.77	175	31.6	2.63	186	48.4	
76	8.1	64.2	42.8	36.0	2.95	2.43	1330	146	7.73	152	27.6	2.61	163	42.2	
71	4.7	—	37.3	47.4	1.98	2.99	1170	127	7.50	60.3	15.8	1.70	145	24.7	
65	5.1	—	40.8	39.7	1.97	3.22	1070	117	7.49	54.8	14.4	1.69	133	22.5	
60	5.4	—	44.0	34.2	1.96	3.47	984	108	7.47	50.1	13.3	1.69	123	20.6	
55	6.0	—	46.4	30.6	1.95	3.82	890	98.3	7.41	44.9	11.9	1.67	112	18.5	
50	6.6	—	50.7	25.7	1.94	4.21	800	88.9	7.38	40.1	10.7	1.65	101	16.6	
46	5.0	—	50.2	26.2	1.54	4.93	712	78.8	7.25	22.5	7.43	1.29	90.7	11.7	
40	5.7	—	56.8	20.5	1.52	5.67	612	68.4	7.21	19.1	6.35	1.27	78.4	9.95	
35	7.1	—	59.0	19.0	1.49	6.94	510	57.6	7.04	15.3	5.12	1.22	66.5	8.06	
100	5.3	—	29.0	—	2.61	1.65	1490	175	7.10	186	35.7	2.51	198	54.9	
89	5.9	—	31.9	64.9	2.79	1.85	1300	155	7.05	163	31.4	2.49	175	48.1	
77	6.8	—	36.3	50.1	2.77	2.11	1110	134	7.00	138	26.9	2.47	150	41.1	
67	7.7	—	41.3	38.6	2.75	2.40	954	117	6.96	119	23.2	2.46	130	35.5	
57	5.0	—	38.2	45.2	1.86	3.23	758	92.2	6.72	43.1	12.1	1.60	105	18.9	
50	5.6	—	42.8	36.1	1.84	3.65	659	81.0	6.68	37.2	10.5	1.59	92.0	16.3	
45	6.2	—	46.8	30.2	1.83	4.06	586	72.7	6.65	32.8	9.34	1.57	82.3	14.5	
40	6.9	—	52.5	24.0	1.82	4.53	518	64.7	6.63	28.9	8.25	1.57	72.9	12.7	
36	8.1	64.0	53.8	22.9	1.79	5.28	448	56.5	6.51	24.5	7.00	1.52	64.0	10.8	