



# Perencanaan Struktur Baja dengan Metode **LRFD**

(Berdasarkan SNI 03-1729-2002)

Agus Setiawan

---

*PERENCANAAN  
STRUKTUR BAJA  
DENGAN METODE LRFD*

*(Sesuai SNI 03-1729-2002)*

**UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA  
NOMOR 19 TAHUN 2002  
TENTANG HAK CIPTA**

**PASAL 72  
KETENTUAN PIDANA  
SANKSI PELANGGARAN**

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu Ciptaan atau memberikan izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

---

***PERENCANAAN  
STRUKTUR BAJA  
DENGAN METODE LRFD  
(Sesuai SNI 03-1729-2002)***

**AGUS SETIAWAN**



**PENERBIT ERLANGGA**

Jl. H. Baping Raya No. 100

Ciracas, Jakarta 13740

<http://www.erlangga.co.id>

e-mail: [editor@erlangga.net](mailto:editor@erlangga.net)

(Anggota IKAPI)



***Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD  
(Sesuai SNI 03-1729-2002)***

**Agus Setiawan**

Hak Cipta © 2008 pada pengarang. Hak terbit pada ***Penerbit Erlangga***

Editor: **Lemeda Simarmata**

Buku ini diset dan dilayout oleh Bagian Produksi ***Penerbit Erlangga***  
dengan Power Macintosh G4 (Adobe Garamond 10 pt)

Setting oleh: Bagian Produksi **PT Penerbit Erlangga**

Dicetak oleh: **PT Gelora Aksara Pratama**

12 11 10 09 9 8 6 5 4 3 2

*Dilarang keras mengutip, menjiplak, memfotokopi, atau memperbanyak dalam bentuk apa pun, baik sebagian atau keseluruhan isi buku ini serta memperjualbelikannya tanpa izin tertulis dari Penerbit Erlangga.*

© HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG

---

## PRAKATA

Metode ASD (*Allowable Stress Design*) dalam struktur baja telah cukup lama digunakan, namun beberapa tahun terakhir metode desain dalam struktur baja mulai beralih ke metode lain yang lebih rasional, yakni metode LRFD (*Load Resistance and Factor Design*). Metode ini didasarkan pada ilmu probabilitas, sehingga dapat mengantisipasi segala ketidakpastian dari material maupun beban. Oleh karena itu, metode LRFD ini dianggap cukup andal. Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI 1987) telah diganti dengan Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1729-2002 yang berbasis pada metode LRFD.

Buku ini mencoba memberikan penjelasan mengenai perencanaan struktur baja dengan menggunakan konsep LRFD tersebut. Beberapa contoh soal yang diberikan telah dilengkapi dengan langkah-langkah penyelesaiannya. Dan dalam perencanaan struktur baja metode LRFD yang digunakan dalam buku ini, semuanya berpedoman pada SNI 03-1729-2002 yang telah disebutkan sebelumnya.

Sebagai bahan perkuliahan buku ini dapat diberikan dalam dua semester pada mata kuliah Struktur Baja. Semester pertama mahasiswa mempelajari tentang konsep dasar LRFD, pengenalan material baja, batang tarik dan tekan, sambungan (baut dan las), komponen struktur balok-kolom, komponen struktur komposit serta jenis-jenis sambungan pada konstruksi bangunan baja.

Selain dapat digunakan oleh mahasiswa Teknik Sipil, buku ini juga dapat dijadikan pedoman perencanaan bagi konsultan maupun praktisi yang banyak berkecimpung di dunia struktur baja.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan yang terdapat dalam buku ini, sehingga saran dari berbagai pihak sangat penulis harapkan guna perbaikan bukku ini pada edisi mendatang. Akhir kata, penulis berharap agar buku ini dapat memacu perkembangan implementasi metode LRFD dalam perencanaan struktur baja khususnya di Indonesia.

Semarang, November 2008

Agus Setiawan



---

# DAFTAR ISI

Prakata	v
Daftar Isi	vii

---

## Bab 1 PENDAHULUAN 1

1.1	Perencanaan Struktur	1
1.2	Beban	3
1.3	Konsep Dasar LRFD	5
1.4	Peluang Kegagalan	8
1.5	Indeks Keandalan	9
1.6	Desain LRFD Struktur Baja	11

---

## Bab 2 MATERIAL BAJA DAN SIFAT-SIFATNYA 15

2.1	Sejarah Penggunaan Material Baja	15
2.2	Material Baja	17
2.3	Sifat-sifat Mekanik Baja	18
2.4	Keuletan Material	21
2.5	Tegangan Multiaksial	22
2.6	Perilaku Baja pada Temperatur Tinggi	23
2.7	Pengerjaan Dingin dan Penguatan Regangan	25
2.8	Keruntuhan Getas	28
2.9	Sobekan Lamelar	27
2.10	Keruntuhan Lelah	28

---

## Bab 3 BATANG TARIK 29

3.1	Pendahuluan	29
3.2	Tahanan Nominal	31
3.3	Luas Netto	32
3.4	Efek Lubang Berselang-Seling pada Luas Netto	33
3.5	Luas Netto Efektif	36
3.6	Geser Blok ( <i>Block Shear</i> )	41
3.7	Kelangsingan Struktur Tarik	44
3.8	Transfer Gaya Pada Sambungan	46
	Soal-soal Latihan	47



**Bab 4 BATANG TEKAN 50**

---

- 4.1 Pendahuluan 50
- 4.2 Tekuk Elastik Euler 50
- 4.3 Kekuatan Kolom 51
- 4.4 Pengaruh Tegangan Sisa 52
- 4.5 Kurva Kekuatan Kolom Akibat Tegangan Sisa 52
- 4.6 Tahanan Tekan Nominal 56
- 4.7 Panjang Tekuk 57
- 4.8 Masalah Tekuk Lokal 61
- 4.9 Komponen Struktur Tekan Tersusun 61
- 4.10 Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi 66
- Soal-soal Latihan 79

**Bab 5 KOMPONEN STRUKTUR LENTUR 81**

---

- 5.1 Pendahuluan 81
- 5.2 Lentur Sederhana Profil Simetris 81
- 5.3 Perilaku Balok Terkekang Lateral 82
- 5.4 Desain Balok Terkekang Lateral 85
- 5.5 Lendutan Balok 88
- 5.6 Geser pada Penampang Gilas 91
- 5.7 Beban Terpusat Pada Balok 94
- 5.8 Teori Umum Lentur 99
- Soal-soal Latihan 107

**Bab 6 SAMBUNGAN BAUT 109**

---

- 6.1 Pendahuluan 109
- 6.2 Tahanan Nominal Baut 110
- 6.3 Geser Eksentris 115
- 6.4 Kombinasi Geser dan Tarik 123
- 6.5 Sambungan yang Mengalami Beban Tarik Aksial 127
- 6.6 Geser dan Tarik Akibat Beban Eksentris 128
- Soal-soal Latihan 132

**Bab 7 SAMBUNGAN LAS 137**

---

- 7.1 Pendahuluan 137
- 7.2 Jenis-jenis Sambungan 138
- 7.3 Jenis-jenis Las 138
- 7.4 Pembatasan Ukuran Las Sudut 139
- 7.5 Luas Efektif Las 140
- 7.6 Tahanan Nominal Sambungan Las 141
- 7.7 Geser Eksentris-Metoda Elastik 146
- 7.8 Geser Eksentris-Metoda Plastis 148
- 7.9 Beban Eksentris Normal pada Bidang Las 152
- Soal-soal Latihan 153

---

**Bab 8 TORSI 156**


---

- 8.1 Pendahuluan 156
- 8.2 Torsi Murni pada Penampang Homogen 156
- 8.3 Pusat Geser (*Shear Center*) 159
- 8.4 Tegangan Puntir Pada Profil I 165
- 8.5 Analogi Torsi dengan Lentur 172
- Soal-soal Latihan 176

---

**Bab 9 TEKUK TORSI LATERAL 178**


---

- 9.1 Pendahuluan 178
- 9.2 Perilaku Balok I Akibat Beban Momen Seragam 178
- 9.3 Tekuk Torsi Lateral Elastis 180
- 9.4 Tekuk Torsi Inelastis 184
- 9.5 Desain LRFD Balok I 186
- 9.6 Lentur Dua Arah 200
- Soal-soal Latihan 204

---

**Bab 10 BALOK PELAT BERDINDING PENUH (PELAT GIRDER) 206**


---

- 10.1 Pendahuluan 206
- 10.2 Persyaratan Balok Pelat Berdinding Penuh 208
- 10.3 Kuat Momen Nominal Balok Pelat Berdinding Penuh 210
- 10.4 Kuat Geser Nominal 213
- 10.5 Kuat Geser Nominal dengan Pengaruh Aksi Medan Tarik 216
- 10.6 Interaksi Geser dan Lentur 221
- 10.7 Pengaku Vertikal 222
- 10.8 Pengaku Penahan Gaya Tumpu 224
- 10.9 Desain Balok Pelat Berdinding Penuh 233
- Soal-soal Latihan 244

---

**Bab 11 BALOK-KOLOM 246**


---

- 11.1 Pendahuluan 246
- 11.2 Persamaan Diferensial untuk Kombinasi Gaya Aksial dan Lentur 248
- 11.3 Faktor Perbesaran Momen 252
- 11.4 Desain LRFD Komponen Struktur Balok-Kolom 254
- 11.5 Perbesaran Momen untuk Struktur Tak Bergoyang 255
- 11.6 Perbesaran Momen untuk Struktur Bergoyang 255
- 11.7 Tekuk Lokal Web pada Komponen Struktur Balok-Kolom 256
- Soal-soal Latihan 277

---

**Bab 12 KOMPONEN STRUKTUR KOMPOSIT 280**


---

- 12.1 Struktur Komposit 280
- 12.2 Tegangan Elastis dalam Balok Komposit 282

**x**    **DAFTAR ISI**

12.3	Lebar Efektif Balok Komposit	<b>284</b>	
12.4	Sistem Pelaksanaan Komponen Struktur Komposit		<b>288</b>
12.5	Kuat Lentur Nominal	<b>292</b>	
12.6	Penghubung Geser	<b>295</b>	
12.7	Balok Komposit pada Daerah Momen Negatif		<b>304</b>
12.8	Lendutan	<b>306</b>	
12.9	Dek Baja Gelombang	<b>309</b>	
12.10	Kolom Komposit	<b>315</b>	
	Soal-soal Latihan	<b>320</b>	

**Bab 13** *SAMBUNGAN PADA KONSTRUKSI BANGUNAN GEDUNG*    **322**

---

13.1	Sambungan Balok Induk dengan Balok Anak	<b>322</b>
13.2	Sambungan Balok-Kolom	<b>324</b>
13.3	Sambungan Balok-Kolom Diperkaku	<b>325</b>
13.4	Sambungan Penahan Momen	<b>327</b>
13.5	Sambungan Balok-Kolom dengan Pengaku	<b>329</b>
	Soal-soal Latihan	<b>332</b>

LAMPIRAN	<b>334</b>
JAWABAN SOAL-SOAL LATIHAN	<b>337</b>
DAFTAR PUSTAKA	<b>339</b>
INDEKS	<b>340</b>

# 1

## Pendahuluan

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Mendefinisikan semua jenis beban yang bekerja pada suatu struktur bangunan
- Menyusun kombinasi pembebanan berdasarkan konsep LRFD

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Perencanaan Struktur
- 1.2 Beban
- 1.3 Konsep Dasar LRFD
- 1.4 Peluang Kegagalan
- 1.5 Indeks Keandalan
- 1.6 Desain LRFD Struktur Baja

### 1.1 PERENCANAAN STRUKTUR

Perencanaan struktur dapat didefinisikan sebagai campuran antara seni dan ilmu pengetahuan yang dikombinasikan dengan intuisi seorang ahli struktur mengenai perilaku struktur dengan dasar-dasar pengetahuan dalam statika, dinamika, mekanika bahan, dan analisa struktur, untuk menghasilkan suatu struktur yang ekonomis dan aman, selama masa layannya.

Hingga tahun 1850 perencanaan struktur merupakan suatu seni yang berdasarkan pada intuisi untuk menentukan ukuran dan susunan elemen struktur. Dengan berkembangnya pengetahuan mengenai perilaku struktur dan material, maka perencanaan struktur menjadi lebih ilmiah.

Perhitungan yang melibatkan prinsip-prinsip ilmiah harus dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan, namun tidak diikuti secara membabi buta. Pengalaman intuisi seorang ahli struktur digabungkan dengan hasil-hasil perhitungan ilmiah akan menjadi suatu dasar proses pengambilan keputusan yang baik.

Tujuan dari perencanaan struktur menurut Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1729-2002) adalah menghasilkan suatu struktur yang stabil, cukup kuat, mampu layan, awet, dan memenuhi tujuan-tujuan lainnya seperti ekonomi dan kemudahan pelaksanaan. Suatu struktur disebut stabil jika tidak mudah terguling, miring, atau tergeser selama umur rencana bangunan. Risiko terhadap kegagalan struktur dan hilangnya kemampulayanan selama umur rencananya juga harus diminimalisir dalam batas-batas yang masih dapat diterima. Suatu struktur yang awet semestinya tidak memerlukan biaya perawatan yang terlalu berlebihan selama umur layannya.

Perencanaan adalah sebuah proses untuk mendapatkan suatu hasil yang optimum. Suatu struktur dikatakan optimum apabila memenuhi kriteria-kriteria berikut:

- a. Biaya minimum
- b. Berat minimum
- c. Waktu konstruksi minimum



- d. Tenaga kerja minimum
- e. Biaya manufaktur minimum
- f. Manfaat maksimum pada saat masa layan

Kerangka perencanaan struktur adalah pemilihan susunan dan ukuran dari elemen struktur sehingga beban yang bekerja dapat dipikul secara aman, dan perpindahan yang terjadi masih dalam batas-batas yang disyaratkan. Prosedur perencanaan struktur secara iterasi dapat dilakukan sebagai berikut:

- a. Perancangan. Penetapan fungsi dari struktur
- b. Penetapan konfigurasi struktur awal (*preliminary*) sesuai langkah 1 termasuk pemilihan jenis material yang akan digunakan
- c. Penetapan beban kerja struktur
- d. Pemilihan awal bentuk dan ukuran elemen struktur berdasarkan langkah 1, 2, 3
- e. Analisa struktur. Untuk memperoleh gaya-gaya dalam dan perpindahan elemen
- f. Evaluasi. Apakah perancangan sudah optimum sesuai yang diharapkan
- g. Perencanaan ulang langkah 1 hingga 6
- h. Perencanaan akhir, apakah langkah 1 hingga 7 sudah memberikan hasil optimum

Salah satu tahapan penting dalam perencanaan suatu struktur bangunan adalah pemilihan jenis material yang akan digunakan. Jenis-jenis material yang selama ini dikenal dalam dunia konstruksi antara lain adalah baja, beton bertulang, serta kayu. Material baja sebagai bahan konstruksi telah digunakan sejak lama mengingat beberapa keunggulannya dibandingkan material yang lain. Beberapa keunggulan baja sebagai material konstruksi, antara lain adalah:

1. Mempunyai kekuatan yang tinggi, sehingga dapat mengurangi ukuran struktur serta mengurangi pula berat sendiri dari struktur. Hal ini cukup menguntungkan bagi struktur-struktur jembatan yang panjang, gedung yang tinggi atau juga bangunan-bangunan yang berada pada kondisi tanah yang buruk
2. Keceragaman dan keawetan yang tinggi, tidak seperti halnya material beton bertulang yang terdiri dari berbagai macam bahan penyusun, material baja jauh lebih seragam/homogen serta mempunyai tingkat keawetan yang jauh lebih tinggi jika prosedur perawatan dilakukan secara semestinya
3. Sifat elastis, baja mempunyai perilaku yang cukup dekat dengan asumsi-asumsi yang digunakan untuk melakukan analisa, sebab baja dapat berperilaku elastis hingga tegangan yang cukup tinggi mengikuti Hukum Hooke. Momen inersia dari suatu profil baja juga dapat dihitung dengan pasti sehingga memudahkan dalam melakukan proses analisa struktur
4. Daktilitas baja cukup tinggi, karena suatu batang baja yang menerima tegangan tarik yang tinggi akan mengalami regangan tarik cukup besar sebelum terjadi keruntuhan
5. Beberapa keuntungan lain pemakaian baja sebagai material konstruksi adalah kemudahan penyambungan antarelemen yang satu dengan lainnya menggunakan alat sambung las atau baut. Pembuatan baja melalui proses gilas panas mengakibatkan baja menjadi mudah dibentuk menjadi penampang-penampang yang diinginkan. Kecepatan pelaksanaan konstruksi baja juga menjadi suatu keunggulan material baja

Selain keuntungan-keuntungan yang disebutkan tersebut, material baja juga memiliki beberapa kekurangan, terutama dari sisi pemeliharaan. Konstruksi baja yang berhubungan



**Gambar 1.1** Konstruksi Bangunan Rangka Baja (Sumber: Koleksi Pribadi)

langsung dengan udara atau air, secara periodik harus dicat. Perlindungan terhadap bahaya kebakaran juga harus menjadi perhatian yang serius, sebab material baja akan mengalami penurunan kekuatan secara drastis akibat kenaikan temperatur yang cukup tinggi, di samping itu baja juga merupakan konduktor panas yang baik, sehingga nyala api dalam suatu bangunan justru dapat menyebar dengan lebih cepat. Kelemahan lain dari struktur baja adalah masalah tekuk yang merupakan fungsi dari kelangsingan suatu penampang.

## 1.2 BEBAN

Beban adalah gaya luar yang bekerja pada suatu struktur. Penentuan secara pasti besarnya beban yang bekerja pada suatu struktur selama umur layannya merupakan salah satu pekerjaan yang cukup sulit. Dan pada umumnya penentuan besarnya beban hanya merupakan suatu estimasi saja. Meskipun beban yang bekerja pada suatu lokasi dari struktur dapat diketahui secara pasti, namun distribusi beban dari elemen ke elemen, dalam suatu struktur umumnya memerlukan asumsi dan pendekatan. Jika beban-beban yang bekerja pada suatu struktur telah diestimasi, maka masalah berikutnya adalah menentukan kombinasi-kombinasi beban yang paling dominan yang mungkin bekerja pada struktur tersebut. Besar beban yang bekerja pada suatu struktur diatur oleh peraturan pembebanan yang berlaku, sedangkan masalah kombinasi dari beban-beban yang bekerja telah diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 6.2.2 yang akan dibahas kemudian. Beberapa jenis beban yang sering dijumpai antara lain:

- a. **Beban Mati**, adalah berat dari semua bagian suatu gedung/bangunan yang bersifat tetap selama masa layan struktur, termasuk unsur-unsur tambahan, *finishing*, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian tak terpisahkan dari gedung/bangunan tersebut. Termasuk dalam beban ini adalah berat struktur, pipa-pipa, saluran listrik, AC, lampu-lampu, penutup lantai, dan plafon. Beberapa contoh berat dari beberapa komponen bangunan penting yang digunakan untuk

menentukan besarnya beban mati suatu gedung/bangunan diperlihatkan dalam Tabel 1.1 berikut ini:

**TABEL 1.1 BERAT SENDIRI BAHAN BANGUNAN DAN KOMPONEN GEDUNG**

Bahan Bangunan	Berat
Baja	7850 kg/m <sup>3</sup>
Beton	2200 kg/m <sup>3</sup>
Beton bertulang	2400 kg/m <sup>3</sup>
Kayu (kelas I)	1000 kg/m <sup>3</sup>
Pasir (kering udara)	1600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Komponen Gedung</b>	
Spesi dari semen, per cm tebal	21 kg/m <sup>2</sup>
Dinding bata merah ½ batu	250 kg/m <sup>2</sup>
Penutup atap genting	50 kg/m <sup>2</sup>
Penutup lantai ubin semen per cm tebal	24 kg/m <sup>2</sup>

(Sumber: Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung, 1983)

- b. **Beban Hidup**, adalah beban gravitasi yang bekerja pada struktur dalam masa layannya, dan timbul akibat penggunaan suatu gedung. Termasuk beban ini adalah berat manusia, perabotan yang dapat dipindah-pindah, kendaraan, dan barang-barang lain. Karena besar dan lokasi beban yang senantiasa berubah-ubah, maka penentuan beban hidup secara pasti adalah merupakan suatu hal yang cukup sulit. Beberapa contoh beban hidup menurut kegunaan suatu bangunan, ditampilkan dalam Tabel 1.2.

**TABEL 1.2 BEBAN HIDUP PADA LANTAI GEDUNG**

Kegunaan Bangunan	Berat
Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana	125 kg/m <sup>2</sup>
Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama, dan rumah sakit	250 kg/m <sup>2</sup>
Lantai ruang olah raga	400 kg/m <sup>2</sup>
Lantai pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, ruang mesin, dan lain-lain	400 kg/m <sup>2</sup>
Lantai gedung parkir bertingkat, untuk lantai bawah	800 kg/m <sup>2</sup>

(Sumber : Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung, 1983)

- c. **Beban Angin**, adalah beban yang bekerja pada struktur akibat tekanan-tekanan dari gerakan angin. Beban angin sangat tergantung dari lokasi dan ketinggian dari struktur. Besarnya tekanan tiup harus diambil minimum sebesar 25 kg/m<sup>2</sup>, kecuali untuk bangunan-bangunan berikut:
1. Tekanan tiup di tepi laut hingga 5 km dari pantai harus diambil minimum 40 kg/m<sup>2</sup>
  2. Untuk bangunan di daerah lain yang kemungkinan tekanan tiupnya lebih dari 40 kg/m<sup>2</sup>, harus diambil sebesar  $p = V^2/16$  (kg/m<sup>2</sup>), dengan  $V$  adalah kecepatan angin dalam m/s
  3. Untuk cerobong, tekanan tiup dalam kg/m<sup>2</sup> harus ditentukan dengan rumus  $(42,5 + 0,6h)$ , dengan  $h$  adalah tinggi cerobong seluruhnya dalam meter



**Gambar 1.2** Konstruksi Rangka Atap dari Baja Ringan (Smart Truss).  
(Sumber: Koleksi Pribadi)

Nilai tekanan tiup yang diperoleh dari hitungan di atas harus dikalikan dengan suatu koefisien angin, untuk mendapatkan gaya resultan yang bekerja pada bidang kontak tersebut.

- d. **Beban Gempa.** adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada struktur akibat adanya pergerakan tanah oleh gempa bumi, baik pergerakan arah vertikal maupun horizontal. Namun pada umumnya percepatan tanah arah horizontal lebih besar daripada arah vertikalnya, sehingga pengaruh gempa horizontal jauh lebih menentukan daripada gempa vertikal. Besarnya gaya geser dasar (statik ekuivalen) ditentukan berdasarkan persamaan  $V = \frac{C \times I}{R} \cdot W_t$ , dengan  $C$  adalah faktor respon gempa yang ditentukan berdasarkan lokasi bangunan dan jenis tanahnya,  $I$  adalah faktor keutamaan gedung,  $R$  adalah faktor reduksi gempa yang tergantung pada jenis struktur yang bersangkutan, sedangkan  $W_t$  adalah berat total bangunan termasuk beban hidup yang bersesuaian.

### 1.3 KONSEP DASAR LRFD

Dua filosofi yang sering digunakan dalam perencanaan struktur baja adalah perencanaan berdasarkan tegangan kerja/*working stress design* (*Allowable Stress Design/ASD*) dan perencanaan kondisi batas/*limit states design* (*Load and Resistance Factor Design/LRFD*). Metode ASD dalam perencanaan struktur baja telah digunakan dalam kurun waktu kurang lebih 100 tahun. Dan dalam 20 tahun terakhir prinsip perencanaan struktur baja mulai beralih ke konsep LRFD yang jauh lebih rasional dengan berdasarkan pada konsep probabilitas. Untuk lebih memahami latar belakang pengembangan metode LRFD dengan ilmu probabilitas, maka berikut akan sedikit dibahas mengenai prinsip-prinsip dasar dalam ilmu probabilitas. Dalam metode LRFD tidak diperlukan analisa probabilitas secara penuh, terkecuali untuk situasi-situasi tidak umum yang tidak diatur dalam peraturan.



Ada beberapa tingkatan dalam desain probabilitas. Metode Probabilitas Penuh (*Fully Probabilistic Method*) merupakan tingkat III, dan merupakan cara analisa yang paling kompleks. Metode Probabilitas Penuh memerlukan data-data tentang distribusi probabilitas dari tiap-tiap variabel acak (seperti tahanan, beban, dan lain-lain) serta korelasi antar variabel tersebut. Data-data ini biasanya tidak tersedia dalam jumlah yang cukup sehingga umumnya metode Probabilitas Penuh ini jarang digunakan dalam praktek.

Tingkat II dalam desain probabilitas dinamakan metode *First-Order Second Moment* (FOSM) yang menggunakan karakteristik statistik yang lebih mudah dari tahanan dan beban. Metode ini mengasumsikan bahwa beban  $Q$  dan tahanan  $R$  saling bebas secara statistik. Metode LRFD untuk perencanaan struktur baja yang diatur dalam SNI 03-1729-2002, berdasarkan pada metode FOSM ini.

Beberapa istilah dalam ilmu statistik yang sering dijumpai, di antaranya:

1. Nilai rerata

Nilai rerata dari sekumpulan data, dapat dihitung dengan persamaan:

$$\bar{x} = \frac{x_i}{N} \quad 1.1$$

dengan  $\bar{x}$  adalah nilai rerata,  $x_i$  adalah data ke- $i$  dan  $N$  adalah jumlah data.

2. Standar Deviasi

Variasi data terhadap nilai rerata ditentukan dengan menjumlahkan kuadrat selisih antara masing-masing data dengan nilai rerata dan membaginya dengan jumlah data minus satu.

$$\text{Varian} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad 1.2$$

Standar Deviasi,  $\sigma$  diperoleh dengan mencari akar kuadrat dari Varian

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad 1.3$$

3. Fungsi Kerapatan Probabilitas

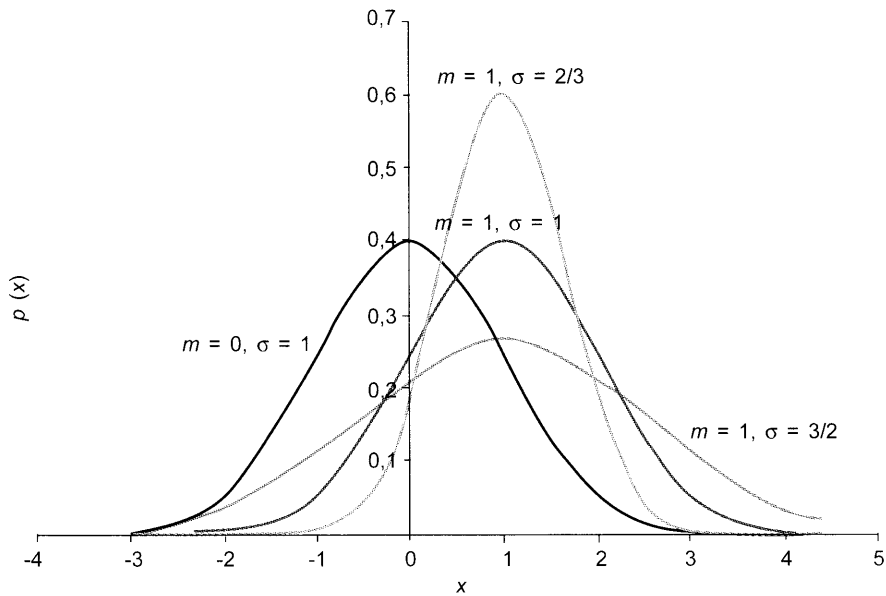
Fungsi Kerapatan Probabilitas (*Probability Density Function*/PDF) merupakan fungsi yang terdefinisi pada suatu selang interval kontinu, sehingga luas daerah di bawah kurva (yang didefinisikan oleh fungsi tersebut) dan di atas sumbu  $x$  adalah sama dengan satu. Untuk suatu variabel acak yang terdistribusi normal (*Gaussian*), maka kurva PDF akan mempunyai bentuk seperti suatu genta/lonceng, dan mempunyai persamaan:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{x-m}{\sigma} \right\}^2 \right] \quad -\infty \leq x < \infty \quad 1.4$$

dengan  $p(x)$  merupakan peluang terjadinya variabel  $x$  sebagai fungsi dari nilai rerata  $m = \bar{x}$  dan Standard Deviasi  $\sigma$ , dari suatu data yang terdistribusi normal. Bentuk kurva PDF tidak selalu terpusat pada sumbu koordinat namun tergantung dari perubahan  $m$  dan  $\sigma$ . Beberapa bentuk kurva PDF untuk  $m$  dan  $\sigma$  yang berbeda ditunjukkan dalam Gambar 1.3.

Selanjutnya didefinisikan pula fungsi distribusi probabilitas,  $P(x)$  yang dirumuskan sebagai:

$$P(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad 1.5$$



Gambar 1.3 Kurva Fungsi Kerapatan Probabilitas

Nilai  $P(x)$  terletak antara 0 hingga 1, sehingga:

$$\text{Prob} (-\infty < x < \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad 1.6$$

Jika distribusi data tidak simetri, maka kurva fungsi kerapatan probabilitas logaritmik normal (lognormal) sering digunakan. Dinyatakan secara matematis, jika  $Y = \ln(x)$  terdistribusi normal, maka  $x$  dikatakan lognormal. Fungsi lognormal digunakan dalam metode LRFD. Karena  $\ln(x)$  terdistribusi normal, maka nilai reratanya  $\lambda_m$  dan Standar Deviasi  $\zeta$  dapat ditentukan dengan transformasi logaritmik dari fungsi distribusi normalnya.

$$\lambda_m = \ln \left[ \frac{\bar{x}}{\sqrt{1+V^2}} \right] \quad 1.7$$

$$\zeta = \sqrt{\ln(1+V^2)} \quad 1.8$$

dengan  $V = \sigma / \bar{x}$  adalah koefisien variasi serta  $\bar{x}$  dan  $\sigma$  didefinisikan seperti pada persamaan 1.1 dan 1.3.

#### 4. Koefisien Variasi

Untuk dapat memberikan gambaran terhadap penyebaran data, maka biasanya digunakan Koefisien Variasi ( $V$ ) yang diperoleh dari pembagian antara Standar Deviasi ( $\sigma$ ) dengan nilai rerata ( $\bar{x}$ ).

#### 5. Faktor Bias

Faktor bias,  $\lambda$  merupakan rasio antara nilai rerata dengan nilai nominal.

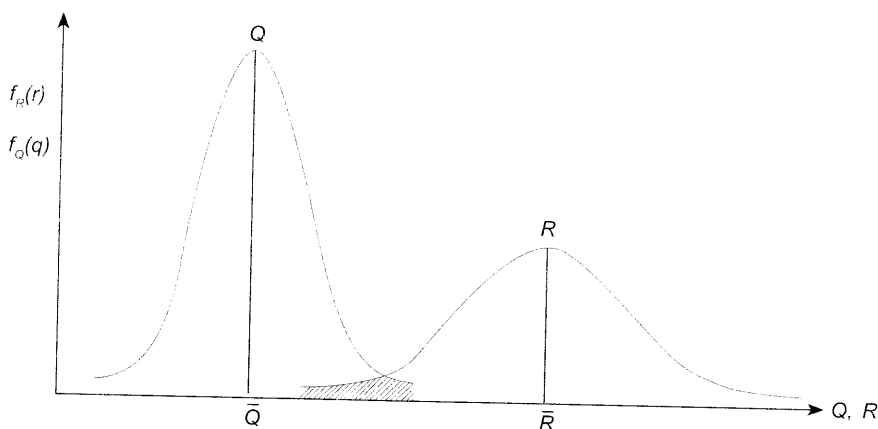
$$\lambda = \frac{\bar{x}}{x_n} \quad 1.9$$

## 1.4 PELUANG KEGAGALAN

Dalam konteks analisa keandalan suatu struktur, yang dimaksud dengan istilah kegagalan (*failure*) adalah terjadinya salah satu dari sejumlah kondisi batas yang telah ditentukan sebelumnya. Faktor beban dan tahanan dipilih sedemikian rupa sehingga peluang kegagalan suatu struktur adalah kecil sekali atau masih dalam batas-batas yang dapat diterima. Peluang kegagalan suatu struktur dapat ditentukan jika tersedia data-data statistik (seperti nilai rata dan standar deviasi) dari tahanan dan tersedia pula fungsi distribusi dari beban.

Untuk mengilustrasikan prosedur analisa keandalan suatu struktur, perhatikan kurva fungsi kerapatan probabilitas / PDF dalam Gambar 1.4 dari variabel acak beban  $Q$  serta tahanan  $R$ . Jika tahanan  $R$  lebih besar dari beban yang bekerja  $Q$ , maka struktur tersebut dapat dikatakan masih aman (*survive*). Karena nilai  $R$  dan  $Q$  bervariasi, maka akan ada kemungkinan kecil bahwa pada suatu saat beban  $Q$  lebih besar daripada tahanan  $R$ . Situasi ini direpresentasikan dengan daerah bersisir pada Gambar 1.4. Hal inilah yang disebut dengan kegagalan (*failure*), dengan peluang suatu kegagalan didefinisikan sebagai:

$$p_f = P(R < Q) \quad 1.10$$



Gambar 1.4 Fungsi Kerapatan Probabilitas Tahanan dan Beban

Fungsi kerapatan probabilitas dari  $R$  dan  $Q$  dalam Gambar 1.4 digambarkan untuk menunjukkan perbedaan nilai koefisien variasi dari tahanan dan beban, yaitu  $V_R$  dan  $V_Q$ . Daerah di bawah masing-masing kurva mempunyai luas sama dengan satu, namun terlihat bahwa tahanan  $R$  memiliki penyebaran data yang lebih lebar daripada beban  $Q$ . Daerah yang tersisir menunjukkan daerah kegagalan (*failure*) di mana nilai tahanan lebih kecil dari beban. Namun demikian, luas dari daerah tersisir tersebut tidak sama dengan besarnya peluang kegagalan, sebab daerah tersebut merupakan gabungan dari dua buah fungsi kerapatan yang memiliki standar deviasi serta nilai rerata yang berbeda. Untuk mencari nilai peluang kegagalan  $p_f$  biasanya lebih sering digunakan sebuah kurva fungsi kerapatan  $g(R, Q)$  yang dapat digunakan secara langsung untuk menentukan peluang kegagalan serta indeks keandalan suatu struktur. Jika  $R$  dan  $Q$  terdistribusi normal, maka fungsi kerapatan  $g(R, Q)$  dapat dituliskan menjadi:

$$g(R, Q) = R - Q \quad 1.11$$

Jika  $R$  dan  $Q$  terdistribusi secara lognormal, maka  $g(R, Q)$  dapat dituliskan:

$$g(R, Q) = \ln(R) - \ln(Q) = \ln\left(\frac{R}{Q}\right) \quad 1.12$$

Dalam kedua kasus di atas, kondisi batas tercapai jika  $R = Q$  dan kegagalan terjadi pada saat  $g(R, Q) < 0$ . Teori probabilitas menyatakan bahwa jika dua buah variabel acak yang terdistribusi normal digabungkan, maka akan menghasilkan fungsi kerapatan yang normal pula. Atau dengan kata lain jika  $R$  dan  $Q$  terdistribusi normal maka  $g(R, Q)$  juga akan terdistribusi normal. Hal serupa dapat pula dinyatakan jika  $R$  dan  $Q$  terdistribusi lognormal, maka  $g(R, Q)$  juga terdistribusi lognormal.

Peluang kegagalan dari  $R$  dan  $Q$  yang terdistribusi normal dapat dihitung berdasarkan persamaan:

$$p_f = 1 - F_u \left( \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right) \quad 1.13$$

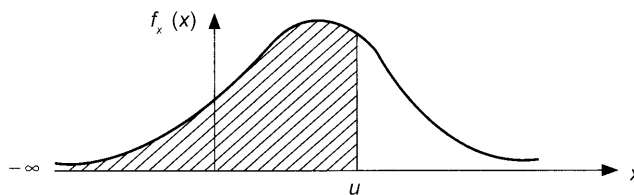
Sedangkan untuk  $R$  dan  $Q$  yang terdistribusi lognormal peluang kegagalannya:

$$p_f = 1 - F_u \left( \frac{\ln \left( \frac{\bar{R}}{\bar{Q}} \right)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \right) \quad 1.14$$

dengan  $\bar{R}$  dan  $\bar{Q}$  adalah nilai rerata,  $\sigma_R$  dan  $\sigma_Q$  adalah standar deviasi,  $V_R$  dan  $V_Q$  adalah koefisien variasi dari tahanan dan beban, serta  $F_u(\cdot)$  adalah fungsi distribusi kumulatif. Fungsi distribusi kumulatif adalah integrasi dari  $f_x(x)$  dengan batas integrasi adalah dari  $-\infty$  hingga  $u$  dan akan menghasilkan nilai peluang di mana  $x$  lebih kecil daripada  $u$ . Hasil integrasi ini diperlihatkan dengan daerah yang bersisir dalam Gambar 1.5.

## 1.5 INDEKS KEANDALAN

Alternatif lain yang lebih mudah untuk menentukan peluang kegagalan adalah dengan menggunakan indeks keandalan  $\beta$ . Prosedur ini akan dibahas dengan menggunakan distribusi lognormal sesuai persamaan 1.11, sebab distribusi lognormal akan dapat mencerminkan distribusi aktual serta  $R$  dan  $Q$  secara lebih akurat daripada distribusi normal. Selain itu, perhitungan secara numerik untuk fungsi  $g(R, Q)$  akan lebih stabil dengan menggunakan rasio  $R/Q$  daripada selisih  $R - Q$ .

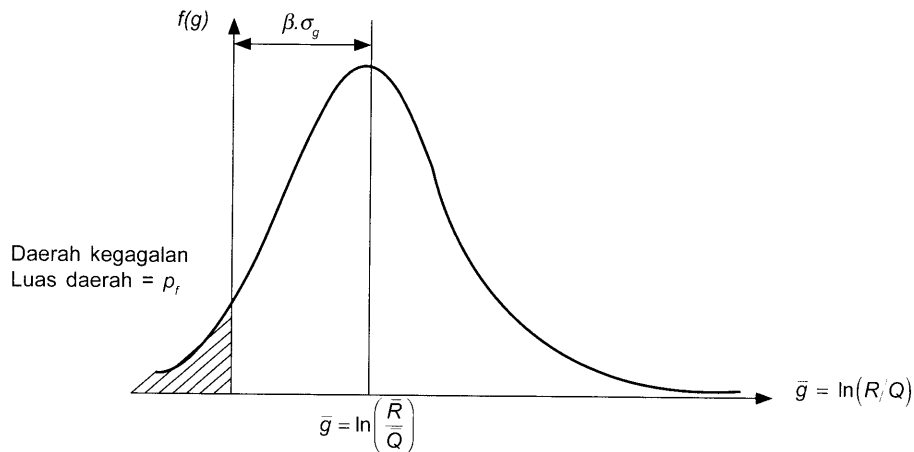


Gambar 1.5 Definisi  $F_u$

Jika fungsi  $g(R, Q)$  dalam persamaan 1.12 mempunyai distribusi lognormal, maka distribusi frekuensinya akan mempunyai bentuk seperti kurva dalam Gambar 1.6. Kurva ini adalah kurva distribusi frekuensi tunggal yang merupakan kombinasi dari  $R$  dan  $Q$ . Kondisi batas pada saat  $R < Q$  sama dengan probabilitas pada saat  $\ln(R/Q) < 0$ , yang ditunjukkan dengan daerah bersisir dalam Gambar 1.6 tersebut.

Jarak antara nilai rerata terhadap titik pusat adalah sama dengan  $\beta \cdot \sigma_g$ , dan menjadi ukuran dari keamanan dan koefisien dari standar deviasi,  $\beta$ , sering disebut sebagai indeks keandalan.





**Gambar 1.6** Indeks Keandalan  $\beta$  untuk  $R$  dan  $Q$  Lognormal.

Jika tahanan  $R$  dan beban  $Q$  keduanya terdistribusi lognormal serta tidak saling terkorrelasi, maka nilai rerata dari  $g(R, Q)$  adalah:

$$\bar{g} = \ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right) \quad 1.14$$

serta standar deviasinya adalah:

$$\sigma_g = \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \quad 1.15$$

dengan  $\bar{R}$  dan  $\bar{Q}$  adalah nilai rerata,  $V_R$  dan  $V_Q$  adalah koefisien variasi dari  $R$  dan  $Q$ . Dengan menyamakan  $\beta \cdot \sigma_g$  dengan  $\ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right)$  maka diperoleh hubungan:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad 1.16$$

Hubungan antara  $p_f$  dengan  $\beta$  dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$p_f = 460 \cdot \exp(-4,3\beta) \quad 1.17$$

$$\text{atau } \beta = -\frac{\ln\left(\frac{460}{p_f}\right)}{4,3} \quad 10^{-1} < p_f < 10^{-9} \quad 1.18$$

**TABEL 1.3** HUBUNGAN ANTARA PELUANG KEGAGALAN DAN INDEKS KEANDALAN

$\beta$	$p_f$	$p_f$	$\beta$
2,50	0,99E-02	1,00E-02	2,50
3,00	1,15E-03	1,00E-03	3,03
3,50	1,34E-04	1,00E-04	3,57
4,00	1,56E-05	1,00E-05	4,10
4,50	1,82E-06	1,00E-06	4,64
5,00	2,12E-07	1,00E-07	5,17
5,50	2,46E-08	1,00E-08	5,71

### ■ CONTOH 1.1

Sebuah balok jembatan dari beton prategang dengan panjang bentang 27 m dan jarak antar balok sepanjang 2,4 m memiliki data-data statistik sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efek beban} &: \bar{Q} = 4870 \text{ kN.m} & \sigma_Q &= 415 \text{ kN.m} \\ \text{Tahanan} &: R_n = 7040 \text{ kN.m} & \sigma_R &= 1,05 & V_R &= 0,075 \end{aligned}$$

Hitunglah indeks keandalan balok beton prategang tersebut.

**JAWAB:**

Indeks keandalan,  $\beta$ , dapat dihitung menggunakan persamaan 1.16, terlebih dahulu harus dihitung  $\bar{R}$  dan  $V_Q$ :

$$\bar{R} = \lambda_{R'} R_n = 1,05(7040) = 7390 \text{ kN.m}$$

$$V_Q = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} = \frac{415}{4870} = 0,085$$

Gunakan persamaan 1.16 :

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}}\right)}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} = \frac{\ln\left(\frac{7390}{4870}\right)}{\sqrt{0,075^2 + 0,085^2}} = 3,68$$

Peluang kegagalan dari balok beton prategang ini kurang lebih 1 : 10000.

## 1.6 DESAIN LRFD STRUKTUR BAJA

Secara umum, suatu struktur dikatakan aman apabila memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$\phi R_n \geq \Sigma \gamma_i Q_i \quad 1.19$$

Bagian kiri dari persamaan 1.19 merepresentasikan tahanan atau kekuatan dari sebuah komponen atau sistem struktur. Dan bagian kanan persamaan menyatakan beban yang harus dipikul struktur tersebut. Jika tahanan nominal  $R_n$  dikalikan suatu faktor tahanan  $\phi$  maka akan diperoleh tahanan rencana. Namun demikian, berbagai macam beban (beban mati, beban hidup, gempa, dan lain-lain) pada bagian kanan persamaan 1.19 dikalikan suatu faktor beban  $\gamma_i$  untuk mendapatkan jumlah beban terfaktor  $\Sigma \gamma_i Q_i$ .

### Faktor Beban dan Kombinasi Beban

Dalam persamaan 1.19 tampak bahwa tahanan rencana harus melebihi jumlah dari beban-beban kerja dikalikan dengan suatu faktor beban. Penjumlahan beban-beban kerja ini yang dinamakan sebagai kombinasi pembebanan. Menurut peraturan baja Indonesia, SNI 03-1729-2002 pasal 6.2.2 mengenai kombinasi pembebanan, dinyatakan bahwa dalam perencanaan suatu struktur baja haruslah diperhatikan jenis-jenis kombinasi pembebanan berikut ini:

- |    |   |               |
|----|---|---------------|
| a. | $1,4D$  | <b>1.20.a</b> |
| b. | $1,2D + 1,6L + 0,5(L_a \text{ atau } H)$                            | <b>1.20.b</b> |
| c. | $1,2D + 1,6(L_a \text{ atau } H) + (\gamma_L L \text{ atau } 0,8W)$ | <b>1.20.c</b> |
| d. | $1,2D + 1,3W + \gamma_L L + 0,5(L_a \text{ atau } H)$               | <b>1.20.d</b> |
| e. | $1,2D \pm 1,0E + \gamma_L L$  | <b>1.20.e</b> |
| f. | $0,9D \pm (1,3W \text{ atau } 1,0E)$                                | <b>1.20.f</b> |

dengan:

- $D$  adalah beban mati yang diakibatkan oleh berat konstruksi permanen, termasuk dinding, lantai atap, plafon, partisi tetap, tangga dan peralatan tetap
- $L$  adalah beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung, termasuk kejut, tetapi tidak termasuk beban lingkungan seperti angin, hujan, dan lain-lain
- $L_u$  adalah beban hidup di atap yang ditimbulkan selama perawatan oleh pekerja, peralatan, dan material atau selama penggunaan biasa oleh orang dan benda bergerak
- $H$  adalah beban hujan, tidak termasuk yang diakibatkan genangan air
- $W$  adalah beban angin
- $E$  adalah beban gempa yang ditentukan dari peraturan gempa  $\gamma_L = 0,5$  bila  $L < 5$  kPa, dan  $\gamma_L = 1$  bila  $L \geq 5$  kPa. Faktor beban untuk  $L$  harus sama dengan 1,0 untuk garasi parkir, daerah yang digunakan untuk pertemuan umum dan semua daerah yang memikul beban hidup lebih besar dari 5 kPa.

**TABEL 1.4 HUBUNGAN KOMBINASI BEBAN DENGAN INDEKS KEANDALAN**

Kombinasi Beban	Indeks Keandalan, $\beta$
D & L	3,0 untuk komponen struktur 4,5 untuk sambungan
D, L, dan W	2,5 untuk komponen struktur
D, L, dan E	1,75 untuk komponen struktur

### ■ CONTOH 1.2:

Suatu struktur pelat lantai dipikul oleh balok dari profil WF 450.200.9.14 dengan jarak antar balok adalah sebesar 2,5 m (as ke as). Beban mati pelat lantai sebesar 2,5 kN/m<sup>2</sup> dan beban hidup 4 kN/m<sup>2</sup>. Hitunglah beban terfaktor yang harus dipikul oleh balok tersebut sesuai kombinasi LRFD (SNI 03-1729-2002)!

#### JAWAB:

Tiap balok harus memikul berat sendiri ditambah beban dari pelat selebar 2,5 m.

$$D = 0,76 + 2,5(2,5) = 7,01 \text{ kN/m}$$

$$L = 2,5(4) = 10 \text{ kN/m}$$

Karena hanya ada 2 jenis beban yakni beban mati dan beban hidup, maka hanya perlu diperiksa terhadap kombinasi beban 1.1 dan 1.2 :

$$(1.20.a) \quad U = 1,4D = 1,4(7,01) = 9,814 \text{ kN/m}$$

$$(1.20.b) \quad U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_u \text{ atau } H) \\ = 1,2(7,01) + 1,6(10) + 0,5(0) = 24,412 \text{ kN/m}$$

Jadi, beban terfaktor yang menentukan adalah sebesar 24,412 kN/m.

### ■ CONTOH 1.3:

Suatu sistem struktur atap dari profil WF 400.200.8.13 yang diletakkan setiap jarak 3 m, digunakan untuk memikul beban mati sebesar 2 kN/m<sup>2</sup>, beban hidup atap 1,5 kN/m<sup>2</sup> serta beban angin 1 kN/m<sup>2</sup>. Hitunglah beban terfaktor yang harus dipikul oleh profil tersebut!

#### JAWAB:

Beban-bekan yang harus dipikul profil tersebut adalah:

$$D = 0,66 + 3(2) = 6,66 \text{ kN/m}$$

$$L = 0 \text{ kN/m}$$

$$L_u = 3(1,5) = 4,5 \text{ kN/m}$$

$$W = 3(1) = 3 \text{ kN/m}$$

Periksa terhadap kombinasi pembebanan 1.1 hingga 1.5:

$$(1.20.a) \quad U = 1,4D = 1,4(6,66) = 9,324 \text{ kN/m}$$

$$(1.20.b) \quad U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_a \text{ atau } H) \\ = 1,2(6,66) + 1,6(0) + 0,5(4,5) = 10,242 \text{ kN/m}$$

$$(1.20.c) \quad U = 1,2D + 1,6(L_a \text{ atau } H) + (\gamma_L L \text{ atau } 0,8 W) \\ = 1,2(6,66) + 1,6(4,5) + 0,8(3) = 17,592 \text{ kN/m}$$

$$(1.20.d) \quad U = 1,2D + 1,3W + \gamma_L L + 0,5(L_a \text{ atau } H) \\ = 1,2(6,66) + 1,3(3) + 0 + 0,5(4,5) = 14,142 \text{ kN/m}$$

$$(1.20.e) \quad U = 0,9D \pm 1,3W \\ = 0,9(6,66) + 1,3(3) = 9,894 \text{ kN/m atau } 2,094 \text{ kN/m}$$

Jadi, beban terfaktor yang harus dipikul profil tersebut adalah sebesar 17,592 kN/m

#### ■ CONTOH 1.4:

Sebuah kolom baja dari suatu struktur bangunan gedung, memikul beban-beban aksial sebagai berikut: beban mati 85 ton, beban hidup dari atap 25 ton, beban hidup dari lantai bangunan 110 ton, beban angin  $\pm 35$  ton, beban gempa + 30 ton. Hitunglah beban desain kolom sesuai kombinasi LRFD!

#### JAWAB:

Beban-beban yang harus dipikul profil tersebut adalah:

$$D = 85 \text{ ton} \quad W = \pm 5 \text{ ton}$$

$$L_a = 25 \text{ ton} \quad E = \pm 30 \text{ ton}$$

$$L = 110 \text{ ton} \quad \text{misalkan diambil } \gamma_L = 0,5$$

Periksa terhadap kombinasi pembebanan 1.1 hingga 1.6:

$$(1.20.a) \quad U = 1,4D = 1,4(85) = 119 \text{ ton}$$

$$(1.20.b) \quad U = 1,2D + 1,6L + 0,5L_a \\ = 1,2(85) + 1,6(110) + 0,5(25) = 290,5 \text{ ton}$$

$$(1.20.c) \quad U = 1,2D + 1,6L_a + 0,5L \\ = 1,2(85) + 1,6(25) + 0,5(110) = 197 \text{ ton}$$

$$(1.20.c) \quad U = 1,2D + 1,6L_a + 0,8W \\ = 1,2(85) + 1,6(25) + 0,8(35) = 170 \text{ ton}$$

$$(1.20.d) \quad U = 1,2D + 1,3W + 0,5L + 0,5L_a \\ = 1,2(85) + 1,3(35) + 0,5(110) + 0,5(25) = 215 \text{ ton}$$

$$(1.20.e) \quad U = 1,2D \pm 1,0E + 0,5L \\ = 1,2(85) \pm 30 + 0,5(110) = 187 \text{ ton atau } 127 \text{ ton}$$

$$(1.20.f) \quad U = 0,9D \pm 1,3W \\ = 0,9(85) \pm 1,3(35) = 122 \text{ ton atau } 31 \text{ ton}$$

$$(1.20.f) \quad U = 0,9D \pm 1,0E \\ = 0,9(85) + 1,0(30) = 106,5 \text{ ton atau } 46,5 \text{ ton}$$

Jadi, beban terfaktor yang harus dipikul oleh kolom tersebut adalah sebesar 290,5 ton.

#### Faktor Tahanan

Faktor tahanan dalam perencanaan struktur berdasarkan metode LRFD, ditentukan dalam tabel 6.4-2 SNI 03-1729-2002, sebagai berikut:

- |    |  |               |
|----|--|---------------|
| a. | Komponen struktur yang memikul lentur            | $\phi = 0,90$ |
| b. | Komponen struktur yang memikul gaya tekan aksial | $\phi = 0,85$ |
| c. | Komponen struktur yang memikul gaya tarik        |               |
|    | 1) Terhadap kuat tarik leleh                     | $\phi = 0,90$ |
|    | 2) Terhadap kuat tarik fraktur                   | $\phi = 0,75$ |

- d. Komponen struktur yang memikul gaya aksial dan lentur  $\phi = 0,90$
- e. Komponen struktur komposit
  - 1) Kuat tekan  $\phi = 0,85$
  - 2) Kuat tumpu beton  $\phi = 0,60$
  - 3) Kuat lentur dengan distribusi tegangan plastis  $\phi = 0,85$
  - 4) Kuat lentur dengan distribusi tegangan elastis  $\phi = 0,90$
- f. Sambungan baut  $\phi = 0,75$
- g. Sambungan las
  - 1) Las tumpul penetrasi penuh  $\phi = 0,90$
  - 2) Las sudut, las tumpul penetrasi sebagian, las pengisi  $\phi = 0,75$

# 2

## Material Baja dan Sifat-sifatnya

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Memahami unsur-unsur penyusun material baja
- Sifat-sifat mekanik dan perilaku material baja

Pokok-pokok Pembahasan Bab

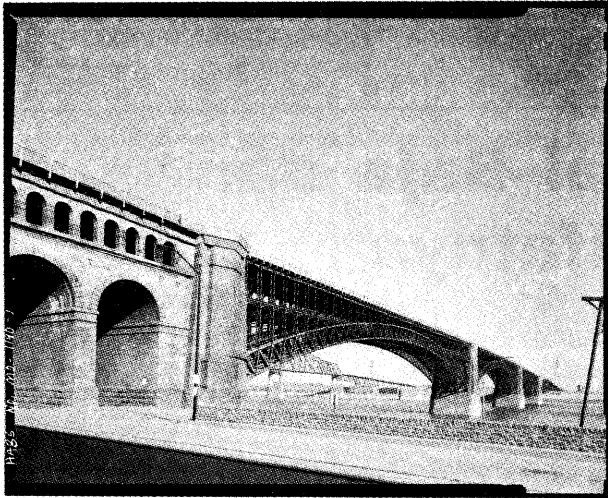
- 1.1 Sejarah Penggunaan Material Baja
- 1.2 Material Baja
- 1.3 Sifat-sifat Mekanik Baja
- 1.4 Keuletan Material
- 1.5 Tegangan Multiaksial
- 1.6 Perilaku Baja pada Temperatur Tinggi
- 1.7 Pengerjaan Dingin dan Penguatan Regangan
- 1.8 Keruntuhan Getas
- 1.9 Sobekan Lamelar
- 1.10 Keruntuhan Lelah

### 2.1 SEJARAH PENGGUNAAN MATERIAL BAJA

Pada masa awal penggunaannya sekitar tahun 4000 SM, besi (komponen utama penyusun baja) digunakan untuk membuat peralatan-peralatan sederhana. Material ini dibuat dalam bentuk besi tempa, yang diperoleh dengan memanaskan bijih-bijih besi dengan menggunakan arang. Sekitar akhir abad ke-18 dan permulaan abad ke-19, besi tuang dan besi tempa sudah mulai banyak digunakan untuk pembuatan struktur jembatan. Jembatan Lengkung Coalbrookdale yang melintang di atas Sungai Severn (Inggris) adalah jembatan pertama yang terbuat dari besi tuang. Jembatan dengan panjang bentang sekitar 30 m ini dibangun oleh Abraham Darby III.



Gambar 2.1 Coalbrookdale Arch Bridge (Sumber: [www.greatbuildings.com](http://www.greatbuildings.com))



**Gambar 2.2** Eads Bridge, St. Louis, USA (Sumber: [www.bridgepos.com](http://www.bridgepos.com))

Pada abad ke-19 muncul material baru yang dinamakan dengan baja yang merupakan logam paduan antara besi dan karbon. Material baja mengandung kadar karbon yang lebih sedikit daripada besi tuang, dan mulai digunakan dalam konstruksi-konstruksi berat. Pembuatan baja dalam volume besar dilakukan pertama kali oleh Sir Henry Bessemer dari Inggris. Sir Henry menerima hak paten dari pemerintah Inggris pada tahun 1855 atas temuannya tersebut. Beliau mempelajari bahwa dengan menghembuskan aliran udara di atas besi cair panas akan membakar kotoran-kotoran yang ada dalam besi tersebut, namun secara bersamaan proses ini juga menghilangkan komponen-komponen penting seperti karbon dan mangan. Selanjutnya komponen-komponen penting ini dapat digantikan dengan suatu logam paduan antara besi, karbon dan mangan, di samping itu juga mulai ditambahkan batu kapur yang dapat mengikat senyawa fosfor dan sulfur. Dengan ditemukannya proses Bessemer, maka di tahun 1870 baja karbon mulai dapat diproduksi dalam skala besar dan secara perlahan material baja mulai menggantikan besi tuang sebagai elemen konstruksi.



**Gambar 2.3** Home Insurance Company Building, Chicago.  
(Sumber: [www.ar.utexas.edu](http://www.ar.utexas.edu))

Di Amerika Serikat jembatan kereta api pertama yang dibuat dari baja adalah jembatan Eads, yang diselesaikan pada tahun 1874. Jembatan yang memakan biaya sekitar \$10.000.000 ini terdiri dari tiga buah bentangan, bentangan tengah sepanjang 520 ft sedangkan dua bentangan yang lain sepanjang 500 ft.

Struktur portal rangka baja pertama adalah Home Insurance Company Building di Chicago yang dibangun oleh William Le Baron Jenny. Jenny menggunakan kolom dari besi tuang yang dibungkus dengan bata, balok-balok untuk enam lantai pertama terbuat dari besi tempa, sedangkan balok-balok di lantai atasnya terbuat dari balok baja struktural.

## 2.2 MATERIAL BAJA

Baja yang akan digunakan dalam struktur dapat diklasifikasikan menjadi baja karbon, baja paduan rendah mutu tinggi, dan baja paduan. Sifat-sifat mekanik dari baja tersebut seperti tegangan leleh dan tegangan putusnya diatur dalam ASTM A6/A6M.

### a. Baja karbon

Baja karbon dibagi menjadi 3 kategori tergantung dari persentase kandungan karbonnya, yaitu: baja karbon rendah ( $C = 0,03-0,35\%$ ), baja karbon medium ( $C = 0,35-0,50\%$ ), dan baja karbon tinggi ( $C = 0,55-1,70\%$ ). Baja yang sering digunakan dalam struktur adalah baja karbon medium, misalnya baja BJ 37. Kandungan karbon baja medium bervariasi dari 0,25–0,29% tergantung ketebalan. Selain karbon, unsur lain yang juga terdapat dalam baja karbon adalah mangan (0,25–1,50%), Silikon (0,25–0,30%), fosfor (maksimal 0,04%) dan sulfur (0,05%). Baja karbon menunjukkan titik peralihan leleh yang jelas, seperti nampak dalam Gambar 2.4, kurva a. Naiknya persentase karbon meningkatkan tegangan leleh namun menurunkan daktilitas, salah satu dampaknya adalah membuat pekerjaan las menjadi lebih sulit. Baja karbon umumnya memiliki tegangan leleh ( $f_y$ ) antara 210–250 MPa.

### b. Baja paduan rendah mutu tinggi

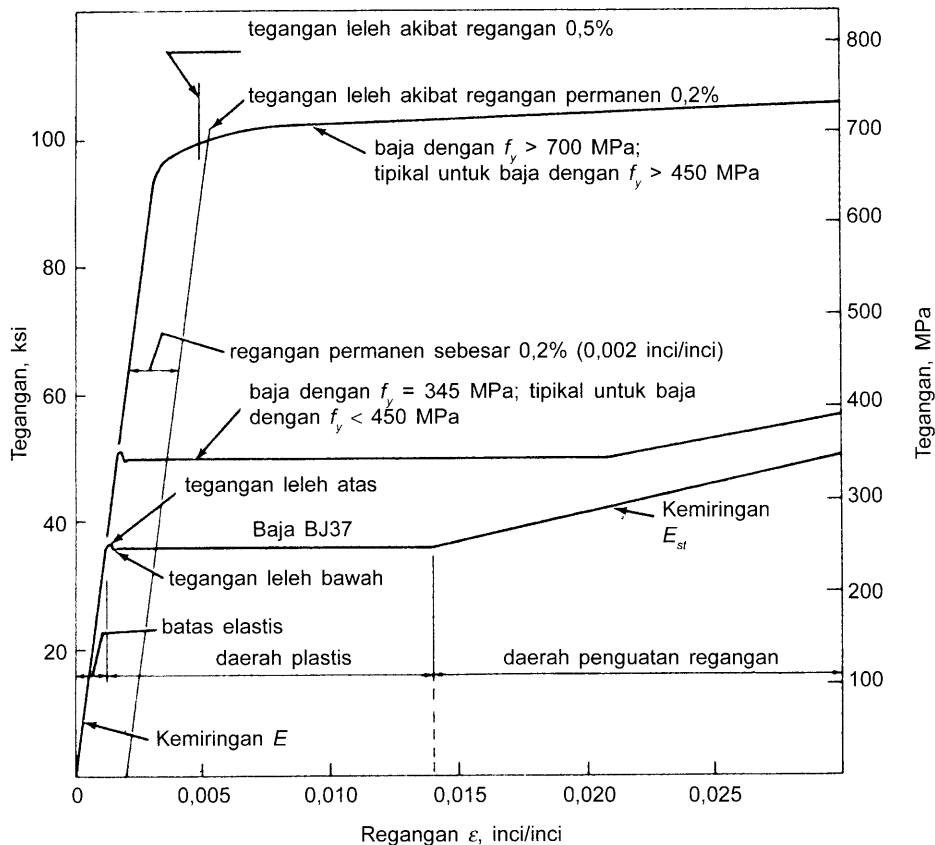
Yang termasuk dalam kategori baja paduan rendah mutu tinggi (*high-strength low-alloy steel/HSLA*) mempunyai tegangan leleh berkisar antara 290–550 MPa dengan tegangan putus ( $f_u$ ) antara 415–700 MPa. Titik peralihan leleh dari baja ini nampak dengan jelas (Gambar 2.4 kurva b). Penambahan sedikit bahan-bahan paduan seperti chromium, columbium, mangan, molybden, nikel, fosfor, vanadium atau zirkonium dapat memperbaiki sifat-sifat mekaniknya. Jika baja karbon mendapatkan kekuatannya seiring dengan penambahan persentase karbon, maka bahan-bahan paduan ini mampu memperbaiki sifat mekanik baja dengan membentuk mikrostruktur dalam bahan baja yang lebih halus.

### c. Baja paduan

Baja paduan rendah (*low alloy*) dapat ditempa dan dipanaskan untuk memperoleh tegangan leleh antara 550–760 MPa. Titik peralihan leleh tidak tampak dengan jelas (Gambar 2.4 kurva c). Tegangan leleh dari baja paduan biasanya ditentukan sebagai tegangan yang terjadi saat timbul regangan permanen sebesar 0,2%, atau dapat ditentukan pula sebagai tegangan pada saat regangan mencapai 0,5%.

Baut yang biasa digunakan sebagai alat pengencang mempunyai tegangan putus minimum 415 MPa hingga 700 MPa. Baut mutu tinggi mempunyai kandungan karbon maksimum 0,30%, dengan tegangan putus berkisar antara 733 hingga 838 MPa.

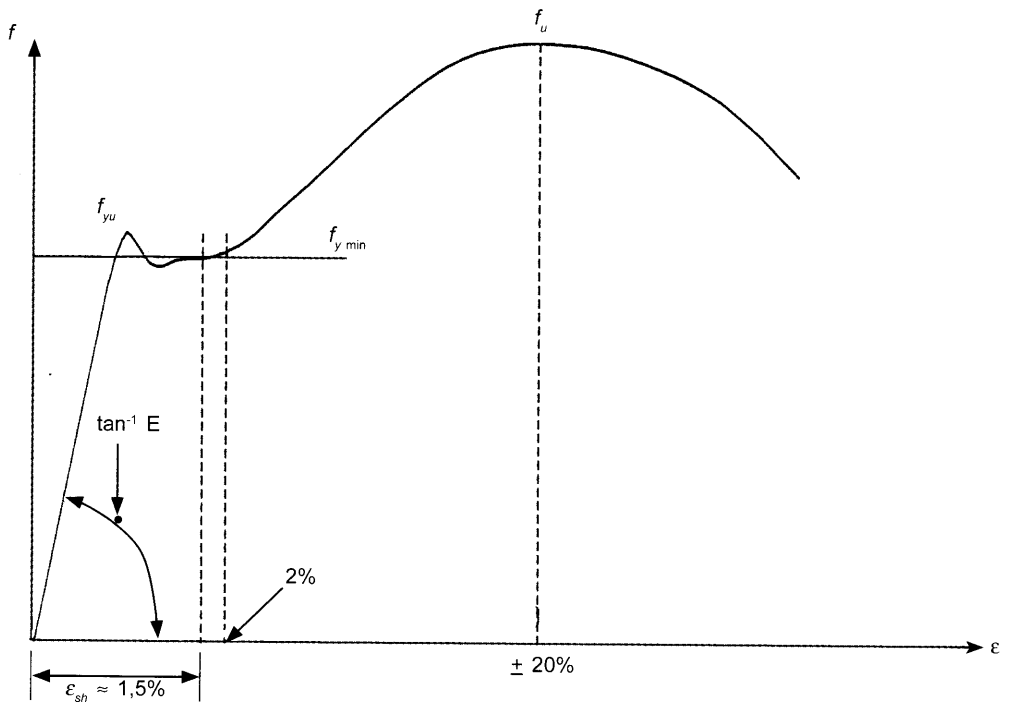




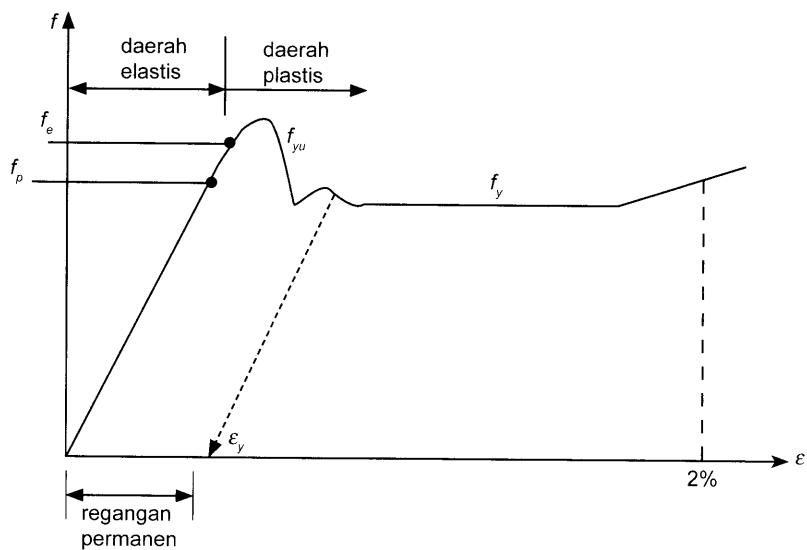
**Gambar 2.4** Hubungan tegangan–regangan tipikal. (Sumber: Salmon & Johnson, *Steel Structures Design and Behavior*, 4<sup>th</sup> ed.)

## 2.3 SIFAT–SIFAT MEKANIK BAJA

Agar dapat memahami perilaku suatu struktur baja, maka seorang ahli struktur harus memahami pula sifat-sifat mekanik dari baja. Model pengujian yang paling tepat untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik dari material baja adalah dengan melakukan uji tarik terhadap suatu benda uji baja. Uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat-sifat mekanik material baja, karena disebabkan beberapa hal antara lain adanya potensi tekuk pada benda uji yang mengakibatkan ketidakstabilan dari benda uji tersebut, selain itu perhitungan tegangan yang terjadi di dalam benda uji lebih mudah dilakukan untuk uji tarik daripada uji tekan. Gambar 2.5 dan 2.6 menunjukkan suatu hasil uji tarik material baja yang dilakukan pada suhu kamar serta dengan memberikan laju regangan yang normal. Tegangan nominal ( $f$ ) yang terjadi dalam benda uji diplot pada sumbu vertikal, sedangkan regangan ( $\epsilon$ ) yang merupakan perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula ( $\Delta L/L$ ) diplot pada sumbu horizontal. Gambar 2.5 merupakan hasil uji tarik dari suatu benda uji baja yang dilakukan hingga benda uji mengalami keruntuhan, sedangkan Gambar 2.6 menunjukkan gambaran yang lebih detail dari perilaku benda uji hingga mencapai regangan sebesar  $\pm 2\%$ .



Gambar 2.5 Kurva Hubungan Tegangan ( $f$ ) vs Regangan ( $\epsilon$ )



Gambar 2.6 Bagian Kurva Tegangan – Regangan yang Diperbesar

Titik-titik penting dalam kurva tegangan–regangan antara lain adalah:

- $f_p$  : batas proporsional
- $f_e$  : batas elastis
- $f_{yu}, f_y$  : tegangan leleh atas dan bawah

- $f_u$  : tegangan putus  
 $\varepsilon_{sh}$  : regangan saat mulai terjadi efek *strain-hardening* (penguatan regangan)  
 $\varepsilon_u$  : regangan saat tercapainya tegangan putus

Titik-titik penting ini membagi kurva tegangan–regangan menjadi beberapa daerah sebagai berikut:

1. Daerah linear antara 0 dan  $f_p$ , dalam daerah ini berlaku Hukum Hooke, kemiringan dari bagian kurva yang lurus ini disebut sebagai Modulus Elastisitas atau Modulus Young,  $E (= f/\varepsilon)$
2. Daerah elastis antara 0 dan  $f_e$  pada daerah ini jika beban dihilangkan maka benda uji akan kembali ke bentuk semula atau dikatakan bahwa benda uji tersebut masih bersifat elastis
3. Daerah plastis yang dibatasi oleh regangan antara 2% hingga 1,2–1,5%, pada bagian ini regangan mengalami kenaikan akibat tegangan konstan sebesar  $f_y$ . Daerah ini dapat menunjukkan pula tingkat daktilitas dari material baja tersebut. Pada baja mutu tinggi terdapat pula daerah plastis, namun pada daerah ini tegangan masih mengalami kenaikan. Karena itu baja jenis ini tidak mempunyai daerah plastis yang benar-benar datar sehingga tak dapat dipakai dalam analisa plastis
4. Daerah penguatan regangan (*strain-hardening*) antara  $\varepsilon_{sh}$  dan  $\varepsilon_u$ . Untuk regangan lebih besar dari 15 hingga 20 kali regangan elastis maksimum, tegangan kembali mengalami kenaikan namun dengan kemiringan yang lebih kecil daripada kemiringan daerah elastis. Daerah ini dinamakan daerah penguatan regangan (*strain-hardening*), yang berlanjut hingga mencapai tegangan putus. Kemiringan daerah ini dinamakan modulus penguatan regangan ( $E_{st}$ )

Dalam perencanaan struktur baja, SNI 03-1729-2002 mengambil beberapa sifat–sifat mekanik dari material baja yang sama yaitu:

Modulus Elastisitas, $E$	= 200.000 MPa
Modulus Geser, $G$	= 80.000 MPa
Angka poisson	= 0,30
Koefisien muai panjang, $\alpha$	= $12.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Sedangkan berdasarkan tegangan leleh dan tegangan putusnya, SNI 03-1729-2002 mengklasifikasikan mutu dari material baja menjadi 5 kelas mutu sebagai berikut:

**TABEL 2.1 SIFAT–SIFAT MEKANIS BAJA STRUKTURAL**

Jenis Baja	Tegangan Putus minimum, $f_u$ (MPa)	Tegangan Leleh minimum, $f_y$ (MPa)	Regangan minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Menurut Kuzmanovic dan Willems (1977), mendefinisikan daktilitas material baja sebagai rasio antara  $\varepsilon_{sh}$  dengan  $\varepsilon_y$ :

$$\psi = \frac{\varepsilon_{sh}}{\varepsilon_y} \quad 2.1$$

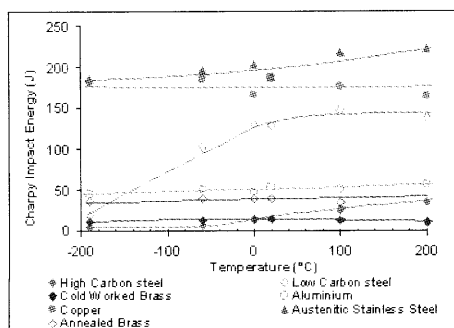
Nilai daktilitas dari berbagai material baja berbeda-beda. Baja mutu tinggi memiliki nilai daktilitas yang lebih rendah dibandingkan misalnya mutu BJ 37. Beberapa baja mutu tinggi bahkan memiliki nilai daktilitas mendekati satu, atau dengan kata lain hampir tidak ada bagian yang mendatar pada kurva tegangan-regangan. Untuk baja mutu tinggi ini juga tidak menunjukkan nilai tegangan leleh ( $f_y$ ) yang jelas, sehingga nilai tegangan leleh dari baja mutu tinggi didefinisikan sebagai besarnya tegangan yang dapat menimbulkan regangan permanen sebesar 0,2%. Rendahnya daktilitas juga membuat material baja menjadi lebih sensitif akibat adanya tegangan sisa yang terjadi selama proses pembuatan baja tersebut. Proses pabrikasi baja mutu tinggi juga harus diawasi dengan lebih cermat, terutama pada saat pengelasan yang dapat menimbulkan sobekan lamelar (dibahas dalam sub bab 2.9).

## 2.4 KEULETAN MATERIAL

Penggunaan material baja dengan mutu yang lebih tinggi dari BJ 37 tanpa ada perlakuan panas (*heat treatment*) akan mengakibatkan bahan tidak memiliki daktilitas yang baik dan bahan yang getas/mudah patah, sehingga penggunaan material yang demikian perlu mendapat perhatian yang lebih dari seorang perencana struktur. Dalam perencanaan struktur baja, keuletan material (*toughness*) adalah ukuran dari suatu material untuk menahan terjadinya putus (*fracture*) atau dengan kata lain adalah kemampuan untuk menyerap energi. Keuletan material juga dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk menahan terjadinya perambatan retak akibat adanya takikan pada badan material. Retak yang merambat akan mengakibatkan keruntuhan getas pada material.

Dalam uji tarik uniaksial, keuletan material dapat dihitung sebagai luas total dari kurva tegangan-regangan hingga titik putus benda uji (pada saat kurva tegangan-regangan berakhir). Karena kondisi tarik uniaksial jarang dijumpai pada struktur yang sebenarnya, maka indeks keuletan bahan dapat diukur berdasarkan kondisi tegangan yang lebih kompleks yang terjadi pada suatu takikan.

Salah satu cara untuk mengukur keuletan dari material adalah dengan melakukan eksperimen Charpy (*Charpy V-notch Test*). Uji Charpy ini menggunakan benda uji balok beton persegi yang tertumpu sederhana dan memiliki takikan berbentuk V pada bagian tengah bentang. Balok ini kemudian dipukul dengan suatu bandul berayun hingga patah. Energi yang diserap oleh benda uji dapat dihitung dari tinggi jatuh bandul hingga benda uji patah. Energi yang dapat diserap suatu benda uji akan bertambah seiring dengan kenaikan suhu pada saat pengujian dilakukan.



Gambar 2.7 Hasil Uji Charpy pada Berbagai Temperatur

Daerah transisi antara perilaku duktail dan getas dari suatu material dapat diperoleh dengan melakukan uji Charpy pada berbagai temperatur. Benda uji dapat didinginkan dengan menggunakan nitrogen cair pada suhu  $-196^{\circ}\text{C}$ . Cara lain untuk mendapatkan suhu rendah adalah dengan membuat campuran antara nitrogen cair, alkohol, es ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dan es kering ( $\text{CO}_2$ ). Untuk menaikkan temperatur dapat ditempuh dengan cara direndam pada air mendidih atau dengan dipanaskan pada suatu tungku pembakar. Hasil uji Charpy untuk berbagai jenis material baja pada berbagai temperatur pengujian ditunjukkan dalam Gambar 2.7.

## 2.5 TEGANGAN MULTIAKSIAL

Untuk tiap kondisi tegangan multiaksial, diperlukan definisi leleh yang jelas, definisi ini dinamakan kondisi leleh (atau teori keruntuhan) yang merupakan suatu persamaan interaksi antara tegangan–tegangan yang bekerja.

### Kriteria Leleh (Huber – Von Mises – Hencky)

Kriteria leleh untuk kondisi tegangan triaksial menurut Huber – von Mises – Hencky adalah:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \leq f_y^2 \quad 2.2$$

Dengan  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  adalah merupakan tegangan–tegangan utama, sedangkan  $\sigma_e$  adalah tegangan efektif. Dalam banyak perencanaan struktur  $\sigma_3$  mendekati nol atau cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dan persamaan 2.2 dapat direduksi menjadi:

$$\sigma_e^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 \leq f_y^2 \quad 2.3$$

Atau dapat dituliskan pula sebagai:

$$\frac{\sigma_1^2}{f_y^2} + \frac{\sigma_2^2}{f_y^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{2.4 f_y^2} \leq 1$$

Persamaan 2.3 dapat digambarkan sebagai kurva seperti dalam Gambar 2.8.

### Tegangan Geser Leleh

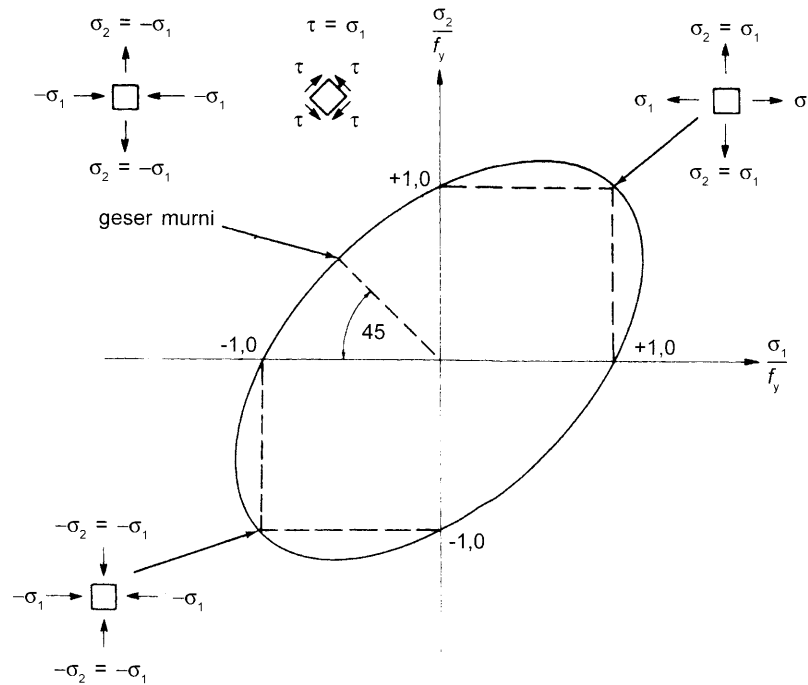
Titik leleh untuk kondisi geser murni, dapat ditentukan dari kurva tegangan–regangan dengan beban geser, atau dengan menggunakan persamaan 2.3. Geser murni terjadi pada bidang  $45^{\circ}$  dari bidang utama, atau pada saat  $\sigma_2 = -\sigma_1$ , dan tegangan geser  $\tau = \sigma_1$ . Substitusikan  $\sigma_2 = -\sigma_1$  ke persamaan 2.3 sehingga diperoleh:

$$\sigma_e^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1^2 - \sigma_1(-\sigma_1) = 3\sigma_1^2 = 3\tau_y^2 = f_y^2 \quad 2.5$$

$$\text{Atau: } \tau_y = \frac{1}{\sqrt{3}} f_y \approx 0,6 f_y \quad 2.6$$

$$\text{Modulus Geser (G), dirumuskan sebagai } G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

Dengan  $E$  adalah modulus elastis bahan dan  $\mu$  adalah angka Poisson. Untuk baja, nilai modulus geser,  $G \approx 80000 \text{ MPa}$



Gambar 2.8 Kriteria Leleh Energi Distorsi untuk Tegangan Bidang

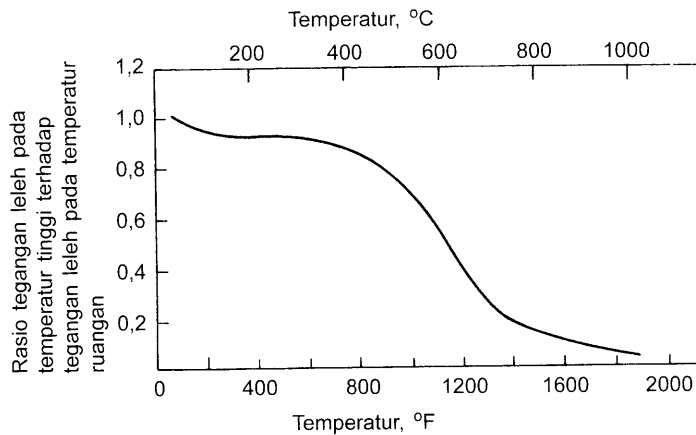
## 2.6 PERILAKU BAJA PADA TEMPERATUR TINGGI

Proses desain suatu struktur untuk suatu beban layan pada temperatur normal, biasanya jarang sekali memperhitungkan perilaku material pada temperatur tinggi. Pengetahuan mengenai sifat-sifat/perilaku material baja pada temperatur tinggi sangat diperlukan terutama pada saat melakukan proses pengelasan atau pada saat struktur terekspose di dalam api.

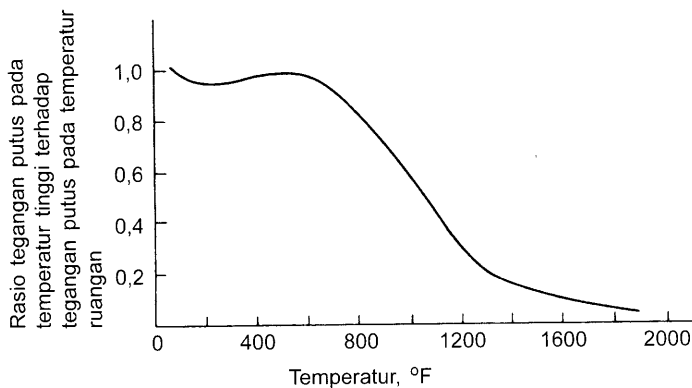
Pada temperatur sekitar 93°C, kurva tegangan-regangan akan berubah menjadi tak linear lagi, dan secara bersamaan titik leleh material tidak tampak dengan jelas. Modulus elastisitas, tegangan leleh dan tegangan tarik semuanya akan tereduksi seiring dengan naiknya temperatur material. Pada temperatur antara 430 – 540°C laju penurunan sifat-sifat mekanik dari baja mencapai tingkat maksimum. Tiap material baja memiliki kandungan kimia dan mikrostruktur yang berbeda-beda, namun secara umum hubungan antara kenaikan temperatur dengan reduksi sifat-sifat mekaniknya ditunjukkan dalam Gambar 2.9. Baja dengan kandungan karbon yang cukup, seperti BJ 37, menunjukkan perilaku “*strain aging*” pada kisaran temperatur 150 – 370°C. Hal ini ditunjukkan dengan adanya sedikit kenaikan dari tegangan leleh dan tegangan tariknya. Tegangan tarik mengalami kenaikan sekitar 10% pada temperatur tersebut dan pada temperatur 260 – 320°C tegangan leleh naik kembali seperti pada kondisi temperatur ruangan normal. “*Strain aging*” akan mengurangi daktilitas material baja.

Modulus elastisitas baja tereduksi secara cepat pada temperatur di atas 540°C. Ketika temperatur mencapai 260 – 320°C, baja mengalami deformasi seiring dengan pertambahan

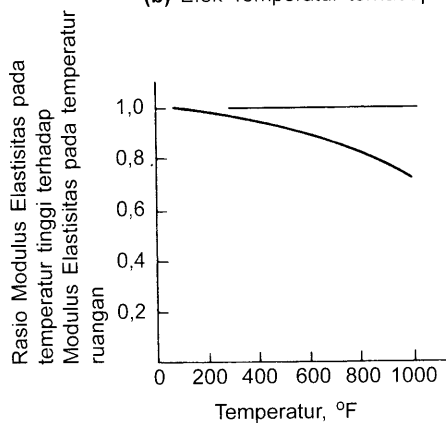
waktu di bawah beban yang dikerjakan. Fenomena ini disebut dengan istilah rangkak (*creep*) yang biasanya dijumpai pada material beton, pada temperatur normal fenomena rangkak tidak dijumpai pada material baja.



(a) Efek Temperatur terhadap Tegangan Leleh



(b) Efek Temperatur terhadap Tegangan Putus



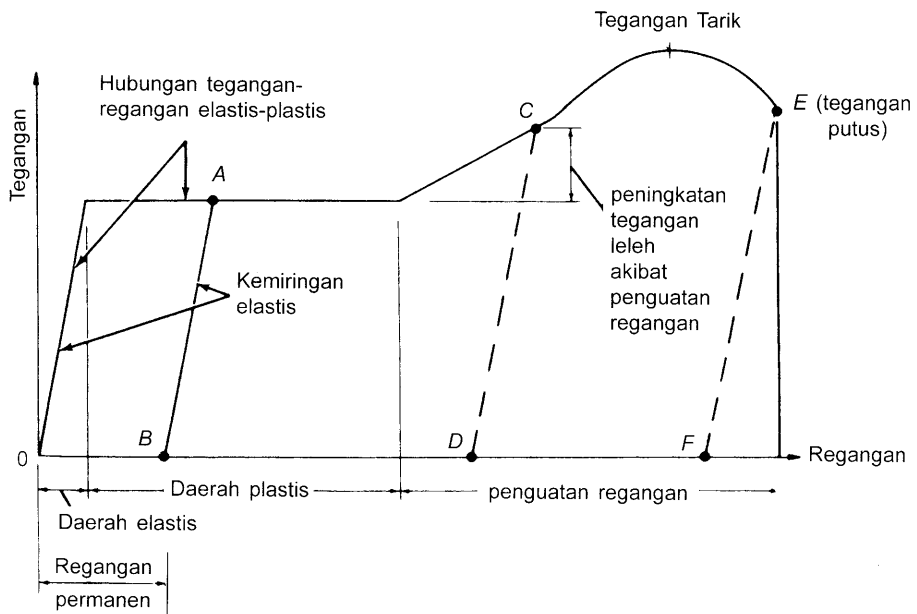
(c) Efek Temperatur terhadap Modulus Elastisitas

**Gambar 2.9** Efek Kenaikan Temperatur terhadap Sifat-sifat Mekanik Material Baja. (Sumber: Salmon & Johnson, *Steel Structures Design and Behavior*, 4<sup>th</sup> ed.)

Efek lain yang terjadi pada material baja akibat kenaikan temperatur antara lain adalah naiknya tahanan impact pada takikan pada temperatur 65 – 95°C, meningkatnya sifat getas material akibat perubahan metalurgi dari material, dan naiknya ketahanan baja terhadap korosi pada temperatur 540°C.

## 2.7 Pengerjaan Dingin dan Penguatan Regangan

Setelah regangan leleh  $\epsilon_y = f_y/E$  pada leleh pertama terlampaui, dan benda uji dibebaskan, pembebanan kembali akan memberikan hubungan tegangan–regangan yang berbeda dari hubungan semula. Dalam gambar 2.10 proses pembebasan terjadi dari lintasan A ke B, timbul regangan permanen OB. Kapasitas daktilitas berkurang dari regangan OF ke BF. Pembebanan kembali dimulai dari titik B hingga mencapai daerah penguatan regangan (titik C). Dari titik C dibebaskan kembali sampai ke titik D.

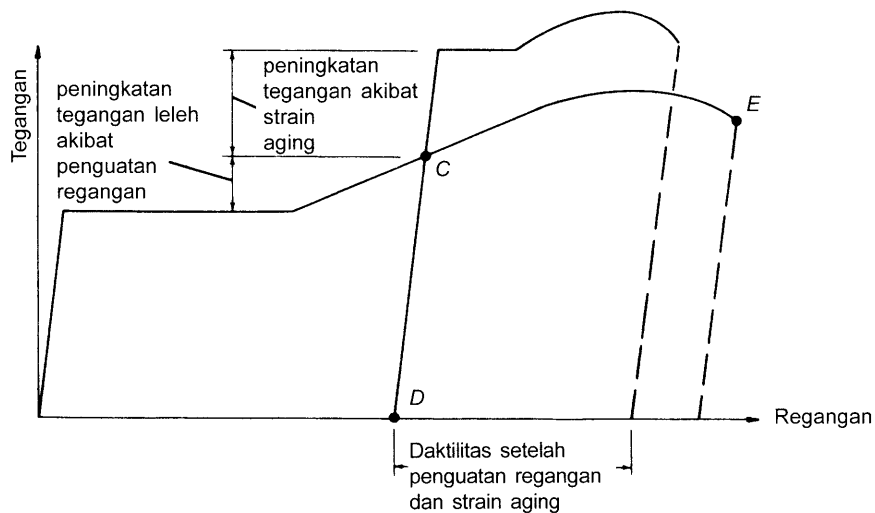


Gambar 2.10 Efek Penguatan Regangan

Bila material baja yang mengalami pembebanan hingga mencapai daerah penguatan regangan dan kemudian beban dilepaskan beberapa saat, maka material itu akan menampilkan sifat yang berbeda. Hubungan tegangan–regangan tidak lagi melalui lintasan D, C E dalam Gambar 2.11, namun titik leleh baja akan meningkat. Fenomena ini disebut *strain aging*. Baja yang mengalami *strain aging* akan mengalami kenaikan tegangan leleh, tegangan tarik dan tegangan putusnya, daerah plastis dengan tegangan konstan juga mengalami kenaikan, namun daktilitas material ini mengalami penurunan.

Beban mulai diberikan kembali dari titik D, panjang lintasan DC lebih panjang dari lintasan BA yang mengindikasikan pula terjadi kenaikan titik leleh, peristiwa ini disebut **efek penguatan regangan**. Proses pembebanan di luar daerah elastis yang berakibat perubahan daktilitas bahan, dan dilakukan pada temperatur ruangan dikenal dengan istilah **pengerjaan dingin** (*cold form*).





Gambar 2.11 Efek Strain Aging

## 2.8 KERUNTUHAN GETAS

Meskipun keruntuhan struktur baja pada umumnya merupakan keruntuhan daktail, namun dalam bermacam variasi kondisi, keruntuhan baja dapat merupakan keruntuhan getas. Keruntuhan getas adalah merupakan suatu keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba tanpa didahului deformasi plastis, terjadi dengan kecepatan yang sangat tinggi. Keruntuhan ini dipengaruhi oleh temperatur, kecepatan pembebanan, tingkat tegangan, tebal pelat, dan sistem pengerjaan. Secara garis besar, faktor-faktor yang dapat menimbulkan keruntuhan getas pada suatu elemen struktur ditampilkan dalam Tabel 2.2 berikut ini:

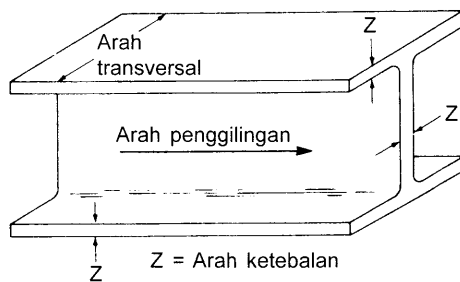
**TABEL 2.2 FAKTOR-FAKTOR YANG POTENSIAL MENIMBULKAN KERUNTUHAN GETAS**

No	Faktor Pengaruh	Efek
1	Temperatur	Makin tinggi temperatur makin besar peluang terjadinya keruntuhan getas
2	Tegangan tarik	Keruntuhan getas hanya dapat terjadi di bawah tegangan tarik
3	Ketebalan material	Makin tebal material baja, makin besar peluang terjadinya keruntuhan getas
4	Kontinuitas 3 dimensi	Menimbulkan efek tegangan multiaksial yang cenderung mengekang proses leleh baja dan meningkatkan kecenderungan terjadinya keruntuhan getas
5	Takikan	Adanya takikan akan meningkatkan potensi keruntuhan getas
6	Kecepatan pembebanan	Makin cepat kelajuan pembebanan, makin besar pula peluang terjadinya keruntuhan getas
7	Perubahan laju tegangan	Naiknya kelajuan tegangan akan meningkatkan potensi keruntuhan getas
8	Las	Retakan pada las akan dapat beraksi sebagai suatu takikan

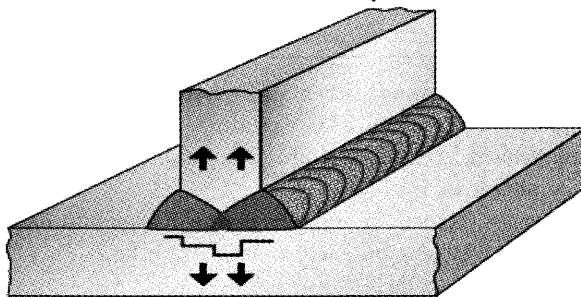
## 2.9 SOBEKAN LAMELAR

Pembuatan profil baja umumnya dilakukan dengan proses gilas panas. Proses ini mengakibatkan profil mempunyai sifat yang berbeda dalam arah gilas, arah transversal dan arah ketebalan. Dalam daerah elastis sifat-sifat baja dalam arah gilas dan transversal hampir sama. Namun daktilitas dalam arah ketebalan jauh lebih kecil daripada daktilitas dalam arah gilasnya.

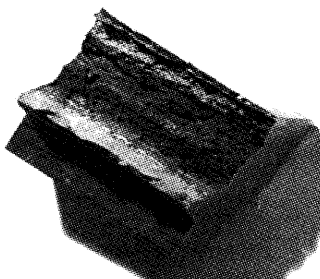
Sobekan lamelar merupakan keruntuhan getas yang terjadi pada bidang gilas akibat gaya tarik besar yang bekerja tegak lurus ketebalan elemen pelat profil. Karena regangan yang diakibatkan oleh beban layan biasanya lebih kecil dari regangan leleh, maka beban-beban layan tak diperhatikan sebagai penyebab sobekan lamelar. Pada sambungan las dengan kekangan tinggi, sobekan lamelar disebabkan oleh penyusutan las yang mengakibatkan timbulnya regangan yang beberapa kali lebih besar daripada regangan lelehnya. Keruntuhan akibat sobekan lamelar dikategorikan sebagai keruntuhan getas. Sobekan lamelar umumnya dijumpai pada sambungan-sambungan las berbentuk T seperti pada Gambar 2.13. Di samping itu ukuran las juga mempengaruhi terjadinya sobekan lamelar, sebaiknya ukuran las tidak melebihi 20 mm untuk menghindari terjadinya sobekan lamelar.



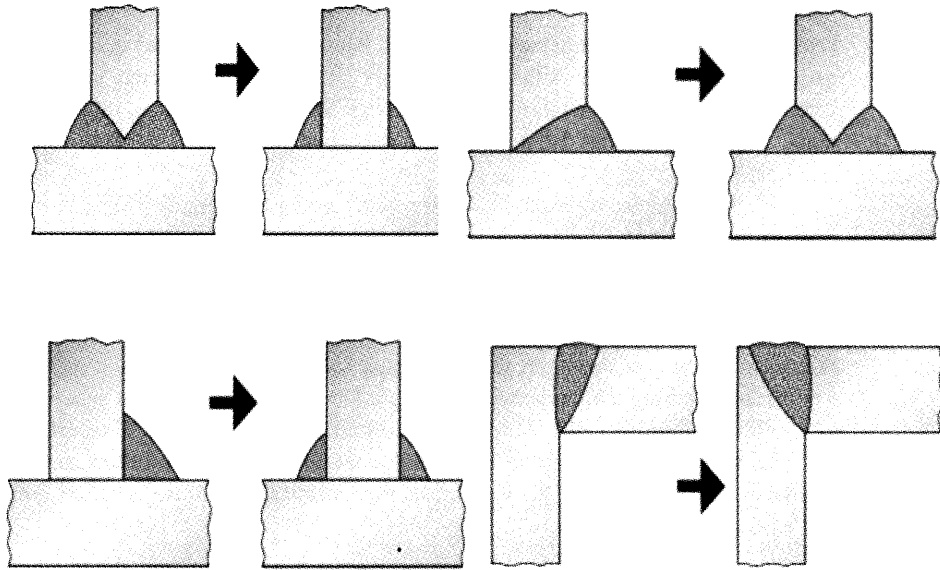
Gambar 2.12 Arah Gilas, Arah Transversal, dan Arah Ketebalan



Gambar 2.13 Sobekan Lamelar pada Sambungan T dari Las Sudut



Gambar 2.14 Sobekan Lamelar Akibat Susut Sambungan Las



**Gambar 2.15** Pengerjaan Las untuk Menghindari Sobekan Lamelar

Bagian pelat baja yang mengalami sobekan lamelar akan menjadi berserabut (Gambar 2.14), hal ini mengindikasikan bahwa pelat tersebut memiliki daktilitas yang rendah dalam arah ketebalan.

Salah satu cara mencegah terjadinya sobekan lamelar adalah dengan memperbaiki detail sambungan las. Beberapa cara perbaikan diperlihatkan dalam Gambar 2.15.

## 2.10 KERUNTUHAN LELAH

Pembebanan yang bersifat siklik (khususnya beban tarik) dapat menyebabkan keruntuhan, meskipun tegangan leleh baja tak pernah tercapai. Keruntuhan ini dinamakan keruntuhan lelah (*fatigue failure*). Keruntuhan lelah dipengaruhi oleh 3 faktor, yakni:

- a. jumlah siklus pembebanan
- b. daerah tegangan layan (perbedaan antara tegangan maksimum dan minimum)
- c. cacat-cacat dalam material tersebut, seperti retak-retak kecil

Pada proses pengelasan cacat dapat diartikan sebagai takikan pada pertemuan antara dua elemen yang disambung. Lubang baut yang mengakibatkan diskontinuitas pada elemen juga dapat dikategorikan sebagai cacat pada elemen tersebut. Cacat-cacat kecil dalam suatu elemen dapat diabaikan dalam suatu proses desain struktur, namun pada struktur yang mengalami beban-beban siklik, maka retakan akan makin bertambah panjang untuk tiap siklus pembebanan sehingga akan mengurangi kapasitas elemen untuk memikul beban layan. Mutu baja tidak terlalu mempengaruhi keruntuhan lelah ini.

# 3

## Batang Tarik

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

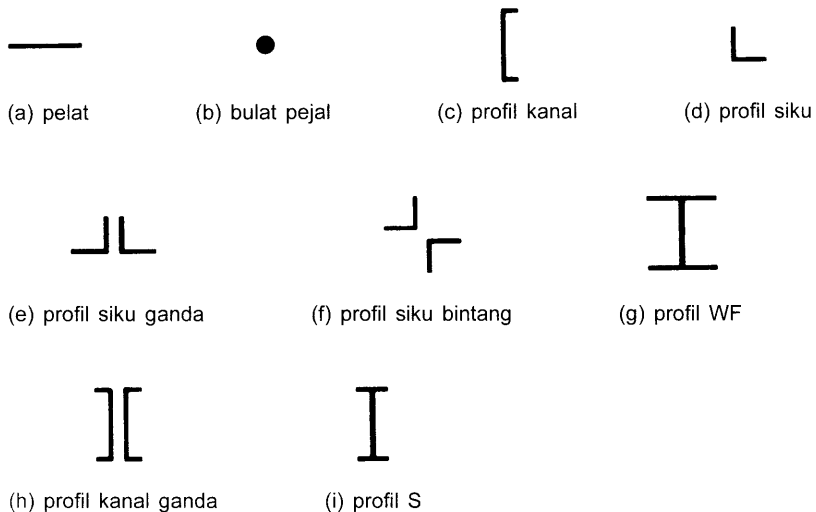
- Mengetahui perilaku keruntuhan suatu batang tarik
- Melakukan proses desain penampang suatu komponen struktur tarik

Pokok-pokok Pembahasan Bab

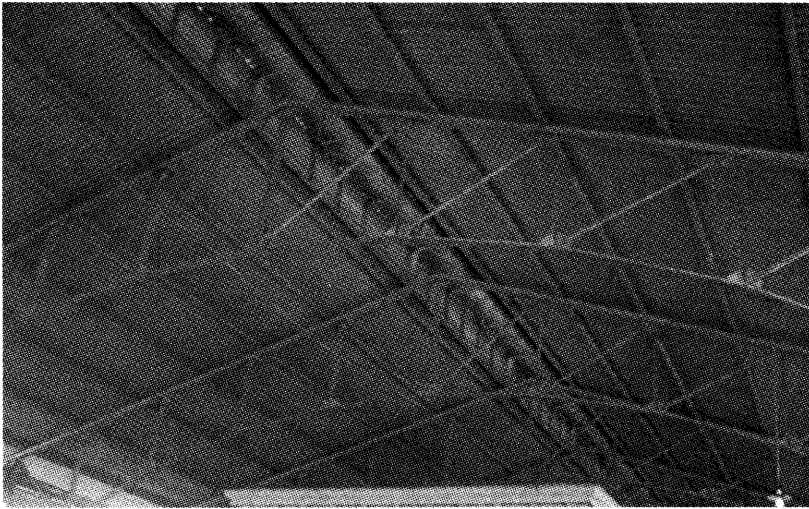
- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Tahanan Nominal
- 1.3 Luas Netto
- 1.4 Efek Lubang Berselang-seling pada Luas Netto
- 1.5 Luas Netto Efektif
- 1.6 Geser Blok (*Block Shear*)
- 1.7 Kelangsingan Struktur Tarik
- 1.8 Transfer Gaya pada Sambungan

### 3.1 PENDAHULUAN

Batang tarik banyak dijumpai dalam banyak struktur baja, seperti struktur-struktur jembatan, rangka atap, menara transmisi, ikatan angin, dan lain sebagainya. Batang tarik ini sangat efektif dalam memikul beban. Batang ini dapat terdiri dari profil tunggal ataupun profil-profil tersusun. Contoh-contoh penampang batang tarik adalah profil bulat, pelat, siku, siku ganda, siku bintang, kanal, WF, dan lain-lain. Gambar 3.1 menunjukkan beberapa penampang dari batang tarik yang umum digunakan.

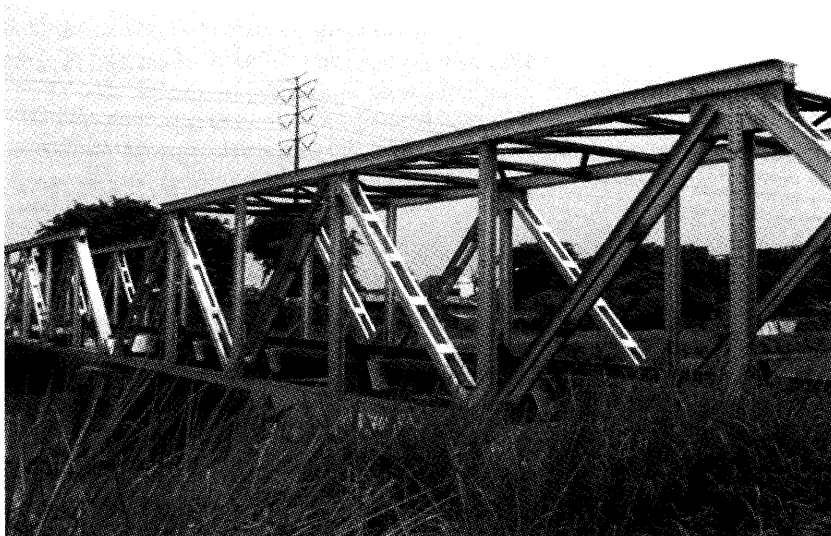


Gambar 3.1 Beberapa Penampang Batang Tarik



**Gambar 3.2** Struktur Rangka Atap Baja dengan Menggunakan Profil Siku.  
(Sumber: Koleksi Pribadi)

Struktur rangka atap biasanya menggunakan profil siku tunggal atau dapat pula digunakan dua buah profil siku yang diletakkan saling membelakangi satu sama lain. Jarak di antara dua buah profil siku tersebut harus cukup agar dapat diselipkan sebuah pelat (biasa dinamakan pelat buhul) yang digunakan sebagai tempat penyambungan antar batang. Siku tunggal dan siku ganda mungkin merupakan profil batang tarik yang paling banyak digunakan. Profil T biasanya juga dapat digunakan dalam struktur rangka atap sebagai alternatif dari profil siku.



**Gambar 3.3** Struktur Rangka Jembatan Kereta Api. (Sumber: Koleksi Pribadi)

Pada struktur rangka jembatan dan rangka atap yang berbentuk besar, umum digunakan profil–profil WF atau profil kanal.

## 3.2 TAHANAN NOMINAL

Dalam menentukan tahanan nominal suatu batang tarik, harus diperiksa terhadap tiga macam kondisi keruntuhan yang menentukan, yaitu:

- leleh dari luas penampang kotor, di daerah yang jauh dari sambungan
- fraktur dari luas penampang efektif pada daerah sambungan
- geser blok pada sambungan

Menurut SNI 03-1729-2002 pasal 10.1 dinyatakan bahwa semua komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial terfaktor sebesar  $T_u$ , maka harus memenuhi:

$$T_u \leq \phi T_n \quad 3.1$$

SNI 03-1729-2002 menggunakan notasi  $N_u$  untuk menyatakan gaya tarik aksial terfaktor, namun dalam buku ini digunakan notasi  $T_u$  untuk membedakan dengan notasi untuk gaya tekan aksial yang akan dibahas dalam bab selanjutnya.  $T_n$  adalah tahanan nominal dari penampang yang ditentukan berdasarkan tiga macam kondisi keruntuhan batang tarik seperti telah disebutkan sebelumnya.

Besarnya tahanan nominal,  $T_n$ , suatu batang tarik untuk tipe keruntuhan leleh dan fraktur ditentukan sebagai berikut:

### Kondisi Leleh dari Luas Penampang Kotor

Bila kondisi leleh yang menentukan, maka tahanan nominal,  $T_n$ , dari batang tarik memenuhi persamaan:

$$T_n = A_g f_y \quad 3.2$$

Dengan  $A_g$  = luas penampang kotor, mm<sup>2</sup>  
 $f_y$  = kuat leleh material, MPa

### Kondisi Fraktur dari Luas Penampang Efektif pada Sambungan

Untuk batang tarik yang mempunyai lubang, misalnya untuk penempatan baut, maka luas penampangnya tereduksi, dan dinamakan luas netto ( $A_n$ ). Lubang pada batang menimbulkan konsentrasi tegangan akibat beban kerja. Teori elastisitas menunjukkan bahwa tegangan tarik di sekitar lubang baut tersebut adalah sekitar 3 kali tegangan rerata pada penampang netto. Namun saat serat dalam material mencapai regangan leleh  $\epsilon_y = f_y/E_s$ , tegangan menjadi konstan sebesar  $f_y$ , dengan deformasi yang masih berlanjut sehingga semua serat dalam material mencapai  $\epsilon_y$  atau lebih. Tegangan yang terkonsentrasi di sekitar lubang tersebut menimbulkan fraktur pada sambungan.



(a) Tegangan elastis

(b) Keadaan batas

Gambar 3.4 Distribusi Tegangan Akibat Adanya Lubang pada Penampang

Bila kondisi fraktur pada sambungan yang menentukan, maka tahanan nominal,  $T_n$ , dari batang tersebut memenuhi persamaan :

$$T_n = A_e \cdot f_u \quad 3.3$$

Dengan  $A_e$  = luas penampang efektif =  $U \cdot A_n$   
 $A_n$  = luas netto penampang, mm<sup>2</sup>  
 $U$  = koefisien reduksi ( akan dijelaskan lebih lanjut )  
 $f_u$  = tegangan tarik putus, MPa  
 Dengan  $\phi$  adalah faktor tahanan, yang besarnya adalah:  
 $\phi$  = 0,90 untuk kondisi leleh, dan  
 $\phi$  = 0,75 untuk kondisi fraktur

Faktor tahanan untuk kondisi fraktur diambil lebih kecil daripada untuk kondisi leleh, sebab kondisi fraktur lebih getas/berbahaya, dan sebaiknya tipe keruntuhan jenis ini dihindari.

### 3.3 LUAS NETTO

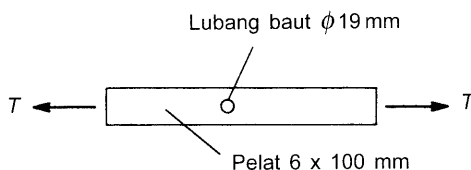
Lubang yang dibuat pada sambungan untuk menempatkan alat pengencang seperti baut atau paku keling, mengurangi luas penampang sehingga mengurangi pula tahanan penampang tersebut. Menurut SNI 03-1729-2002 pasal 17.3.5 mengenai pelubangan untuk baut, dinyatakan bahwa suatu lubang bulat untuk baut harus dipotong dengan mesin pemotong dengan api, atau dibor ukuran penuh, atau dipons 3 mm lebih kecil dan kemudian diperbesar, atau dipons penuh. Selain itu, dinyatakan pula bahwa suatu lubang yang dipons hanya diijinkan pada material dengan tegangan leleh ( $f_y$ ) tidak lebih dari 360 MPa dan ketebalannya tidak melebihi  $5600/f_y$  mm.

Selanjutnya dalam pasal 17.3.6 diatur pula mengenai ukuran lubang suatu baut, dinyatakan bahwa diameter nominal dari suatu lubang yang sudah jadi, harus 2 mm lebih besar dari diameter nominal baut untuk suatu baut yang diameternya tidak lebih dari 24 mm. Untuk baut yang diameternya lebih dari 24 mm, maka ukuran lubang harus diambil 3 mm lebih besar.

Luas netto penampang batang tarik tidak boleh diambil lebih besar daripada 85% luas bruttonya,  $A_n \leq 0,85 A_g$ .

#### ■ CONTOH 3.1:

Hitung luas netto,  $A_n$ , dari batang tarik berikut ini. Baut yang digunakan berdiameter 19 mm. Lubang dibuat dengan metode punching.



#### JAWAB:

Luas kotor,  $A_g = 6 \times 100 = 600 \text{ mm}^2$

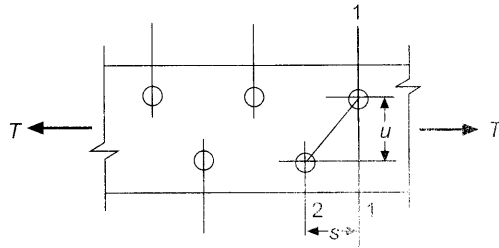
Lebar lubang =  $19 + 2 = 21 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} A_n &= A_g - (\text{lebar lubang} \times \text{tebal pelat}) \\ &= 600 - 6(21) = 474 \text{ mm}^2 < 85\% \cdot A_g (= 510 \text{ mm}^2) \end{aligned}$$

**OK**

### 3.4 EFEK LUBANG BERSELANG-SELING PADA LUAS NETTO

Lubang baut dapat diletakkan berselang-seling seperti dalam Gambar 3.5. Dalam SNI 03-1729-2002 pasal 10.2.1 diatur mengenai cara perhitungan luas netto penampang dengan lubang yang diletakkan berselang-seling, dinyatakan bahwa luas netto harus dihitung berdasarkan luas minimum antara potongan 1 dan potongan 2.



Gambar 3.5 Keruntuhan Potongan 1-1 dan Potongan 1-2

Dari potongan 1-1 diperoleh:  $A_n = A_g - n.d.t$

Potongan 1- 2:  $A_n = A_g - n.d.t + \sum \frac{s^2.t}{4u}$

Dengan:  $A_g$  = luas penampang kotor

$A_n$  = luas penampang netto

$t$  = tebal penampang

$d$  = diameter lubang

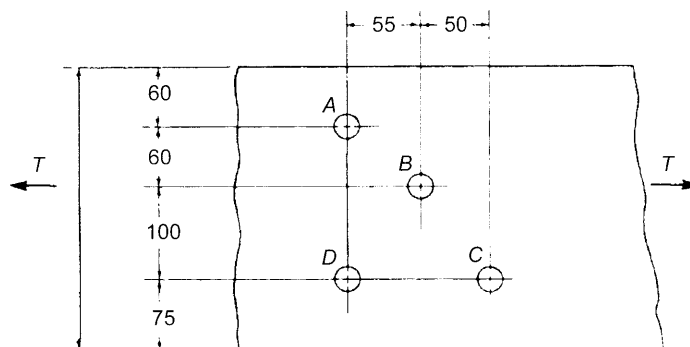
$n$  = banyak lubang dalam satu potongan

$s, u$  = jarak antar sumbu lubang pada arah sejajar dan tegak lurus sumbu komponen struktur

#### ■ CONTOH 3.2:

Tentukan  $A_{\text{netto}}$  minimum dari batang tarik berikut ini,  $\phi$  baut = 19 mm, tebal pelat 60 mm

**JAWAB:**





Luas kotor,  $A_g = 6 \times (60 + 60 + 100 + 75) = 1770 \text{ mm}^2$

Lebar lubang =  $19 + 2 = 21 \text{ mm}$

Potongan AD:

$$A_n = 1770 - 2(21)(6) = 1518 \text{ mm}^2$$

Potongan ABD:

$$A_n = 1770 - 3(21)(6) + \frac{55^2 \times 6}{4 \times 60} + \frac{55^2 \times 6}{4 \times 100} = 1513 \text{ mm}^2$$

Potongan ABC:

$$A_n = 1770 - 3(21)(6) + \frac{55^2 \times 6}{4 \times 60} + \frac{50^2 \times 6}{4 \times 100} = 1505,125 \text{ mm}^2$$

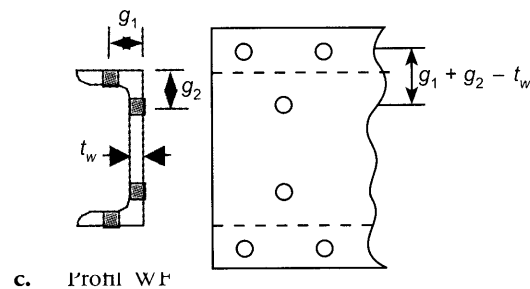
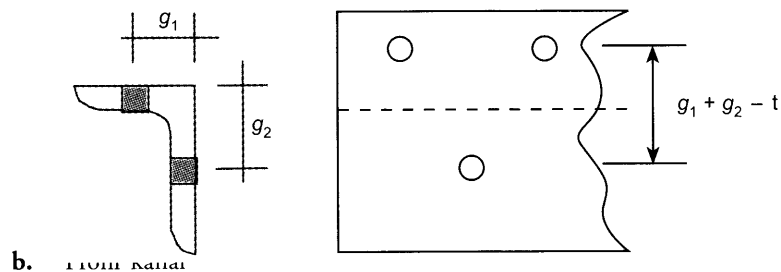
Periksa terhadap syarat  $A_n \leq 0,85 \cdot A_g$

$$0,85 \cdot A_g = 0,85(1770) = 1504,5 \text{ mm}^2$$

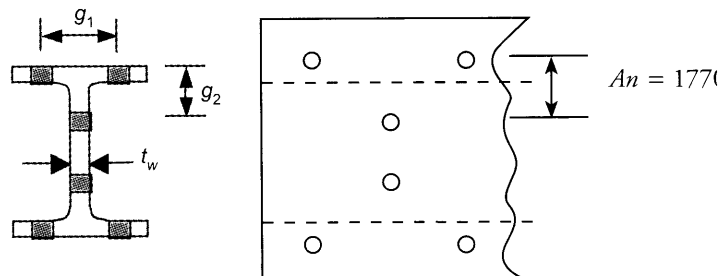
Jadi  $A_n$  minimum adalah  $1504,5 \text{ mm}^2$ .

Jika sambungan yang diletakkan berselang-seling tersebut dijumpai pada sebuah profil siku, kanal atau WF, maka penentuan nilai  $u$  dapat dilakukan sebagai berikut:

a. Profil siku sama kaki atau tak sama kaki

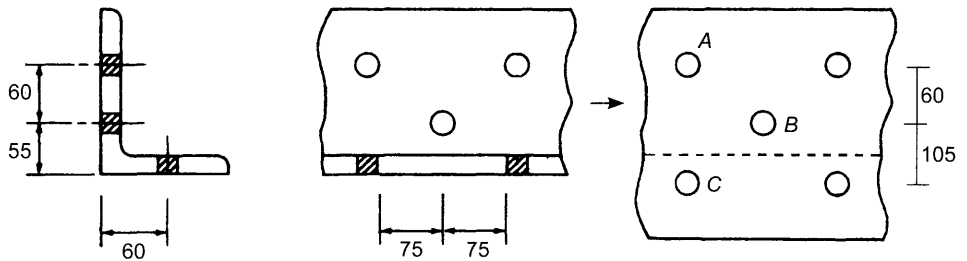


■ CONTOH 3.3:



Hitung  $A_n$  minimum dari batang tarik berikut, yang terbuat dari profil siku L 100.150.10. Dengan  $\phi$  lubang = 25 mm.

**JAWAB:**



Luas kotor,  $A_g = 2420 \text{ mm}^2$  ( tabel profil baja )

Lebar lubang =  $25 + 2 = 27 \text{ mm}$

Potongan AC:  $A_n = 2420 - 2(27)(10) = 1880 \text{ mm}^2$

Potongan ABC:  $A_n = 2420 - 3(27)(10) + \frac{75^2 \times 10}{4 \times 60} + \frac{75^2 \times 10}{4 \times 105} = 1978,3 \text{ mm}^2$

Periksa terhadap syarat  $A_n \leq 0,85 \cdot A_g$

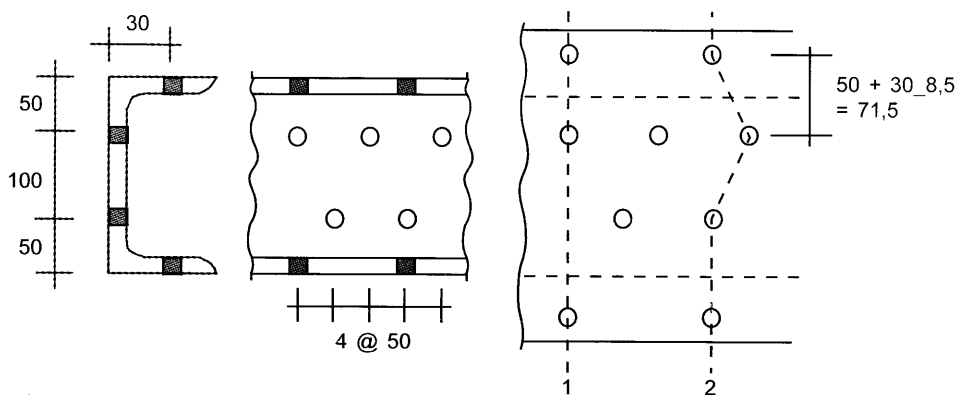
$$0,85 \cdot A_g = 0,85(2420) = 2057 \text{ mm}^2$$

Jadi  $A_n$  minimum adalah  $1880 \text{ mm}^2$ .

#### ■ CONTOH 3.4:

Hitunglah luas netto dari profil CNP 20 berikut ini, jika baut yang digunakan berdiameter 16 mm.

**JAWAB:**



Ukuran lubang =  $16 + 2 = 18 \text{ mm}$

Potongan 1:  $A_n = 3220 - 2(18)(11,5) - 8,5(18) = 2653 \text{ mm}^2$

Potongan 2:  $A_n = 3220 - 2(18)(11,5) - 2(18)(8,5) + \frac{50^2 \times (11,5 + 8,5) / 2}{4 \times 71,5} + \frac{50^2 \times 8,5}{4 \times 100}$   
 $= 2640,54 \text{ mm}^2$

Periksa terhadap syarat  $A_n \leq 0,85 \cdot A_g$

$$0,85 \cdot A_g = 0,85(3220) = 2737 \text{ mm}^2$$

Jadi  $A_n$  minimum adalah 2640,54 mm<sup>2</sup>.

### 3.5 LUAS NETTO EFEKTIF

Kinerja suatu batang tarik dapat dipengaruhi oleh beberapa hal, namun hal yang perlu diperhatikan adalah masalah sambungan karena adanya sambungan pada suatu batang tarik akan memperlemah batang tersebut. Efisiensi suatu sambungan merupakan fungsi dari daktilitas material, jarak antar alat pengencang, konsentrasi tegangan pada lubang baut serta suatu fenomena yang sering disebut dengan istilah *shear lag*.

*Shear lag* timbul jika suatu komponen struktur tarik hanya disambung sebagian saja, sebagai contoh adalah sambungan untuk profil siku dalam Gambar 3.6. Profil siku tersebut hanya disambung pada salah satu kakinya saja, sehingga bagian yang disambung akan mengalami beban yang berlebihan sedangkan bagian lainnya tidak menerima tegangan yang sama besarnya. Salah satu cara mengatasi masalah *shear lag* adalah dengan memperpanjang sambungan. Masalah *shear lag* dalam perhitungan diantisipasi dengan menggunakan istilah luas netto efektif, yang dapat diterapkan pada sambungan baut maupun las. Pasal 10.2 SNI 03-1729-2002 mengatur masalah perhitungan luas netto efektif. Dinyatakan bahwa luas penampang efektif komponen struktur yang mengalami gaya tarik harus ditentukan sebagai berikut:

$$A_e = U \cdot A_n \quad 3.4$$

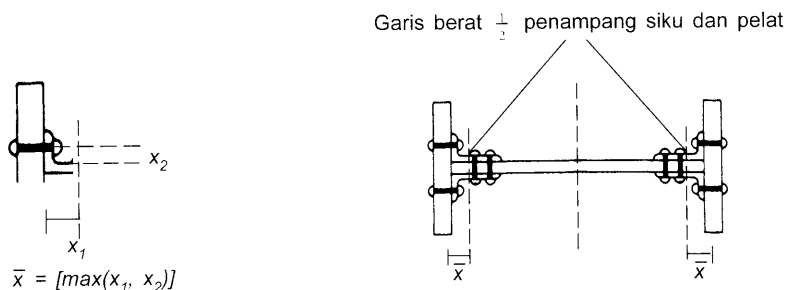
Dengan:  $A_e$  = Luas efektif penampang

$A_n$  = luas netto penampang

$$U = \text{koefisien reduksi} = 1 - \frac{\bar{x}}{L} \leq 0,9$$

$\bar{x}$  = eksentrisitas sambungan

$L$  = panjang sambungan dalam arah gaya tarik



Gambar 3.6 Nilai  $\bar{x}$  untuk Profil Siku

Apabila gaya tarik disalurkan dengan menggunakan alat sambung las, maka akan ada 3 macam kondisi yang dijumpai, yaitu:

1. bila gaya tarik disalurkan hanya oleh las memanjang ke elemen bukan pelat, atau oleh kombinasi las memanjang dan melintang, maka:  $A_e = A_g$
2. bila gaya tarik disalurkan oleh las melintang saja:  
 $A_e$  = luas penampang yang disambung las ( $U = 1$ )
3. bila gaya tarik disalurkan ke elemen pelat oleh las memanjang sepanjang kedua sisi bagian ujung elemen:  $A_e = U \cdot A_g$

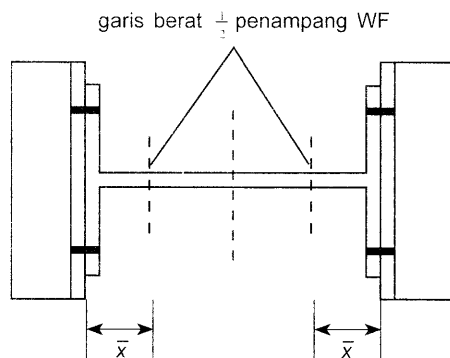
Dengan:  $U = 1,00$  untuk  $l \geq 2w$

$U = 0,87$  untuk  $2w > l \geq 1,5w$

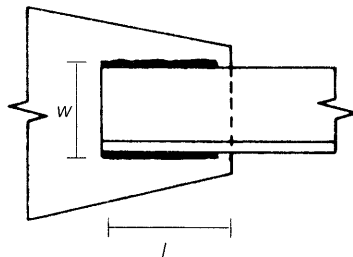
$U = 0,75$  untuk  $1,5w > l \geq w$

$l$  = panjang las

$w$  = jarak antar las memanjang (lebar pelat)



Gambar 3.7 Eksentrisitas Sambungan,  $\bar{x}$  untuk Profil WF



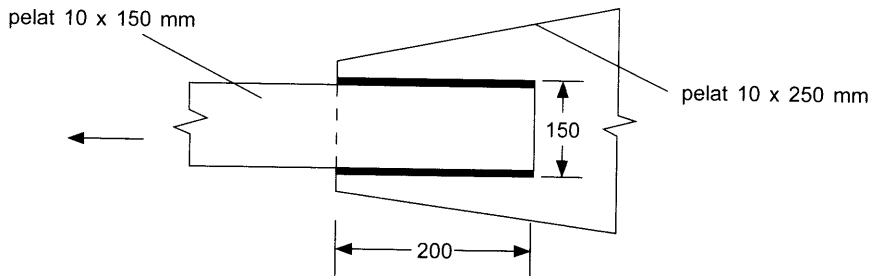
Gambar 3.8 Sambungan Las

Selain ketentuan di atas, koefisien reduksi  $U$  untuk beberapa penampang menurut manual dari AISC, adalah:

1. Penampang-I dengan  $b/h > 2/3$  atau penampang  $T$  yang dipotong dari penampang I, dan sambungan pada pelat sayap dengan jumlah baut lebih atau sama dengan 3 buah per baris (arah gaya)  
 $U = 0,90$
2. Untuk penampang yang lain (termasuk penampang tersusun) dengan jumlah alat pengencang minimal 3 buah per baris  
 $U = 0,85$
3. Semua penampang dengan banyak baut = 2 per baris (arah gaya)  
 $U = 0,75$

### ■ CONTOH 3.5:

Sebuah pelat  $10 \times 150$  mm dihubungkan dengan pelat berukuran  $10 \times 250$  mm menggunakan sambungan las seperti pada gambar. Hitunglah tahanan tarik rencana dari struktur tersebut jika mutu baja adalah BJ 41 ( $f_y = 250$  MPa,  $f_u = 410$  MPa)

**JAWAB:**

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi A_g f_y = 0,90(10)(150)(250) = \mathbf{33,75 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$1,5w = 225 \text{ mm} > l = 200 \text{ mm} > w = 150 \text{ mm} \rightarrow U = 0,75$$

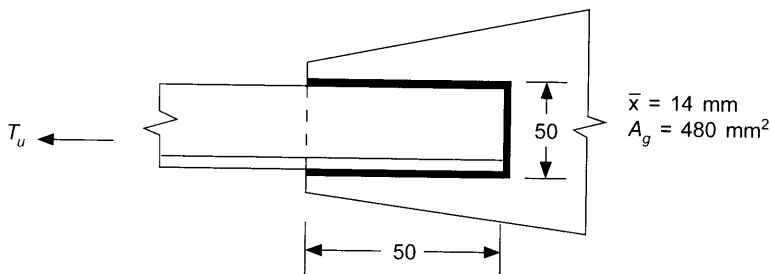
$$A_e = U \cdot A_n = 0,75(10)(150) = 1125 \text{ mm}^2$$

$$\phi T_n = \phi A_e f_u = 0,75(1125)(410) = \mathbf{34,6 \text{ ton}}$$

Jadi, tahanan tarik rencana dari komponen struktur tersebut adalah sebesar 33,75 ton.

**■ CONTOH 3.6:**

Hitunglah tahanan tarik rencana dari profil siku 50.50.5 yang dihubungkan pada suatu pelat buhul seperti pada gambar berikut. Mutu baja adalah BJ 37

**JAWAB:**

Karena pada ujung profil siku juga terdapat sambungan las, maka nilai  $U$  harus dihitung

berdasarkan persamaan  $1 - \frac{\bar{x}}{L} \leq 0,9$

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi A_g f_y = 0,90(480)(240) = \mathbf{10,368 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

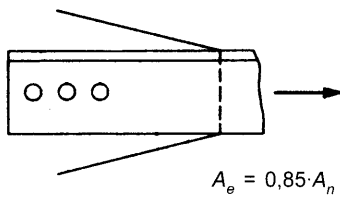
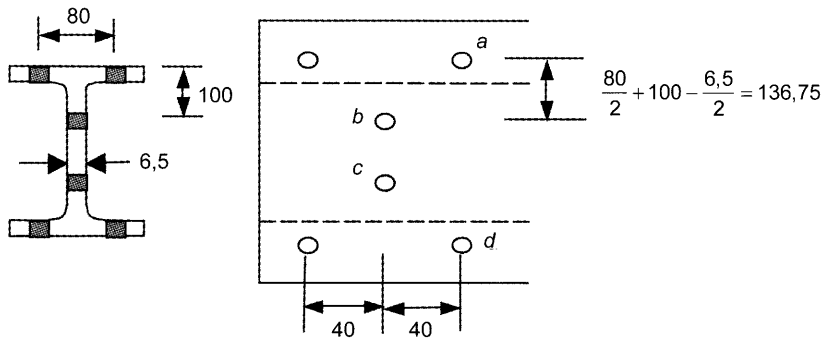
$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} = 1 - \frac{14}{50} = 0,72 < 0,9 \text{ (OK)}$$

$$\phi T_n = \phi A_e f_u = 0,75(345,6)(370) = \mathbf{9,59 \text{ ton}}$$

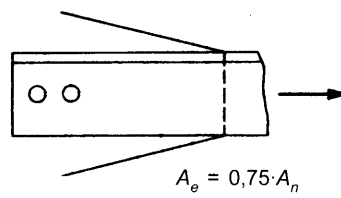
Jadi, tahanan tarik rencana dari komponen struktur tersebut adalah sebesar 9,59 ton.

**■ CONTOH 3.7:**

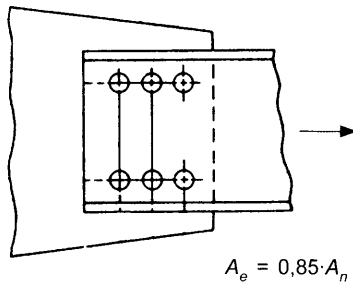
Tentukan tahanan tarik rencana dari profil WF 300.150.6,5.9 pada gambar berikut ini, jika baut yang digunakan mempunyai diameter 19 mm.



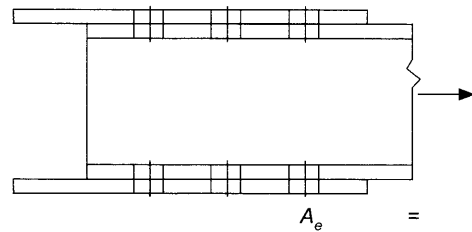
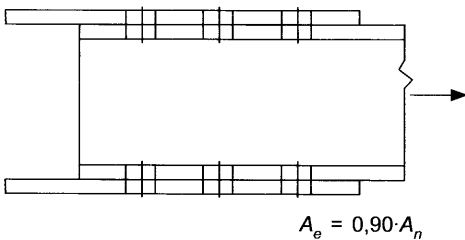
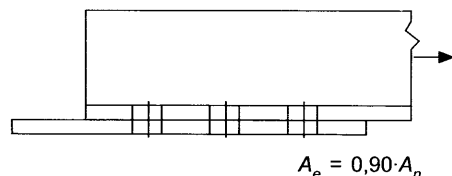
(a) siku atau siku ganda



(b) siku atau siku ganda



(c) profil kanal


(d) WF,  $b/h < 2/3$ 

(e) WF,  $b/h > 2/3$ 

(f) T,  $b/h > 2/3$  (untuk profil WF induk)

Gambar 3.9 Nilai U untuk Berbagai Macam Tipe Sambungan

**JAWAB:**

Menghitung luas netto profil:

Potongan a-d:

$$A_n = 4678 - 4(9)(19+2) = 3922 \text{ mm}^2$$

Potongan a-b-c-d:

$$A_n = 4678 - 4(9)(19+2) - 2(6,5)(19+2) + 2 \cdot \frac{40^2(6,5+9)/2}{4 \times 136,75}$$

$$= 3694,34 \text{ mm}^2$$

$$85\% A_g = 0,85(4678) = 3976,3 \text{ mm}^2$$

Jadi,  $A_n = 3694,34 \text{ mm}^2$

Karena tiap bagian profil tersambung, maka distribusi tegangan terjadi secara merata pada bagian flens dan web, sehingga nilai  $U$  dapat diambil sama dengan 1,0.

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi A_g f_y = 0,90(4678)(240) = \mathbf{101,04 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$A_e = U \cdot A_n = 1,0(3694,34) = 3694,34 \text{ mm}^2$$

$$\phi T_n = \phi A_e f_u = 0,75(3694,34)(370) = \mathbf{102,52 \text{ ton}}$$

Jadi, tahanan tarik rencana dari komponen struktur tersebut adalah sebesar 101,04 ton.

**■ CONTOH 3.8:**

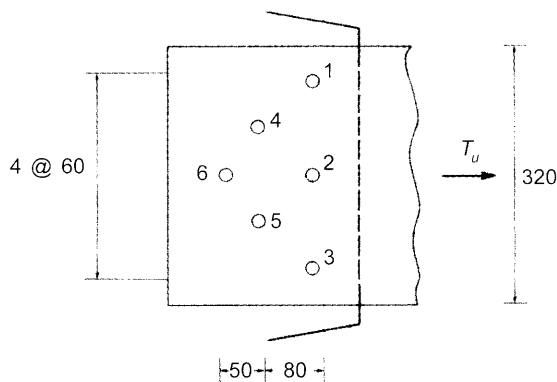
Suatu pelat baja setebal 20 mm disambungkan ke sebuah pelat buhul dengan alat sambung baut berdiameter 19 mm. Jika mutu baja BJ 37, hitunglah beban kerja maksimum yang dapat dipikul oleh pelat tersebut (beban kerja terdiri dari 20% beban mati dan 80% beban hidup)

**JAWAB:**

Menghitung luas netto,  $A_n$ :

Pot. 1-2-3:

$$A_n = 20(320 - 3(19 + 2)) = 5140 \text{ mm}^2$$



Pot. 1-4-2-5-3:

$$A_n = 20(320 - 5(19 + 2)) + 4 \cdot \frac{80^2 \times 20}{4 \times 60} = 6433,3 \text{ mm}^2$$

Pot. 1-4-5-3:

$$A_n = 20(320 - 4(19 + 2)) + 2 \cdot \frac{80^2 \times 20}{4 \times 60} = 5786,6 \text{ mm}^2$$

Pot. 1-4-6:

$$A_n = 20(320 - 3(19 + 2)) + \frac{80^2 \times 20}{4 \times 60} + \frac{50^2 \times 20}{4 \times 60} = 5881,63 \text{ mm}^2$$

$$85\% A_g = 0,85(320)(20) = 5440 \text{ mm}^2$$

$$\text{Jadi, } A_n \text{ min} = 5140 \text{ mm}^2$$

$$\text{Koefisien reduksi } U = 1 - \bar{x}/L = 1 - (1/2 \cdot 20/130) = 0,923 > 0,9 \rightarrow U = 0,9$$

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi A_g f_y = 0,90(6400)(240) = \mathbf{138,24 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$A_e = U A_n = 0,9(5140) = 4626 \text{ mm}^2$$

$$\phi T_n = \phi A_e f_u = 0,75(4626)(370) = \mathbf{128,3715 \text{ ton}}$$

$$\phi T_n > Tu (= 1,2D + 1,6L)$$

$$128,3715 = 1,2(0,2T) + 1,6(0,8T)$$

$$128,3715 = 0,24T + 1,28T \rightarrow T = 84,45 \text{ ton}$$

Jadi, beban kerja maksimum yang boleh bekerja adalah sebesar 84,45 ton.

### 3.6 GESER BLOK (BLOCK SHEAR)

Sebuah elemen pelat tipis menerima beban tarik, dan disambungkan dengan alat pengencang, tahanan dari komponen tarik tersebut kadang ditentukan oleh kondisi batas sobek, atau sering disebut geser blok. Dalam Gambar 3.10 profil siku dengan beban tarik, yang dihubungkan dengan alat pengencang, dapat mengalami keruntuhan geser blok sepanjang potongan a-b-c. Bagian yang terarsir dalam gambar akan terlepas/sobek. Keruntuhan jenis ini dapat pula terjadi pada sambungan pendek yang menggunakan dua alat pengencang atau kurang pada garis searah bekerjanya gaya.

Pengujian menunjukkan bahwa keruntuhan geser blok merupakan penjumlahan tarik leleh (atau tarik fraktur) pada satu irisan dengan geser fraktur (atau geser leleh) pada irisan lainnya yang saling tegak lurus. Dan tahanan nominal tarik dalam keruntuhan geser blok diberikan oleh persamaan:

1. Geser Leleh – Tarik Fraktur ( $f_u A_{nt} \geq 0,6 f_u A_{nv}$ )

$$T_n = 0,6 f_y A_{gv} + f_u A_{nt} \quad \mathbf{3.5.a}$$

2. Geser Fraktur – Tarik Leleh ( $f_u A_{nt} < 0,6 f_u A_{nv}$ )

$$T_n = 0,6 f_u A_{nv} + f_y A_{gt} \quad \mathbf{3.5.b}$$

Dengan:

$A_{gv}$  = Luas kotor akibat geser

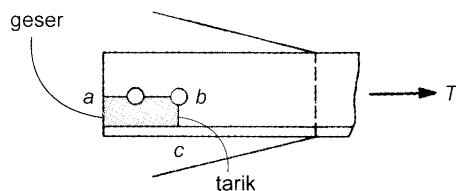
$A_{gt}$  = Luas kotor akibat tarik

$A_{nv}$  = Luas netto akibat geser

$A_{nt}$  = Luas netto akibat tarik

$f_u$  = kuat tarik

$f_y$  = kuat leleh



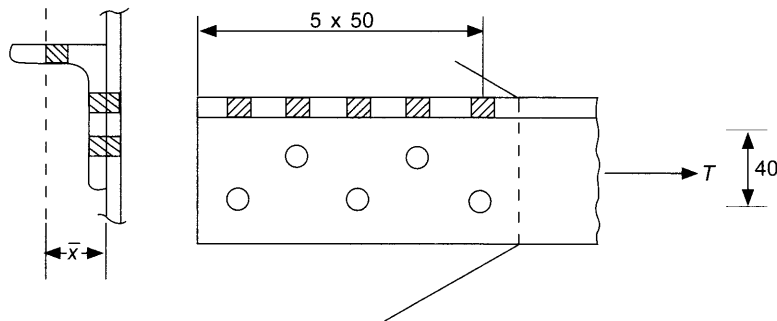
Gambar 3.10 Keruntuhan Geser Blok



Tahanan nominal suatu struktur tarik ditentukan oleh tiga macam tipe keruntuhan yakni leleh dari penampang brutto, fraktur dari penampang efektif dan geser blok pada sambungan. Sedapat mungkin dalam mendisain suatu komponen struktur tarik, keruntuhan yang terjadi adalah leleh dari penampang bruttonya, agar diperoleh tipe keruntuhan yang daktail.

### ■ CONTOH 3.9:

Bila rasio beban hidup dengan beban mati adalah sama dengan 3,  $L/D = 3$ , hitunglah beban kerja yang dapat dipikul oleh profil L 100.100.10, dengan baut berdiameter 16 mm yang disusun seperti dalam gambar berikut. BJ baja 37 ( $f_y = 240$ ,  $f_u = 370$ )



### JAWAB:

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi A_g f_y = 0,9(1920)(240) = \mathbf{41,472 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$A_{n1} = 1920 - 10(16 + 2) = 1740 \text{ mm}^2 \text{ (90,6 \% } A_g \text{)}$$

$$A_{n2} = 1920 - 2(10)(16 + 2) + \frac{50^2 \times 10}{4 \times 40} = 1716,25 \text{ mm}^2 \text{ (89,4 \% } A_g \text{)}$$

$$A_n \text{ menentukan} = 85\% A_g = 0,85 \times 1920 = 1632 \text{ mm}^2$$

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} = 1 - \frac{28,2}{4 \times 50} = 0,86$$

$$A_e = U A_n = 0,86 \times 1632 = 1403,52 \text{ mm}^2$$

$$\phi T_n = \phi A_e f_u = 0,75(1403,52)370 = \mathbf{38,95 \text{ ton}}$$

Jadi, tahanan rencana,  $T_d = 38,95 \text{ ton}$

$$T_d > T_u = 1,2D + 1,6L$$

$$38,95 = 1,2D + 1,6(3D) = 6D$$

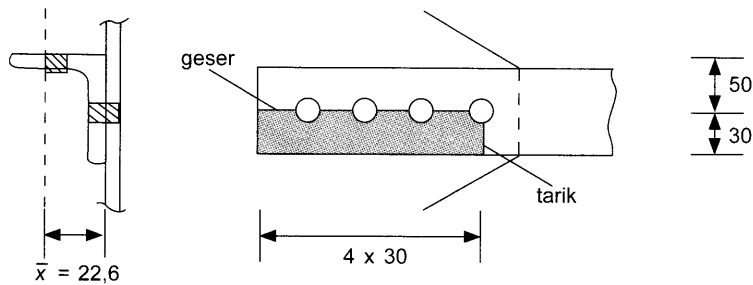
Diperoleh  $D = 6,49 \text{ ton}$  dan  $L = 19,47 \text{ ton}$ .

Beban kerja,  $D + L = 6,49 + 19,47 = 25,96 \text{ ton}$ .

Bila digunakan baut berukuran besar (jumlahnya menjadi lebih sedikit) atau bila tebal pelat sayap cukup tipis, maka perlu ditinjau keruntuhan geser blok.

### ■ CONTOH 3.10:

Hitunglah tahanan rencana komponen struktur tarik berikut, yang terbuat dari profil L 80.80.8. Mutu baja BJ 37. Diameter baut 19 mm.

**JAWAB:**

Kondisi leleh:

$$\phi \cdot T_n = \phi \cdot A_g \cdot f_y = 0,9(1230)(240) = \mathbf{26,568 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$A_n = 1230 - 8(19 + 2) = 1062 \text{ mm}^2$$

$$0,85 \cdot A_g = 0,85(1230) = 1045,5 \text{ mm}^2$$

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} = 1 - \frac{22,6}{90} = 0,75$$

$$A_e = U \cdot A_n = 0,75(1045,5) = 784,125 \text{ mm}^2$$

$$\phi \cdot T_n = \phi \cdot A_e \cdot f_u = 0,75(784,125)(370) = \mathbf{21,76 \text{ ton}}$$

Periksa terhadap geser blok:

$$0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} = 0,6(370)(120 - 3,5(19 + 2))(8) = 8,26 \text{ ton}$$

$$f_u \cdot A_{nt} = 370(30 - 0,5(19 + 2))(8) = 5,77 \text{ ton}$$

Karena  $f_u \cdot A_{nt} < 0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv}$ , gunakan persamaan 3.5.b, sehingga

$$T_n = 0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt} = 8,26 + (240)(30)(8) = 14,02 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75 \times 14,02 = \mathbf{10,515 \text{ ton}}$$

Sehingga tahanan rencana,  $T_d = 9,945 \text{ ton}$ . Keruntuhan geser blok terjadi karena jarak antar baut yang kecil, Peraturan Baja Indonesia SNI mensyaratkan jarak minimal antar alat pengencang adalah 3 kali diameter nominalnya.

**■ CONTOH 3.11:**

Hitunglah tahanan rencana dari profil siku 100.100.10 pada sambungan berikut, jika mutu baja yang digunakan adalah BJ 41. Perhitungkan pula terhadap geser blok!

**JAWAB:**

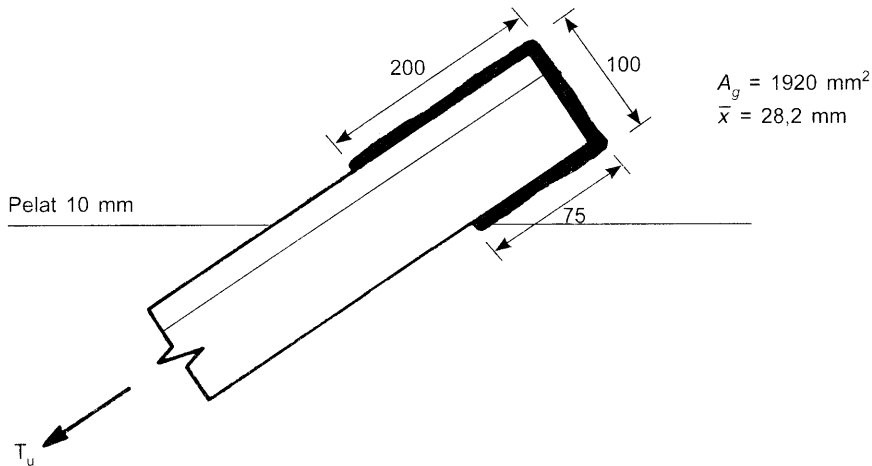
Kondisi leleh:

$$\phi \cdot T_n = \phi \cdot A_g \cdot f_y = 0,9(1920)(250) = \mathbf{43,2 \text{ ton}}$$

Kondisi fraktur:

$$A_n = 1920 \text{ mm}^2$$

$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L} = 1 - \frac{28,2}{75} = 0,624$$



$$A_e = U \cdot A_n = 0,624(1920) = 1198,08 \text{ mm}^2$$

$$\phi \cdot T_n = \phi \cdot A_e \cdot f_u = 0,75(1198,08)(410) = \mathbf{36,84 \text{ ton}}$$

Periksa terhadap geser blok:

$$A_{gv} = (200)(10) + (75)(10) = 2750 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = 100(10) = 1000 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = 2750 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = 1000 \text{ mm}^2$$

$$0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} = 0,6(410)(2750) = 67,65 \text{ ton}$$

$$f_u \cdot A_{nt} = 410(1000) = 41 \text{ ton}$$

$$0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} > f_u \cdot A_{nt} \text{ terjadi geser fraktur - tarik leleh}$$

$$T_n = 0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt} = 0,6(410)(2750) + (250)(1000) = 69,4875 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75 \times 69,4875 = \mathbf{10,515 \text{ ton}}$$

Jadi, tahanan tarik rencana dari profil tersebut adalah sebesar 36,84 ton.

### 3.7 KELANGSINGAN STRUKTUR TARIK

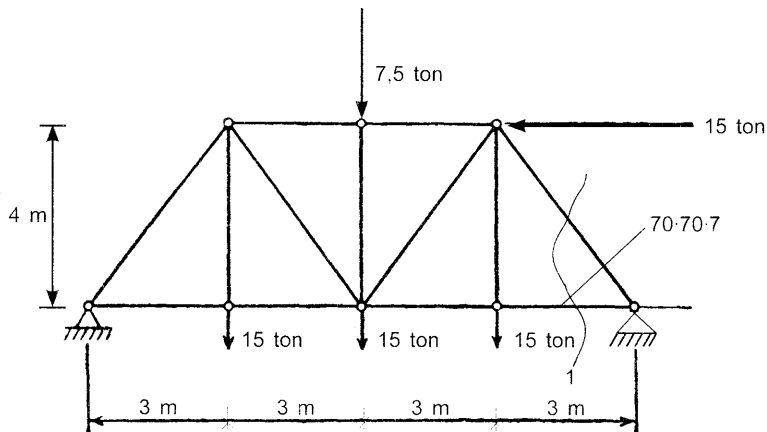
Untuk mengurangi problem yang terkait dengan lendutan besar dan vibrasi, maka komponen struktur tarik harus memenuhi syarat kekakuan. Syarat ini berdasarkan pada rasio kelangsingan,  $\lambda = L/r$ . Dengan  $\lambda$  adalah angka kelangsingan struktur,  $L$  adalah panjang

komponen struktur, sedangkan  $r$  adalah jari-jari girasi ( $r = \sqrt{I/A}$ ). Nilai  $\lambda$  diambil maksimum 240 untuk batang tarik utama, dan 300 untuk batang tarik sekunder.

#### ■ CONTOH 3.12:

Suatu struktur rangka batang dengan pembebanan seperti pada gambar berikut:

Periksalah apakah batang AB cukup kuat menahan gaya tarik yang bekerja padanya, jika beban kerja merupakan kombinasi dari 20% $D$  dan 80% $L$ . Asumsikan banyak baut adalah 1 baris ( $\phi$  baut = 19 mm). Mutu baja BJ 37.

**JAWAB:**

Terlebih dahulu harus dicari besar reaksi pada titik B serta gaya batang AB, dengan menggunakan rumus-rumus dasar ilmu statika.

$$\sum M_C = 0$$

$$- R_B(12) + 15(3 + 6 + 9) + 7,5(6) + 15(4) = 0$$

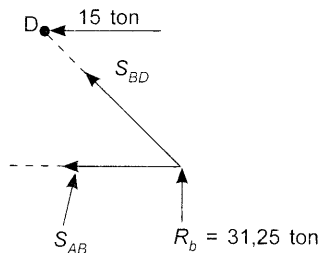
$$R_B = 31,25 \text{ ton}$$

Dengan cara Ritter melalui potongan 1, dapat dicari besarnya gaya batang AB:

$$\sum M_D = 0$$

$$S_{AB}(4) - 31,25(3) = 0$$

$$S_{AB} = 23,4375 \text{ ton}$$



Pada batang AB bekerja gaya tarik terfaktor,  $T_u$ , sebesar:

$$\begin{aligned} T_u &= 1,2(0,2)(23,4375) + 1,6(0,8)(23,4375) \\ &= 35,625 \text{ ton} \end{aligned}$$

Periksa syarat kelangsingan batang tarik:

$$\lambda = \frac{L}{r_{\min}} = \frac{300}{2,12} = 141,5 < 240$$

**OK**

Kondisi leleh:

$$\phi T_n = \phi f_y A_g = 0,90(240)(2)(940) = 40,608 \text{ ton}$$

Kondisi fraktur:

$$A_n = 2(940 - 7(21)) = 1586 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ambil } U = 0,85$$

$$\phi T_n = \phi f_u A_e = 0,75(370)(0,85)(1586) = 37,41 \text{ ton}$$

Jadi,  $\phi T_n (= 37,41 \text{ ton}) > T_u (= 35,625 \text{ ton})$ , profil tersebut cukup kuat.

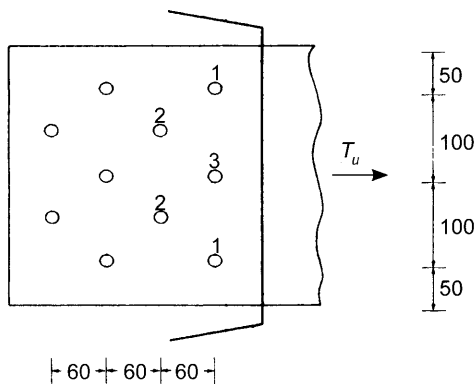
### 3.8 TRANSFER GAYA PADA SAMBUNGAN

Pada umumnya lubang pada batang tarik digunakan oleh alat pengencang, baut, atau paku keling, untuk mentransfer gaya dari satu batang tarik ke batang tarik lainnya.

**Anggapan dasar:** Alat pengencang dengan ukuran yang sama akan menyalurkan gaya yang sama besarnya bila diletakkan secara simetri terhadap garis netral komponen struktur tarik.

#### ■ CONTOH 3.12:

Hitunglah gaya tarik nominal maksimum dari komponen struktur tarik berikut ini. Bila tebal pelat 6 mm, diameter baut 19 mm, dan mutu baja BJ 37.



**JAWAB:**

- a. potongan 1-3-1: ( Gaya 100%  $T_n$  )

$$A_n = 6(300 - 3(19 + 2)) = 1422 \text{ mm}^2 \text{ (79\% } A_g \text{)}$$

$$T_n = A_n f_u = U A_n f_u$$

$$U = 1 - \frac{0,5 \times 6}{3 \times 60} > 0,9 \rightarrow U = 0,9$$

$$T_n = 0,9(1422)(370) = \mathbf{47,35 \text{ ton}}$$

- b. potongan 1-2-3-2-1: ( Gaya 100%  $T_n$  )

$$A_n = 6(300 - 5(19 + 2)) + 4 \cdot \frac{60^2 \times 6}{4 \times 50} = 1602 \text{ mm}^2 \text{ (89\% } A_g \text{)}$$

$$T_n = U A_n f_u$$

$$= 0,9(0,85)(1602)(370) = \mathbf{50,95 \text{ ton}}$$

- c. potongan 1-2-2-1: ( Gaya 90%  $T_n$  )

$$A_n = 6(300 - 4(19 + 2)) + 2 \cdot \frac{60^2 \times 6}{4 \times 50} = 1512 \text{ mm}^2 \text{ (84\% } A_g \text{)}$$

$$0,9 \cdot T_n = U A_n f_u$$

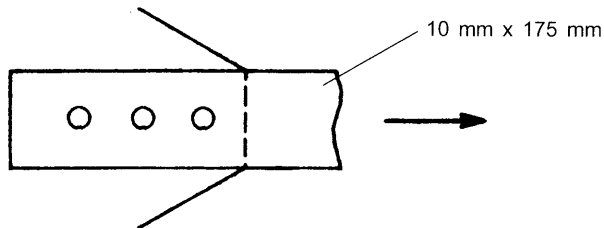
$$= 0,9(1483,2)(370) = 50,35 \text{ ton}$$

$$T_n = 50,35 / 0,9 = \mathbf{55,94 \text{ ton}}$$

Jadi,  $T_n$  maksimum adalah 47,35 ton.

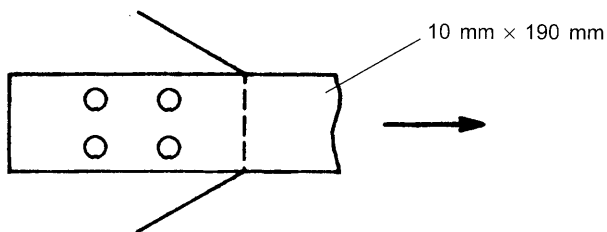
## SOAL-SOAL LATIHAN

- 3.1 Sebuah batang tarik berukuran  $10 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$  disambung dengan 3 buah baut berdiameter 25 mm. Mutu baja yang digunakan adalah BJ 37. Hitunglah tahanan tarik rencana batang tersebut dengan mengasumsikan  $A_e = A_n$ .



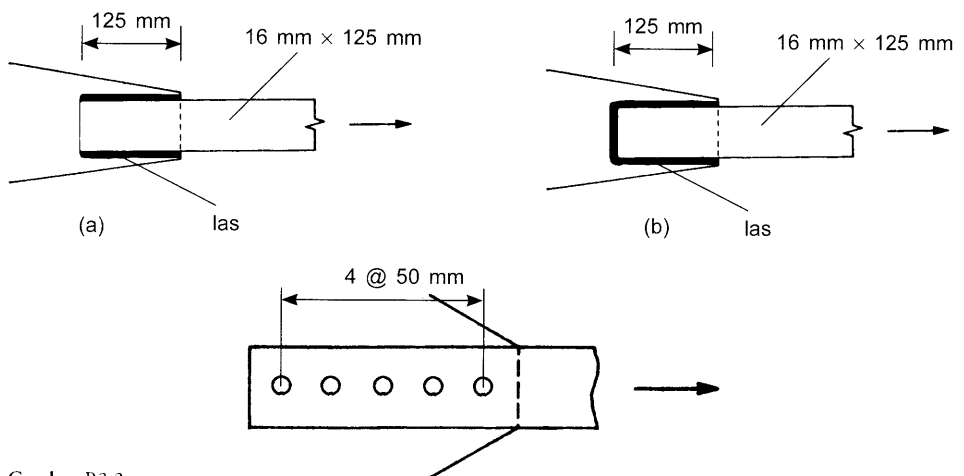
Gambar P.3.1

- 3.2 Sebuah batang tarik dari pelat berukuran  $10 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ , harus memikul beban mati sebesar 110 kN dan beban hidup 200 kN. Mutu baja BJ 41 dan diameter baut 25 mm. Dengan mengasumsikan  $A_e = A_n$ , periksalah kecukupan batang tersebut!



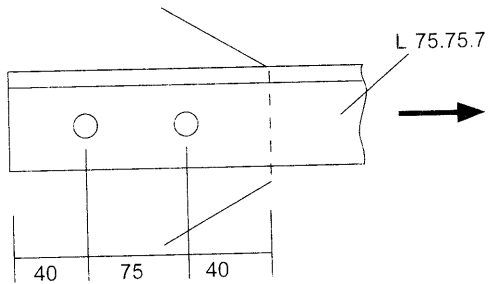
Gambar P.3.2

- 3.3 Hitunglah besarnya luas efektif,  $A_e$ , pada tiap-tiap komponen struktur tarik berikut ini!



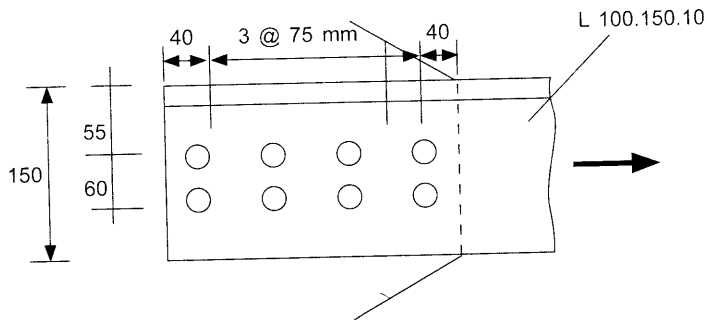
Gambar P.3.3

- 3.4 Sebuah batang tarik dari profil siku tunggal seperti pada gambar (dari baja dengan mutu BJ 41). Jika baut yang digunakan berdiameter 22 mm, hitunglah tahanan tarik rencana dari batang tersebut!



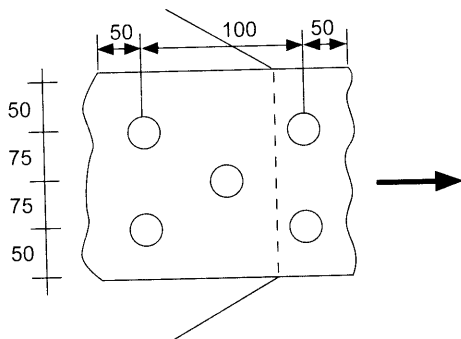
Gambar P.3.4

- P.3.5** Profil siku 100.150.10 dari baja BJ 37 disambungkan ke sebuah pelat simpul dengan baut berdiameter 25 mm. Batang ini memikul beban mati 200 kN, beban hidup 400 kN serta beban angin 150 kN. Periksa apakah profil siku 100.150.10 tersebut mencukupi untuk memikul beban-beban yang bekerja!



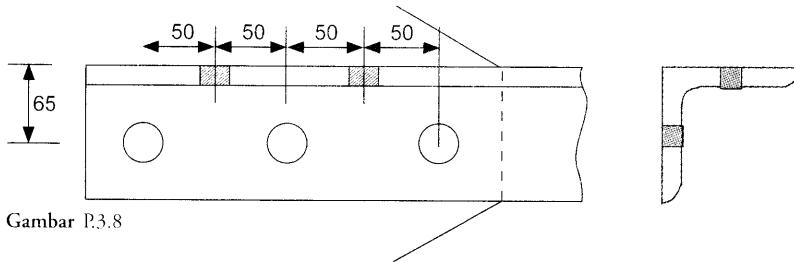
Gambar P.3.5

- P.3.6** Batang tarik yang terbuat dari pelat berukuran 6 mm  $\times$  125 mm disambung dengan las memanjang di kedua sisinya. Panjang las yang digunakan adalah 175 mm. Jika mutu baja adalah BJ 41, hitunglah tahanan tarik rencananya!
- P.3.7** Sebuah pelat berukuran 10 mm  $\times$  250 mm dari baja bermutu BJ 37 disambungkan dengan baut berdiameter 22 mm. Hitunglah tahanan tarik rencana dari batang tersebut!



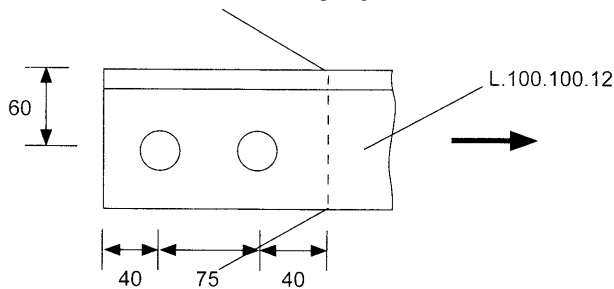
Gambar P.3.7

- 3.8 Profil siku 100.100.12 disambung dengan baut berdiameter 19 mm seperti pada gambar. Jika mutu baja yang digunakan adalah BJ 37, berapakah tahanan tarik rencana dari batang tersebut?



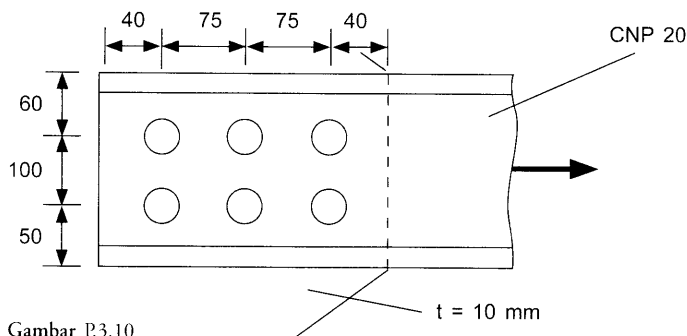
Gambar P.3.8

- 3.9 Hitunglah tahanan geser blok dari suatu komponen struktur tarik berikut, jika mutu baja BJ 41 dan diameter baut yang dipakai adalah 22 mm!



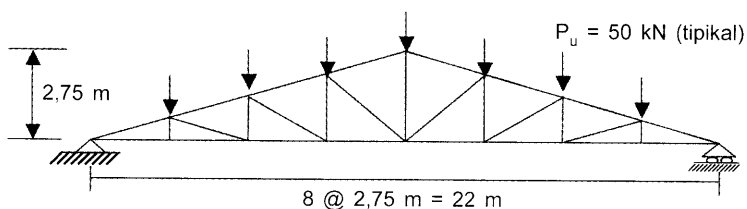
Gambar P.3.9

- 3.10 Hitunglah beban tarik terfaktor maksimum yang dapat dipikul oleh batang tarik berikut, dengan mempertimbangkan pengaruh geser blok. Mutu baja yang digunakan adalah BJ 37 dan diameter baut 19 mm.



Gambar P.3.10

- 3.11 Pilihlah profil siku yang cukup ekonomis yang dapat digunakan untuk batang bawah dari suatu konstruksi kuda-kuda baja (BJ 37) berikut ini. Semua batang disambung dengan menggunakan las memanjang.





# 4

## Batang Tekan

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Memahami kondisi-kondisi dalam merencanakan suatu komponen struktur tekan
- Memahami pengaruh tegangan sisa, panjang tekuk dan tekuk lokal dalam merencanakan komponen struktur tekan
- Melakukan analisis dan desain penampang untuk memikul beban tekan aksial

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 4.1 Pendahuluan
- 4.2 Batang Tekan
- 4.3 Kekuatan Kolom
- 4.4 Pengaruh Tegangan Sisa
- 4.5 Kurva Kekuatan Kolom Akibat Tegangan Sisa
- 4.6 Tahanan Tekan Nominal
- 4.7 Panjang Tekuk
- 4.8 Masalah Tekuk Lokal
- 4.9 Komponen Struktur Tekan Tersusun
- 4.10 Tekuk Torsi dan Tekuk Lentur Torsi

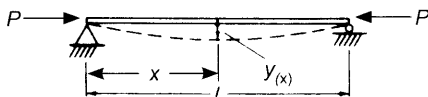
### 4.1 PENDAHULUAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai komponen-komponen struktur yang mengalami gaya aksial tekan. Batang-batang tekan yang banyak dijumpai yaitu kolom dan batang-batang tekan dalam struktur rangka batang. Komponen struktur tekan dapat terdiri dari profil tunggal atau profil tersusun yang digabung dengan menggunakan pelat kopel.

Syarat kestabilan dalam mendisain komponen struktur tekan sangat perlu diperhatikan, mengingat adanya bahaya tekuk (*buckling*) pada komponen-komponen tekan yang langsing.

### 4.2 TEKUK ELASTIK EULER

Teori tekuk kolom pertama kali diperkenalkan oleh Leonhard Euler di tahun 1744. Komponen struktur yang dibebani secara konsentris, di mana seluruh serat bahan masih dalam kondisi elastik hingga terjadinya tekuk, perlahan-lahan melengkung. Perhatikan Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Kolom Euler

Akibat terlenturnya batang tersebut, maka timbul momen lentur sekunder yang besarnya:

$$M(x) = P \cdot y(x) \quad 4.1$$

Dengan mengingat bahwa:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad 4.2$$

Sehingga dari 4.1 dan 4.2 diperoleh suatu persamaan diferensial linear orde dua dengan koefisien konstan:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P}{EI} y = 0 \quad 4.3$$

Dengan mengubah  $K^2 = P/EI$ , maka solusi persamaan 4.3 adalah:

$$y(x) = A \sin Kx + B \cos Kx \quad 4.4$$

Dari kondisi batas:

$$y(0) = 0 \rightarrow 0 = 0 + B \rightarrow B = 0 \quad 4.5.a$$

$$y(L) = 0 \rightarrow 0 = A \sin KL \quad 4.5.b$$

Solusi dari 4.5.b ada tiga kemungkinan,  $A = 0$  yang berarti tak ada lendutan,  $KL = 0$  yang berarti tak ada beban, serta  $KL = N \cdot \pi$  ( $N = 1, 2, 3, \dots$ ). Sehingga diperoleh:

$$K^2 = \frac{N^2 \cdot \pi^2}{L^2} = \frac{P}{EI} \quad 4.6$$

Atau dari 4.6, dengan  $N = 1$  ( $N$  ditetapkan sedemikian hingga  $P$  memberikan tingkat energi yang minimum), diperoleh:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad 4.7$$

Dan tegangan tekan yang terjadi:

$$f_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_g} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad 4.8$$

Pendekatan Euler pada umumnya diabaikan dalam disain karena hasil dari percobaan–percobaan yang dilakukan tak sesuai dengannya. Pendekatan Euler hanya mungkin terjadi bila nilai  $l$  yang cukup besar ( $l > 110$ ). Untuk nilai  $l$  yang lebih kecil, akan terjadi tekuk inelastis. Dan bila nilai  $l < 20$  akan terjadi leleh pada seluruh penampang. Pada kenyataannya, keruntuhan kolom lebih banyak terjadi akibat tekuk inelastis.

### 4.3 KEKUATAN KOLOM

Kolom ideal yang memenuhi persamaan Euler, harus memenuhi anggapan–anggapan sebagai berikut:

1. kurva hubungan tegangan-regangan tekan yang sama di seluruh penampang
2. tak ada tegangan sisa
3. kolom benar-benar lurus dan prismatis
4. beban bekerja pada titik berat penampang, hingga batang melentur
5. kondisi tumpuan harus ditentukan secara pasti
6. berlakunya teori lendutan kecil (*small deflection theory*)
7. tak ada puntir pada penampang, selama terjadi lentur

Bila asumsi–asumsi di atas dipenuhi, maka kekuatan kolom dapat ditentukan berdasarkan:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(L/r)^2} A_g = f_{cr} \cdot A_g \quad 4.9$$

dengan:

- $E_t$  = tangen Modulus Elastisitas ada tegangan  $P_{cr}/A_g$
- $A_g$  = luas kotor penampang batang
- $kL/r$  = rasio kelangsingan efektif
- $k$  = faktor panjang efektif
- $L$  = panjang batang
- $r$  = jari-jari girasi

Komponen tekan yang panjang akan mengalami keruntuhan elastik, sedangkan komponen tekan yang cukup pendek dapat dibebani hingga leleh atau bahkan hingga memasuki daerah penguatan regangan. Namun, dalam kebanyakan kasus keruntuhan tekuk terjadi setelah sebagian dari penampang melintang batang mengalami leleh. Kejadian ini dinamakan tekuk inelastik

#### 4.4 PENGARUH TEGANGAN SISA

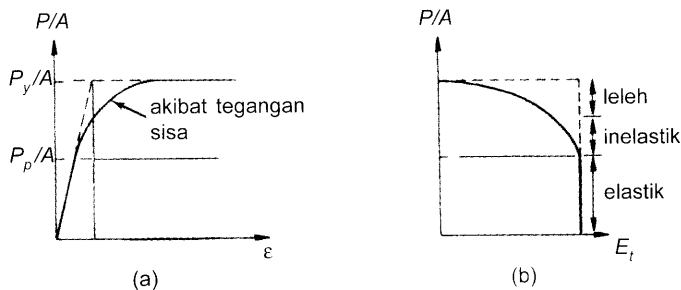
Tegangan sisa (*residual stress*) adalah tegangan yang masih tinggal dalam suatu komponen struktur yang dapat diakibatkan oleh beberapa hal seperti

1. proses pendinginan yang tak merata akibat proses gilas panas
2. pengerjaan dingin
3. pembuatan lubang atau pemotongan saat fabrikasi
4. proses pengelasan

Pada umumnya tegangan sisa banyak dihasilkan akibat proses 1 dan 3. Besarnya tegangan sisa tak tergantung pada kuat leleh bahan, namun bergantung pada dimensi dan konfigurasi penampang, karena faktor-faktor tersebut mempengaruhi kecepatan pendinginan. Profil WF atau profil H setelah dibentuk melalui proses gilas panas, maka bagian sayap menjadi lebih tebal dari bagian badannya, mendingin lebih lambat daripada bagian badan. Bagian ujung sayap mempunyai daerah sentuh dengan udara yang lebih luas dibandingkan daerah pertemuannya dengan badan. Konsekuensinya, tegangan tekan sisa terjadi pada ujung sayap dan pada daerah tengah dari badan. Sedangkan tegangan sisa tarik terjadi pada daerah pertemuan antara sayap dan badan.

#### 4.5 KURVA KEKUATAN KOLOM AKIBAT TEGANGAN SISA

Akibat pengaruh tegangan sisa, kurva tegangan regangan seperti diperlihatkan pada Gambar 4.2.



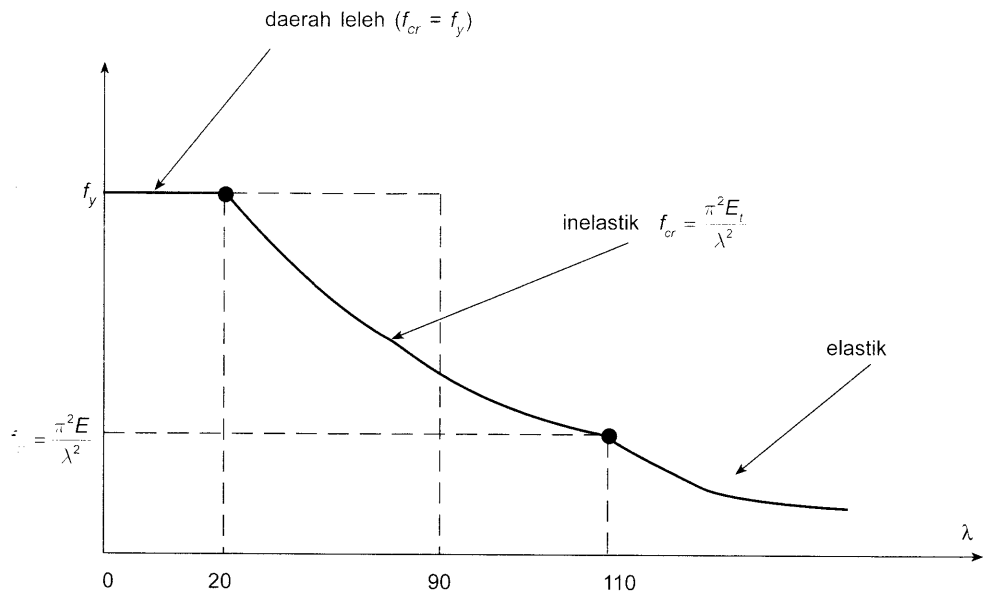
4.9

can  
gga  
tuk  
ini

ten

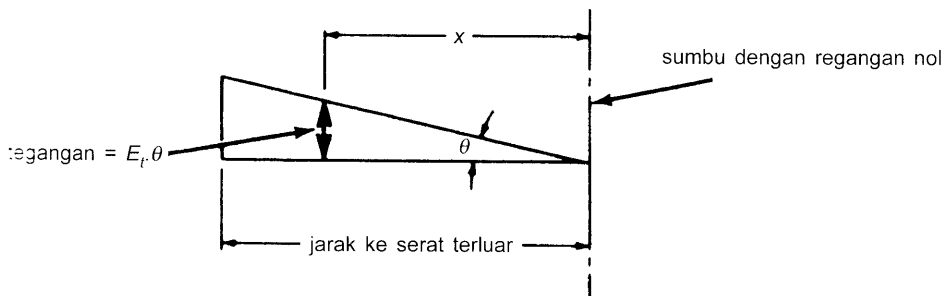
iya  
nsi  
en-  
ka  
da  
yih  
an  
isa

bar



Gambar 4.2 Pengaruh Tegangan Sisa

Untuk memperhitungkan efek dari leleh awal yang diakibatkan oleh tegangan sisa, perhatikan satu serat pada penampang sejarak  $x$  dari sumbu dengan regangan nol yang diakibatkan oleh lentur.

Gambar 4.3 Tegangan pada Serat Sejarak  $x$  dari Sumbu Regangan Nol Akibat Lentur

Maka kontribusi momen lentur dari tegangan pada satu serat adalah:

$$dM = (\text{tegangan})(\text{luas})(\text{lengan momen}) = (\theta \cdot E_t \cdot x)(dA)(x) \quad 4.10$$

Dan pada seluruh penampang:

$$M = \int_A \theta \cdot E_t \cdot x^2 dA = \theta \int_A E_t \cdot x^2 dA \quad 4.11$$

Dari teori lenturan balok, bahwa jari-jari kelengkungan:

$$R = \frac{1}{\theta} \quad 4.12$$

$$\theta = \frac{1}{R} = \frac{M}{E' \cdot I} \quad 4.13$$

Sehingga:

$$E' \cdot I = \frac{M}{\theta} = \int_A E_t \cdot x^2 dA \quad 4.14$$

$$E' = \frac{1}{I} \int_A E_t \cdot x^2 dA \quad 4.15$$

Lihat kembali kurva tegangan regangan ideal (garis putus) pada Gambar 4.2, untuk  $f < f_y$ , maka  $E_t = E$ , dan untuk  $f = f_y$ ,  $E_t = 0$ , maka 4.15 menjadi:

$$E' = \frac{E}{I} \int_{A(\text{elastik})} x^2 dA = E \frac{I_e}{I} \quad 4.16$$

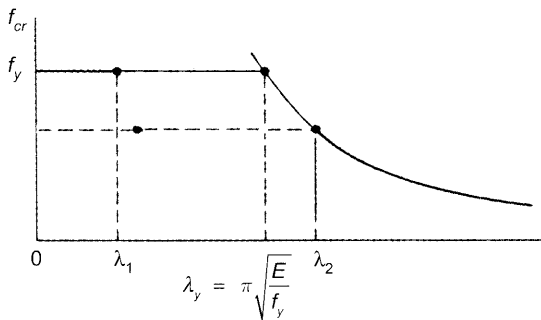
$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E'}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \frac{I_e}{I} \quad 4.17$$

Atau

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot (I_e / I)}{(k \cdot L / r)^2} \cdot A_g = f_{cr} \cdot A_g \quad 4.18$$

Bila tak ada tegangan sisa dalam komponen struktur tekan, pada saat  $I_e = I$ , dan  $f_{cr} = f_y$ , berlaku:

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = f_y \text{ atau } \lambda_y = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 4.19$$



**Gambar 4.4** Komponen Struktur Tekan Tanpa Tegangan Sisa

Tegangan sisa pada komponen struktur tekan mempengaruhi bentuk kurva pada daerah  $I_1 < I < I_2$ , di mana  $0 < I_e < I$ . Pada daerah  $0 < I < I_1$ ,  $s_{cr} = f_y$ .

#### ■ CONTOH 4.1:

Gambarkan kurva ( $f_{cr}$  vs  $\lambda$ ) untuk tekuk arah sumbu lemah, dari profil I berikut ini, yang mempunyai  $f_y = 240$  MPa. Profil hasil gilas panas ini mempunyai kurva tegangan sisa yang sudah disederhanakan seperti pada gambar. Abaikan kontribusi dari bagian badan (*web*). Hasil pengujian menunjukkan kurva tegangan regangan material elastoplastik,  $E = 200.000$  MPa.

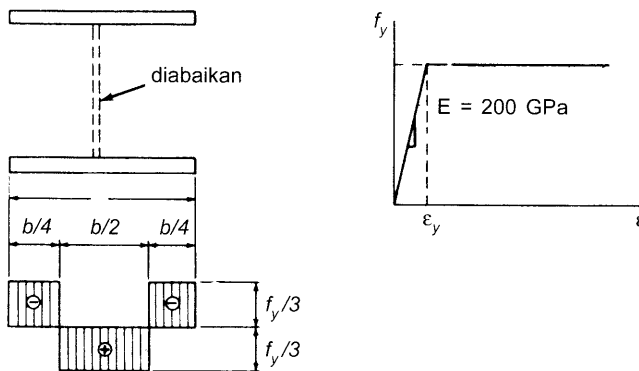
**JAWAB:**

4.13 Akibat beban luar, regangan yang timbul dalam tiap serat bahan adalah sama. Hingga tercapainya regangan leleh  $\epsilon_y$  yang pertama kali, beban yang bekerja diekspresikan dengan:

$$P = \int_A \sigma \cdot dA = \sigma \cdot A$$

4.14 Setelah sebagian dari penampang mengalami leleh, maka beban kerja menjadi:

$$P = (A - A_e) f_y + \int_{A_e} f \cdot dA$$



4.19 Saat bekerja beban  $f_{cr} = P/A < 2f_y/3$ , seluruh penampang masih elastik, sehingga  $E_t = E$ , atau mengingat persamaan 4.16 menghasilkan  $E' = E$  (karena  $I_e = I$ ), sehingga:

$$\frac{I_e}{I} = \frac{2(1/12)(tf)(b/2)^3}{2(1/12)(tf)(b)^3} = \frac{(b/2)^3}{b^3} = \frac{1}{8}$$

$$\text{atau } \frac{k \cdot L}{r} = \lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 (200000)}{(2/3)(240)}} = 111,072 \quad (\text{titik 1})$$

Bila bekerja gaya  $f_{cr} = P/A > 2f_y/3$ , ujung flens akan mulai mengalami leleh, yang berakibat  $I_e < I$ , sehingga:

$$\frac{I_e}{I} = \frac{2(1/12)(tf)(b/2)^3}{2(1/12)(tf)(b)^3} = \frac{(b/2)^3}{b^3} = \frac{1}{8}$$

$$f_{cr} = \frac{2f_y}{3} = \frac{\pi^2 E (I_e / I)}{(k \cdot L / r)^2} = \frac{\pi^2 E}{8(k \cdot L / r)^2}$$

ada

$$\frac{k \cdot L}{r} = \lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 (200000)}{(2/3)(8)(240)}} = 39,27 \quad (\text{titik 2})$$

Dan ketika bekerja gaya  $f_{cr} = P/A = f_y$ , maka:

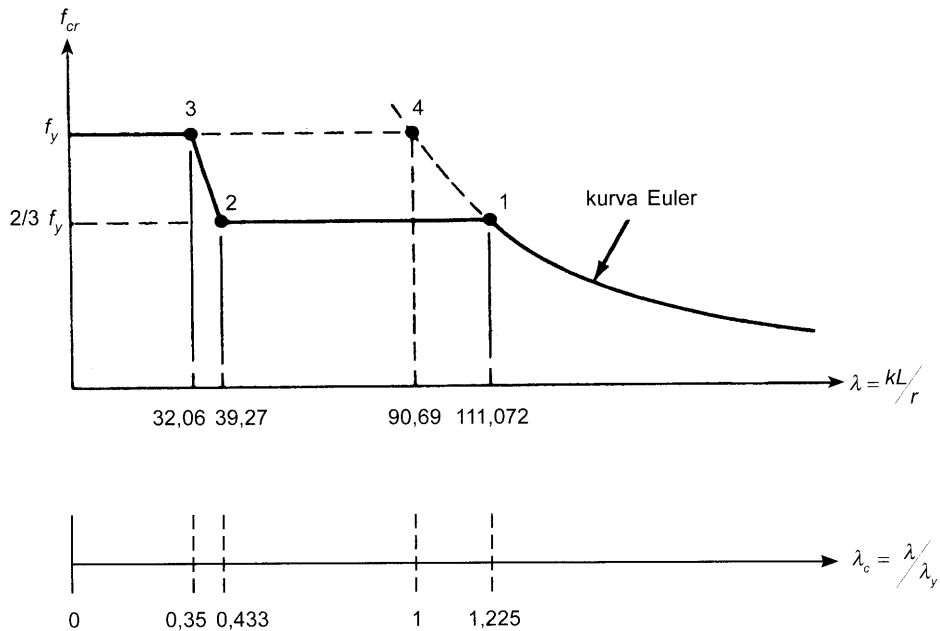
$$f_{cr} = f_y = \frac{\pi^2 E}{8(k \cdot L / r)^2}$$

ng  
isa  
an  
E

$$\frac{k \cdot L}{r} = \lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 (200000)}{(8)(240)}} = 32,06 \quad (\text{titik 3})$$

Dan bila tak ada pengaruh tegangan sisa, akan diperoleh

$$\frac{k \cdot L}{r} = \lambda_y = \sqrt{\frac{\pi^2 (200000)}{240}} = 90,69 \quad (\text{titik 4})$$



#### 4.6 TAHANAN TEKAN NOMINAL

Suatu komponen struktur yang mengalami gaya tekan konsentris, akibat beban terfaktor  $N_u$ , menurut SNI 03-1729-2002, pasal 9.1 harus memenuhi:

$$N_u < \phi_c N_n \quad 4.20$$

Dengan:  $\phi_c = 0,85$

$N_u$  = beban terfaktor

$N_n$  = kuat tekan nominal komponen struktur =  $A_g f_{cr}$

Tegangan kritis untuk daerah elastik, dituliskan sebagai:

$$\frac{f_{cr}}{f_y} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 f_y} = \frac{1}{\lambda_c^2} \quad 4.21$$

$$\text{sehingga } \lambda_c = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad 4.22$$

Daya dukung nominal  $N_n$  struktur tekan dihitung sebagai berikut:

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega} \quad 4.23$$

Dengan besarnya  $\omega$  ditentukan oleh  $\lambda_c$ , yaitu:

Untuk  $\lambda_c < 0,25$  maka  $\omega = 1$  4.24.a

(titik 4) Untuk  $0,25 < \lambda_c < 1,2$  maka  $\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67\lambda_c}$  4.24.b

Untuk  $\lambda_c > 1,2$  maka  $\omega = 1,25\lambda_c^2$  4.24.c

## 4.7 PANJANG TEKUK

Kolom dengan kekangan yang besar terhadap rotasi dan translasi pada ujung-ujungnya (contohnya tumpuan jepit) akan mampu menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan kolom yang mengalami rotasi serta translasi pada bagian tumpuan ujungnya (contohnya adalah tumpuan sendi). Selain kondisi tumpuan ujung, besar beban yang dapat diterima oleh suatu komponen struktur tekan juga tergantung dari panjang efektifnya. Semakin kecil panjang efektif suatu komponen struktur tekan, maka semakin kecil pula risikonya terhadap masalah tekuk.

$$= \frac{kL}{r}$$

$$= \frac{\lambda}{\lambda_y}$$

terfakto:

4.20

Garis putus menunjukkan posisi kolom pada saat tertekuk							
	Harga K teoretis	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
	K desain	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
	Keterangan						
	jepit						
	sendi						
	rol tanpa rotasi						
ujung bebas							

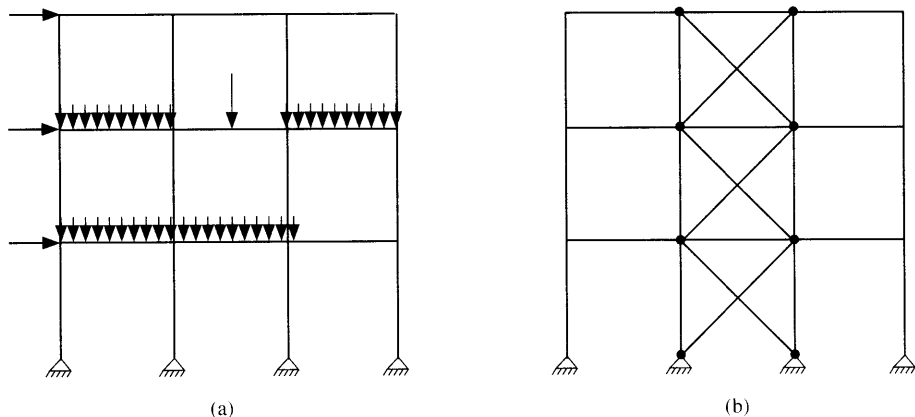
Gambar 4.5 Panjang Tekuk untuk Beberapa Kondisi Perletakan (Gambar 7.6-1 SNI 03-1729-2002)



Panjang efektif suatu kolom secara sederhana dapat didefinisikan sebagai jarak di antara dua titik pada kolom tersebut yang mempunyai momen sama dengan nol, atau didefinisikan pula sebagai jarak di antara dua titik belok dari kelengkungan kolom. Dalam perhitungan kelangsingan komponen struktur tekan ( $\lambda = L/r$ ), panjang komponen struktur yang digunakan harus dikalikan suatu faktor panjang tekuk  $k$  untuk memperoleh panjang efektif dari kolom tersebut. Besarnya faktor panjang efektif sangat tergantung dari kondisi perletakan pada ujung-ujung komponen struktur tersebut. Prosedur penentuan nilai  $k$  dilakukan dengan analisa tekuk terhadap suatu kolom, dan cara analisa tersebut tidak dibahas dalam buku ini.

SNI 03-1729-2002 pasal 7.6.3.1 memberikan daftar nilai faktor panjang tekuk untuk berbagai kondisi tumpuan ujung dari suatu kolom. Nilai  $k$  ini diperoleh dengan mengasumsikan bahwa kolom tidak mengalami goyangan atau translasi pada ujung-ujung tumpuannya.

Nilai  $k$  untuk komponen struktur tekan dengan dengan kondisi-kondisi tumpuan ujung yang ideal seperti dalam Gambar 4.5 dapat ditentukan secara mudah dengan menggunakan ketentuan-ketentuan di atas, namun untuk suatu komponen struktur tekan yang merupakan bagian dari suatu struktur portal kaku seperti dalam Gambar 4.6, maka nilai  $k$  harus dihitung berdasarkan suatu nomogram. Tumpuan-tumpuan pada ujung kolom tersebut ditentukan oleh hubungan antara balok dengan kolom-kolom lainnya. Portal dalam Gambar 4.6.a dinamakan sebagai portal bergoyang sedangkan portal dalam Gambar 4.6.b disebut sebagai portal tak bergoyang (goyangan dicegah dengan mekanisme kerja dari bresing-bresing yang dipasang).



**Gambar 4.6** Portal Kaku Bergoyang dan Tanpa Goyangan

Nilai  $k$  untuk masing-masing sistem portal tersebut dapat dicari dari nomogram dalam Gambar 4.7. Terlihat dalam Gambar 4.7 bahwa nilai  $k$  merupakan fungsi dari  $G_A$  dan  $G_B$  yang merupakan perbandingan antara kekakuan komponen struktur yang dominan terhadap tekan (kolom) dengan kekakuan komponen struktur yang relatif bebas terhadap gaya tekan (balok). Nilai  $G$  ditetapkan berdasarkan persamaan:

$$G = \frac{\sum \left( \frac{I}{L} \right)_c}{\sum \left( \frac{I}{L} \right)_b} \quad 4.25$$

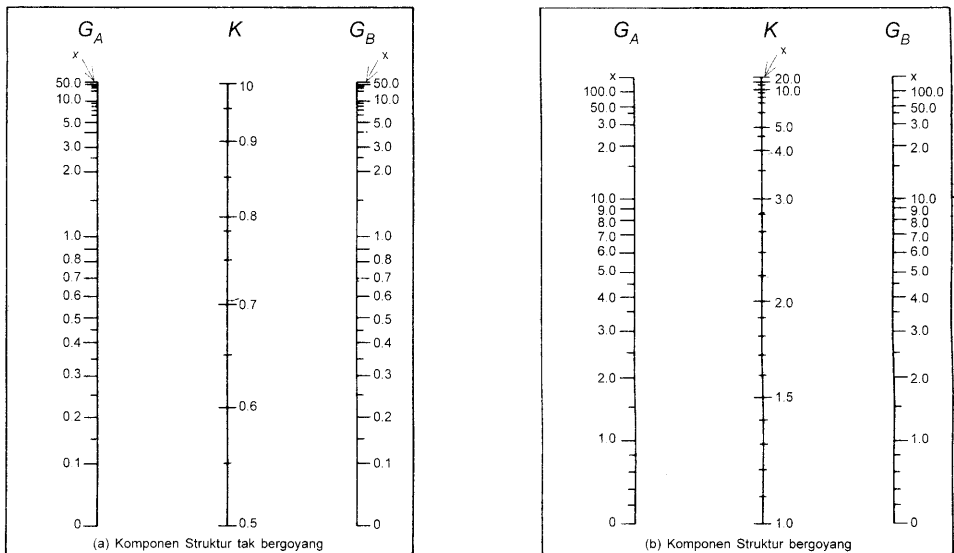
Persamaan 4.25 dapat dikecualikan untuk kondisi-kondisi berikut:

a. untuk komponen struktur tekan yang dasarnya tidak terhubung secara kaku pada pondasi (contohnya tumpuan sendi), nilai  $G$  tidak boleh diambil kurang dari 10, kecuali bila dilakukan analisa secara khusus untuk mendapatkan nilai  $G$  tersebut

b. untuk komponen struktur tekan yang dasarnya terhubung secara kaku pada pondasi (tumpuan jepit), nilai  $G$  tidak boleh diambil kurang dari 1, kecuali dilakukan analisa secara khusus untuk mendapatkan nilai  $G$  tersebut

Besaran  $\sum \left( \frac{I}{L} \right)_c$  dihitung dengan menjumlahkan kekakuan semua komponen struktur tekan (kolom)—dengan bidang lentur yang sama—yang terhubung secara kaku pada ujung komponen struktur yang sedang ditinjau.

Besaran  $\sum \left( \frac{I}{L} \right)_b$  dihitung dengan menjumlahkan kekakuan semua komponen struktur lentur (balok)—dengan bidang lentur yang sama—yang terhubung secara kaku pada ujung komponen struktur yang sedang ditinjau.

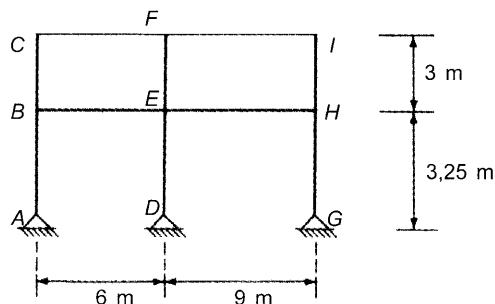


Gambar 4.7 Nomogram Faktor Panjang Tekuk,  $k$  (SNI 03-1729-2002 Gb.7.6-2)

#### ■ CONTOH 4.2:

Hitunglah nilai  $k$  untuk masing-masing kolom dalam struktur berikut:

JAWAB:



Faktor kekakuan masing-masing elemen:

Elemen	Profil	$I \text{ (cm}^4\text{)}$	$L \text{ (cm)}$	$I/L$
AB	WF 200.200.8.12	4720	350	13,486
BC	WF 200.200.8.12	4720	300	15,73
DE	WF 250.125.6.9	4050	350	11,57
EF	WF 250.125.6.9	4050	300	13,5
GH	WF 200.200.8.12	4720	350	13,486
HI	WF 200.200.8.12	4720	300	15,73
BE	WF 450.200.9.14	33500	600	55,83
CF	WF 400.200.8.13	23700	600	39,5
EH	WF 450.300.11.18	56100	900	62,33
FI	WF 400.300.10.16	38700	900	43

Faktor  $G$  tiap-tiap joint:

Joint	$S \text{ (I/L)}_c / S \text{ (I/L)}_b$	$G$
A	-	10
B	$(13,486+15,73) / 55,83$	0,523
C	$15,73 / 39,5$	0,398
D	-	10
E	$(11,57+13,5) / (55,83+62,33)$	0,212
F	$13,5 / (39,5+43)$	0,164
G	-	10
H	$(13,486+15,73) / 62,33$	0,469
I	$15,73 / 43$	0,366

Faktor panjang efektif,  $k$ , masing-masing kolom:

Kolom	$G_A$	$G_B$	$k$
AB	10	0,523	1,80
BC	0,523	0,398	1,15
DE	10	0,212	1,72
EF	0,212	0,164	1,07
GH	10	0,469	1,79
HI	0,469	0,366	1,18

### 4.8 MASALAH TEKUK LOKAL

Jika penampang melintang suatu komponen struktur tekan cukup tipis, maka akan ada kemungkinan timbul tekuk lokal. Jika tekuk lokal terjadi maka komponen struktur tersebut tidak akan lagi mampu memikul beban tekan secara penuh, dan ada kemungkinan pula struktur tersebut akan mengalami keruntuhan. Profil-profil WF dengan tebal flens yang tipis cukup rawan terhadap bahaya tekuk lokal, sehingga penggunaan profil-profil demikian sebaiknya dihindari.

SNI 03-1729-2002 membatasi rasio antara lebar dengan ketebalan suatu elemen, dan penampang suatu komponen struktur dapat diklasifikasikan menjadi penampang kompak, tak kompak dan langsing. Suatu penampang yang menerima beban aksial tekan murni, kekuatannya harus direduksi jika penampang tersebut termasuk penampang yang langsing. Rasio antara lebar dengan tebal suatu elemen biasanya dinotasikan dengan simbol  $\lambda$ . Untuk profil WF maka kelangsingan flens dan web dapat dihitung berdasarkan rasio  $b_f/2t_f$  dan  $h/t_w$ , dengan  $b_f$  dan  $t_f$  adalah lebar dan tebal dari flens sedangkan  $h$  dan  $t_w$  adalah tinggi dan tebal dari web. Jika nilai  $\lambda$  lebih besar dari suatu batas yang ditentukan,  $\lambda_p$ , maka penampang dikategorikan sebagai penampang langsing dan sangat potensial mengalami tekuk lokal. Batasan-batasan  $\lambda_r$  untuk berbagai tipe penampang ditunjukkan dalam Gambar 4.8.

### 4.9 KOMPONEN STRUKTUR TEKAN TERSUSUN

Komponen struktur tekan dapat tersusun dari dua atau lebih profil, yang disatukan dengan menggunakan pelat kopel. Analisis kekuatannya harus dihitung terhadap sumbu bahan dan sumbu bebas bahan. Sumbu bahan adalah sumbu yang memotong semua elemen komponen struktur tersebut, sedangkan sumbu bebas bahan adalah sumbu yang sama sekali tidak, atau hanya memotong sebagian dari elemen komponen struktur tersebut. Analisis dilakukan sebagai berikut:

Kelangsingan pada arah sumbu bahan (sumbu  $x$ ) dihitung dengan:

$$\lambda_x = \frac{k \cdot L_x}{r_x} \quad 4.26$$

Dan pada arah sumbu bebas bahan harus dihitung kelangsingan ideal  $\lambda_y$ :

$$\lambda_y = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2} \quad 4.27$$

dan

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_y} \quad \text{dan} \quad \lambda_1 = \frac{L_1}{r_{\min}} \quad 4.28$$

Dengan:

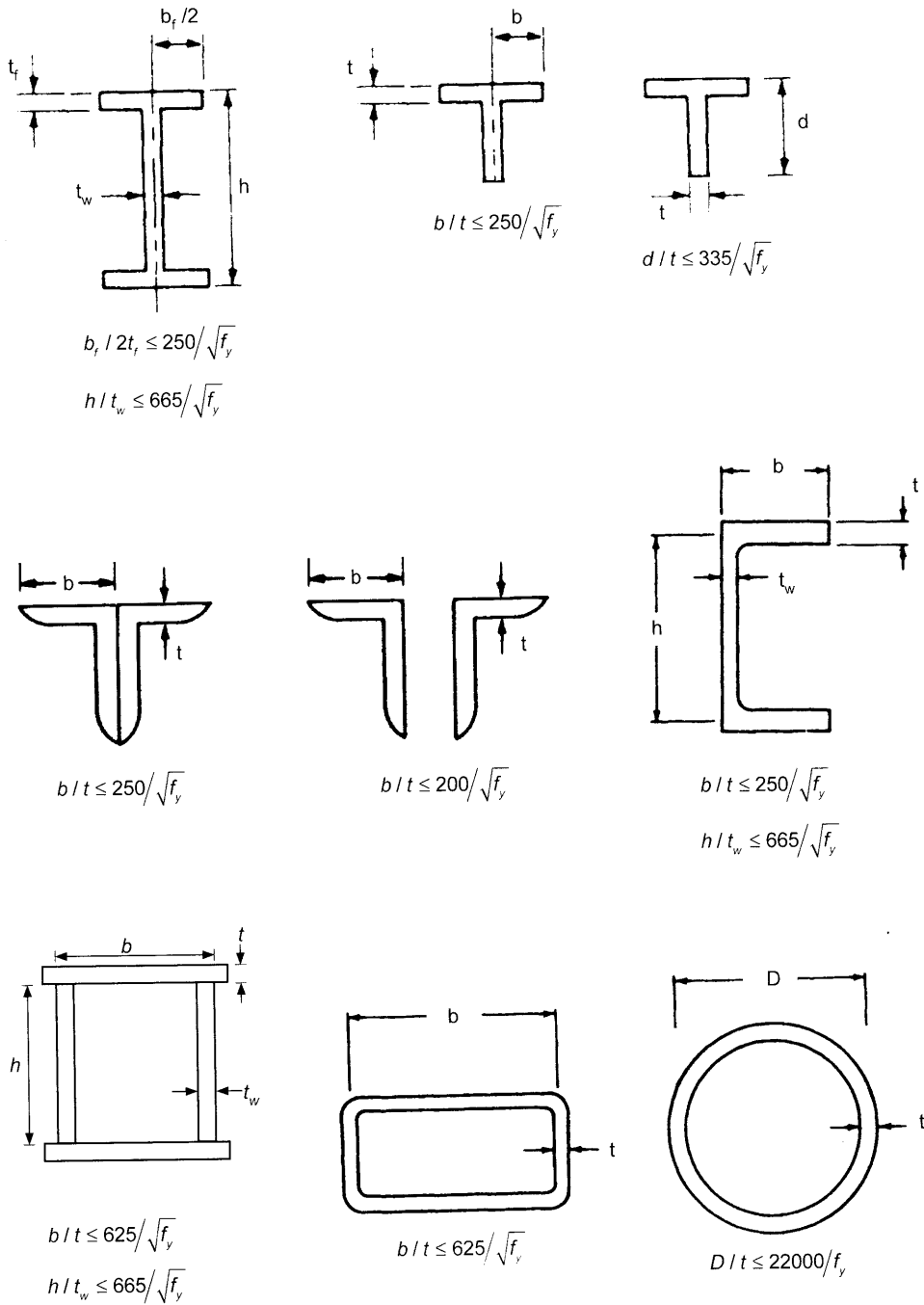
- $L_x, L_y$  = panjang komponen struktur tekan arah  $x$  dan arah  $y$
- $k$  = faktor panjang tekuk
- $r_x, r_y, r_{\min}$  = jari-jari girasi komponen struktur
- $m$  = konstanta yang besarnya ditentukan dalam peraturan
- $L_1$  = jarak antar pelat kopel pada arah komponen struktur tekan

Pelat kopel yang digunakan harus cukup kaku sehingga memenuhi persamaan:

$$\frac{b/2}{t_f} \geq 10 \frac{I}{I}$$

4.29

Dengan:  $I_p$  = momen inersia pelat kopel, untuk pelat kopel di muka dan di



Gambar 4.8 Nilai Batas  $\lambda_c$  untuk Berbagai Tipe Penampang

4.29

belakang yang tebalnya  $t$  dengan tinggi  $h$ , maka  
 $I_y$  = momen inersia minimum satu buah profil  
 $a$  = jarak antar dua pusat titik berat elemen komponen struktur

Selain ketentuan tersebut di atas, untuk menjaga kestabilan elemen-elemen penampang komponen struktur tersusun, maka harga  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ , dan  $\lambda_z$  harus memenuhi:

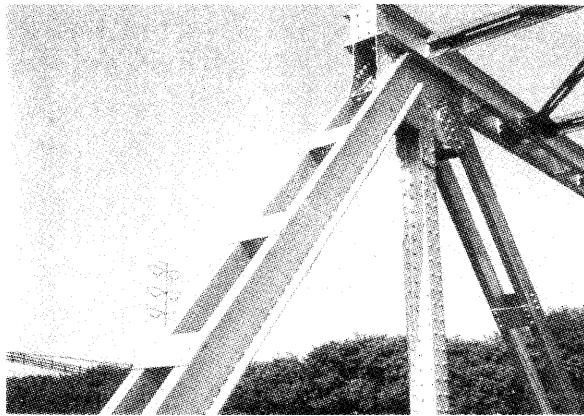
$$\begin{aligned}\lambda_x &\geq 1,2 \lambda_z \\ \lambda_y &\geq 1,2 \lambda_z \\ \lambda_z &\leq 50\end{aligned}\quad 4.30$$

Pelat kopel harus dihitung dengan menganggap bahwa pada seluruh panjang komponen struktur tersusun tersebut bekerja gaya lintang yang besarnya:

$$D_u = 0,02 N_u \quad 4.31$$

#### ■ CONTOH 4.3:

Rencanakan komponen struktur tekan berikut dengan memakai profil WF. Kondisi perletakan jepit-sendi. Beban aksial tekan terfaktor  $N_u = 120$  ton. Mutu baja B. 37 ( $f_y = 240$  MPa,  $f_u = 370$  MPa). Panjang batang  $L = 4500$  mm.



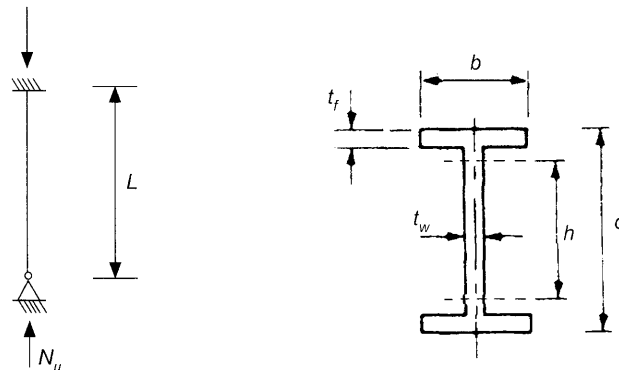
Gambar 4.9 Pelat Kopel pada Batang Tekan Tersusun

Coba profil WF 300.200.9.14

$d = 298$  mm

$b = 201$  mm

$t_w = 9$  mm



$$\begin{aligned}
 t_f &= 14 \text{ mm} \\
 r_o &= 18 \text{ mm} \\
 b &= d - 2(t_f + r_o) = 234 \text{ mm} \\
 r_x &= 126 \text{ mm} \\
 r_y &= 47,7 \text{ mm} \\
 A_g &= 8336 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

**JAWAB:**

Periksa kelangsingan penampang:

Flens  $\frac{b/2}{t_f} = \frac{201}{2 \times 14} = 7,18$

$$\frac{250}{\sqrt{f_y}} = \frac{250}{\sqrt{240}} = 16,14$$

$$\frac{b/2}{t_f} < \lambda_r$$

**OK**

Web  $\frac{b}{t_w} = \frac{234}{9} = 26$

$$\frac{665}{\sqrt{f_y}} = \frac{665}{\sqrt{240}} = 42,92$$

$$\frac{b}{t_w} < \lambda_r$$

**OK**

Kondisi tumpuan jepit–sendi,  $k = 0,8$ .

Arah sumbu kuat (sumbu  $x$ ):

$$\lambda_x = \frac{k \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,8 \times 4500}{126} = 28,57$$

$$\lambda_{cx} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{28,57}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,3149$$

$$0,25 < \lambda_{cx} < 1,2 \rightarrow \omega_x = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_{cx}}$$

$$\omega_x = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,3149)} = 1,0295$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 8336 \cdot \frac{240}{1,0295} = 194,3 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{120}{0,85 \times 194,3} = 0,73 < 1$$

**OK**

Arah sumbu lemah (sumbu  $y$ ):

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,8 \times 4500}{47,7} = 75,47$$

$$\lambda_{cy} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{75,47}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,832$$

$$0,25 < \lambda_{cy} < 1,2 \rightarrow \omega_y = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_{cy}}$$

$$\omega_y = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,832)} = 1,372$$

$$N_u = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 8336 \cdot \frac{240}{1,372} = 145,82 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{120}{0,85 \times 145,82} = 0,97 < 1$$

OKOK

Jadi, profil WF 300.200.9.14 cukup untuk memikul beban tekan terfaktor 120 ton.

#### ■ CONTOH 4.4:

Rencanakan komponen struktur tekan berikut, yang menerima beban aksial tekan terfaktor,  $N_u = 60$  ton. Gunakan profil **T**. Panjang batang 4000 mm, dengan kondisi tumpuan jepit-jepit. Mutu baja BJ 37.

Coba profil **T125.250**

$$d = 125 \text{ mm}$$

$$b = 250 \text{ mm}$$

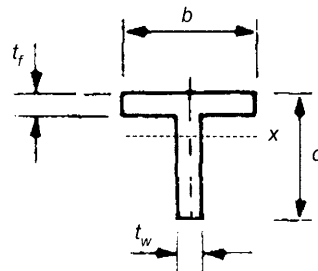
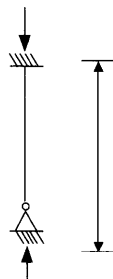
$$t_w = 9 \text{ mm}$$

$$t_f = 14 \text{ mm}$$

$$A_g = 4609 \text{ mm}^2$$

$$r_x = 29,8 \text{ mm}$$

$$r_y = 62,9 \text{ mm}$$

OK

#### JAWAB:

Periksa kelangsingan penampang:

$$\text{Flens} \quad \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{250}{2 \times 14} = 8,93$$

$$\frac{250}{\sqrt{f_y}} = \frac{250}{\sqrt{240}} = 16,14$$

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} < \lambda_r$$

OK

$$\text{Web} \quad \frac{d}{t_w} = \frac{125}{9} = 13,88$$

$$\frac{335}{\sqrt{f_y}} = \frac{335}{\sqrt{240}} = 21,62$$

$$\frac{d}{t_w} < \lambda_r$$

OKOK

Kondisi tumpuan jepit-jepit, faktor panjang tekuk  $k = 0,65$ .



Arah sumbu lemah (sumbu  $x$ ):

$$\lambda_x = \frac{k \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,65 \times 4000}{29,8} = 87,25$$

$$\lambda_{cx} = \frac{\lambda_x}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{87,25}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,9617$$

$$0,25 < \lambda_{cx} < 1,2 \rightarrow \omega_x = \frac{1,43}{1,6 - 0,67\lambda_{cx}}$$

$$\omega_x = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,9617)} = 1,4963$$

$$N_u = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 4609 \cdot \frac{240}{1,4963} = 73,93 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{60}{0,85 \times 73,93} = 0,955 < 1$$

OK

Arah sumbu kuat (sumbu  $y$ ):

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_y} = \frac{0,65 \times 4000}{62,9} = 41,335$$

$$\lambda_{cy} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{41,335}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,4556$$

$$0,25 < \lambda_{cy} < 1,2 \rightarrow \omega_y = \frac{1,43}{1,6 - 0,67\lambda_{cy}}$$

$$\omega_y = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,4556)} = 1,1043$$

$$N_u = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_y} = 4609 \cdot \frac{240}{1,1043} = 100,16 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{120}{0,85 \times 100,16} = 0,705 < 1$$

OK

Jadi, profil **T** 125.250 cukup untuk memikul beban terfaktor  $N_u = 60$  ton.

#### 4.10 TEKUK TORSI DAN TEKUK LENTUR TORSI

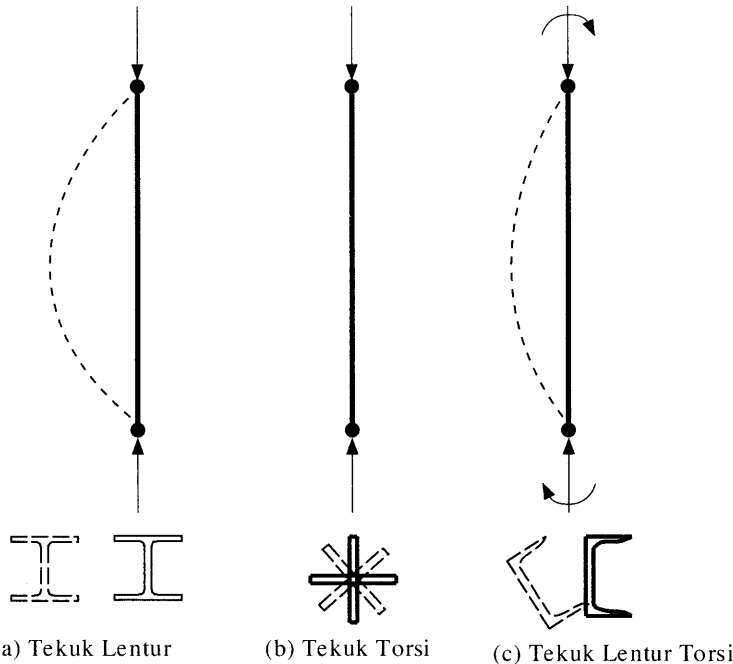
Jika sebuah komponen struktur tekan dibebani beban aksial tekan sehingga terjadi tekuk terhadap keseluruhan elemen tersebut (bukan tekuk lokal), maka ada tiga macam potensi tekuk yang mungkin terjadi di antaranya:

**a.** Tekuk lentur, pada umumnya kekuatan komponen struktur dengan beban aksial tekan murni ditentukan oleh tekuk lentur. Hingga kini komponen struktur tekan yang dibahas adalah komponen struktur tekan yang mengalami tekuk lentur. Tekuk lentur mengakibatkan defleksi terhadap sumbu lemah (sumbu dengan rasio kelangsingan terbesar). Setiap komponen struktur tekan dapat mengalami kegagalan akibat tekuk lentur.

**b.** Tekuk torsi, model tekuk ini terjadi akibat adanya puntir dalam sumbu memanjang komponen struktur tekan. Tekuk torsi hanya terjadi pada elemen-elemen yang langsung dengan sumbu simetri ganda. Bentuk profil standar hasil gilas panas umumnya tidak mempunyai resiko terhadap tekuk torsi, namun profil yang tersusun dari pelat-pelat tipis harus diperhitungkan terhadap tekuk torsi. Sebagai contoh, penampang yang riskan terhadap tekuk torsi adalah penampang berbentuk silang dalam Gambar 4.10.b. Penampang ini dapat disusun dari empat buah profil siku yang diletakkan saling membelakangi.

c. Tekuk lentur torsi, yang terjadi akibat kombinasi dari tekuk lentur dan tekuk torsi. Batang akan terlentur dan terpuntir secara bersamaan. Tekuk lentur torsi dapat terjadi pada penampang-penampang dengan satu sumbu simetri saja seperti profil kanal, T, siku ganda, dan siku tunggal sama kaki. Selain itu juga dapat terjadi pada penampang-penampang tanpa sumbu simetri seperti profil siku tunggal tak sama kaki dan profil Z.

Gambar 4.11.a menunjukkan sebuah komponen struktur tekan dengan penampang melintang berbentuk silang, sedangkan Gambar 4.11.b adalah sebuah potongan sepanjang  $dz$  dari komponen struktur tersebut. Pada suatu potongan elemen  $dA$  bekerja gaya tekan  $f \cdot dA$ . Pada awalnya tegangan yang terjadi adalah seragam pada seluruh panjang elemen



**Gambar 4.10** Tiga Macam Model Tekuk Komponen Struktur Tekan

sebab beban tekan yang bekerja adalah konsentris. Akibat beban yang bekerja akhirnya suatu titik yang terletak sejauh  $z$  dari ujung elemen akan tertekuk seperti pada Gambar 4.11.c. Perpindahan pada titik tersebut dari posisi awalnya adalah sebesar  $u + du$ . Dari Gambar 4.11.a diperoleh hubungan:

$$u = r \cdot \phi \quad 4.32$$

dengan  $f$  adalah sudut puntir dan  $r$  adalah jarak dari pusat geser ke  $dA$ .

Jumlahkan momen-momen terhadap sumbu  $z$  dalam Gambar 4.9.b:

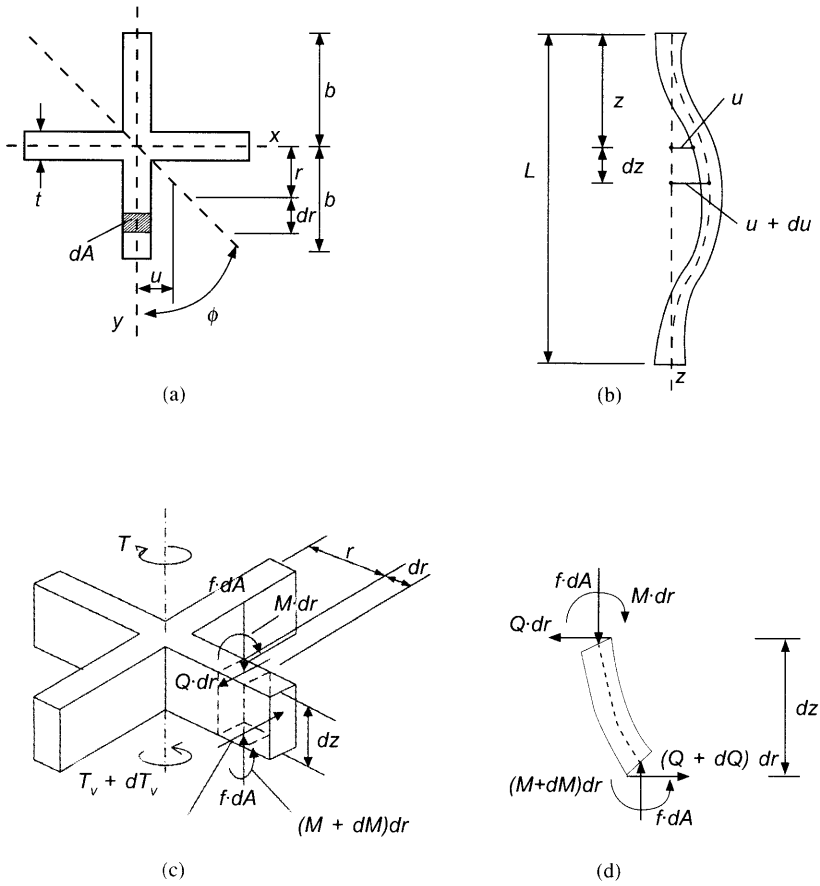
$$dT_v = \int_A r \cdot dQ \cdot dr = 0 \quad 4.33$$

Jumlahkan pula momen-momen dalam Gambar 4.11.d:

$$dM \cdot dr + Q \cdot dr \cdot dz + f \cdot dA \cdot du = 0 \quad 4.34$$

Dari persamaan 4.34, selesaikan untuk  $Q$  dan kemudian diferensialkan ke- $z$ :

$$Q \cdot dr = -\frac{dM}{dz} \cdot dr - f \cdot dA \cdot \frac{du}{dz} \quad 4.35$$



Gambar 4.11 Tekuk Lentur Torsi pada Penampang Berbentuk Silang

$$\frac{dQ}{dz} \cdot dr = -\frac{d^2 M}{dz^2} \cdot dr - f \cdot dA \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} \quad 4.36$$

Bagilah persamaan 4.33 dengan  $dz$ , dan substitusikan hasilnya ke dalam persamaan 4.36:

$$\begin{aligned} \frac{dT_v}{dz} + \int_A r \cdot \frac{dQ}{dz} \cdot dr &= 0 \\ \frac{dT_v}{dz} + \int_A \left( \frac{d^2 M}{dz^2} \cdot dr - f \cdot dA \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad 4.38$$

$$-\frac{dT_v}{dz} + \int_A r \cdot \frac{d^2 M}{dz^2} \cdot dr - f \int_A \frac{d^2 u}{dz^2} \cdot r \cdot dA = 0 \quad 4.39$$

Karena  $M$  adalah momen per satuan  $r$ , maka momen pada elemen  $dA$  ( $= t \cdot dr$ ) adalah  $M \cdot dr$ , sehingga:

$$M \cdot dr = EI \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} = E \cdot \frac{t^3 \cdot dr}{12} \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} \quad 4.40$$

Dengan  $I = t^3 \cdot dr / 12$  adalah momen inersia dari elemen  $dA$ . Diferensiasikan persamaan 4.40 dua kali ke- $z$  dan substitusikan  $d^2 M / dz^2$  ke dalam persamaan 4.39, sehingga diperoleh hubungan:

$$-\frac{dT_v}{dz} + E \cdot \frac{t^3}{12} \int_A \frac{d^4 u}{dz^4} \cdot r \cdot dr + f \int_A \frac{d^2 u}{dz^2} \cdot r \cdot dA = 0 \quad 4.41$$

Karena  $T_v = G \cdot J \cdot \frac{d\phi}{dz}$ , sehingga  $\frac{dT_v}{dz} = G \cdot J \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2}$ . Substitusikan  $dT_v / dz$  ke dalam persamaan 4.41:

$$-G \cdot J \cdot \phi'' + \frac{E \cdot t^3}{12} \cdot \phi^{iv} \cdot \int_A r^2 \cdot dr + f \cdot \phi'' \int_A r^2 \cdot dA = 0 \quad 4.42$$

Dengan mengingat bahwa:

$$\int_A r^2 \cdot dr = 4 \times \frac{1}{3} \cdot r^3 \Big|_0^b = \frac{4 \cdot b^3}{3} \quad 4.43$$

$$\text{dan } \int_A r^2 \cdot dA = I_p \quad (I_p \text{ adalah Inersia polar}) \quad 4.44$$

Maka persamaan 4.42 dapat disederhanakan menjadi:

$$-G \cdot J \cdot \phi'' + \frac{E \cdot t^3}{12} \cdot \phi^{iv} \cdot \frac{4 \cdot b^3}{3} + f \cdot \phi'' \cdot I_p = 0 \quad 4.45$$

$$\frac{E \cdot t^3}{12} \cdot \phi^{iv} \cdot \frac{4 \cdot b^3}{3} + (f \cdot I_p - G \cdot J) \cdot \phi'' = 0 \quad 4.46$$

$$\text{atau } \frac{E \cdot t^3 \cdot b^3}{9} \cdot \phi^{iv} + (f \cdot I_p - G \cdot J) \cdot \phi'' = 0 \quad 4.47$$

Faktor  $b^3 \cdot t^3 / 9$  disebut sebagai konstanta torsi warping,  $C_w$  untuk penampang berbentuk silang. Masalah konstanta torsi warping ini akan dibahas lebih lanjut dalam bab VIII tentang torsi. Persamaan 4.47 dapat disederhanakan menjadi:

$$4.36 \quad \phi^{iv} + \frac{f \cdot I_p - G \cdot J}{E \cdot C_w} \cdot \phi'' = 0 \quad 4.48$$

$$\text{atau } \phi^{iv} + K^2 \cdot \phi'' = 0 \quad 4.49$$

$$\text{dengan } K^2 = \frac{f \cdot I_p - G \cdot J}{E \cdot C_w} \quad 4.50$$

4.38 Persamaan 4.49 merupakan suatu persamaan diferensial linear homogen orde keempat, yang mempunyai solusi:

$$\phi = A \cdot \sin Kz + B \cdot \cos Kz + C \cdot z + D \quad 4.51$$

4.39 Konstanta  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  dapat ditentukan dengan menggunakan kondisi batas yang ada. Jika tumpuan pada ujung-ujung kolom adalah jepit, maka dapat digunakan empat buah kondisi batas sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \phi|_z=0 &= 0 & 0 &= B + D \\ \phi|_z=L &= 0 & 0 &= A \cdot \sin KL + B \cdot \cos KL + CL + D \\ \left(\frac{du}{dz}\right)|_z=0 &= 0 & 0 &= A \cdot K + C \end{aligned}$$

adalah

$$\left( \frac{du}{dz} \right)_{z=L} = 0 \quad 0 = A \cdot K \cdot \cos KL - B \cdot K \cdot \sin KL + C$$

Eliminasikan  $C$  dan  $D$  dari keempat persamaan tersebut sehingga diperoleh dua buah persamaan linear:

$$A(\sin KL - KL) + B(\cos KL - 1) = 0 \quad 4.52.a$$

$$A(\cos KL - 1) - B \cdot \sin KL = 0 \quad 4.52.b$$

Solusi dari sistem persamaan linear tersebut eksis jika determinan dari persamaan tersebut sama dengan nol, jika evaluasi terhadap determinan dilakukan dan disamakan dengan nol, maka akan diperoleh persamaan:

$$\sin \frac{KL}{2} \cdot \left( 2 \cdot \sin \frac{KL}{2} - KL \cdot \cos \frac{KL}{2} \right) = 0 \quad 4.53$$

Persamaan 4.53 terpenuhi, jika  $KL/2 = \pi$  atau  $KL/2 = 4,49$ . Substitusikan nilai akar terkecil ke dalam persamaan 4.50, sehingga didapatkan tegangan kritis minimum:

$$f_{cr} = \frac{G \cdot J}{I_p} + \frac{\pi^2 E \cdot C_w}{\left( \frac{1}{2} \times L \right)^2 \cdot I_p} \quad 4.54$$

Jika ujung-ujung kolom adalah tumpuan sendi, maka kondisi batas yang ada adalah  $d^2u/dz^2 = 0$  pada  $z = 0$  dan  $z = L$ , serta  $\phi = 0$  pada kedua ujung kolom, maka diperoleh besar tegangan kritis:

$$f_{cr} = \frac{G \cdot J}{I_p} + \frac{\pi^2 E \cdot C_w}{L^2 \cdot I_p} \quad 4.55$$

Secara umum  $f_{cr}$  dapat dituliskan menjadi:

$$f_{cr} = \frac{G \cdot J}{I_p} + \frac{\pi^2 E \cdot C_w}{(KL)^2 \cdot I_p} \quad 4.56$$

Dengan  $k$  adalah faktor panjang efektif yang tergantung pada tumpuan ujung kolom,  $k = 1/2$  untuk jepit dan  $k = 1$  untuk sendi. Persamaan 4.56 berlaku untuk profil-profil dengan dua sumbu simetri (sebagai contoh adalah profil silang dan profil WF). Selanjutnya dapat ditentukan jari-jari girasi profil yang dapat menimbulkan tekuk lentur torsi, yaitu dengan cara menyamakan  $f_{cr}$  dari persamaan 4.8 dan  $f_{cr}$  dari persamaan 4.56:

$$\frac{\pi^2 E}{\left( k \cdot L / r_t \right)^2} = \frac{G \cdot J}{I_p} + \frac{\pi^2 E \cdot C_w}{(KL)^2 \cdot I_p} \quad 4.56$$

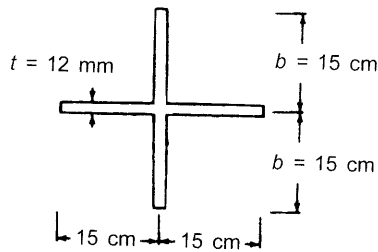
$$r_t^2 = \frac{C_w + 0,04 \cdot J (k \cdot L)^2}{I_{pS}} \quad 4.57$$

Jika  $r_t$  dari persamaan 4.57 lebih kecil dari  $r_x$  atau  $r_y$  profil, maka keruntuhan profil akan ditentukan oleh tekuk lentur torsi.  $I_{pS}$  dalam persamaan 4.57 adalah momen inersia polar terhadap pusat geser.

### ■ CONTOH 4.5:

Tentukan tipe keruntuhan komponen struktur tekan berikut ini, jika diketahui bahwa panjang kolom tersebut adalah 4,5 m dan pada ujung-ujung kolom tidak terjadi momen torsi (kekangan jepit).

JAWAB:



$$I_x = I_y = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot b^3 \cdot t$$

$$= \frac{2 \times 15^3 \times 1,2}{3} = 2700 \text{ cm}^4$$

$$I_{pS} = I_x + I_y = 5400 \text{ cm}^4$$

$$J = 4 \cdot \frac{1}{3} \cdot b^3 \cdot t = 4 \cdot \frac{1}{3} \cdot 15(1,2)^3$$

$$= 34,56 \text{ cm}^4$$

$$C_w = \frac{b^3 \cdot t^3}{9} = \frac{(15 \times 1,2)^3}{9} = 648 \text{ cm}^6$$

$$r_x = r_y = \sqrt{\frac{2700}{72}} = 6,124 \text{ cm}$$

$$r_t^2 = \frac{648 + 0,04(34,56)(450/2)^2}{5400} = 13,08 \text{ cm}^2$$

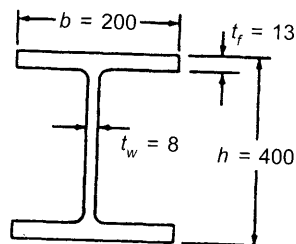
$$r_t = 3,62 \text{ cm}$$

Jadi, profil tersebut akan mengalami keruntuhan akibat tekuk lentur torsi.

### ■ CONTOH 4.6:

Periksalah apakah keruntuhan tekuk lentur torsi dapat terjadi pada profil WF 400.200.8.13 berikut ini:

JAWAB:



$$J = \frac{1}{3} [2(200)(13)^3 + (374)(8)^3]$$

$$= 2140576 \text{ mm}^4$$

$$C_w = b^2 \cdot I_y / 4$$

$$= (400 - 13)^2 (1740 \cdot 10^4) / 4$$

$$= 65149515 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_p = I_x + I_y = (23700 + 1740) \cdot 10^4 = 25440 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$r_t = \sqrt{\frac{C_w + 0,04 J \cdot L^2}{J_p}} = \sqrt{\frac{65149515 \cdot 10^4 + 0,04 \times 2140576 \times L^2}{25440 \cdot 10^4}}$$

$$= \sqrt{2560,91 + 0,000336 \cdot L^2}$$

$$r_t \text{ min} = 50,60 \text{ mm (dicapai jika } L = 0 \text{ mm)}$$

karena  $r_t \text{ min} > r_y (= 45,4 \text{ mm})$ , maka profil ini tidak akan mengalami tekuk lentur torsi, dan keruntuhannya akan ditentukan oleh tekuk lentur terhadap sumbu  $y$ .

SNI 03-1729-2002 pasal 9.2 mensyaratkan pemeriksaan terhadap tekuk lentur torsi untuk profil-profil siku ganda dan profil **T**. Dinyatakan bahwa kuat tekan rencana akibat tekuk lentur torsi,  $\phi_n N_{nlt}$  dari komponen struktur tekan yang terdiri dari siku ganda atau berbentuk **T**, harus memenuhi:

$$N_u < \phi_n N_{nlt} \quad 4.58$$

Dengan:

$$\phi_n = 0,85$$

$$N_{nlt} = A g f_{nlt}$$

$$f_{clt} = \left( \frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right] \quad 4.59$$

Dan:

$$f_{crz} = \frac{G \cdot J}{A \cdot r_0^2} \quad 4.60$$

$$\bar{r}_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + x_0^2 + y_0^2 \quad 4.61$$

$$H = 1 - \left( \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} \right) \quad 4.62$$

Keterangan:

a.  $x_0, y_0$  merupakan koordinat pusat geser terhadap titik berat,  $x_0 = 0$  untuk siku ganda dan profil **T**.

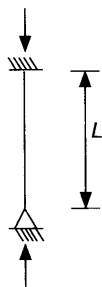
b.  $f_{cry} = f_y / \omega_{iy}$

c.  $G$  adalah modulus geser,  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

d.  $J$  adalah konstanta puntir,  $J = \sum \frac{1}{3} b \cdot t^3$

#### ■ CONTOH 4.7:

Periksalah apakah profil  $\angle 60.90.10$  berikut cukup kuat menahan beban aksial terfaktor  $N_u = 30$  ton, jika panjang batang 3 m dan kondisi perletakan jepit-sendi. Mutu baja BJ 37.



Data profil

$$A_g = 1410 \text{ mm}^2$$

$$e_x = 30,5 \text{ mm}$$

$$e_y = 15,6 \text{ mm}$$

$$I_x = 112.10^4 \text{ mm}^4$$

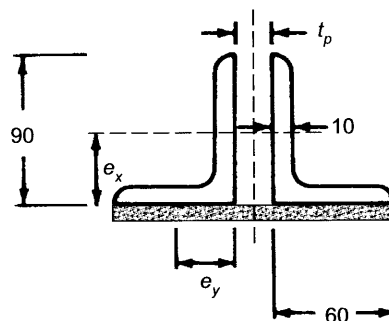
$$I_y = 39,6.10^4 \text{ mm}^4$$

$$r_x = 28,2 \text{ mm}$$

$$r_y = 16,8 \text{ mm}$$

$$r_{\eta} = 12,8 \text{ mm}$$

$$t_p = 8 \text{ mm}$$



**JAWAB:**

Periksa kelangsingan penampang

$$\text{Flens} \quad \frac{b}{t} = \frac{90}{10} = 9$$

$$\frac{200}{\sqrt{f_y}} = \frac{200}{\sqrt{240}} = 12,91$$

$$\frac{b}{t} < \frac{200}{\sqrt{f_y}} \rightarrow \text{penampang tak kompak}$$

Web Tak ada syarat

Kondisi tumpuan jepit-sendi,  $k = 0,8$ 

Dicoba menggunakan 6 buah pelat kopel:

$$L_1 = \frac{3000}{6-1} = 600$$

$$\lambda_1 = \frac{L_1}{r_{\min}} = \frac{600}{12,8} = 46,875 < 50$$

OKArah sumbu bahan (sumbu  $x$ ):

$$\lambda_x = \frac{k \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,8 \times 3000}{28,2} = 85,10$$

$$\lambda_x (= 85,10) > 1,2 \lambda_1 (= 56,25)$$

OKArah sumbu bebas bahan (sumbu  $y$ ):

$$\lambda_y = 2 (\lambda_{y1} + A_g (e_y + t_p/2)^2)$$

$$\lambda_y = 2 (39,6.104 + 1410 (15,6+4)^2) = 1.875.331,2 \text{ mm}^4$$

$$A_{profil} = 2 \times 1410 = 2820 \text{ mm}^2$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{profil}}} = \sqrt{\frac{1875331,2}{2820}} = 25,7878 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_x} = \frac{0,8 \times 3000}{25,7878} = 93,06$$

Kelangsingan ideal:

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{93,06^2 + \frac{2}{2} 46,875^2} = 104,1989$$

$$\lambda_{iy} (= 104,1989) > 1,2 \lambda_i (= 48,696)$$

OKKarena  $\lambda_{iy} > \lambda_x$ , tekuk terjadi pada sumbu bebas bahan

$$\lambda_{cy} = \frac{\lambda_{iy}}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{104,1989}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 1,1489$$



$$0,25 < \lambda_{cy} < 1,2 \quad \rightarrow \quad \omega_y = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_{cy}}$$

$$\omega_y = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 1,1489)} = 1,722$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 2820 \frac{240}{1,722} = 39,3 \text{ ton}$$

Periksa terhadap tekuk lentur torsi:

$$N_{nlt} = A_g \cdot f_{clt}$$

$$f_{clt} = \left( \frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right]$$

$$f_{clt} = \left( \frac{f_{cry} + f_{crz}}{2H} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot f_{cry} \cdot f_{crz} \cdot H}{(f_{cry} + f_{crz})^2}} \right]$$

$$f_{crz} = \frac{G \cdot J}{A \cdot r_0^2}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{200000}{2(1+0,3)} = 76923 \text{ MPa}$$

$$J = 2 \sum \frac{1}{3} b \cdot t^3 = 2 \left[ \frac{1}{3} \cdot 60 \cdot 10^3 + \frac{1}{3} \cdot (90-10) \cdot 10^3 \right] = 93333,3 \text{ mm}^4$$

$$y_0 = e_x - t/2 = 30,5 - (10/2) = 25,5 \text{ mm}$$

$$x_0 = 0$$

$$\bar{r}_0^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + x_0^2 + y_0^2 = \frac{(112 + 39,6) \cdot 10^4}{2820} + 0 + 25,5^2 = 1187,84 \text{ mm}^2$$

$$f_{crz} = \frac{76923 \times 93333,3}{2820 \times 1187,84} = 2143,314 \text{ MPa}$$

$$H = 1 - \frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2} = 1 - \frac{0 + 25,5^2}{1187,84} = 0,4526$$

$$f_{cry} = \frac{f_y}{\omega_y} = \frac{240}{1,722} = 139,373 \text{ MPa}$$

$$f_{clt} = 134,41 \text{ MPa}$$

$$N_{clt} = A_g \cdot f_{clt} = 2820 \times 134,41 = 37,9 \text{ ton}$$

Jadi, tekuk lentur torsi menentukan.

$$\phi_c \cdot N_{nlt} = 0,85 \times 37,9 = 32,2 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_{nlt}} = \frac{30}{32,2} = 0,93 < 1$$

OK

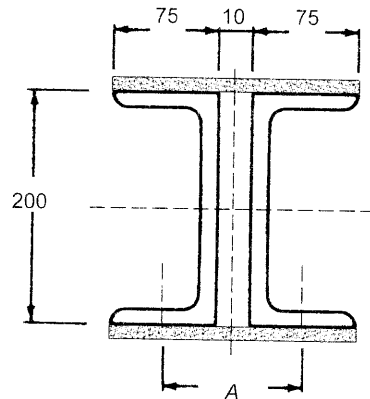
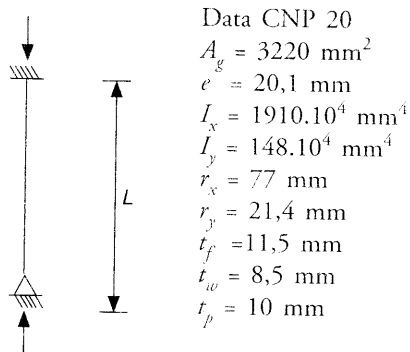
Profil  $\text{JL 60.90.10}$  cukup kuat.

### ■ CONTOH 4.8:

Sebuah komponen struktur tekan dengan beban aksial terfaktor  $N_u = 80$  ton dan memiliki panjang batang 4,5 m. Rencanakan komponen struktur tersebut dari dua buah profil kanal tersusun, rencanakan pula dimensi pelat kopelnya. Mutu baja BJ 37.

#### JAWAB:

Dicoba profil kanal CNP 20:



Kondisi tumpuan jepit-sendi,  $k = 0,65$

Periksa kelangsingan penampang:

$$\begin{aligned} \text{Flens} \quad \frac{b}{t} &= \frac{75}{11,5} = 6,52 \\ \frac{250}{\sqrt{f_y}} &= \frac{250}{\sqrt{240}} = 16,137 \\ \frac{b}{t} &< \frac{250}{\sqrt{f_y}} \end{aligned}$$

OK

$$\begin{aligned} \text{Web} \quad \frac{h}{t_w} &= \frac{200}{8,5} = 23,53 \\ \frac{665}{\sqrt{f_y}} &= \frac{665}{\sqrt{240}} = 42,92 \\ \frac{h}{t_w} &< \lambda_r \end{aligned}$$

OK

Dicoba pasang 10 pelat kopel:

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{4500}{10-1} = 500 \\ \lambda_1 &= \frac{L_1}{r_{\min}} = \frac{500}{21,4} = 23,36 < 50 \end{aligned}$$

OK

Arah sumbu x:

$$\begin{aligned} \lambda_x &= \frac{k \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,65 \times 4500}{77} = 37,99 \\ \lambda_x (= 37,99) &> 1,2\lambda (= 28,032) \end{aligned}$$

OK

Arah sumbu  $y$ :

$$I_y = 2 (I_{y1} + A_g(e_y + t_p/2)^2)$$

$$I_y = 2 (148.10^4 + 3220 (20,1 + 5)^2) = 7.017.264,4 \text{ mm}^4$$

$$A_{profil} = 2 \times 3220 = 6440 \text{ mm}^2$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A_{profil}}} = \sqrt{\frac{7017264,4}{6440}} = 33,01$$

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_x} = \frac{0,65 \times 4500}{33,01} = 88,61 \text{ mm}$$

Kelangsingan ideal:

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2}$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{88,61^2 + \frac{2}{2} 23,36^2} = 91,64$$

$$\lambda_{iy} (91,64) > 1,2 \lambda (= 28,032)$$

OK

Karena  $\lambda_{iy} > \lambda_x$ , tekuk terjadi pada sumbu bebas bahan

$$\lambda_{cy} = \frac{\lambda_{iy}}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{91,64}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 1,0105$$

$$0,25 < \lambda_{cy} < 1,2 \quad \rightarrow \quad \omega_y = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_{cy}}$$

$$\omega_y = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 1,0105)} = 1,549$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 6440 \frac{240}{1,549} = 99,78 \text{ ton}$$

$$\phi_c \cdot N_n = 0,85 \times 99,78 = 84,8 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{80}{84,8} = 0,94 < 1$$

OK

Perhitungan dimensi pelat kopel:

Syarat kekakuan pelat kopel, adalah harus dipenuhinya:

$$\frac{I_p}{a} \geq 10 \frac{I_1}{L_1}$$

$$I_1 = I_{min} = 148.10^4 \text{ mm}^4$$

$$L_1 = 500 \text{ mm}$$

$$a = 2e + t_p = (2 \times 20,1) + 10 = 50,2 \text{ mm}$$

$$I_p \geq 10 \frac{I_1}{L_1} \cdot a$$

$$I_p \geq 10 \cdot \frac{148 \cdot 10^4}{500} \cdot 50,2$$

$$I_p \geq 1485920 \text{ mm}^4$$

Bila  $I_p = 2 \cdot \frac{1}{12} t \cdot h^3$ , dengan tebal pelat ( $t = 8$  mm), diperoleh  $h > 103,6$  mm. Gunakan  $h = 110$  mm.

Cek kekuatan pelat kopel:

$$D_u = 0,02 N_u = 0,02 \times 80 \text{ ton} = 1,6 \text{ ton}$$

Gaya sebesar 1,6 ton dibagi untuk 10 pelat kopel, sehingga masing-masing kopel memikul 0,16 ton.

Kuat geser pelat kopel:

$$\lambda_w = \frac{h}{t} = \frac{110}{8} = 13,75$$

$$k_n = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} = 5 + \frac{5}{\left(\frac{50,2}{110}\right)^2} = 29$$

$$1,1 \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} = 1,1 \sqrt{\frac{29 \times 200000}{240}} = 171$$

$$\lambda_w < 1,1 \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} \text{ sehingga}$$

$$V_n = 2,0 \cdot 6 \cdot f_y \cdot A_w = 2(0,6)(240)(110)(8) = 25,344 \text{ ton}$$

$$\phi V_n = 0,9 V_n = 0,9(25,344) = 22,8 \text{ ton}$$

$$\frac{V_u}{\phi V_n} = \frac{0,16}{22,8} = 0,009 < 1$$

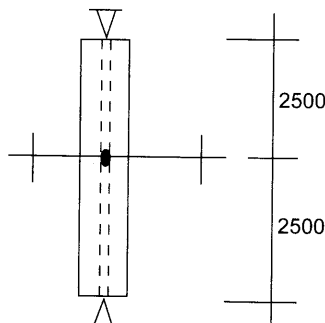
OK

#### ■ CONTOH 4.9:

Sebuah kolom dari profil baja (BJ 37) dengan panjang batang 5 m, mempunyai tumpuan ujung sendi-sendi. Pada arah sumbu lemah diberi sokongan lateral di tengah bentang. Beban aksial terfaktor,  $N_u = 75$  ton. Pilihlah profil WF yang mencukupi kebutuhan kolom tersebut.

**JAWAB:**

Coba profil INP 30:



Data INP 30:

$$d = 300 \text{ mm}$$

$$b = 125 \text{ mm}$$

$$t_w = 10,8 \text{ mm}$$

$$t_f = 16,2 \text{ mm}$$

$$h = 241 \text{ mm}$$

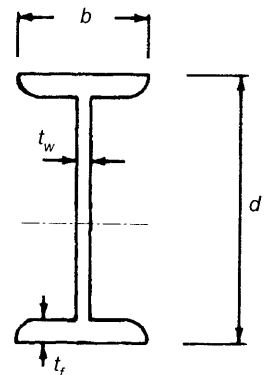
$$A_g = 6910 \text{ mm}^2$$

$$I_x = 9800 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 451 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$r_x = 119 \text{ mm}$$

$$r_y = 25,6 \text{ mm}$$



Periksa kelangsingan penampang:

$$\begin{aligned}\text{Flens} \quad \frac{b/2}{t_f} &= \frac{125}{2 \times 16,2} = 3,858 \\ \frac{170}{\sqrt{f_y}} &= \frac{170}{\sqrt{240}} = 10,97 \\ \frac{b/2}{t_f} &< \frac{170}{\sqrt{f_y}} \rightarrow \text{penampang kompak}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Web} \quad \frac{b}{t_w} &= \frac{241}{10,8} = 22,31 \\ \frac{1680}{\sqrt{f_y}} &= \frac{1689}{\sqrt{240}} = 108,44 \\ \frac{b}{t_w} &< \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \rightarrow \text{penampang kompak}\end{aligned}$$

Arah sumbu bahan (sumbu  $x$ ):

$$\lambda_x = \frac{k \cdot L_x}{r_x} = \frac{5000}{119} = 42,017$$

Arah sumbu bebas bahan (sumbu  $y$ ):

$$\lambda_y = \frac{k \cdot L_y}{r_y} = \frac{2500}{25,6} = 97,656$$

$\lambda_y > \lambda_x$  (batang menekuk ke arah sumbu lemah)

$$\lambda_{cy} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{97,656}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 1,0768$$

$$0,25 < \lambda_{cy} < 1,2 \rightarrow \omega_y = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_{cy}}$$

$$\omega_y = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 1,0768)} = 1,6277$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g \cdot \frac{f_y}{\omega_x} = 6910 \cdot \frac{240}{1,6277} = 101,88 \text{ ton}$$

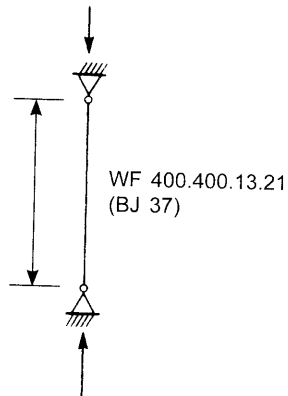
$$\frac{N_u}{\phi_c \cdot N_n} = \frac{75}{86,6} = 0,866 < 1$$

OK

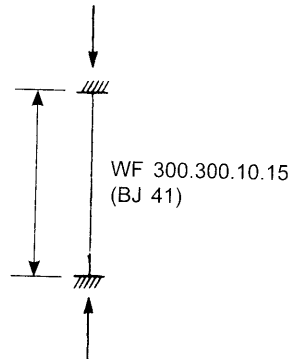
## SOAL-SOAL LATIHAN

## P.4.1 – P.4.3

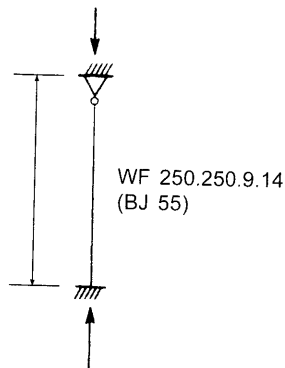
Hitunglah tahanan tekan rencana dari masing-masing komponen struktur tekan yang ditunjukkan dalam Gambar P.4.1 – P.4.3!



Gambar P.4.1



Gambar P.4.2



Gambar P.4.3

## P.4.4 – P.4.6

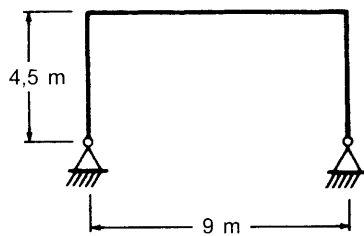
Periksalah bahaya tekuk lokal dari masing-masing komponen struktur tekan dalam soal P.4.1 – P.4.3!

## P.4.7 – P.4.9

Jika masing-masing komponen struktur tekan dalam soal P.4.1 – P.4.3 diberi pengekan lateral dalam arah sumbu lemah, hitunglah besarnya tahanan tekan rencananya !

Profil WF 350.175.7.11 digunakan sebagai suatu komponen struktur tekan dengan panjang 9 m. Pada tiap interval 3 m dipasang pengekan lateral dalam arah sumbu lemah. Ujung-ujung komponen struktur tekan tersebut berupa tumpuan sendi dan mutu baja BJ 37. Jika rasio  $D/L = 0,5$ , hitunglah beban kerja yang dapat dipikul oleh komponen struktur tekan tersebut!

- P.4.11** Sebuah komponen struktur tekan didesain agar mampu menahan beban tekan aksial yang terdiri dari beban mati 500 kN dan beban hidup 1000 kN. Batang ini memiliki panjang 8,5 m dan pada jarak 3,5 m dari tepi atas dipasang pengekang lateral dalam arah sumbu lemah. Dengan menggunakan mutu baja BJ 41 pilihlah profil WF yang ekonomis ! (tumpuan ujung adalah sendi).
- P.4.12** Suatu portal bergoyang terdiri dari kolom WF 200.200.8.12 dan balok WF 250.125.6.9, mutu baja BJ 37. Tiap batang disusun sedemikian rupa sehingga lentur terjadi dalam arah sumbu kuat. Asumsikan  $k_y = 1,0$ . Hitunglah besarnya  $k_x$  untuk kolom-kolom portal tersebut dengan menggunakan nomogram yang ada. Hitunglah pula tahanan tekan rencana dari kolom tersebut!



Gambar P.4.12

# 5

## Komponen Struktur Lentur

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Melakukan analisis dan desain komponen struktur lentur yang memiliki kekangan lateral secara menerus pada bagian sayap tekan
- Memahami perilaku balok akibat lentur dua arah

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Lentur Sederhana Profil Simetris
- 1.3 Perilaku Balok Terkekang Lateral
- 1.4 Desain Balok Terkekang Lateral
- 1.5 Lendutan Balok
- 1.6 Geser pada Penampang Gilas
- 1.7 Beban Terpusat pada Balok
- 1.8 Teori Umum Lentur

### 1 PENDAHULUAN

Balok adalah komponen struktur yang memikul beban-beban gravitasi, seperti beban mati dan beban hidup. Komponen struktur balok merupakan kombinasi dari elemen tekan dan elemen tarik, sehingga konsep dari komponen struktur tarik dan tekan yang telah dipelajari dalam bab terdahulu, akan dikombinasikan dalam bab ini. Pembahasan dalam bab ini diasumsikan bahwa balok tak akan tertekuk, karena bagian elemen yang mengalami tekan, sepenuhnya terkekang baik dalam arah sumbu kuat ataupun sumbu lemahnya. Asumsi ini mendekati kenyataan, sebab dalam banyak kasus balok cukup terkekang secara lateral, sehingga masalah stabilitas tidak perlu mendapat penekanan lebih.

### 2 LENTUR SEDERHANA PROFIL SIMETRIS

Rumus umum perhitungan tegangan akibat momen lentur, seperti dipelajari dalam mata kuliah Mekanika Bahan ( $\sigma = M.c/I$ ) dapat digunakan dalam kondisi yang umum. Tegangan lentur pada penampang profil yang mempunyai minimal satu sumbu simetri, dan dibebani pada pusat gesernya, dapat dihitung dari persamaan:

$$f = \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} \quad 5.1$$

$$\text{dengan } S_x = \frac{I_x}{c_y} \text{ dan } S_y = \frac{I_y}{c_x} \quad 5.2$$

$$\text{sehingga } f = \frac{M_x \cdot c_y}{I_x} + \frac{M_y \cdot c_x}{I_y} \quad 5.3$$

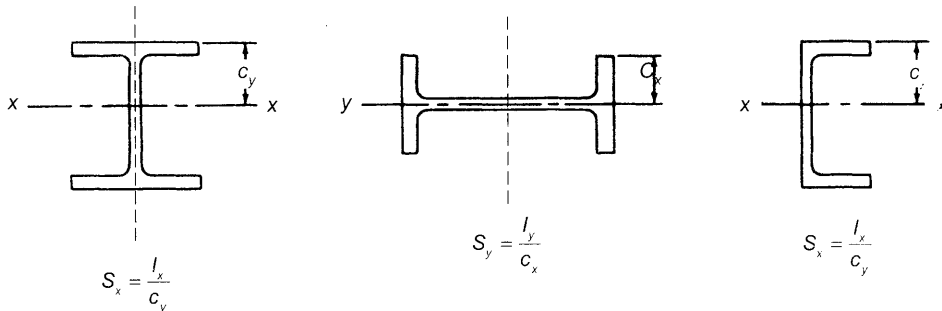
Dengan:

$$\begin{aligned} f &= \text{tegangan lentur} \\ M_x, M_y &= \text{momen lentur arah } x \text{ dan } y \end{aligned}$$



$S_x, S_y$  = Modulus penampang arah  $x$  dan  $y$   
 $I_x, I_y$  = Momen Inersia arah  $x$  dan  $y$   
 $c_x, c_y$  = jarak dari titik berat ke tepi serat arah  $x$  dan  $y$

Gambar 5.1 menunjukkan beberapa penampang yang mempunyai minimal satu buah sumbu simetri.



**Gambar 5.1** Modulus Penampang Berbagai Tipe Profil Simetri

### 5.3 PERILAKU BALOK TERKEKANG LATERAL

Distribusi tegangan pada sebuah penampang WF akibat momen lentur, diperlihatkan dalam Gambar 5.2. Pada daerah beban layan, penampang masih elastik (Gambar. 5.2.a), kondisi elastik berlangsung hingga tegangan pada serat terluar mencapai kuat lelehnya ( $f_y$ ). Setelah mencapai regangan leleh ( $\epsilon_y$ ), regangan akan terus naik tanpa diikuti kenaikan tegangan (Gambar 5.3).

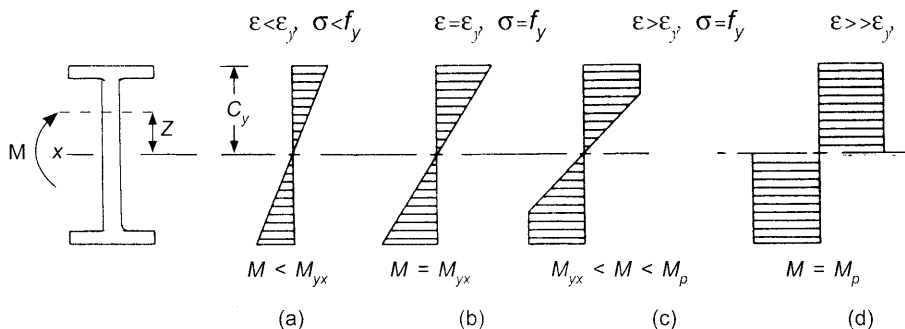
Ketika kuat leleh tercapai pada serat terluar (Gambar 5.2.b), tahanan momen nominal sama dengan **momen leleh**  $M_{yx}$ , dan besarnya adalah:

$$M_u = M_{yx} = S_x \cdot f_y \quad 5.4$$

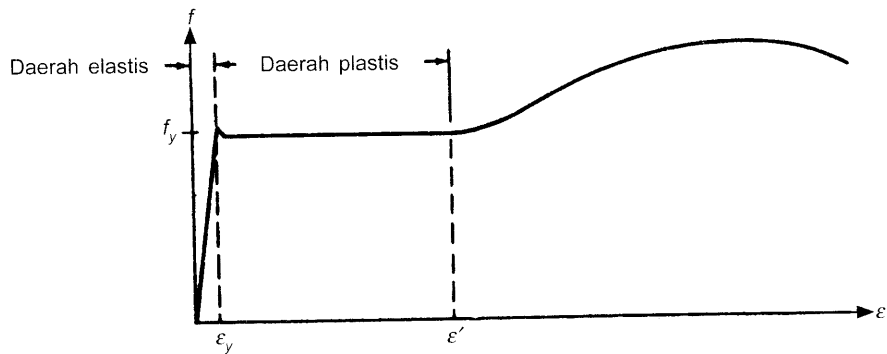
Dan pada saat kondisi pada Gambar 5.2.d tercapai, semua serat dalam penampang melampaui regangan lelehnya, dan dinamakan kondisi plastis. Tahanan momen nominal dalam kondisi ini dinamakan **momen plastis**  $M_p$ , yang besarnya:

$$M_p = f_y \int_A y \cdot dA = f_y \cdot Z \quad 5.5$$

Dengan  $Z$  dikenal sebagai **modulus plastis**.



**Gambar 5.2** Distribusi Tegangan pada Level Beban Berbeda



Gambar 5.3 Diagram Tegangan-Regangan Material Baja

$\sigma = f_y$  Selanjutnya diperkenalkan istilah **faktor bentuk** (*shape factor*, SF), yang merupakan perbandingan antara modulus plastis dengan modulus tampang, yaitu:

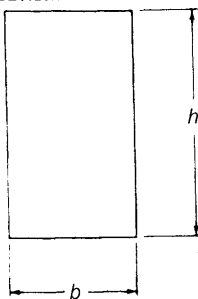
$$SF = \xi = \frac{M_p}{M_y} = \frac{Z}{S} \quad 5.6$$

Untuk profil WF dalam lentur arah sumbu kuat (sumbu x), faktor bentuk berkisar antara 1,09 sampai 1,18 (umumnya 1,12). Dalam arah sumbu lemah (sumbu y) nilai faktor bentuk bisa mencapai 1,5.

#### ■ CONTOH 5.1:

Tentukan faktor bentuk penampang persegi berikut, dalam arah sumbu kuat (sumbu x)!

JAWAB:



$$Z_x = 2 \left[ b \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4} \right] = \frac{1}{4} b \cdot h^2$$

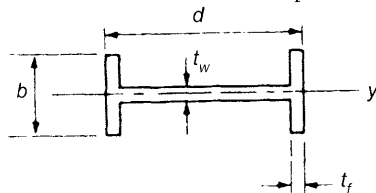
$$I_x = \frac{1}{12} b \cdot h^3$$

$$S_x = \frac{I_x}{h/2} = \frac{1}{12} b \cdot h^3 \cdot \frac{2}{h} = \frac{1}{6} b \cdot h^2$$

$$SF = \xi = \frac{Z_x}{S_x} = \frac{\frac{1}{4} b \cdot h^2}{\frac{1}{6} b \cdot h^2} = \frac{3}{2} = 1,5$$

#### ■ CONTOH 5.2:

Tentukan faktor bentuk dari profil WF berikut, terhadap sumbu y!



JAWAB:

$$Z_y = 2 \left( 2 \cdot \frac{b}{2} \cdot t_f \cdot \frac{b}{4} \right) + 2 \left( (d - 2t_f) \cdot \frac{t_w}{2} \cdot \frac{t_w}{4} \right)$$

$$Z_y = \frac{1}{2} \cdot t_f \cdot b^2 + \frac{1}{4} \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w^2$$

$$I_y = 2 \left[ \frac{1}{12} \cdot t_f \cdot b^3 \right] + \frac{1}{12} \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w^3$$

$$I_y = \frac{1}{6} \cdot t_f \cdot b^3 + \frac{1}{12} \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w^3$$

$$S_y = \frac{I_y}{b/2} = \frac{1}{3} \cdot t_f \cdot b^2 + \frac{1}{6} \cdot (d - 2t_f) \cdot \frac{t_w^3}{b}$$

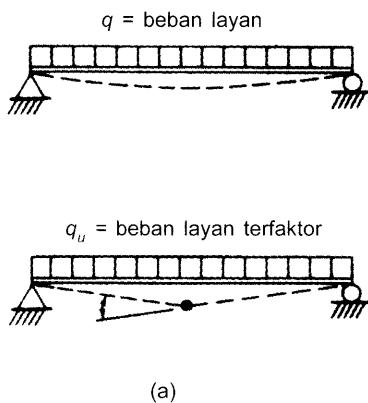
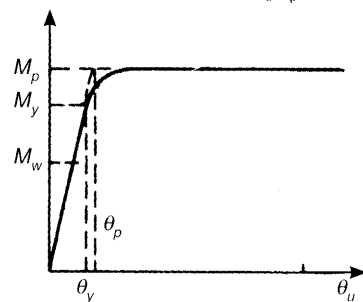
Dan faktor bentuk  $\xi$ :

$$SF = \xi = \frac{Z_y}{S_y} = \frac{\frac{1}{2} \cdot t_f \cdot b^2 + \frac{1}{4} \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w^2}{\frac{1}{3} \cdot t_f \cdot b^2 + \frac{1}{6} \cdot (d - 2t_f) \cdot \frac{t_w^3}{b}} \cong \frac{3}{2} = 1,5$$

Pada saat tahanan momen plastis  $M_p$  tercapai, penampang balok akan terus berdeformasi dengan tahanan lentur konstan  $M_p$ , kondisi ini dinamakan **sendi plastis**. Pada suatu balok tertumpu sederhana (sendi rol), munculnya sendi plastis di daerah tengah bentang akan menimbulkan situasi ketidakstabilan, yang dinamakan **mekanisme keruntuhan**. Secara umum, kombinasi antara 3 sendi (sendi sebenarnya dan sendi plastis) akan mengakibatkan mekanisme keruntuhan.

Dalam Gambar 5.4 sudut rotasi  $\theta$  elastik dalam daerah beban layan  $M$ , hingga serat terluar mencapai kuat leleh  $f_y$  pada saat  $M_{yx}$ . Sudut rotasi kemudian menjadi inelastik parsial hingga momen plastis  $M_p$  tercapai. Ketika sendi plastis tercapai, kurva  $M-\theta$  menjadi horizontal dan lendutan balok tetap bertambah. Dan pada tengah bentang timbul rotasi  $\theta_u$ , yang mengakibatkan lendutan balok tak lagi kontinu.

Agar penampang mampu mencapai  $\theta_u$  tanpa menimbulkan keruntuhan akibat ketidakstabilan ini, maka harus dipenuhi ketiga macam syarat yakni kekangan lateral, perbandingan lebar dan tebal flens ( $b/t_f$ ), perbandingan tinggi dan tebal web ( $h/t_w$ ).

Daktilitas Kelengkungan  $\mu = \theta_u / \theta_p$ 

Gambar 5.4 Sendi Platis dan Kurva M-θ

#### 5.4 DESAIN BALOK TERKEKANG LATERAL

Tahanan balok dalam desain LRFD harus memenuhi persyaratan:

$$\phi_b M_n > M_u \quad 5.7$$

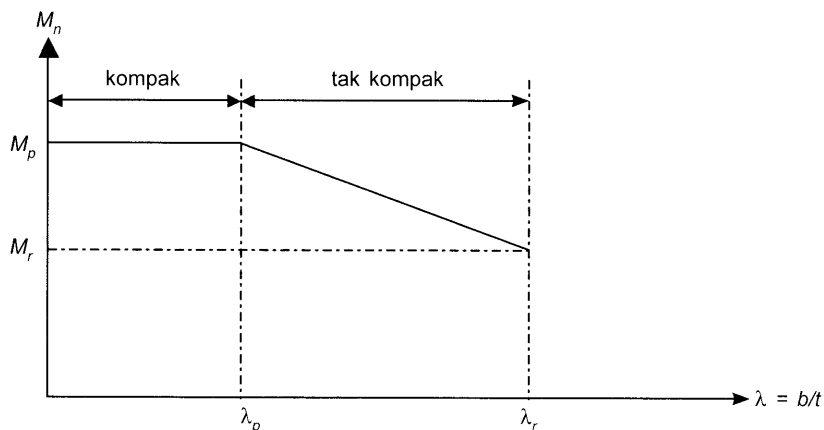
Dengan:  $\phi_b = 0,90$

$M_n$  = tahanan momen nominal

$M_u$  = momen lentur akibat beban terfaktor

Dalam perhitungan tahanan momen nominal dibedakan antara penampang kompak, tak kompak, dan langsing seperti halnya saat membahas batang tekan. Batasan penampang kompak, tak kompak, dan langsing adalah:

1. Penampang kompak :  $\lambda < \lambda_p$
2. Penampang tak kompak :  $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$
3. Langsing :  $\lambda > \lambda_r$



Gambar 5.5 Tahanan Momen Nominal Penampang Kompak dan Tak Kompak

##### 5.4.1 PENAMPANG KOMPAK

Tahanan momen nominal untuk balok terkekang lateral dengan penampang kompak:

$$M_n = M_p = Z \cdot f_y \quad 5.8$$

Dengan:  $M_p$  = tahanan momen plastis

$Z$  = modulus plastis

$f_y$  = kuat leleh

##### 5.4.2 PENAMPANG TAK KOMPAK

Tahanan momen nominal pada saat  $\lambda = \lambda_r$  adalah:

$$M_n = M_r = (f_y - f_r) \cdot S \quad 5.9$$

Dengan:  $f_y$  = tahanan leleh

$f_r$  = tegangan sisa

$S$  = modulus penampang

Besarnya tegangan sisa  $f_r = 70$  MPa untuk penampang gelas panas, dan 115 MPa untuk penampang yang dilas.

Bagi penampang tak kompak yang mempunyai  $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ , maka besarnya tahanan momen nominal dicari dengan melakukan interpolasi linear, sehingga diperoleh:

$$M_u = \frac{\lambda_r - \lambda}{\lambda_r - \lambda_p} M_p + \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} M_r \quad 5.10$$

Dengan:  $\lambda$  = kelangsingan penampang balok ( $= b/2t_f$ )

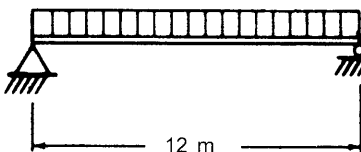
$\lambda_p, \lambda_r$  = tabel 7.5-1 Peraturan Baja

Untuk balok-balok hibrida di mana  $f_{yf} > f_{yw}$  maka perhitungan  $M_r$  harus didasarkan pada nilai terkecil antara  $(f_{yf} - f_r)$  dengan  $f_{yw}$ .

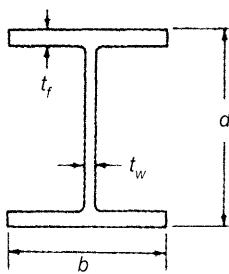
### ■ CONTOH 5.3:

Rencanakan balok untuk memikul beban mati,  $D = 350$  kg/m dan beban hidup,  $L = 1500$  kg/m. Bentang balok,  $L = 12$  m. Sisi tekan flens terkekang lateral. Gunakan profil baja WF dengan  $f_y = 240$  MPa dan  $f_y = 450$  MPa.

JAWAB:



$$\begin{aligned} q_u &= 1,2D + 1,6L = 1,2(350) + 1,6(1500) \\ &= 2820 \text{ kg/m} = 2,82 \text{ ton/m} \end{aligned}$$



$$M_u = \frac{1}{8} q_u L^2 = \frac{1}{8} \cdot 2,82 \cdot 12^2 = 50,76 \text{ ton.m}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi_b} = \frac{50,76}{0,90} = 56,4 \text{ ton.m}$$

$$Z_x = b \cdot t_f (d - t_f) + \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (d - 2t_f)^2$$

$$Z_y = \frac{1}{2} \cdot b^2 \cdot t_f + \frac{1}{4} \cdot t_w^2 \cdot (d - 2t_f)$$

$$h = d - 2(r_o + t_f)$$

Untuk  $f_y = 240$  MPa

Coba profil WF 350.350.12.19

$$\lambda_f = \frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{350}{2 \cdot 19} = 9,21$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{350 - 2(20 + 19)}{12} = 22,67$$

$\lambda_p$

$$\frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{240}} = 10,97$$

$$\frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{240}} = 108,44$$

$\lambda_r$

$$\frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}} = \frac{370}{\sqrt{240 - 70}} = 28,37$$

$$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{240}} = 164,6$$

Penampang kompak!

$$Z_x = b \cdot t_f \cdot (d - t_f) + \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (d - 2t_f)^2$$

$$Z_x = 350(19)(350 - 19) + \frac{1}{4}(12)(350 - 2(19))^2 = 2493182 \text{ mm}^3$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 2493182(240) = 59,84 \text{ ton.m}$$

$$M_p (= 59,84 \text{ ton.m}) > M_u / \phi (= 56,4 \text{ ton.m})$$

OK

Untuk  $f_y = 450 \text{ MPa}$

Coba profil 350.350.12.19

$$\lambda_f = \frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{350}{2 \times 19} = 9,21$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{350 - 2(20 + 19)}{12} = 22,67$$

$\lambda_p$

$$\frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{450}} = 8,01$$

$$\frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{450}} = 79,2$$

$\lambda_r$

$$\frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}} = \frac{370}{\sqrt{450 - 70}} = 18,98$$

$$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{450}} = 120,2$$

Penampang tak kompak!

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 2493182(450) = 112,19 \text{ ton.m}$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot S_x = (f_y - f_r) \cdot \frac{I_x}{d/2}$$

$$M_r = (450 - 70) \cdot \frac{40300 \cdot 10^4}{350/2} = 87,5 \text{ ton.m}$$

(profil terlalu kuat, coba profil lain yang lebih kecil)

Coba WF 300.300.10.15

$$\lambda_f = \frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{300}{2 \times 15} = 10$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{300 - 2(18 + 15)}{10} = 23,4$$

$\lambda_p$

$$\frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{450}} = 8,01$$

$$\frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{450}} = 79,2$$

$\lambda_r$

$$\frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}} = \frac{370}{\sqrt{450 - 70}} = 18,98$$

$$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{450}} = 120,2$$

Penampang tak kompak!

$$Z_x = b \cdot t_f \cdot (d - t_f) + \frac{1}{4} \cdot t_w \cdot (d - 2t_f)^2$$

$$Z_x = 300(15)(300 - 15) + \frac{1}{4}(10)(300 - 2(15))^2 = 1464750 \text{ mm}^3$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 1464750(450) = 65,91 \text{ ton.m}$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot S_x = (f_y - f_r) \cdot \frac{I_x}{d/2}$$

$$= (450 - 70) \cdot \frac{20400 \cdot 10^4}{300/2} = 51,68 \text{ ton.m}$$

$$M_n = \frac{\lambda_r - \lambda}{\lambda_r - \lambda_p} M_p + \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} M_r$$

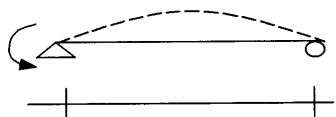
$$M_n = \frac{18,98 - 10}{18,98 - 8,01} \cdot 65,91 + \frac{10 - 8,01}{18,98 - 8,01} \cdot 51,68 = 63,32 \text{ ton.m}$$

$$M_p (= 63,32 \text{ ton.m}) > M_u / \phi (= 56,4 \text{ ton.m})$$

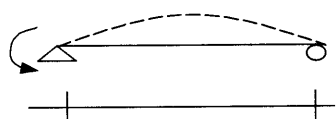
OK

## 5.5 LENDUTAN BALOK

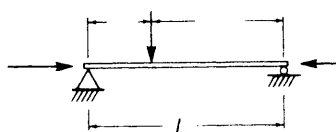
SNI 03-1729-2002 pasal 6.4.3 membatasi besarnya lendutan yang timbul pada balok. Dalam pasal ini disyaratkan lendutan maksimum untuk balok pemikul dinding atau finishing yang getas adalah sebesar  $L/360$ , sedangkan untuk balok biasa lendutan tidak boleh lebih dari  $L/240$ . Pembatasan ini dimaksudkan agar balok memberikan kemampuan yang baik (*serviceability*). Besar lendutan pada beberapa jenis pembebanan balok yang umum terjadi ditunjukkan sebagai berikut:



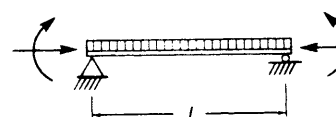
$$\Delta_{L/2} = -\frac{M_1 \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I}$$



$$\Delta_{L/2} = \frac{5 \cdot q_0 \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} = \frac{5}{48} \left( \frac{1}{8} q_0 \cdot L^2 \right) \frac{L^2}{EI} = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_0 \cdot L^2}{E \cdot I}$$

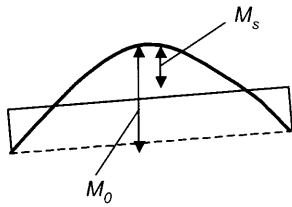


$$\Delta_{L/2} = \frac{P \cdot b(3L^2 - 4b^2)}{48 \cdot EI}$$



$$\Delta_{L/2} = \frac{5}{48} \frac{M_0 \cdot L^2}{EI} - \frac{M_1 \cdot L^2}{16EI} - \frac{M_2 \cdot L^2}{16EI}$$

$$\Delta_{L/2} = \frac{L^2}{48 \cdot EI} (5M_0 - 3M_1 - 3M_2)$$



Karena  $M_0 = M_s + 0,5(M_1 + M_2)$ , maka

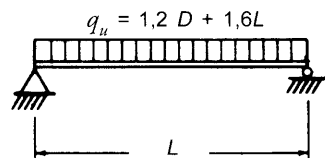
$$\Delta_{L/2} = \frac{5 \cdot L^2}{48 \cdot EI} (M_s - 0,1 \cdot M_1 - 0,1 \cdot M_2)$$

Dalam beberapa kasus tertentu, terkadang masalah batasan lendutan lebih menentukan dalam pemilihan profil balok daripada tahanan momennya.

#### ■ CONTOH 5.4:

Rencanakan komponen struktur balok berikut yang memikul beban mati,  $D = 200 \text{ kg/m}$  dan beban hidup  $L = 1200 \text{ kg/m}$ . Panjang bentang balok  $L = 8 \text{ m}$ . Mutu baja BJ 37. Disyaratkan batas lendutan tak melebihi  $L/300$ .

**JAWAB:**



$$q_u = 1,2(200) + 1,6(1200) = 2,16 \text{ t/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot (2,16)(8)^2 = 17,28 \text{ ton.m}$$

Asumsikan penampang adalah kompak, maka tahanan rencana  $\phi_b \cdot M_n$  adalah:

$$\phi_b \cdot M_n = \phi_b \cdot M_p = \phi_b \cdot Z_x \cdot f_y$$

$$Z_{x \text{ perlu}} = \frac{M_u}{\phi_b \cdot f_y} = \frac{17,28 \cdot 10^7}{0,90 \cdot 240} = 800000 \text{ mm}^3 = 800 \text{ cm}^3$$

Coba profil WF 300-200-8-12 ( $Z_x = 822,60 \text{ cm}^3$ )

Cek kelangsingan penampang:

$$\lambda_f = \frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \times 12} = 8,33$$

$$\lambda_w = \frac{h}{t_w} = \frac{294 - 2(12 + 18)}{8} = 29,25$$

$\lambda_p$

$\lambda_r$

$$\frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{240}} = 10,97$$

$$\frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}} = \frac{370}{\sqrt{240 - 70}} = 28,37$$

$$\frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{240}} = 108,44$$

$$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{240}} = 164,6$$



Penampang kompak!

Selanjutnya dihitung  $I_x$  perlu untuk memenuhi syarat lendutan.

$$M_L = \frac{1}{8} \cdot 1200 \cdot 8^2 = 18,75 \text{ ton.m} = 18,75 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

(untuk memeriksa syarat lendutan, hanya beban hidup saja yang dipertimbangkan)

$$\Delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI} = \frac{5 \cdot M \cdot L^2}{48 \cdot EI}$$

$$I_{x \text{ perlu}} = \frac{5 \cdot M \cdot L^2}{48 \cdot E} = \frac{5 \times 9,6 \cdot 10^7 \times 8000^2}{48 \times 200000 \times \left( \frac{8000}{300} \right)} = 12000 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 = 12000 \text{ cm}^4$$

Profil WF 300.200.8.12 tak mencukupi karena memiliki  $I_x = 11300 \text{ cm}^4$ . Selanjutnya profil diganti dengan WF 350.175.7.11 yang memiliki  $I_x = 13600 \text{ cm}^4$  dan  $Z_x = 840,85 \text{ cm}^3$ .

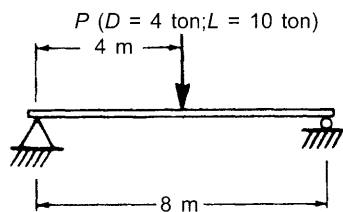
Cek lendutan:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI} = \frac{5 \cdot M \cdot L^2}{48 \cdot EI} = \frac{5 \times 9,6 \cdot 10^7 \times 8000^2}{48 \times 200000 \times 13600 \cdot 10^4} \\ &= 23,53 \text{ mm} < \frac{L}{300} (= 26,67 \text{ mm}) \end{aligned}$$

Dalam contoh soal ini tampak bahwa kondisi batas layan (lendutan) lebih menentukan daripada kondisi batas tahanan, dalam proses desain profil yang aman.

### ■ CONTOH 5.5:

Rencanakanlah komponen struktur balok baja berikut ini dengan menggunakan profil WF seekonomis mungkin. Asumsikan terdapat kekangan lateral yang cukup pada bagian flens tekan profil. Disyaratkan pula bahwa lendutan tidak boleh melebihi  $L/300$ . Gunakan mutu baja BJ 37!



JAWAB:

$$P_u = 1,2(4) + 1,6(10) = 20,8 \text{ ton}$$

$$M_u = \frac{P_u \times L}{4} = \frac{20,8 \times 8}{4} = 41,6 \text{ ton.m} = 41,6 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Asumsikan profil kompak!

$$M_p = M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{41,6 \cdot 10^7}{0,9} = 46,22 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y$$

$$Z_x \text{ perlu} = \frac{M_p}{f_y} = \frac{46,22 \cdot 10^7}{240} = 1925,83 \text{ cm}^3$$

Gunakan profil WF 500.200.10.16 ( $Z_x = 2096,36 \text{ cm}^3$ ;  $I_x = 47800 \text{ cm}^4$ )  
Akibat berat sendiri profil, momen lentur bertambah menjadi:

$$M_u = 1,2\left(\frac{1}{8}\right)(0,0897)(8)^2 + 41,6 = 42,4611 \text{ ton.m}$$

Periksa syarat kelangsingan profil:

$$\begin{aligned} \frac{b_f}{2.t_f} &= \frac{200}{2 \times 16} = 6,25 & < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97 \\ \frac{h}{t_w} &= \frac{500 - 2(16 + 20)}{10} = 42,8 & < \lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = 108,44 \end{aligned}$$

Penampang kompak!

$$M_n = Z_x f_y = 2096,36,103(240) = 50,31 \text{ ton.m}$$

$$\phi.M_n = 0,90(50,31) = 45,281 \text{ ton.m} > 42,4611 \text{ ton.m}$$

OK

Periksa terhadap syarat lendutan:

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} &= \frac{P.L^3}{48EI} = \frac{10 \cdot 10^4 \times 8000^3}{48 \times 200000 \times 47800 \times 10000} \\ &= 11,16 \text{ mm} < \frac{L}{300} (= 26,66 \text{ mm}) \end{aligned}$$

## 5.6 GESER PADA PENAMPANG GILAS

Perencanaan balok yang memiliki bentang panjang biasanya lebih ditentukan oleh syarat lendutan daripada syarat tahanan. Balok dengan bentang-bentang menengah, ukuran profil lebih ditentukan akibat lentur pada balok. Namun demikian, pada balok-balok dengan bentang pendek, tahanan geser lebih menentukan dalam pemilihan profil.

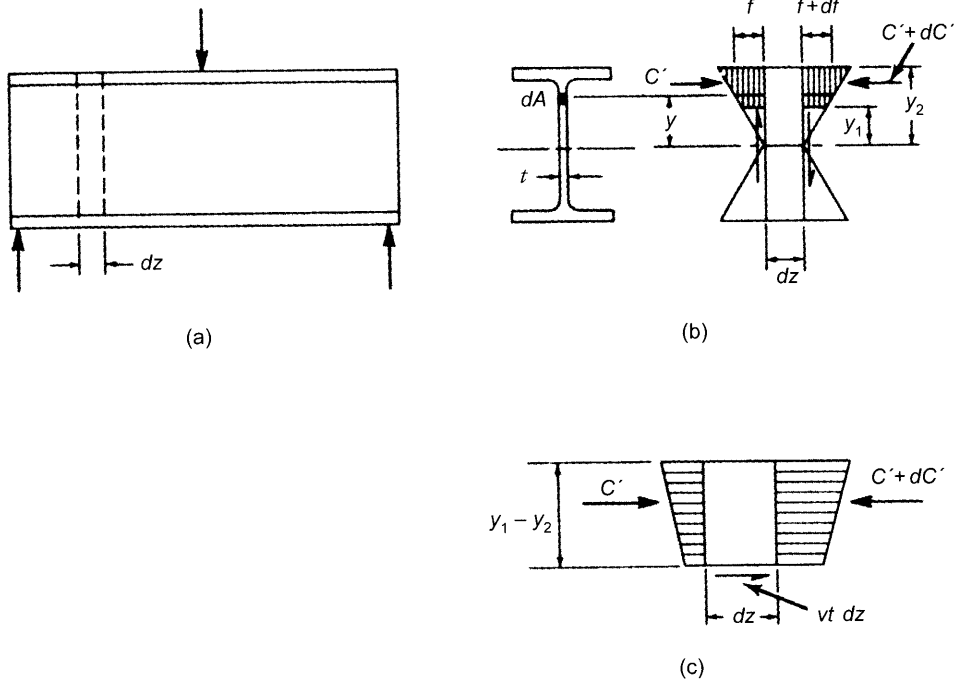
Untuk menurunkan persamaan tegangan geser untuk penampang simetri, lihat potongan  $dz$  dari balok pada Gambar 5.6, dengan *free body*-nya dalam Gambar 5.6.a. Bila tegangan geser satuan  $v$ , bekerja sejarak  $y_1$  dari sumbu netral, maka dari Gambar 5.6.c diperoleh hubungan:

$$dC' = v.t.dz \quad 5.11$$

Dan gaya horizontal akibat momen lentur adalah:

$$C' = \int_{y_1}^{y_2} f.dA \quad 5.12$$

$$C' + dC' = \int_{y_1}^{y_2} (f + df).dA \quad 5.13$$



Gambar 5.6 Penurunan Persamaan Tegangan Geser

Mengurangkan persamaan 5.13 dengan persamaan 5.12 diperoleh:

$$dC' = \int_{y_1}^{y_2} df \cdot dA \quad 5.14$$

$$df = \frac{dM \cdot y}{I} \quad 5.15$$

$$dC' = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dM \cdot y}{I} \cdot dA = \frac{dM}{I} \int_{y_1}^{y_2} y \cdot dA \quad 5.16$$

Dari persamaan 5.16 dan 5.12 diperoleh hubungan:

$$v = \frac{dM}{dz} \frac{1}{t \cdot I} \int_{y_1}^{y_2} y \cdot dA \quad 5.17$$

dengan mengingat bahwa  $V = dM/dz$ , serta  $Q = \int_{y_1}^{y_2} y \cdot dA$ , maka diperoleh persamaan bagi tegangan geser yang sangat familiar bagi kita:

$$v = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad 5.18$$

Dengan  $V$  adalah gaya geser, dan  $Q$  adalah statis momen terhadap garis netral. Terkadang untuk menghitung tegangan geser, digunakan rumus pendekatan yang merupakan harga

rata-rata luas penampang web, dengan mengabaikan efek dari lubang alat pengencang, yaitu:

$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{V}{d \cdot t_w} \quad 5.19$$

### ■ CONTOH 5.5:

Hitung distribusi tegangan geser elastik pada profil WF 350.350.12.19 yang memikul beban geser layan sebesar 95 ton. Hitung pula berapa besar gaya geser yang dipikul oleh flens dan berapa yang dipikul oleh pelat web.

Tegangan pada pertemuan antara flens dan web:

$$V = 95 \text{ ton} = 95 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$Q = 350(19)(175 - 9,5) = 1100575 \text{ mm}^3$$

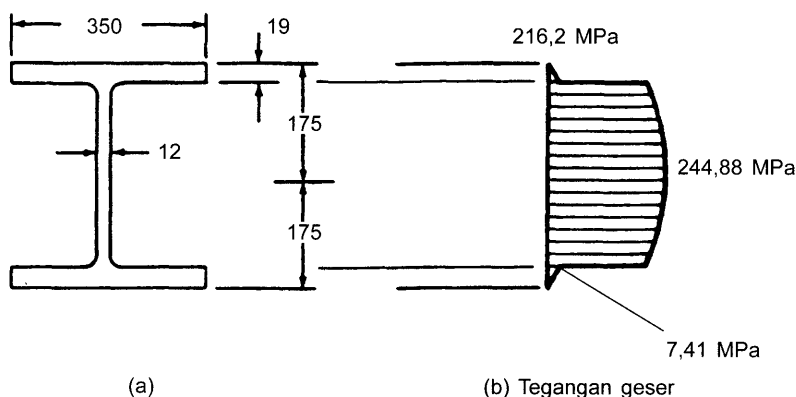
$$v_{web} = \frac{95 \cdot 10^4 \times 1100575}{40300 \cdot 10^4 \times 12} = 216,2 \text{ MPa}$$

$$v_{flen} = \frac{95 \cdot 10^4 \times 1100575}{40300 \cdot 10^4 \times 350} = 7,41 \text{ MPa}$$

Tegangan pada sumbu netral:

$$Q = 1100575 + \frac{1}{2} (175 - 19)^2 (12) = 1246591 \text{ mm}^3$$

$$v = \frac{95 \cdot 10^4 \times 1246591}{40300 \cdot 10^4 \times 12} = 244,88 \text{ MPa}$$



Gaya geser yang dipikul oleh flens dan web, masing-masing adalah:

$$V_{flen} = 2 \left( \frac{1}{2} \right) (7,41)(19)(350) = 4,927 \text{ ton}$$

$$V_{web} = 95 - 4,927 = 90,073 \text{ ton}$$

Tampak bahwa 94% gaya geser dipikul oleh web.

Bila digunakan rumus pendekatan dari persamaan 5.19:

$$f_v = \frac{V}{d \cdot t_w} = \frac{95 \cdot 10^4}{350 \times 12} = 226,19 \text{ MPa (7,34\% di bawah harga maksimum)}$$

### TAHANAN GESER NOMINAL PENAMPANG GILAS

Dalam contoh 5.5 tampak bahwa gaya geser sebagian besar dipikul oleh web jika web dalam kondisi stabil (artinya ketidakstabilan akibat kombinasi geser dan lentur tak terjadi). Kuat geser nominal pelat web ditentukan oleh SNI 03-1729-2002 pasal 8.8.3, yaitu:

$$V_n = \tau_y \cdot A_w \approx 0,60 \cdot f_{yw} \cdot A_w \quad 5.20$$

Dengan:  $f_{yw}$  = kuat leleh web  
 $A_w$  = luas penampang web

Persamaan 5.20 dapat digunakan bila dipenuhi syarat kelangsingan untuk tebal pelat web sebagai berikut:

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_{yw}}} \quad 5.21$$

Dan kuat geser rencana harus memenuhi persamaan:

$$\phi_v V_n \geq V_u \quad 5.22$$

### ■ CONTOH 5.6:

Tentukan tahanan geser rencana profil WF 300.300.10.15, data profil:

$$\begin{aligned} d &= 300 \text{ mm} & \text{Mutu baja BJ 37 } (f_y &= 240 \text{ MPa, } f_u &= 370 \text{ MPa}) \\ b &= 300 \text{ mm} \\ t_f &= 15 \text{ mm} \\ t_w &= 10 \text{ mm} \\ h &= d - 2(r_o + t_f) = 300 - 2(18 + 15) = 234 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cek persamaan 5.21:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{234}{10} = 23,4 \quad \frac{1100}{\sqrt{f_y}} = \frac{1100}{\sqrt{240}} = 71$$

Karena persamaan 5.21 terpenuhi, maka:

$$V_n = 0,6 \cdot f_y \cdot d \cdot t_w = 0,6(240)(234)(10) = 33,69 \text{ ton}$$

$$V_d = 0,90 \cdot V_n = 0,90(33,69) = 30,321 \text{ ton}$$

## 5.7 BEBAN TERPUSAT PADA BALOK

Bila balok dikenai beban terpusat, leleh lokal akibat tegangan tekan yang tinggi diikuti dengan tekuk inelastik pada daerah web akan terjadi di sekitar lokasi beban terpusat itu. Gaya tumpu perlu ( $R_u$ ) pada pelat web harus memenuhi:

$$R_u < \phi \cdot R_n \quad 5.23$$

Dengan:  $\phi$  = faktor reduksi

$R_n$  = kuat tumpu nominal pelat web akibat beban terpusat

Bila persamaan 5.23 dipenuhi, maka tak diperlukan pengaku (*stiffener*) pada pelat web. Besarnya  $R_n$  ditentukan menurut SNI 03-1729-2002 pasal 8.10:

1. Lentur lokal pada flens

$$R_n = 6,25 \cdot t_f^2 \cdot f_{yf} \quad 5.24$$

$$\phi = 0,90$$

2. Leleh lokal pada web

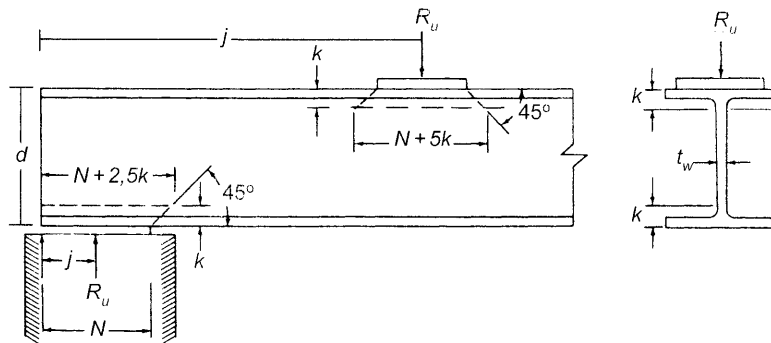
$$R_n = (\alpha \cdot k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w \quad 5.25$$

$$\alpha = \begin{cases} 5 & j > d \\ 2,5 & j \leq d \end{cases}$$

$$\phi = 1,0$$

$k$  adalah tebal pelat sayap ditambah jari-jari peralihan, mm

$N$  adalah dimensi longitudinal pelat perletakan, minimal sebesar  $k$ , mm



$N$  = panjang dukung  $\geq k$

$k$  = jarak dari muka sayap terluar ke kaki  
lengkungan badan (yang diberikan dalam  
AISC Manual bersama dengan dimensi  
(penampang)

$R$  = beban terpusat yang disalurkan ke gelegar

Gambar 5.7 Balok dengan Beban Terpusat

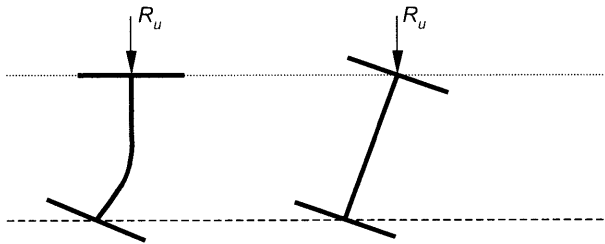
3. Lipat pada web

$$R_n = \alpha \cdot t_w^2 \left[ 1 + \eta \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_{yf} \cdot t_f}{t_w}} \quad 5.26$$

$$\alpha = \begin{cases} 0,79 & j > d/2; \eta = 3N/d \\ 0,39 & j \leq d/2 \left\{ \begin{array}{ll} \eta = 3N/d & \text{bila: } N/d \leq 0,2 \\ \eta = \left( \frac{4N}{d} - 0,2 \right) & \text{bila: } N/d > 0,2 \end{array} \right. \end{cases}$$

$$\phi = 0,75$$

## 4. Tekuk web bergoyang



Gambar 5.8 Tekuk Web Bergoyang

Ada dua kasus pada tekuk web bergoyang:

- a. bila sisi tekan flens dikekang terhadap rotasi pada posisi kerja  $R_u$ :

$$\text{untuk } \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} \leq 2,3$$

$$R_n = \frac{C_r \cdot E \cdot t_w^3 \cdot t_f}{h^2} \left[ 1 + 0,4 \left( \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} \right)^3 \right] \quad 5.27$$

$$\text{Jika } \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} > 2,3 \rightarrow R_n \rightarrow \infty$$

- b. Jika sisi tekan flens tak dikekang terhadap rotasi

$$\text{untuk } \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} \leq 1,7$$

$$R_n = \frac{C_r \cdot E \cdot t_w^3 \cdot t_f}{h^2} \left[ 0,4 \left( \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} \right)^3 \right] \quad 5.28$$

$$\text{Jika } \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} > 1,7 \rightarrow R_n \rightarrow \infty$$

$$C_r = \begin{cases} 3,25 & \text{untuk: } M \leq M_y \\ 1,62 & \text{untuk: } M > M_y \end{cases}$$

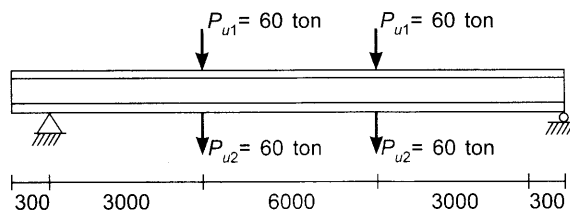
$$\phi = 0,85$$

## 5. Lentur pada pelat web

$$R_n = \frac{24,08 \cdot t_w^3}{h} \sqrt{E \cdot f_{yw}} \quad 5.28$$

$$\phi = 0,90$$

## ■ CONTOH 5.7:



Periksa apakah komponen struktur tersebut perlu *stiffener* atau tidak! Gunakan profil WF 300.800.14.26,  $k = 54$  mm,  $f_y = 240$  MPa,  $N = 200$  mm.

**JAWAB:**

1. Leleh lokal pada web

Daerah lapangan ( $j > d$ )

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi (\alpha \cdot k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w \\ &= 1,0(5(54) + 200)(240)(14) \\ &= 157,92 \text{ ton} (> P_{u1} = 60 \text{ ton, tak perlu stiffener})\end{aligned}$$

Daerah tumpuan ( $j < d$ )

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi (\alpha \cdot k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w \\ &= 1,0(2,5(54) + 200)(240)(14) \\ &= 112,56 \text{ ton} (< P_{u1} + P_{u2} = 120 \text{ ton, perlu stiffener})\end{aligned}$$

2. Lentur lokal pada flens

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \cdot 6,25 \cdot t_f^2 \cdot f_{yf} \\ &= 0,90(6,25)(262)(240) \\ &= 91,26 \text{ ton} (> P_{u2} = 60 \text{ ton, tak perlu stiffener})\end{aligned}$$

3. Lipat pada web

Daerah lapangan ( $j > d/2$ )

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \cdot \alpha \cdot t_w^2 \left[ 1 + \eta \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_{yf} \cdot t_f}{t_w}} \\ &= 0,75(0,79)(14)^2 \left[ 1 + \left( \frac{4 \times 200}{800} - 0,2 \right) \left( \frac{14}{26} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{200000 \times 240 \times 26}{14}} \\ &= 142,14 \text{ ton} (> P_{u1} = 60 \text{ ton, tak perlu stiffener})\end{aligned}$$

Daerah tumpuan ( $j < d/2$ )

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi \cdot \alpha \cdot t_w^2 \left[ 1 + \eta \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_{yf} \cdot t_f}{t_w}} \\ &= 0,75(0,39)(14)^2 \cdot \frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} = \frac{2 \left( \frac{800}{2} - 54 \right)}{14} \cdot \frac{300}{6000} \\ &= 71,24 \text{ ton} (< P_{u1} + P_{u2} = 120 \text{ ton, perlu stiffener})\end{aligned}$$

4. Tekuk web bergoyang (asumsikan sisi tekan flens terkekang terhadap rotasi)

$$\frac{h}{t_w} \cdot \frac{b_f}{L_b} = \frac{2 \left( \frac{800}{2} - 54 \right)}{14} \cdot \frac{300}{6000} = 2,47 > 2,3$$

$$R_n \rightarrow \infty$$

5.27

5.28



### ■ CONTOH 5.8:

Tentukan dimensi bearing plat untuk tumpuan balok, bila diketahui reaksi tumpuan akibat beban mati,  $D = 10$  ton, dan reaksi akibat beban hidup,  $L = 20$  ton. Balok yang digunakan WF 350.350.12.19 ( $k = 39$  mm). Balok ini terletak di atas beton yang mempunyai  $f'_c = 22,5$  MPa.

#### JAWAB:

$$R_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(10) + 1,6(20) = 44 \text{ ton}$$

$$R_n = R_u / \phi = 44 / 1,0 = 44 \text{ ton}$$

Panjang bearing plat harus memenuhi persamaan 5.25 dan 5.26.

Dari persamaan 5.25:

$$R_n = (2,5k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w$$

$$N = \frac{R_n}{f_{yw} \cdot t_w} - 2,5k = \frac{440000}{240 \times 12} - (2,5 \times 39) = 55,27 \text{ mm} \approx 60 \text{ mm}$$

Tahanan tumpu nominal dari beton:

$$P_p = 0,85 \cdot f'_c \cdot A_l$$

$$A_{l\text{ perlu}} = \frac{P_p}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{440000}{0,85 \times 22,5} = 23000 \text{ mm}^2$$

$$\text{Lebar pelat, } B = 23000 / 60 = 383 \text{ mm} \approx 390 \text{ mm}$$

Periksa lipat pada web:

$$N/d = 60/350 = 0,17 < 0,2$$

$$R_n = 0,39 \cdot t_w^2 \left[ 1 + 3 \frac{N}{d} \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_{yw} \cdot t_f}{t_w}}$$

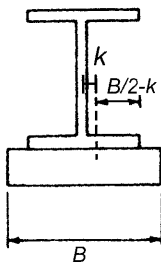
$$R_n = 0,39 \times 12^2 \left[ 1 + 3 \frac{60}{350} \left( \frac{12}{19} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{200000 \times 240 \times 19}{12}} = 61,5 \text{ ton}$$

$$\phi R_n = 0,75 \times 61,5 = 46,1 \text{ ton} (> 44 \text{ ton, OK!})$$

Sehingga dimensi pelat,  $N = 60 \text{ mm} \times B = 390 \text{ mm}$ . Selanjutnya adalah menentukan tebal pelat.

$$\text{Tegangan tumpu merata, } p = \frac{440000}{60 \times 390} = 18,8 \text{ MPa}$$

Daerah kritis bagi lentur diambil sepanjang ujung luar flens hingga sejarak  $k$  dari tengah web.



$$M_u = \frac{p \left( \frac{B}{2} - k \right)^2 \cdot N}{2}$$

$$M_u = \frac{18,8 \cdot (195 - 39)^2 \cdot N}{2} = 228758,4 \cdot N$$

$$\phi \cdot M_n \geq M_u$$

$$\phi \cdot Z \cdot f_y \geq M_u$$

$$\phi \cdot \frac{1}{4} \cdot N \cdot t^2 \cdot f_y \geq M_u$$

$$t^2 \geq \frac{M_u \cdot 4}{0,9 \times f_y \times N}, \text{ masukkan harga-harga yang}$$

sudah diketahui, diperoleh  $t > 65 \text{ mm}$ .

Karena ukuran bearing plat terlalu tebal, maka dimensinya perlu diperbesar. Dicoba, memakai  $N = 200 \text{ mm}$  dan  $B = 360 \text{ mm}$ . Dan bila dihitung kembali akan ditemukan persyaratan  $t > 33,5 \text{ mm}$ . Ambil  $t = 35 \text{ mm}$ .

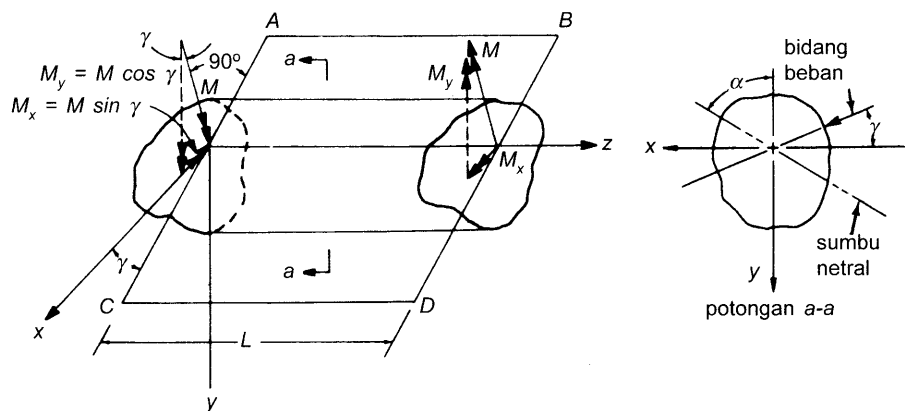
Secara umum tebal plat dapat dihitung melalui persamaan:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot p \left( \frac{B}{2} - k \right)^2}{\phi \cdot f_y}}$$

## 5.8 TEORI UMUM LENTUR

Sejauh ini pembahasan hanya terbatas pada bentuk-bentuk profil simetris, sehingga rumus  $f = M \cdot c / I$  dapat digunakan untuk menghitung tegangan lentur elastik. Pembahasan berikut akan lebih memperumum lenturan pada batang prismatis (batang yang mempunyai bentuk penampang melintang sama di setiap potongannya). Diasumsikan pula dalam balok ini tak terjadi puntir.

Perhatikan balok dengan penampang seragam pada Gambar 5.9 yang dikenai momen pada bidang ABCD. Bidang ABCD membentuk sudut  $\gamma$  terhadap bidang  $xz$ . Momen ini direpresentasikan dengan vektor normal terhadap ABCD.



Gambar 5.9 Balok Prismatis dengan Lentur Murni

Perhatikan pula potongan sejarak  $z$  pada Gambar 5.10. Syarat kesetimbangan dalam *free body* dipenuhi bila:

$$\Sigma f_z = 0 \rightarrow \int_A \sigma \cdot dA = 0 \quad 5.29$$

$$\Sigma M_x = 0 \rightarrow M_x = \int_A y \cdot \sigma \cdot dA \quad 5.30$$

$$\Sigma M_y = 0 \rightarrow M_y = \int_A x \cdot \sigma \cdot dA \quad 5.31$$

Momen  $M_x$  dan  $M_y$  positif bila menghasilkan lentur positif, artinya lentur yang mengakibatkan tekan pada bagian atas balok dan tarik pada bagian bawah.

### LENTUR DALAM BIDANG YZ

Jika lentur terjadi dalam bidang  $yz$ , tegangan  $\sigma$  proporsional terhadap  $y$ , sehingga:

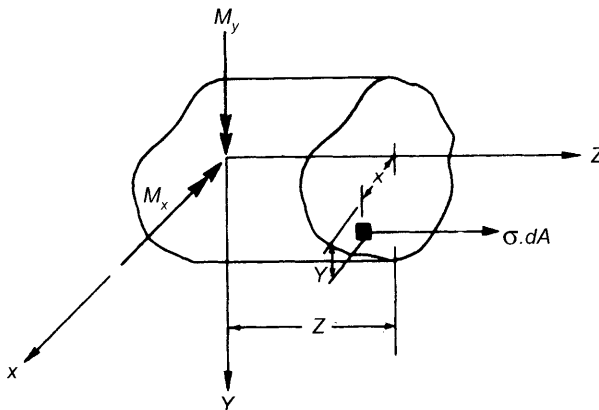
$$\sigma = k_1 \cdot y \quad 5.32$$

Gunakan persamaan 5.29 hingga 5.31 memberi hasil:

$$k_1 \int_A y \cdot dA = 0 \quad 5.33$$

$$M_x = k_1 \int_A y^2 \cdot dA = k_1 \cdot I_x \quad 5.34$$

$$M_y = k_1 \int_A xy \cdot dA = k_1 \cdot I_{xy} \quad 5.35$$



Gambar 5.10 Free Body Balok pada Potongan Sejarak  $z$

Persamaan 5.33 menunjukkan bahwa  $x$  haruslah sumbu berat. Dari persamaan 5.34 dan 5.35 memberikan:

$$k_1 = \frac{M_x}{I_x} = \frac{M_y}{I_{xy}} \quad 5.36$$

Dan sudut  $\gamma$  dapat ditentukan sebagai:

$$\tan \gamma = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_x}{I_{xy}} \quad 5.37$$

Bila penampang memiliki minimal satu sumbu simetri ( $I_{xy} = 0$ ,  $\gamma = \pi/2$ ) maka beban dan lentur terjadi dalam bidang  $yz$ .

### LENTUR DALAM BIDANG XZ

Bila lentur terjadi dalam bidang  $xz$ , tegangan  $\sigma$  proporsional terhadap  $x$ , sehingga:

$$5.30 \quad \sigma = k_2 \cdot y \quad 5.38$$

Gunakan persamaan 5.29 hingga 5.31 memberi hasil:

$$5.31 \quad k_2 \int_A x \cdot dA = 0 \quad 5.39$$

$$\text{Meng-} \quad M_x = k_2 \int_A xy \cdot dA = k_2 \cdot I_{xy} \quad 5.40$$

$$M_y = k_2 \int_A x^2 \cdot dA = k_2 \cdot I_y \quad 5.41$$

Dan sudut  $\gamma$  haruslah:

$$5.32 \quad \tan \gamma = \frac{M_x}{M_y} = \frac{I_{xy}}{I_y} \quad 5.42$$

5.33 Dalam kasus penampang yang memiliki paling sedikit satu sumbu simetri  $I_{xy} = 0$   
 5.34 dan  $\tan \gamma = 0$ , maka beban dan lentur terjadi dalam bidang  $xz$ .

#### 5.35 LENTUR DI LUAR BIDANG XZ DAN YZ

Tegangan total  $\sigma$  merupakan penjumlahan dari tegangan akibat lentur dalam bidang  $xz$  dan  $yz$ .

$$\sigma = k_1 \cdot y + k_2 \cdot x \quad 5.43$$

$$M_x = k_1 \cdot I_x + k_2 \cdot I_{xy} \quad 5.44$$

$$M_y = k_1 \cdot I_{xy} + k_2 \cdot I_y \quad 5.45$$

Menyelesaikan persamaan 5.44 dan 5.45 serta substitusi ke persamaan 5.43 akan diperoleh:

$$\sigma = \frac{M_x \cdot I_y - M_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot y + \frac{M_y \cdot I_x - M_x \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot x \quad 5.46$$

Persamaan 5.46 merupakan persamaan umum lentur, dengan mengasumsikan: balok lurus, prismatis, sumbu  $x$  dan  $y$  adalah dua sumbu berat saling tegak lurus, material elastik linear, tak ada pengaruh puntir.

ian 5.34 Bila penampang mempunyai setidaknya satu sumbu simetri, maka dengan mensubstitusikan  $I_{xy} = 0$ , persamaan 5.46 menjadi:

$$5.36 \quad \sigma = \frac{M_x}{I_x} \cdot y + \frac{M_y}{I_y} \cdot x \quad 5.47$$

$$\text{Dari persamaan 5.37 dan 5.42 didefinisikan } \tan \gamma = \frac{M_x}{M_y}$$

5.37 Bila tegangan dalam sumbu netral sama dengan nol,  $\sigma$  dalam persamaan 5.46 dapat  
 ka beban disubstitusikan dengan nol, selesaikan untuk  $-x/y$ , akan diperoleh bentuk:

$$-\frac{x}{y} = \left[ \frac{M_x \cdot I_y - M_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \right] \left[ \frac{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2}{M_y \cdot I_x - M_x \cdot I_{xy}} \right] \quad 5.48$$

ga:

Dari Gambar 5.9 tampak bahwa  $\tan \alpha = -x/y$ , sehingga persamaan 5.48 dapat ditulis sebagai:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{M_x}{M_y} \cdot I_y - I_{xy}}{I_x - \frac{M_x}{M_y} \cdot I_{xy}} = \frac{I_y \cdot \tan \gamma - I_{xy}}{I_x - I_{xy} \tan \gamma} \quad 5.49$$

Jika penampang memiliki paling tidak satu buah sumbu simetri ( $I_{xy} = 0$ ):

$$\tan \alpha = \frac{I_y}{I_x} \tan \gamma \quad 5.50$$

### ■ CONTOH 5.9:

Sebuah profil WF 400.400.13.21 dikenai beban yang membentuk sudut  $5^\circ$  terhadap sumbu vertikal. Hitung kemiringan sumbu netral!

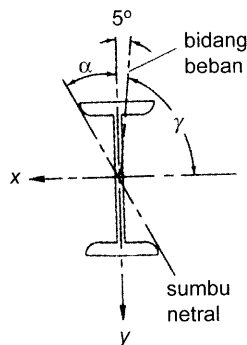
Data profil WF 400.400.13.21 :  $I_x = 66600 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$  dan  $I_y = 22400 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ .

$$\tan \gamma = \tan 85^\circ$$

$$\tan \alpha = \frac{I_y}{I_x} \tan \gamma$$

$$\tan \alpha = \frac{22400}{66600} \cdot \tan(85^\circ)$$

$$\alpha = 75,42^\circ$$



### ■ CONTOH 5.10:

Balok dengan batang 3 m memikul beban merata 0,75 ton/m (termasuk berat sendiri). Digunakan profil siku tak sama kaki L 75.170.10. Hitung tegangan pada titik A, B, dan C, bila profil dapat melentur dalam arah sembarang dan hitung pula bila profil diasumsikan hanya melentur pada bidang vertikal saja.

$$I_{xy} = [170(85 - 62,1)(-15,2 + 5) + 65(-62,1 + 5)(32,5 + 10 - 15,2)]10$$

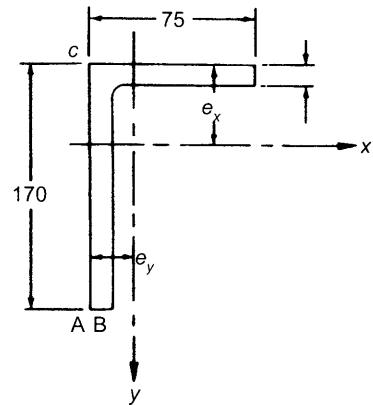
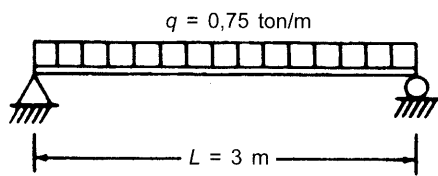
$$I_{xy} = -1410325,5 \text{ mm}^4$$

$$I_x = 709 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$I_y = 88,2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$e_x = 62,1 \text{ mm}$$

$$e_y = 15,2 \text{ mm}$$



$$M_x = \frac{1}{8} = 0,84375 \text{ tm}$$

$$M_x = 0,84375 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

$$M_y = 0$$

Lentur terjadi pada arah sembarang:

$$f_A = \frac{M_x(I_y \cdot y - I_{xy} \cdot x)}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} = \frac{0,84375 \cdot 10^7 \cdot (88,2 \cdot 10^4 \cdot 107,9 - (-1410325,5x - 15,2))}{(709 \times 88,2 \cdot 10^8) - (-1410325,5)^2}$$

$$= + 145,88 \text{ MPa}$$

$$f_B = \frac{M_x(I_y \cdot y - I_{xy} \cdot x)}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} = \frac{0,84375 \cdot 10^7 \cdot (88,2 \cdot 10^4 \cdot 107,9 - (-1410325,5x - 5,2))}{(709 \times 88,2 \cdot 10^8) - (-1410325,5)^2}$$

$$= + 173,79 \text{ MPa}$$

$$f_C = \frac{M_x(I_y \cdot y - I_{xy} \cdot x)}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} = \frac{0,84375 \cdot 10^7 \cdot ((88,2 \cdot 10^4 \cdot -62,1) - (-1410325,5x - 15,2))}{(709 \times 88,2 \cdot 10^8) - (-1410325,5)^2}$$

$$= - 150,788 \text{ MPa}$$

Lentur dalam bidang vertikal saja:

$$f_A = f_B = \frac{M_x \cdot y}{I_x} = \frac{0,84375 \cdot 10^7 \cdot 107,9}{709 \cdot 10^4} = 128,4 \text{ MPa}$$

$$f_C = \frac{M_x \cdot y}{I_x} = \frac{0,84375 \cdot 10^7 \cdot -62,1}{709 \cdot 10^4} = -73,9 \text{ MPa}$$

Persamaan-persamaan umum lentur di atas berlaku hanya untuk material yang elastik linear ( $\sigma < f_y$ ). Bila material telah mencapai batas plastis, maka persamaan berikut dapat dipakai untuk material yang memiliki paling tidak satu sumbu simetri.

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \leq 1 \quad 5.51$$

Dengan:  $M_u$  adalah momen terfaktor  
 $M_n$  adalah tahanan lentur nominal  
 $\phi_b = 0,90$

### ■ CONTOH 5.11:

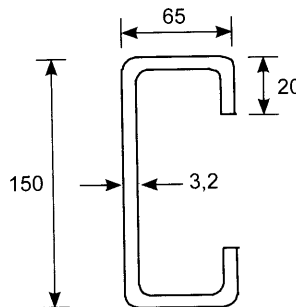
Rencanakanlah struktur gording pada suatu rangka atap dengan ketentuan-ketentuan sebagai berikut:

Jarak antar gording	= 1,25 m
Jarak antar kuda-kuda	= 4 m
Sudut kemiringan atap	= $25^\circ$
Penutup atap genteng, berat	= $50 \text{ kg/m}^2$
Tekanan tiup angin	= $40 \text{ kg/m}^2$

### JAWAB:

Coba menggunakan profil light lip channel 150.65.20.3,2, dengan data-data:

$$\begin{aligned} I_x &= 332.10^4 \text{ mm}^4 \\ I_y &= 54.10^4 \text{ mm}^4 \\ Z_x &= 44,331.10^3 \text{ mm}^3 \\ Z_y &= 12,268.10^3 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$



### Beban mati:

$$\begin{aligned} \text{Berat gording} &= 7,51 \text{ kg/m} \\ \text{Berat atap} &= 1,25(50) \\ q &= 70,01 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

### Beban hidup:

$$\text{Di tengah-tengah gording } P = 100 \text{ kg}$$

### Beban angin:

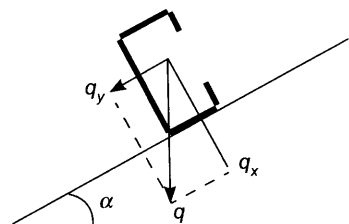
$$\begin{aligned} \text{Tekanan angin} &= 40 \text{ kg/m}^2 \\ \text{Koefisien angin tekan} &= 0,02\alpha - 0,4 \\ &= 0,02(25) - 0,4 = 0,1 \\ \text{Koefisien angin hisap} &= -0,4 \\ \omega_{\text{tekan}} &= 0,1(40)(1,25) = 5 \text{ kg/m} \\ \omega_{\text{hisap}} &= -0,4(40)(1,25) = -20 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

### Mencari momen-momen pada gording:

Pada arah sumbu lemah dipasang trekstang pada tengah bentang sehingga  $L_y = \frac{1}{2} \times \text{jarak kuda-kuda} = 2 \text{ m}$ .

### Akibat beban mati:

$$\begin{aligned} q &= 70,01 \text{ kg/m} \\ q_x &= q \cdot \cos 25 = 70,01(\cos 25) = 63,45 \text{ kg/m} \\ q_y &= q \cdot \sin 25 = 70,01(\sin 25) = 29,59 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

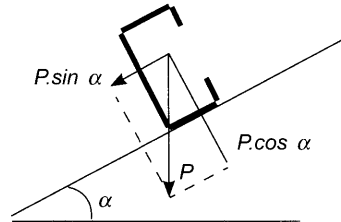


$$M_x = \frac{1}{8} (63,45)(4)^2 = 126,9 \text{ kg.m}$$

$$M_y = \frac{1}{8} (29,59)(2)^2 = 14,795 \text{ kg.m}$$

**Akibat beban hidup:**

$$P = 100 \text{ kg}$$



$$M_x = \frac{1}{4} (P \cdot \cos \alpha) \cdot L_x = \frac{1}{4} (100)(\cos 25)(4) = 90,631 \text{ kg.m}$$

$$M_y = \frac{1}{4} (P \cdot \sin \alpha) \cdot L_y = \frac{1}{4} (100)(\sin 25)(2) = 21,131 \text{ kg.m}$$

**Akibat angin:**

Karena beban angin bekerja tegak lurus sumbu  $x$  sehingga hanya ada  $M_x$

$$\text{angin tekan: } M_x = \frac{1}{8} (5)(4)^2 = 10 \text{ kg.m}$$

$$\text{angin hisap: } M_x = \frac{1}{8} (-20)(4)^2 = -40 \text{ kg.m}$$

**Kombinasi Beban:**

Kombinasi Beban	Arah $x$ (kg.m)	Arah $y$ (kg.m)
1. $U = 1,4 D$	177,66	20,713
2. $U = 1,2D + 0,5L_a$	197,5955	28,3195
3. $U = 1,2D + 1,6 L_a$	297,2896	51,5636
$U = 1,2D + 1,6L_a + 0,8W$	305,2896	51,5636
4. $U = 1,2D + 1,3W + 0,5L_a$	210,5955	28,3195
5. $U = 0,9D \pm 1,3W$	127,21	13,3155
	74,21	13,3155

$$\text{Jadi } M_{ux} = 305,2896 \text{ kg.m} = 305,2896 \cdot 10^4 \text{ N.mm}$$

$$M_{uy} = 51,5636 \text{ kg.m} = 51,5636 \cdot 10^4 \text{ N.mm}$$

Asumsikan penampang kompak:

$$M_{nx} = Z_x \cdot f_y = 44,331 \cdot 10^3 (240) = 10639440 \text{ N.mm}$$

$$M_{ny} = Z_y \cdot f_y = 12,268 \cdot 10^3 (240) = 2944320 \text{ N.mm}$$

Untuk mengantisipasi masalah puntir maka  $M_{ny}$  dapat dibagi 2 sehingga:

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny} / 2} \leq 1,0$$

$$\frac{305,2896 \cdot 10^4}{0,9 \times 10639440} + \frac{51,5636 \cdot 10^4}{1/2 \cdot 0,9 \cdot 2944320} = 0,32 + 0,39 = 0,71 < 1,0$$

**OK**



Untuk struktur berpenampang I dengan rasio  $b_f/d \leq 1,0$  dan merupakan bagian dari struktur dengan kekangan lateral penuh maka harus dipenuhi persyaratan seperti pada SNI 03-1729-2002 pasal 11.3.1 sebagai berikut:

$$\left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{px}} \right)^\zeta + \left( \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{py}} \right)^\zeta \leq 1,0 \quad 5.52$$

$$\left( \frac{C_{mx} \cdot M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right)^\eta + \left( \frac{C_{my} \cdot M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right)^\eta \leq 1,0 \quad 5.53$$

Dengan ketentuan:

$$\begin{aligned} \text{Untuk } b_f/d < 0,5 : & \quad \zeta = 1,0 \\ \text{Untuk } 0,5 \leq b_f/d \leq 1,0 : & \quad \zeta = 1,6 \\ \text{Untuk } b_f/d < 0,3 : & \quad \eta = 1,0 \\ \text{Untuk } 0,3 \leq b_f/d \leq 1,0 : & \quad \eta = 0,4 + b_f/d \geq 1,0 \end{aligned}$$

### ■ CONTOH 5.12:

Periksalah kekuatan profil WF 250.250.9.14 untuk memikul momen akibat beban mati  $M_{Dx} = 2$  ton.m,  $M_{Dy} = 0,6$  ton.m serta momen akibat beban hidup  $M_{Lx} = 6$  ton.m dan  $M_{Ly} = 2,8$  ton.m. Asumsikan terdapat sokongan lateral yang cukup untuk menjaga kestabilan struktur. Gunakan mutu baja BJ 37!

#### JAWAB:

Hitung momen terfaktor dalam arah  $x$  dan  $y$ :

$$M_{ux} = 1,2(2) + 1,6(6) = 12 \text{ ton.m}$$

$$M_{uy} = 1,2(0,6) + 1,6(2,8) = 5,2 \text{ ton.m}$$

Periksa kelangsingan penampang:

$$\frac{b_f}{2t_f} = \frac{250}{2 \times 14} = 8,93 < \frac{170}{\sqrt{f_y}} (= 10,97)$$

$$\frac{b}{t_w} = \frac{250 - 2(14 + 16)}{9} = 21,1 < \frac{1680}{\sqrt{f_y}} (= 108,44)$$

Penampang kompak!

Hitung rasio  $b_f/d$ :

$$\frac{b_f}{d} = \frac{250}{250} = 1 \rightarrow \text{periksa dengan persamaan 5.52 dan 5.53}$$

$$M_{nx} = M_{px} = Z_x \cdot f_y = 936,89 \cdot 103(240) = 22,48536 \text{ ton.m}$$

$$M_{ny} = M_{py} = Z_y \cdot f_y = 442 \cdot 103(240) = 10,608 \text{ ton.m}$$

Karena  $M_{nx} = M_{px}$ ,  $M_{ny} = M_{py}$  serta dengan mengambil nilai  $C_{mx} = C_{my} = 1,0$  dan  $(0,4 + b_f/d) = 1,4$ , maka persamaan 5.53 lebih menentukan!

$$\left( \frac{C_{mx} \cdot M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right)^{1,4} + \left( \frac{C_{my} \cdot M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right)^{1,4} \leq 1,0$$

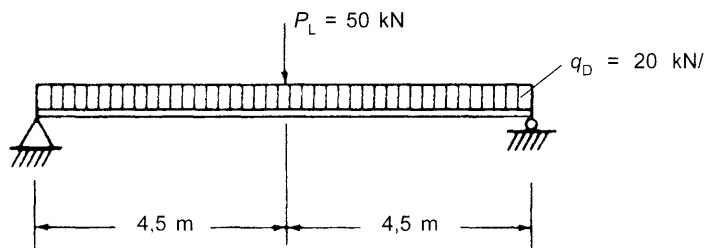
$$\left( \frac{1,0 \times 12}{0,9 \times 22,48536} \right)^{1,4} + \left( \frac{1,0 \times 5,2}{0,9 \times 10,608} \right)^{1,4} = 0,9086 < 1,0$$

OK

Jadi, profil WF 250.250.9.14 cukup kuat untuk memikul beban momen lentur tersebut.

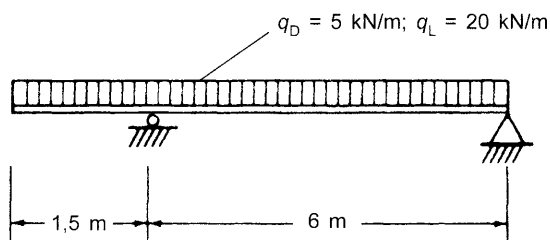
## SOAL-SOAL LATIHAN

- 5.1 Suatu komponen struktur lentur terbuat dari dua buah pelat sayap ukuran  $12 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$  dan pelat badan ukuran  $9 \text{ mm} \times 425 \text{ mm}$ . Mutu baja yang digunakan adalah BJ 41.
- Hitunglah modulus plastis penampang ( $Z$ ) dan momen plastis ( $M_p$ ) dalam arah sumbu kuat
  - Hitunglah besarnya modulus penampang elastis ( $S$ ) dan momen leleh ( $M_y$ ) dalam arah sumbu kuat
- 5.2 Suatu komponen struktur lentur terbuat dari dua buah pelat sayap yang berbeda, yaitu  $12 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  (sayap atas) dan  $12 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$  (sayap bawah) serta pelat badan ukuran  $9 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ . Hitunglah besarnya modulus plastis penampang dalam arah sumbu kuat dan hitung pula besarnya momen plastis yang bersangkutan. Gunakan mutu baja BJ 37!
- 5.3 Suatu balok baja seperti pada gambar terbuat dari profil WF 500.200.10.16 (dari baja BJ 37), dengan kekangan lateral menerus pada sisi flens tekan. Periksalah apakah profil tersebut mencukupi untuk memikul beban seperti pada gambar!



Gambar P.5.3

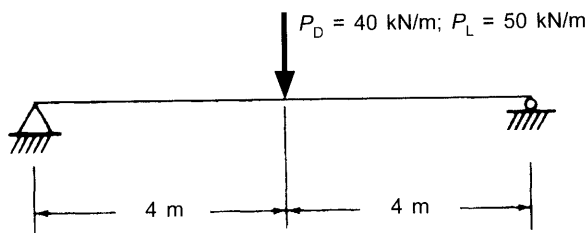
- 5.4 Sebuah balok dengan panjang 7,5 m tertumpu dengan sendi pada ujung kanan, dan tertumpu dengan rol pada jarak 1,5 m dari ujung kiri seperti pada gambar. Flens tekan balok terkekang lateral secara menerus. Periksalah apakah profil WF 250.125.6.9 dari baja BJ 41 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut! (beban sudah termasuk berat sendiri profil)



Gambar P.5.4

- 5.5 Profil WF 400.200.8.13 sepanjang 10 m ditumpu sederhana pada kedua ujungnya, dan digunakan sebagai suatu komponen struktur lentur. Bagian sayap tekan terkekang lateral secara menerus dan mutu baja yang digunakan adalah BJ 37. Jika rasio  $L/D = 3$ , hitunglah beban kerja total yang diperbolehkan bekerja (dalam kN/m) pada balok tersebut!

- P.5.6** Rencanakanlah balok baja dengan profil WF pada struktur berikut dengan seekonomis mungkin. Disyaratkan pula batas lendutan tidak boleh melebihi  $L/300$  (mutu baja BJ 37). Perhitungkan pula berat sendiri profil!



Gambar P.5.6

- P.5.7** Hitunglah besarnya tahanan geser rencana dari profil–profil berikut:
- WF 700.300.13.24,  $f_y = 250 \text{ MPa}$
  - WF 400.400.13.21,  $f_y = 290 \text{ MPa}$
  - WF 250.250.9.14,  $f_y = 410 \text{ MPa}$
- P.5.8** Desainlah ukuran bearing plat yang diperlukan untuk mendistribusikan reaksi dari balok WF 500.200.10.16 yang memiliki panjang bentang 4,8 m diukur dari as ke as tumpuan. Balok memikul beban mati sebesar 50 kN/m dan beban hidup 50 kN/m. Balok menumpu pada dinding beton bertulang dengan  $f'_c = 25 \text{ MPa}$ . Mutu baja dan bearing plat adalah BJ 37.
- P.5.9** Profil WF 400.200.8.13 memikul beban yang membentuk sudut  $10^\circ$  terhadap sumbu vertikal. Hitunglah sudut kemiringan sumbu netral profil tersebut, diukur dari sumbu vertikal penampang.
- P.5.10** Desainlah profil WF yang dapat memikul momen lentur dua arah sebagai berikut:
- |                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| $M_{Dx} = 80 \text{ Nmm}$ | $M_{Lx} = 175 \text{ Nmm}$ |
| $M_{Dy} = 5 \text{ Nmm}$  | $M_{Ly} = 15 \text{ Nmm}$  |
- Asumsikan terdapat pengekang lateral menerus pada balok tersebut, gunakan mutu baja BJ 37!
- P.5.11** Rencanakan struktur gording dari suatu rangka atap dengan data berikut:
- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Jarak antar gording   | $= 1,5 \text{ m}$     |
| Jarak antar kuda-kuda | $= 3,75 \text{ m}$    |
| Sudut kemiringan atap | $= 20^\circ$          |
| Berat penutup atap    | $= 25 \text{ kg/m}^2$ |
| Tekanan tiup angin    | $= 20 \text{ kg/m}^2$ |
- Gunakan mutu baja BJ 37!

# 6

## Sambungan Baut

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Menghitung kapasitas baut sebagai alat sambung dalam suatu konstruksi baja
- Melakukan proses analisis dan desain sambungan baja yang menggunakan baut sebagai alat sambungnya

### Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Tahanan Nominal Baut
- 1.3 Geser Eksentris
- 1.4 Kombinasi Geser dan Tarik
- 1.5 Sambungan yang Mengalami Beban Tarik Aksial
- 1.6 Geser dan Tarik Akibat Beban Eksentris

### 1 PENDAHULUAN

Setiap struktur baja merupakan gabungan dari beberapa komponen batang yang disatukan dengan alat pengencang. Salah satu alat pengencang di samping las (akan dibahas dalam bab VII) yang cukup populer adalah baut terutama baut mutu tinggi. Baut mutu tinggi menggeser penggunaan paku keling sebagai alat pengencang karena beberapa kelebihan yang dimilikinya dibandingkan paku keling, seperti jumlah tenaga kerja yang lebih sedikit, kemampuan menerima gaya yang lebih besar, dan secara keseluruhan dapat menghemat biaya konstruksi. Selain mutu tinggi ada pula baut mutu normal A307 terbuat dari baja kadar karbon rendah.

Dua tipe dasar baut mutu tinggi yang distandarkan oleh ASTM adalah tipe A325 dan A490. Baut ini mempunyai kepala berbentuk segi enam. Baut A325 terbuat dari baja karbon yang memiliki kuat leleh 560 – 630 MPa, baut A490 terbuat dari baja alloy dengan kuat leleh 790 – 900 MPa, tergantung pada diameternya. Diameter baut mutu tinggi berkisar antara  $\frac{1}{2}$  -  $1\frac{1}{2}$  in, yang sering digunakan dalam struktur bangunan berdiameter  $\frac{3}{4}$  dan  $\frac{7}{8}$  in, dalam desain jembatan antara  $\frac{7}{8}$  hingga 1 in.

Dalam pemasangan baut mutu tinggi memerlukan gaya tarik awal yang cukup yang diperoleh dari pengencangan awal. Gaya ini akan memberikan friksi sehingga cukup kuat untuk memikul beban yang bekerja. Gaya ini dinamakan *proof load*. *Proof load* diperoleh dengan mengalikan luas daerah tegangan tarik ( $A_s$ ) dengan kuat leleh yang diperoleh dengan metoda 0,2% tangen atau 0,5% regangan (lihat bab II) yang besarnya 70%  $f_u$  untuk A325, dan 80%  $f_u$  untuk A490.

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left[ d_b - \frac{0,9743}{n} \right]^2$$

6.1

Dengan:  $d_b$  adalah diameter nominal baut  
 $n$  adalah jumlah ulir per mm

Baut mutu normal dipasang kencang tangan. Baut mutu tinggi mula-mula dipasang kencang tangan, dan kemudian diikuti  $\frac{1}{2}$  putaran lagi (*turn-of-the-nut method*). Dalam Tabel 6.1 ditampilkan tipe-tipe baut dengan diameter, *proof load* dan kuat tarik minimumnya.

**TABEL 6.1 TIPE – TIPE BAUT**

Tipe Baut	Diameter (mm)	<i>Proof Stress</i> (MPa)	Kuat Tarik Min.(MPa)
A307	6.35 - 104	-	60
A325	12.7 - 25.4	585	825
28.6 - 38.1	510	725	
A490	12.7 - 38.1	825	1035

Sambungan baut mutu tinggi dapat didesain sebagai sambungan tipe friksi (jika dikehendaki tak ada slip) atau juga sebagai sambungan tipe tumpu.

## 6.2 TAHANAN NOMINAL BAUT

Suatu baut yang memikul beban terfaktor,  $R_u$ , sesuai persyaratan LRFD harus memenuhi:

$$R_u \leq \phi \cdot R_n \quad 6.2$$

Dengan  $R_n$  adalah tahanan nominal baut sedangkan  $\phi$  adalah faktor reduksi yang diambil sebesar 0,75. Besarnya  $R_n$  berbeda-beda untuk masing-masing tipe sambungan.

### Tahanan Geser Baut

Tahanan nominal satu buah baut yang memikul gaya geser memenuhi persamaan:

$$R_n = m \cdot r_l \cdot f_u^b \cdot A_b \quad 6.3$$

Dengan:  $r_l$  = 0,50 untuk baut tanpa ulir pada bidang geser  
 $r_l$  = 0,40 untuk baut dengan ulir pada bidang geser  
 $f_u^b$  adalah kuat tarik baut (MPa)  
 $A_b$  adalah luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir  
 $m$  adalah jumlah bidang geser

### Tahanan Tarik Baut

Baut yang memikul gaya tarik tahanan nominalnya dihitung menurut:

$$R_n = 0,75 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad 6.4$$

Dengan:  $f_u^b$  adalah kuat tarik baut (MPa)  
 $A_b$  adalah luas bruto penampang baut pada daerah tak berulir

### Tahanan Tumpu Baut

Tahanan tumpu nominal tergantung kondisi yang terlemah dari baut atau komponen pelat yang disambung. Besarnya ditentukan sebagai berikut:

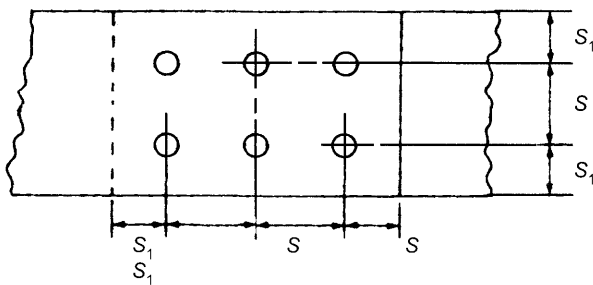
$$R_n = 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u \quad 6.5$$

Dengan:  $d_b$  adalah diameter baut pada daerah tak berulir  
 $t_p$  adalah tebal pelat  
 $f_u$  kuat tarik putus terendah dari baut atau pelat

Persamaan 6.4 berlaku untuk semua baut, sedangkan untuk lubang baut selot panjang tegak lurus arah gaya berlaku:

$$R_u = 2,0 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u \quad 6.6$$

Tata letak baut diatur dalam SNI pasal 13.4. Jarak antar pusat lubang baut harus diambil tidak kurang dari 3 kali diameter nominal baut, dan jarak antara baut tepi dengan ujung pelat harus sekurang-kurangnya 1,5 diameter nominal baut. Dan jarak maksimum antar pusat lubang baut tak boleh melebihi  $15t_p$  (dengan  $t_p$  adalah tebal pelat lapis tertipis dalam sambungan) atau 200 mm, sedangkan jarak tepi maksimum harus tidak melebihi  $(4t_p + 100 \text{ mm})$  atau 200 mm.



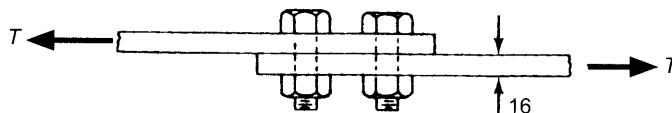
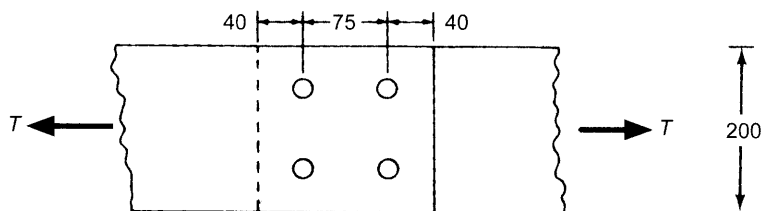
$$3d_b < S < 15t_p \text{ atau } 200 \text{ mm}$$

$$1,5d_b < S_1 < (4t_p + 100 \text{ mm}) \text{ atau } 200 \text{ mm}$$

Gambar 6.1 Tata Letak Baut

### ■ CONTOH 6.1:

Hitung beban kerja tarik maksimum untuk sambungan tipe tumpu berikut, yang menyatukan dua buah pelat (BJ 37) berukuran 16 x 200 mm. Baut yang digunakan berdiameter 22 mm,  $f_u^b = 825 \text{ MPa}$  dan tanpa ulir dalam bidang geser. Beban hidup yang bekerja besarnya 3 kali beban mati.



**JAWAB:**

Periksa kekuatan pelat terlebih dahulu, lakukan analisa seperti batang tarik!

$$A_g = 16(200) = 3200 \text{ mm}^2$$

$$A_n = 3200 - 2 \cdot (22 + 3,2) \cdot 16 = 2393,6 \text{ mm}^2$$

$$A_e = A_n = 2393,6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Leleh: } \phi T_n = \phi f_y A_g = 0,90(240)(3200) = \mathbf{69,12 \text{ ton}}$$

$$\text{Fraktur: } \phi T_n = \phi f_u A_e = 0,75(370)(2393,6) = \mathbf{66,42 \text{ ton}}$$

Tinjau tahanan baut:

$$\text{Geser: } \phi R_n = \phi 0,5 f_u^b m A_b = 0,75(0,5)(825)(1)(\frac{1}{4} \pi \cdot 22^2) = 11,76 \text{ ton/baut}$$

$$\text{Tumpu: } \phi R_n = \phi 2,4 d_b t_p f_u^p = 0,75(2,4)(22)(16)(370) = 23,44 \text{ ton/baut}$$

Tahanan geser menentukan, sehingga tahanan untuk 4 baut:

$$\phi T_n = 4 \times 11,76 = \mathbf{47,04 \text{ ton}}$$

Dari 3 kemungkinan tersebut,  $\phi T_n = 47,04 \text{ ton}$  yang menentukan.

$$\phi T_n \geq T_u$$

$$47,04 \geq 1,2D + 1,6L$$

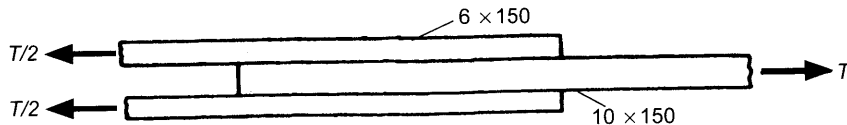
$$47,04 \geq 1,2D + 1,6(3D) = 6D$$

$$D \leq 7,84 \text{ ton} \quad \text{dan} \quad L \leq 23,52 \text{ ton}$$

Jadi, beban hidup yang boleh terjadi sebesar  $D + L = 7,84 + 23,53 = \mathbf{31,36 \text{ ton}}$ .

**CONTOH 6.2:**

Rencanakan sambungan baut sekuat pelat yang disambung bagi komponen struktur tarik berikut ini. Pelat dari baja BJ 55 ( $f_y = 410 \text{ MPa}$ ,  $f_u = 550 \text{ MPa}$ ). Gunakan baut diameter 19 mm (tanpa ulir di bidang geser,  $f_u^b = 825 \text{ MPa}$ ). Rencanakan baut diatur dalam dua baris.

**JAWAB:**

Jumlah luas dua pelat luar lebih besar dari luas pelat tengah, sehingga perhitungan didasarkan pada pelat yang tengah.

$$A_g = 10(150) = 1500 \text{ mm}^2$$

$$A_n = [150 - 2 \cdot (19 + 3,2)](10) = 1056 \text{ mm}^2$$

$$\text{Max. } A_n = 0,85 A_g = 0,85 (1500) = 1275 \text{ mm}^2$$

$$A_e = A_n = 1056 \text{ mm}^2$$

$$\text{Leleh: } \phi T_n = \phi f_y A_g = 0,90(410)(1500) = \mathbf{55,35 \text{ ton}}$$

$$\text{Fraktur: } \phi T_n = \phi f_u A_e = 0,75(550)(1056) = \mathbf{43,56 \text{ ton}}$$

Jadi, jumlah baut dihitung berdasarkan gaya 43,56 ton.

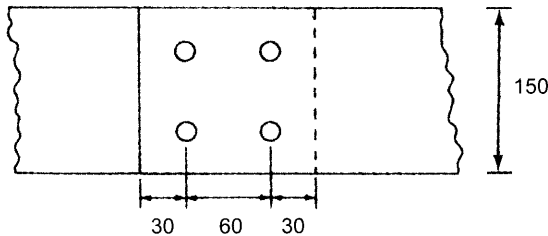
Tinjau tahanan baut:

$$\text{Geser: } \phi R_n = \phi 0,5 f_u^b m A_b = 0,75(0,5)(825)(2)(\frac{1}{4} \pi \cdot 19^2) = 17,54 \text{ ton/baut}$$

$$\text{Tumpu: } \phi R_n = \phi 2,4 d_b t_p f_u^p = 0,75(2,4)(19)(10)(550) = 18,81 \text{ ton/baut}$$

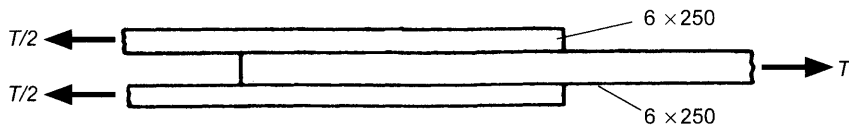
Tahanan geser menentukan!

$$\Sigma \text{ baut diperlukan} = \frac{43,56}{17,54} = 2,48 \cong 4 \text{ baut}$$



### ■ CONTOH 6.3:

Hitung jumlah baut yang diperlukan oleh komponen struktur berikut yang memikul beban mati ( $D = 3$  ton) dan beban hidup ( $L = 15$  ton). Gunakan baut tanpa ulir di bidang geser,  $d_b = 19$  mm,  $f_u^b = 825$  MPa. Pelat yang disambung dari baja BJ 37. Aturlah baut dalam 2 baris.



### JAWAB:

Hitung beban tarik terfaktor,  $T_u$ :

$$T_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(3) + 1,6(15) = 27,6 \text{ ton}$$

Pelat tengah menentukan dalam perhitungan kekuatan:

$$A_g = 6 \times 250 = 1500 \text{ mm}^2$$

$$A_n = [250 - 2 \cdot (19 + 3,2)] \cdot 6 = 1233,6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Max } A_n = 0,85 \cdot A_g = 0,85 \times 1500 = 1275 \text{ mm}^2$$

$$A_e = A_n = 1233,6 \text{ mm}^2$$

$$\text{Leleh: } \phi \cdot T_n = \phi \cdot f_y \cdot A_g = 0,90(240)(1500) = \mathbf{32,4 \text{ ton}}$$

$$\text{Fraktur: } \phi \cdot T_n = \phi \cdot f_u \cdot A_e = 0,75(370)(1233,6) = \mathbf{34,23 \text{ ton}}$$

$$\phi \cdot T_n (= 32,4 \text{ ton}) > T_u (= 27,6 \text{ ton})$$

OK

Perencanaan baut:

$$\begin{aligned} \text{Geser: } \phi \cdot R_n &= \phi \cdot 0,5 \cdot f_u^b \cdot m \cdot A_b = 0,75(0,5)(825)(2)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2) \\ &= 17,54 \text{ ton/baut} \end{aligned}$$

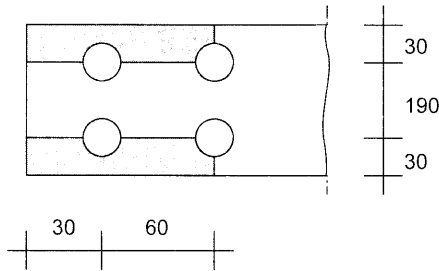
$$\text{Tumpu: } \phi \cdot R_n = \phi \cdot 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u^p = 0,75(2,4)(19)(6)(370) = 7,59 \text{ ton/baut}$$

$$\Sigma \text{ baut diperlukan } \frac{27,6}{7,59} = 3,6 \cong 4 \text{ baut}$$

$$1,5d_b = 28,5 \approx 30 \text{ mm}$$

$$3d_b = 57 \approx 60 \text{ mm}$$





Cek keruntuhan geser blok!

$$A_{nv} = 2 \cdot [90 - 1,5 \cdot (19 + 3,2)](6) = 680,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = 2 \cdot [30 - 0,5 \cdot (19 + 3,2)](6) = 226,8 \text{ mm}^2$$

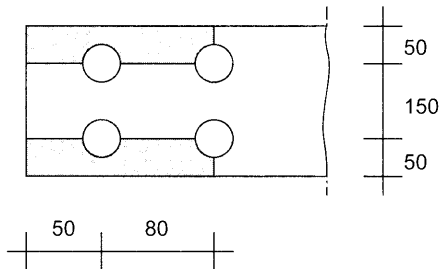
$$0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} = 0,6(370)(680,4) = 15,1 \text{ ton}$$

$$f_u \cdot A_{nt} = 370(226,8) = 8,39 \text{ ton}$$

Karena  $0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} > f_u \cdot A_{nt}$ , maka kondisi geser fraktur tarik leleh menentukan:

$$\begin{aligned} \phi R_{bs} &= \phi (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt}) \\ &= 0,75 (0,6(370)(680,4) + 240(60)(6)) = 17,80 \text{ ton} \end{aligned}$$

Ternyata keruntuhan geser blok lebih menentukan daripada keruntuhan leleh ataupun fraktur, bahkan  $\phi R_{bs} < T_u$ . Untuk mengatasinya, maka jarak baut perlu diubah!



$$A_{nv} = 2 \cdot [130 - 1,5 \cdot (19 + 3,2)](6) = 1160,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{nt} = 2 \cdot [50 - 0,5 \cdot (19 + 3,2)](6) = 466,8 \text{ mm}^2$$

$$0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} = 0,6(370)(1160,4) = 25,76 \text{ ton}$$

$$f_u \cdot A_{nt} = 370(466,8) = 17,27 \text{ ton}$$

Karena  $0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} > f_u \cdot A_{nt}$ , maka kondisi geser fraktur tarik leleh menentukan:

$$\begin{aligned} \phi R_{bs} &= \phi (0,6 \cdot f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt}) \\ &= 0,75 (0,6(370)(1160,4) + 240(100)(6)) = 30,12 \text{ ton} > T_u \end{aligned}$$

OK

### Sambungan Tipe Friksi

Semua contoh di atas didisain sebagai sambungan tipe tumpu, apabila dikehendaki sambungan tanpa slip (tipe friksi), maka satu baut yang hanya memikul gaya geser terfaktor,  $V_u$ , dalam bidang permukaan friksi harus memenuhi

$$V_u < V_d (= \phi \cdot V_n) \quad 6.7$$

Kuat rencana,  $V_d = \phi \cdot V_n$ , adalah kuat geser satu baut dalam sambungan tipe friksi yang besarnya dihitung menurut:

$$V_d = \phi \cdot V_n = 1,13 \cdot \phi \cdot \mu \cdot m \cdot \text{proof load} \quad 6.8$$

Dengan:  $\mu$  koefisien gesek = 0,35

$m$  adalah jumlah bidang geser

$\phi = 1,0$  untuk lubang standar

$\phi = 0,85$  untuk lubang selot pendek dan lubang besar

$\phi = 0,70$  untuk lubang selot panjang tegak lurus arah gaya

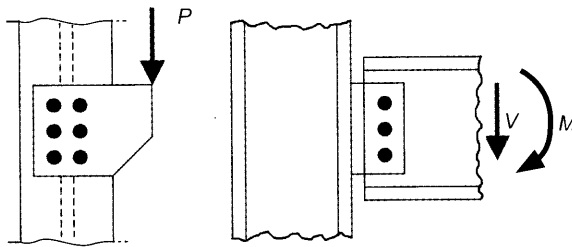
$\phi = 0,60$  untuk lubang selot panjang sejajar arah gaya

### 6.3 GESER EKSENTRIS

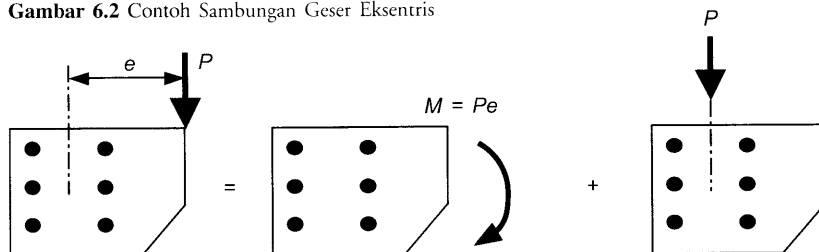
Apabila gaya  $P$  bekerja pada garis kerja yang tidak melewati titik berat kelompok baut, maka akan timbul efek akibat gaya eksentris tersebut. Beban  $P$  yang mempunyai eksentrisitas sebesar  $e$ , adalah ekuivalen statis dengan momen  $P$  dikali  $e$  ditambah dengan sebuah gaya konsentris  $P$  yang bekerja pada sambungan. Karena baik momen maupun beban konsentris tersebut memberi efek geser pada kelompok baut, kondisi ini sering disebut sebagai **geser eksentris**.

Dalam mendisain sambungan seperti ini, dapat dilakukan dua macam pendekatan yaitu:

1. **analisa elastik**, yang mengasumsikan tak ada gesekan antara pelat yang kaku dan alat pengencang yang elastik
2. **analisa plastis**, yang mengasumsikan bahwa kelompok alat pengencang dengan beban eksentris  $P$  berputar terhadap pusat rotasi sesaat dan deformasi di setiap alat penyambung sebanding dengan jaraknya dari pusat rotasi.



Gambar 6.2 Contoh Sambungan Geser Eksentris

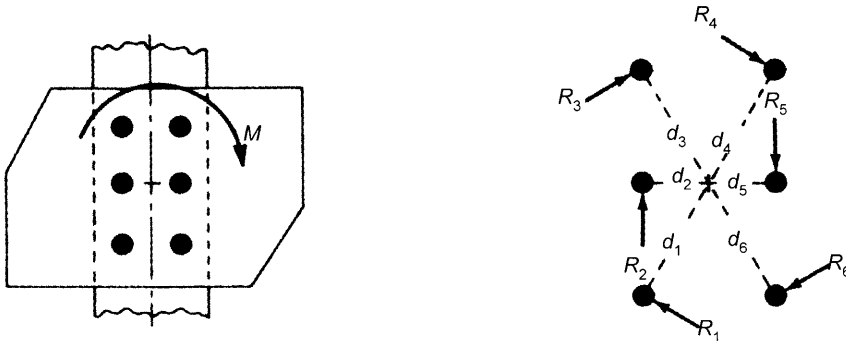


Gambar 6.3 Kombinasi Momen dan Geser

### Analisa Elastik

Prosedur analisa ini didasarkan pada konsep mekanika bahan sederhana, dan digunakan sebagai prosedur konservatif. Untuk menurunkan persamaan yang digunakan dalam analisa ini, perhatikan sambungan yang menerima beban momen  $M$  dalam Gambar 6.4.a. Abaikan gesekan antara pelat, momen sama dengan jumlah gaya dalam Gambar 6.4.b dikalikan jaraknya ke titik berat kelompok baut.

$$M = R_1 \cdot d_1 + R_2 \cdot d_2 + \dots + R_6 \cdot d_6 = \sum R \cdot d \quad 6.9$$



**Gambar 6.4** Sambungan dengan Beban Momen

Jika tiap baut dianggap elastik dan mempunyai luas yang sama, maka gaya  $R$  dari tiap baut juga proporsional terhadap jarak ke titik berat kelompok baut tersebut.

$$\frac{R_1}{d_1} = \frac{R_2}{d_2} = \dots = \frac{R_6}{d_6} \quad 6.10$$

Atau  $R_1, R_2, \dots, R_6$  dapat dituliskan dalam bentuk:

$$R_1 = \frac{R_1}{d_1} \cdot d_1; R_2 = \frac{R_1}{d_1} \cdot d_2; \dots; R_6 = \frac{R_1}{d_1} \cdot d_6 \quad 6.11$$

Substitusikan 6.10 ke persamaan 6.8:

$$M = \frac{R_1}{d_1} \cdot d_1^2 + \frac{R_1}{d_1} \cdot d_2^2 + \dots + \frac{R_1}{d_1} \cdot d_6^2$$

$$M = \frac{R_1}{d_1} [d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_6^2] = \frac{R_1}{d_1} \cdot \sum d^2 \quad 6.12$$

Sehingga gaya pada baut 1:

$$R_1 = \frac{M \cdot d_1}{\sum d^2} \quad 6.13$$

Dengan cara yang sama, maka gaya pada baut-baut yang lain adalah:

$$R_2 = \frac{M \cdot d_2}{\sum d^2}; R_3 = \frac{M \cdot d_3}{\sum d^2}; \dots; R_6 = \frac{M \cdot d_6}{\sum d^2} \quad 6.14$$

Atau secara umum dituliskan:

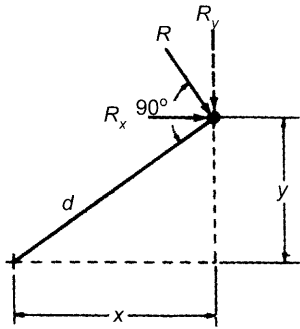
$$R = \frac{M \cdot d}{\sum d^2} \quad 6.15$$

Apabila gaya  $R$ , diuraikan dalam arah  $x$  dan  $y$  seperti dalam Gambar 6.5, maka dapat dituliskan komponen gaya dalam arah  $x$  dan  $y$ :

$$R_x = \frac{y}{d} \cdot R \quad R_y = \frac{x}{d} \cdot R \quad 6.16$$

Substitusikan 6.15 ke 6.14 diperoleh:

$$R_x = \frac{M \cdot y}{\sum d^2} \quad R_y = \frac{M \cdot x}{\sum d^2} \quad 6.17$$



**Gambar 6.5** Gaya  $R$  Diuraikan dalam Arah  $x$  dan  $y$

Karena  $d^2 = x^2 + y^2$ , maka persamaan 6.17 secara umum dapat dituliskan lagi:

$$R_x = \frac{M \cdot y}{\sum x^2 + \sum y^2} \quad R_y = \frac{M \cdot x}{\sum x^2 + \sum y^2} \quad 6.18$$

Dengan hukum penjumlahan vektor, maka gaya  $R$  didapatkan dari:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad 6.19$$

Untuk menghitung gaya total akibat beban eksentris seperti pada Gambar 6.2.a, maka pengaruh gaya  $R_v$  memberikan kontribusi gaya kepada tiap baut sebesar:

$$R_v = \frac{P}{\sum N} \quad 6.20$$

Dengan  $N$  adalah jumlah baut. Dan total resultan gaya pada tiap baut yang mengalami gaya eksentris adalah:

$$R = \sqrt{R_x^2 + (R_y + R_v)^2} \quad 6.21$$

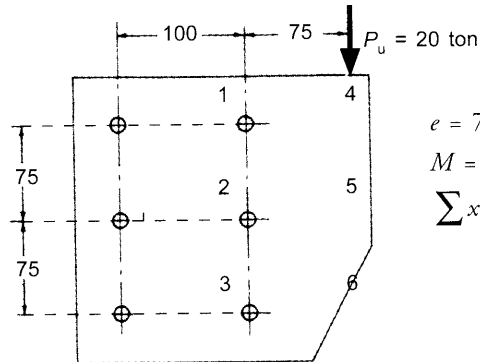
#### ■ CONTOH 6.4:

Hitunglah gaya maksimal yang bekerja dalam satu baut, untuk suatu komponen struktur berikut yang memikul gaya eksentris seperti pada gambar.

#### JAWAB:

Baut yang menerima gaya terbesar adalah baut nomor 1, 3, 4, dan 6. Pada baut nomor 4 bekerja gaya-gaya:

$$R_x = \frac{M \cdot y}{\sum x^2 + \sum y^2} = \frac{1500 \times 75}{37500} = 3 \text{ ton} \rightarrow$$



$$e = 75 + 50 = 125 \text{ mm}$$

$$M = 12(125) = 1500 \text{ ton mm}$$

$$\sum x^2 + \sum y^2 = 6(50)^2 + 4(75)^2 = 37500 \text{ mm}^2$$

$$R_y = \frac{M \cdot x}{\sum x^2 + \sum y^2} = \frac{1500 \times 50}{37500} = 2 \text{ ton} \downarrow$$

$$R_v = \frac{P}{N} = \frac{12}{6} = 2 \text{ ton} \downarrow$$

Gaya total pada baut nomor 4:

$$R = \sqrt{R_x^2 + (R_y + R_v)^2} = \sqrt{3^2 + (2+2)^2} = 5 \text{ ton}$$

### ■ CONTOH 6.5:

Hitung gaya  $R$  yang bekerja pada baut nomor 4 berikut ini, bila kelompok baut tersebut memikul beban  $P_u = 5 \text{ ton}$  yang membentuk sudut  $\alpha$  terhadap sumbu horizontal, di mana besarnya  $\tan \alpha = \frac{3}{4}$ .

**JAWAB:**

$$e = 160 \text{ mm}$$

$$M = 5 (160) = 800 \text{ ton mm}$$

$$\sum x^2 + \sum y^2 = 4(50)^2 + 4(75)^2 = 32500 \text{ mm}^2$$

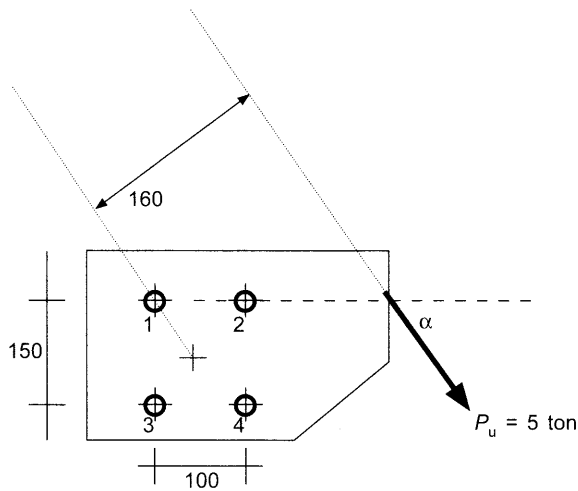
Gaya-gaya yang bekerja pada baut nomor 2:

$$R_x = \frac{M \cdot y}{\sum x^2 + \sum y^2} = \frac{800 \times 75}{32500} = 1,85 \text{ ton} \rightarrow$$

$$R_y = \frac{M \cdot x}{\sum x^2 + \sum y^2} = \frac{800 \times 50}{32500} = 1,23 \text{ ton} \downarrow$$

$$R_H = \frac{P \cdot \cos \alpha}{4} = \frac{5 \times 0,8}{4} = 1 \text{ ton} \rightarrow$$

$$R_V = \frac{P \cdot \sin \alpha}{4} = \frac{5 \times 0,6}{4} = 0,75 \text{ ton} \downarrow$$



Total gaya  $R$  pada baut 2:

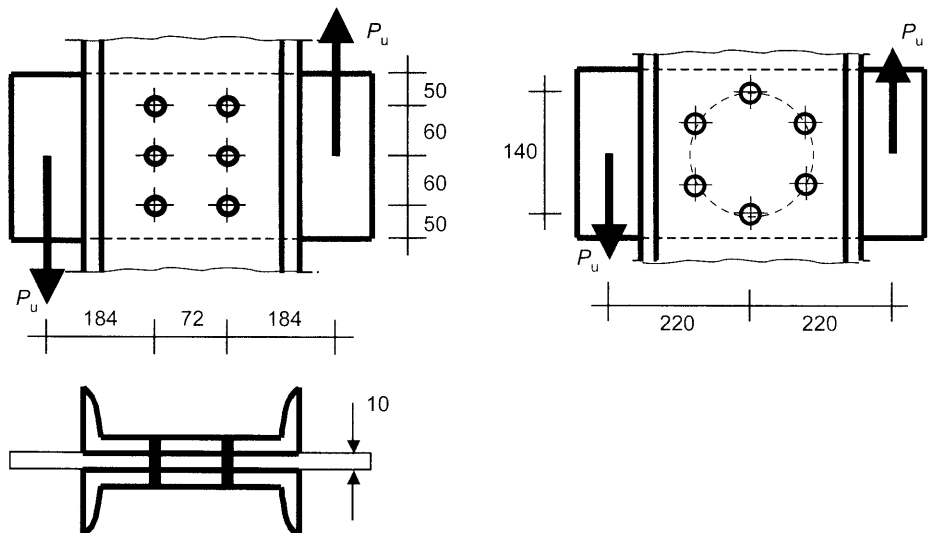
$$R = \sqrt{(R_x + R_H)^2 + (R_y + R_V)^2}$$

$$R = \sqrt{(1,85 + 1)^2 + (1,23 + 0,75)^2} = 3,47 \text{ ton}$$

#### ■ CONTOH 6.6:

Dua buah profil CNP 24 dihubungkan dengan pelat setebal 10 mm, sebagai alat sambung digunakan baut A325  $d_b = 22$  mm (tanpa ulir dalam bidang geser). Tersedia dua pola baut seperti dalam gambar, yaitu pola I dan pola II. Pada kondisi tersebut bekerja beban terfaktor  $P_u$  yang sama besar dan berlawanan arah. Jika diketahui perbandingan beban hidup dengan beban mati adalah 3 ( $L = 3D$ ):

- tentukan pola mana yang lebih baik
- dengan pola yang lebih baik tersebut, hitung beban kerja yang dapat dipikul



tersebut  
ontal, di

**JAWAB:**

**Pola baut I:** baut yang menerima gaya terbesar adalah baut-baut atas dan bawah

$$M = P_u \cdot (184 + 72 + 184) = 440 P_u$$

$$r_1 = \sqrt{36^2 + 60^2} = 70 \text{ mm}$$

$$R_1 = \frac{M \cdot r_1}{\sum r^2} = \frac{440 \cdot P_u \cdot 70}{(4 \times 70^2) + (2 \times 36^2)} = 1,3879 \cdot P_u$$

**Pola baut II :** semua baut menerima gaya yang sama besar

$$M = P_u \cdot (220 + 220) = 440 P_u$$

$$r = 70 \text{ mm}$$

$$R = \frac{M \cdot r}{\sum r^2} = \frac{440 \cdot P_u \cdot 70}{6 \times 70^2} = 1,0476 \cdot P_u$$

Ternyata pola baut II lebih baik, gaya yang dipikul tiap baut sama besar dan lebih kecil daripada gaya maksimum baut 1 pada pola I.

Selanjutnya menghitung tahanan satu buah baut:

$$\text{Geser: } \phi \cdot R_n = \phi \cdot 0,5 \cdot f_u^b \cdot m \cdot A_b = 0,75(0,5)(825)(2)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2) = 23,52 \text{ ton}$$

$$\text{Tumpu: } \phi \cdot R_n = \phi \cdot 2,4 \cdot d_b \cdot t_p \cdot f_u^p = 0,75(2,4)(22)(10)(370) = 14,652 \text{ ton}$$

Tahanan tumpu menentukan!

$$1,0476 \cdot P_u \leq 14,652 \text{ ton}$$

$$P_u \leq 13,986 \text{ ton}$$

$$13,986 > 1,2D + 1,6L$$

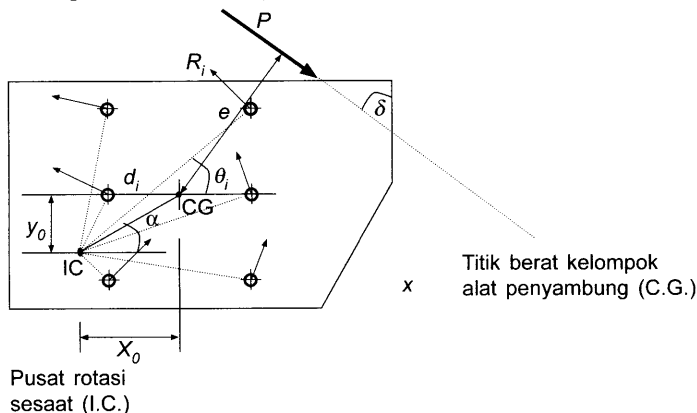
$$13,986 > 1,2D + 1,6(3D) = 6D$$

$$D \leq 2,331 \text{ ton} \quad L \leq 6,993 \text{ ton}$$

Beban kerja yang boleh bekerja  $D + L \leq \mathbf{9,324 \text{ ton}}$  ( $= 2,331 + 6,993$ )

**Analisa Plastis**

Cara analisa ini dianggap lebih rasional dibandingkan dengan cara elastik. Beban  $P$  yang bekerja dapat menimbulkan translasi dan rotasi pada kelompok baut. Translasi dan rotasi ini dapat direduksi menjadi rotasi murni terhadap pusat rotasi sesaat. Lihat gambar 6.6.



**Gambar 6.6** Pusat Rotasi Sesaat

Dari persamaan kesetimbangan diperoleh hubungan:

$$\sum F_h = 0 \quad \sum_{i=1}^n R_i \cdot \sin \theta_i - P \sin \delta = 0 \quad 6.22$$

$$\sum F_v = 0 \quad \sum_{i=1}^n R_i \cdot \cos \theta_i - P \cos \delta = 0 \quad 6.23$$

$$\sum M = 0 \quad \sum_{i=1}^n R_i \cdot d_i - P(e + x_o \cdot \cos \delta + y_o \cdot \sin \delta) = 0 \quad 6.24$$

Dengan substitusi:  $r_o = x_o \cdot \cos \delta + y_o \cdot \sin \delta$ , persamaan 6.24 menjadi:

$$\sum M = 0 \quad \sum_{i=1}^n R_i \cdot d_i - P(e + r_o) = 0 \quad 6.25$$

Di mana  $r_o$  adalah jarak terdekat antara pusat rotasi sesaat (IC) dengan titik berat baut (CG).

### Sambungan Tipe Tumpu

Untuk sambungan tipe tumpu, slip diabaikan dan deformasi tiap alat pengencang proporsional terhadap jaraknya ke pusat rotasi sesaat. Analisa dilakukan sebagai berikut:

$$R_i = R_{ni} [1 - \exp(-0,4 \Delta_i)]^{0,55} \quad 6.26$$

Dengan:  $R_i$  adalah tahanan nominal satu baut

$\Delta_i$  adalah deformasi baut  $i$  dalam mm,

$\Delta_{max}$  dari hasil eksperimental adalah sama dengan 8,6 mm

### ■ CONTOH 6.7:

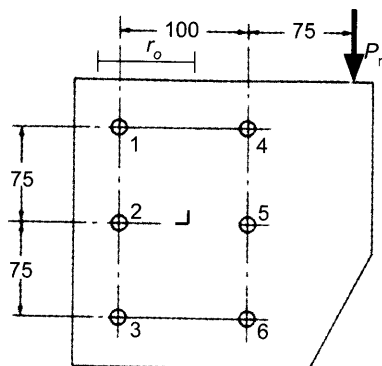
Hitung  $P_n$  yang boleh bekerja pada sambungan berikut ini, lakukan analisa plastis. Alat sambung yang digunakan adalah baut A325 ( $d_b = 22$  mm,  $f_u^b = 825$  MPa) tanpa ulir dalam bidang geser.

### JAWAB:

$$e = 75 + 50 = 125 \text{ mm}$$

$$R_{ni} = 0,5 f_u^b A_b m = 0,5(825)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2)(1) = 15,68 \text{ ton}$$

$$R_i = R_{ni} [1 - \exp(-0,4 \Delta_i)]^{0,55}$$



jawab

in lebih kecil

on

Beban  $P$  yang  
lasi dan rotasi  
gambar 6.6.



Beban bekerja pada sumbu  $y$ ,  $\delta = 0$ , dengan mengganti  $y_i/d_i$  untuk  $\sin \theta_i$  serta  $x_i/d_i$  untuk  $\cos \theta_i$ , maka persamaan 6.22, 6.23, 6.25 menjadi:

$$\sum R_i \cdot \frac{y_i}{d_i} = 0 \quad 6.26$$

$$\sum R_i \cdot \frac{x_i}{d_i} = P_n \quad 6.27$$

$$\sum R_i \cdot d_i = P_n (e + r_o) \quad 6.28$$

Ingat juga asumsi:  $\frac{d_i}{d_{\max}} = \frac{d_i}{d_{\max}} \cdot 8,6$

Persamaan 6.25 hingga 6.27 diselesaikan dengan *trial and error*.

1. Misalkan  $r_o$  diambil sama dengan 75 mm, proses hitungan ditabelkan sebagai berikut:

No. baut	$x_i$	$y_i$	$d_i$	$\Delta_i$	$R_i$	$(R_i \cdot x_i / d_i)$	$R_i \cdot d_i$
1	25	75	79,057	4,664	14,295	4,520	1130,090
2	25	0	25,000	1,475	10,053	10,053	251,323
3	25	-75	79,057	4,664	14,295	4,520	1130,090
4	125	75	145,774	8,600	15,401	13,207	2245,127
5	125	0	125,000	7,374	15,223	15,223	1902,883
6	125	-75	145,774	8,600	15,401	13,207	2245,127
$\Sigma$						60,730	8904,640

Dari persamaan 6.27 didapat  $P_n = 60,730$  ton

Dari persamaan 6.28 didapat  $P_n = \frac{8904,640}{(125 + 75)} = 44,5232$  ton

Karena hasil tidak cocok, proses diulangi lagi.

2. Coba  $r_o = 51,46$  mm

No. baut	$x_i$	$y_i$	$d_i$	$\Delta_i$	$R_i$	$(R_i \cdot x_i / d_i)$	$R_i \cdot d_i$
1	1,46	75	75,014	5,113	14,530	0,283	1089,942
2	1,46	0	1,460	0,100	2,634	2,634	3,845
3	1,46	-75	75,014	5,113	14,530	0,283	1089,942
4	101,46	75	126,171	8,600	15,401	12,385	1943,217
5	101,46	0	101,460	6,916	15,130	15,130	1535,055
6	101,46	-75	126,171	8,600	15,401	12,385	1943,217
$\Sigma$						43,099	7605,219

Dari persamaan 6.27 didapat  $P_n = 43,099$  ton

Dari persamaan 6.28 didapat  $P_n = \frac{7605,219}{(125 + 51,46)} = 43,0988$  ton

OK

**Sambungan Tipe Friksi**

Analisa hampir sama dengan tipe tumpu hanya saja  $R_i$  konstan yaitu:

$$R_i = 1,13 \times \mu \times \text{Proof Load} \times m \quad 6.29$$

**■ CONTOH 6.8:**

Kerjakan kembali contoh 6.7 sebagai sambungan tipe friksi. Karena  $R_i$  konstan, maka persamaan 6.25, 6.26, dan 6.27 menjadi:

$$R_i \sum \frac{y_i}{d_i} = 0 \quad 6.30$$

$$R_i \sum \frac{x_i}{d_i} = P \quad 6.31$$

$$R_i \sum d_i = P(e + r_o) \quad 6.32$$

**JAWAB:**

Dengan cara *trial and error*, diperoleh hasil,  $r_o = 59,569$  mm.

No. Baut	xi	yi	di	xi/di
1	9,569	75	75,60797	0,12656
2	9,569	0	9,56900	0,00000
3	9,569	-75	75,60797	0,12656
4	109,569	75	132,77939	0,82520
5	109,569	0	109,56900	1,00000
6	109,569	-75	132,77939	0,82520
$\Sigma$			535,91272	2,90351

Dari 6.31:  $P_n = R_i \cdot 2,90351$

Dari 6.32:  $P_n = \frac{R_i(535,91272)}{(125 + 59,569)} = R_i \cdot 2,90359$

Karena  $R_i = 1,13 \times 0,35 \times \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2 \times 0,75 \times 585 \times 1 = 6,5963$  ton (digunakan baut A325,  $d_b = 22$  mm), sehingga  $P_n = 2,90359 \times 6,5963 = \mathbf{19,153}$  ton.

**4 KOMBINASI GESER DAN TARIK**

Pada umumnya sambungan yang ada merupakan kombinasi geser dan tarik. Contoh sambungan yang merupakan kombinasi geser dan tarik terlihat pada Gambar 6.7. Pada sambungan (a) akibat momen maka baut tepi atas akan mengalami tarik yang sebanding dengan momen yang bekerja. Sambungan ini digunakan bila momen tidak terlalu besar, dan untuk momen yang besar biasanya digunakan sambungan, (b) momen disalurkan melalui sayap dan diterima oleh baut-baut pada sayap tersebut.

**Sambungan Tipe Tumpu**

Persamaan interaksi geser dan tarik dari berbagai studi eksperimental, dapat direpresentasikan sebagai persamaan lingkaran berikut ini:

$$\left[ \frac{R_{uv}}{\phi_t \cdot R_{nt}} \right]^2 + \left[ \frac{R_{uv}}{\phi_v \cdot R_{nv}} \right]^2 \leq 1 \quad 6.33$$

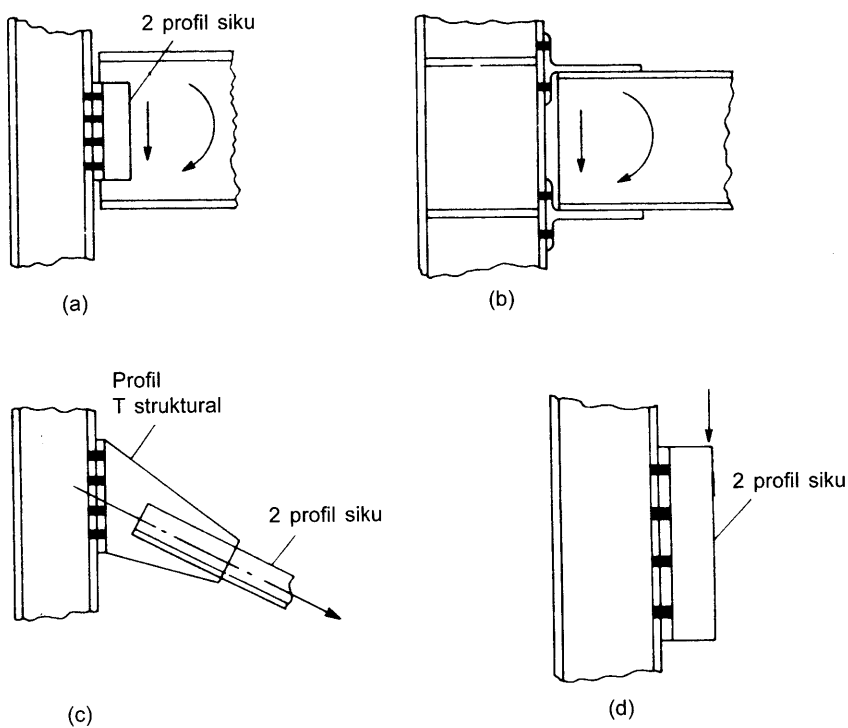
Dengan:  $R_{ut}$  adalah beban tarik terfaktor pada baut  
 $R_{uv}$  adalah beban geser terfaktor pada baut  
 $\phi_t \cdot R_{nt}$  adalah tahanan rencana pada baut dalam tarik saja  
 $\phi_v \cdot R_{nv}$  adalah tahanan rencana pada baut dalam geser saja  
 $\phi_t, \phi_v = 0,75$

$R_{nt}$  dan  $R_{nv}$  masing-masing adalah tahanan nominal tarik dan geser yang besarnya:

$$R_{nt} = 0,75 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad 6.34$$

$$R_{nv} = m \cdot 0,5 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad 6.35.a$$

$$\text{atau } R_{nv} = m \cdot 0,4 \cdot f_u^b \cdot A_b \quad 6.35.b$$



**Gambar 6.7** Sambungan Kombinasi Geser dan Tarik

Persamaan 6.35.a untuk baut tanpa ulir dalam bidang geser, sedangkan 6.35.b untuk baut dengan ulir pada bidang geser.

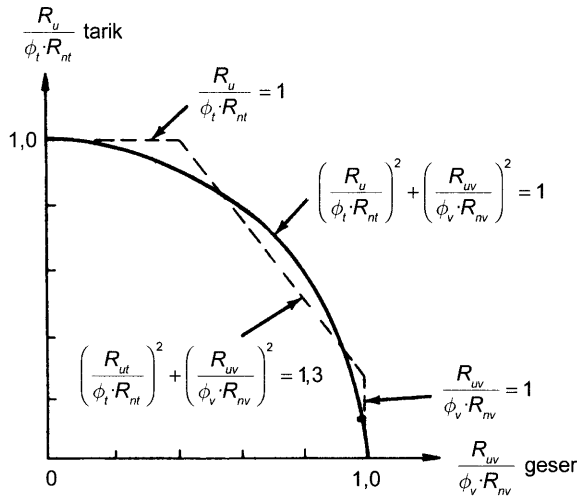
Peraturan menyederhanakan persamaan interaksi geser-tarik pada 6.32, menjadi sebuah persamaan garis lurus:

$$\left[ \frac{R_u}{\phi_t \cdot R_{nt}} \right]^2 + \left[ \frac{R_{uv}}{\phi_v \cdot R_{nv}} \right]^2 \leq C \quad 6.36$$

Dengan C adalah suatu konstanta.

Persamaan 6.36 dapat dituliskan sebagai:

$$R_u \leq C \cdot \phi_t \cdot R_{nt} - \frac{\phi_t \cdot R_{nt}}{\phi_v \cdot R_{nv}} \cdot R_{uv} \quad 6.37$$



Gambar 6.8 Kurva Interaksi Tahanan Geser-Tarik (Sambungan Tipe Tumpu)

Bagi persamaan 6.37 dengan  $A_b$  (luas penampang baut), dan substitusikan  $R_{nt}$  dan  $R_{nv}$  dari persamaan 6.34 dan 6.35. diperoleh:

$$\frac{R_u}{A_b} \leq C \frac{\phi(0,75 \cdot f_u^b) \cdot A_b}{A_b} - \frac{\phi(0,75 \cdot f_u^b) \cdot A_b}{0,75 \cdot (0,5 \cdot f_u^b) \cdot A_b} \frac{R_{uv}}{A_b} \quad 6.38$$

$$f_{ut} \leq [\phi \cdot f_t = \phi \cdot (0,75 \cdot f_u^b \cdot C - 2 \cdot f_{uv})] \quad 6.39$$

Untuk baut dengan ulir pada bidang geser diperoleh:

$$f_{ut} \leq [\phi \cdot f_t = \phi \cdot (0,75 \cdot f_u^b \cdot C - 2,5 \cdot f_{uv})] \quad 6.40$$

Nilai konstanta C dalam peraturan ditetapkan besarnya adalah 1,3. Nilai 2 dan 2,5 (koefisien  $f_{uv}$ ) dalam peraturan direduksi menjadi 1,5 dan 1,9. Besarnya nilai  $\phi \cdot f_t$  untuk masing-masing mutu baut ditabelkan berikut ini dalam Tabel 6.2.

Dalam perencanaan sambungan yang memikul kombinasi geser dan tarik, ada dua persyaratan yang harus dipenuhi:

$$1. \quad f_{uw} = \frac{V_u}{n \cdot A_b} \leq \begin{cases} 0,5 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m & \text{Tanpa ulir di bidang geser} \\ 0,4 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m & \text{Dengan ulir di bidang geser} \end{cases} \quad 6.41$$

$$2. \quad \phi \cdot R_{nt} = \phi \cdot f_t \cdot A_b > \frac{T_u}{n} \quad 6.42$$

TABEL 6.2 NILAI  $\phi \cdot f_t$  UNTUK BERBAGAI TIPE BAUT

Tipe Baut	$\phi \cdot f_t$
A325 dengan ulir di bidang geser	$\phi \cdot (807 - 1,9 f_{uv}) < \phi \cdot 621$
A325 tanpa ulir di bidang geser	$\phi \cdot (807 - 1,5 f_{uv}) < \phi \cdot 621$
A490 dengan ulir di bidang geser	$\phi \cdot (1010 - 1,9 f_{uv}) < \phi \cdot 779$
A490 tanpa ulir di bidang geser	$\phi \cdot (1010 - 1,5 f_{uv}) < \phi \cdot 779$

### Sambungan Tipe Friksi

Untuk sambungan tipe friksi berlaku hubungan:

$$\frac{V_u}{n} \leq \phi \cdot V_n \left( 1 - \frac{T_u / n}{1,13 \times \text{proofload}} \right) \quad 6.43$$

Dengan:  $V_n = 1,13 \cdot \mu \cdot \text{proof load} \cdot m$

$\text{Proof load} = 0,75 \times A_b \times \text{proof stress}$

$A_b$  adalah luas bruto baut

$T_u$  adalah beban tarik terfaktor

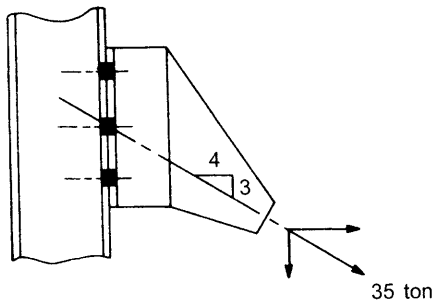
$n$  adalah jumlah baut

5.5 S

#### ■ CONTOH 6.9:

Hitung kecukupan jumlah baut bagi sambungan berikut ini (tipe tumpu dan tipe friksi), diketahui beban terdiri dari 10% beban mati dan 90% beban hidup. Baut A325 tanpa ulir di bidang geser.

**JAWAB:**



$$P_u = 1,2(0,1)(35) + 1,6(0,9)(35)$$

$$P_u = 54,6 \text{ ton}$$

$$T_u = P_{ux} = 0,8 \times 54,6 = 43,68 \text{ ton}$$

$$V_u = P_{uy} = 0,6 \times 54,6 = 32,76 \text{ ton}$$

a. Sambungan tipe tumpu:

$$\text{Geser: } f_{uv} = \frac{V_u}{n \cdot A_b} = \frac{32,76}{6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2} = 143,634 \text{ MPa}$$

$$0,5 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m = 0,5 \times 0,75 \times 825 \times 1 = 309,375 \text{ MPa}$$

$$f_{uv} < 0,5 \cdot \phi \cdot f_u^b \cdot m$$

OK

$$\text{Tarik: } f_t = 807 - 1,5 \cdot f_{uv} = 807 - (1,5 \times 143,634) = 591,549 \text{ MPa}$$

$$\phi \cdot R_n = \phi \cdot f_t \cdot A_b = 0,75 \times 591,549 \times \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2 = 16,865 \text{ ton}$$

$$T_u / n = 43,68 / 6 = 7,28 \text{ ton}$$

$$T_u / n < \phi \cdot R_n$$

OK

b. Sambungan tipe friksi

$$V_n = 1,13 \times \mu \times \text{proof load} \times m$$

$$= 1,13 \times 0,35 \times 1 \times \text{proof load} = 0,3955$$

$$\text{proof load} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2 \times 0,75 \times 585 = 16,68 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot V_n = 1 \times 0,3955 \times 16,68 = 6,597 \text{ ton}$$

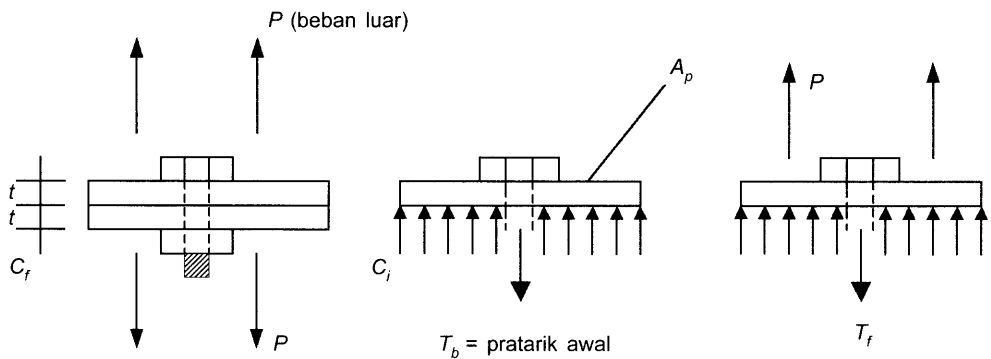
$$V_u / n = 32,76 / 6 = 5,46 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot V_n \left( 1 - \frac{T_u / n}{1,13 \cdot \text{proofload}} \right) = 6,597 \cdot \left( 1 - \frac{43,86 / 6}{1,13 \times 16,68} \right) = 4,038 \text{ ton}$$

$$V_u / n > \phi \cdot V_n \text{ (baut tak mencukupi untuk sambungan tipe friksi!!)}$$

### 6.5 SAMBUNGAN YANG MENGALAMI BEBAN TARIK AKSIAL

Tarik aksial yang terjadi tak bersamaan dengan geser, dijumpai pada batang-batang tarik seperti penggantung (*hanger*) atau elemen struktur lain yang garis kerja bebannya tegak lurus dengan batang yang disambung. Untuk memahami efek akibat beban eksternal pada baut mutu tinggi yang diberi gaya tarik awal, perhatikan sebuah baut dan daerah pengaruhnya pada pelat yang disambung. Pelat yang disambung mempunyai ketebalan  $t$  dan luas kontak antara pelat adalah  $A_p$ .



**Gambar 6.9** Pengaruh Pratarik Awal Akibat Beban Tarik Aksial

Pada saat pemasangan awal, baut mutu tinggi sudah diberi gaya pra tarik awal  $T_b$ , hal ini mengakibatkan pelat tertekan sebesar  $C_f$  dari keseimbangan gaya:

$$C_i = T_b \quad 6.44$$

Beban luar akhirnya bekerja, sehingga keseimbangan gaya sekarang seperti tampak dalam Gambar 6.9.c.:

$$P + C_f = T_f \quad 6.45$$

Gaya  $P$  mengakibatkan baut memanjang sebesar:

$$\delta_b = \frac{T_f - T_b}{A_b \cdot E_b} \cdot t \quad 6.46$$

Pada saat yang sama tekanan di antara pelat mengakibatkan pelat memendek sebesar:

$$\delta_p = \frac{C_i - C_f}{A_p \cdot E_p} \cdot t \quad 6.47$$

Dengan:  $E_b$   $E_p$  adalah modulus elastisitas baut dan pelat  
 $T_f$  adalah gaya akhir yang bekerja pada baut setelah beban bekerja  
 $C_f$  adalah gaya tekan akhir antara pelat setelah beban bekerja

Menyamakan  $\delta_b$  dan  $\delta_p$  diperoleh hubungan:

$$\frac{T_f - T_b}{A_b \cdot E_b} = \frac{C_i - C_f}{A_p \cdot E_p} \quad 6.48$$

Substitusikan  $C_i$  dari 6.44 dan  $C_f$  dari 6.45 ke persamaan 6.48 didapatkan:

$$\frac{T_f - T_b}{A_b \cdot E_b} = \frac{T_b - T_f + P}{A_p \cdot E_p} \quad 6.49$$

Karena  $E_b$  dan  $E_p$  sama untuk material baja, maka 6.49 dapat ditulis dalam bentuk:

$$T_f = T_b + \frac{P}{1 + \frac{A_p}{A_b}} \quad 6.50$$

### ■ CONTOH 6.10:

Baut A325 berdiameter 22 mm menerima gaya tarik aksial seperti dalam gambar. Jika  $A_p = 6000 \text{ mm}^2$ . Hitung gaya tarik akhir pada baut ( $T_f$ ) bila beban kerja terdiri dari 20% beban mati dan 80% beban hidup.

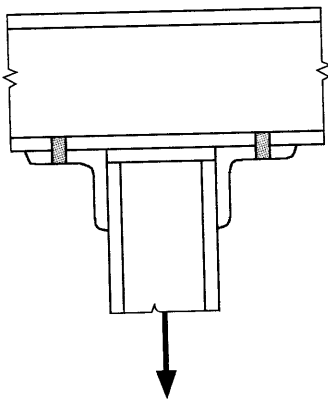
**JAWAB:**

$$\phi R_n = 0,75 f_u^b \cdot 0,75 A_b = 0,75(825)(0,75)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2) = 17,64 \text{ ton}$$

$$R_u = 1,2(0,2R) + 1,6(0,8R) = 1,52 R = 17,64 \text{ ton}$$

$$R = 11,61 \text{ ton}$$

$$T_b = \text{proof stress} \times 0,75 A_b = 585(0,75)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2) = 16,678 \text{ ton}$$



$$\frac{A_p}{A_b} = \frac{6000}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2} = 15,784$$

$$T_f = T_b + \frac{P}{1 + \frac{A_p}{A_b}} = 16,678 + \frac{11,61}{1 + 15,78}$$

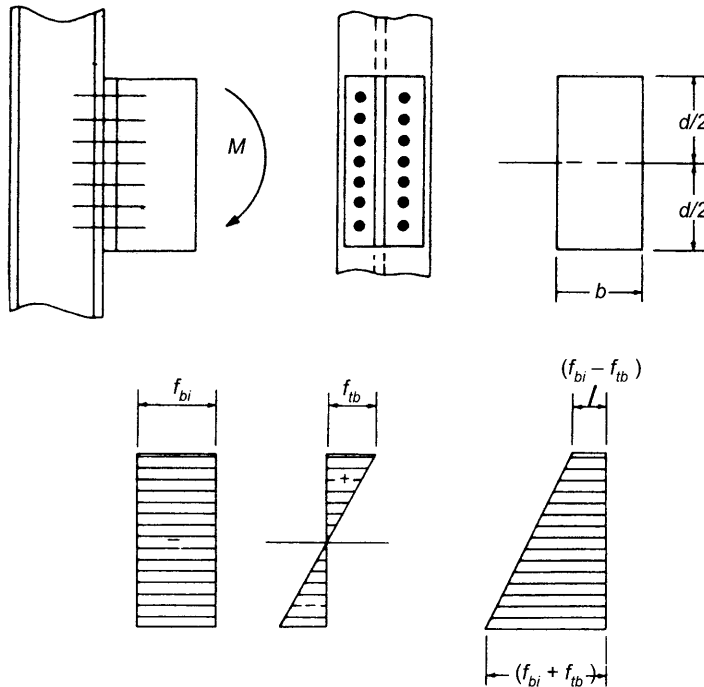
$$T_f = 17,37 \text{ ton}$$

## 6.6 GESER DAN TARIK AKIBAT BEBAN EKSENTRIS

Perhatikan momen  $M$  yang bekerja pada sambungan konsol dalam Gambar 6.10 yang mengakibatkan tarik pada baut atas. Jika digunakan baut mutu tinggi yang mempunyai gaya pra tarik awal, maka gaya ini akan menekan pelat atau penampang yang disambung. Sumbu netral akibat beban momen  $M$  akan terjadi di titik berat daerah kontak.

Tekanan tumpu awal  $f_{bi}$  akibat gaya pratarik, dianggap seragam sepanjang daerah kontak  $b \cdot d$  yang sama dengan:

$$f_{bi} = \frac{\sum T_b}{b \cdot d} \quad 6.51$$



**Gambar 6.10** Geser dan Tarik Akibat Beban Eksentris

Dengan  $\Sigma T_b$  adalah *proof load* kali jumlah baut. Tegangan tarik  $f_{tb}$  pada bagian atas bidang kontak akibat momen  $M$ , adalah:

$$f_{tb} = \frac{M \cdot d / 2}{I} = \frac{6 \cdot M}{b \cdot d^2} \quad 6.52$$

Beban  $T$  pada baut teratas sama dengan perkalian antara daerah pengaruhnya (lebar  $b$  kali jarak antara baut,  $p$ ) dengan  $f_{tb}$ , atau:

$$T = f_{tb} \cdot b \cdot p \quad 6.53$$

Substitusikan persamaan 6.52 ke 6.53 diperoleh hubungan:

$$T = \frac{6 \cdot M \cdot p}{d^2} \quad 6.54$$

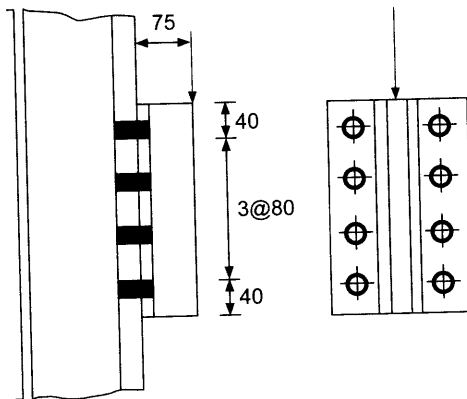
Jika baut terluar berjarak  $p/2$  terhadap bagian atas bidang kontak, maka  $T$  menjadi:

$$T = \frac{6 \cdot M \cdot p}{d^2} \left( \frac{d - p}{d} \right) \quad 6.55$$

#### ■ CONTOH 6.11:

Hitung beban kerja  $P$  dalam sambungan berikut ini, jika digunakan baut A325,  $d_b = 19$  mm (tanpa ulir di bidang geser). Beban yang bekerja terdiri dari 20% beban mati dan 80% beban hidup.



**JAWAB:**

$$P_u = 1,2(0,2P) + 1,6(0,8P) = 1,52.P$$

$$T_u = \frac{6 \cdot M_u \cdot p}{d^2} \left[ \frac{d-p}{d} \right] = \frac{6 \times 1,52 \cdot P \times 75 \times 80}{320^2} \left[ \frac{320-80}{320} \right] = 0,40.P$$

$$V_u = \frac{P_u}{N} = \frac{1,52 \cdot P}{8} = 0,19 \cdot P$$

$$\phi \cdot R_{nv} = 0,75(0,5 f_u^b) m. A_b = 0,75(0,5)(825)(1)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2) = 8,77 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} \phi f_{uv} \cdot A_b &= \phi \cdot A_b \cdot (807 - 1,5 \cdot f_{uv}) < \phi \cdot 621 \cdot A_b \\ &= 0,75(807)A_b - 0,75(1,5 \cdot f_{uv} \cdot A_b) < 0,75(621)A_b \\ &= 0,75(807)(\frac{1}{4})(\pi)(19^2) - 0,75(1,5 \cdot f_{uv} \cdot A_b) \\ &< 0,75(621)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2) \end{aligned}$$

$$\max T_u = 17,16 - 1,125 \cdot V_u < 13,2 \text{ ton}$$

Samakan  $T_u$  dengan  $\max T_u$ :

$$0,4 \cdot P = 17,16 - 1,125(0,19 P)$$

$$P = 27,96 \text{ ton}$$

Periksa  $\max V_u$  dan batas atas  $T_u$  (13,2 ton):

$$V_u = 0,19 \cdot P = 0,19(27,96) = 5,3124 \text{ ton} < 8,77 \text{ ton}$$

$$T_u = 0,4 \cdot P = 0,4(27,96) = 11,184 \text{ ton} < 13,2 \text{ ton}$$

OKSehingga beban kerja  $P$  adalah 27,96 ton.

Cara lain untuk menganalisa sambungan kombinasi geser dan tarik yang menerima beban eksentris dilakukan dengan menghitung tegangan tarik dalam baut dengan memakai teori lentur  $f = M \cdot y / I$ , atau:

$$f_t = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{M \cdot y}{\sum A_b \cdot y^2} \quad 6.56$$

Jika semua baut memiliki ukuran sama, maka gaya tarik  $T$  dalam sebuah baut adalah:

$$T = A_b \cdot f_t = \frac{M \cdot y}{\sum y^2} \quad 6.57$$

Persamaan 6.57 sebenarnya identik dengan 6.55, jika  $d$  dalam 6.55 sama dengan  $n \cdot p$ , di mana  $n$  adalah jumlah baut dalam satu baris, maka 6.55 menjadi:

$$T = \frac{6 \cdot M \cdot p}{n^2 \cdot p^2} \left[ \frac{n \cdot p - p}{n \cdot p} \right] = \frac{12 \cdot M}{n^3 \cdot p^2} \left[ \frac{p(n-1)}{2} \right] \quad 6.58$$

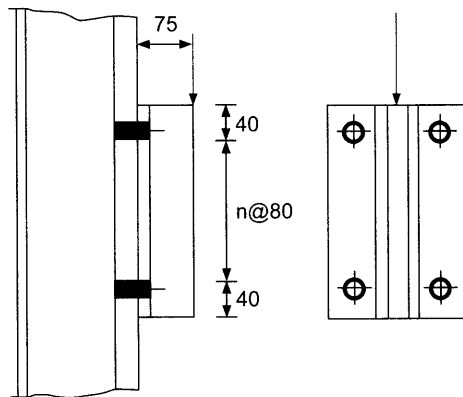
Perhatikan bahwa  $p(n-1)/2$  adalah jarak baut terluar terhadap setengah tinggi kontak area, yang identik dengan  $y$  dalam 6.57. Satu baris baut dengan jarak  $p$  dapat diasumsikan sebagai tampang persegi dengan lebar  $A/p$  dan tinggi  $n \cdot p$ . Momen inersia penampang ini adalah:

$$I = \frac{1}{12} \cdot \frac{A}{p} \cdot (n \cdot p)^3 \quad 6.59$$

Prosedur pendekatan yang terakhir ini lebih mudah daripada cara analisa yang terdahulu.

#### ■ CONTOH 6.12:

Hitung jumlah baut (A325,  $d_b = 22$  mm) untuk sambungan berikut ini, yang menerima beban mati  $D = 3,5$  ton dan beban hidup  $L = 25$  ton.



#### JAWAB:

$$P_u = 1,2(3,5) + 1,6(25) = 44,2 \text{ ton}$$

$$\phi R_{nv} = 0,75(0,5 \cdot f_u^b) m \cdot A_b = 0,75(0,5)(825)(1)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2) = 11,76 \text{ ton}$$

Coba pakai 10 baut (5 buah per baris):

$$\sum y^2 = 4 [160^2 + 80^2] = 128000 \text{ mm}^2$$

$$T_u = \frac{M_u \cdot y}{\sum y^2} = \frac{44,2 \times 150 \times 160}{128000} = 8,2875 \text{ ton}$$

$$V_u = \frac{P_u}{n} = \frac{44,2}{10} = 4,42 \text{ ton} < \phi R_{nv} (= 11,76 \text{ ton})$$

OK

Periksa interaksi geser dan tarik:

$$\begin{aligned} f_t &= (807 - 1,5 \cdot f_{uv}) < 621 \\ &= (807 - 1,5 \cdot \frac{R_{uv}}{A_b}) < 621 \\ &= 807 - 1,5 \cdot \frac{4,42 \cdot 10^4}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2} = 632,58 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gunakan  $f_t = 621 \text{ MPa}$

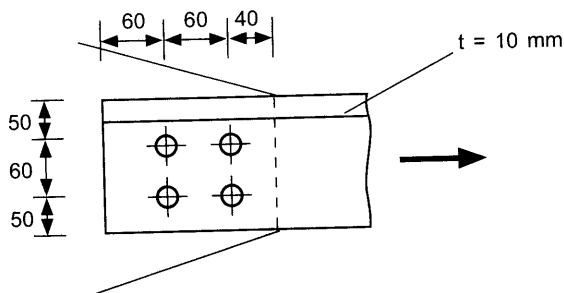
$$\phi \cdot R_{nt} = \phi \cdot f_t \cdot A_b = 0,75(621)(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 22^2) = 17,705 \text{ ton}$$

$$T_u (= 8,2875 \text{ ton}) < \phi \cdot R_{nt} (= 17,705 \text{ ton})$$

OK

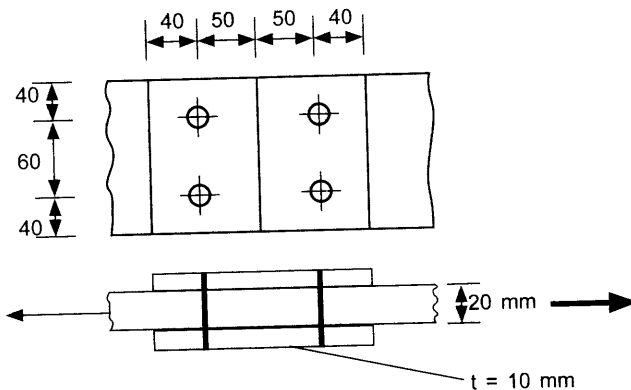
### SOAL-SOAL LATIHAN

- P.6.1** Hitunglah beban kerja layan yang dapat dipikul oleh komponen struktur tarik berikut ini, jika baut yang digunakan adalah baut mutu tinggi A325 berdiameter  $\frac{3}{4}$ " dengan ulir di luar bidang geser, sedangkan mutu pelat baja adalah BJ 37. Diketahui pula bahwa perbandingan beban hidup dan beban mati adalah 3 ( $L/D = 3$ ).



Gambar P.6.1

- P.6.2** Dua buah pelat setebal 20 mm disambung dengan suatu pelat sambung setebal 10 mm seperti tampak dalam gambar. Baut yang dipakai sebagai alat pengencang adalah baut A325 berdiameter  $\frac{5}{8}$ " dengan ulir di luar bidang geser. Mutu pelat baja adalah BJ 37. Hitunglah tahanan tarik rencana yang diperbolehkan bekerja pada komponen struktur tersebut!

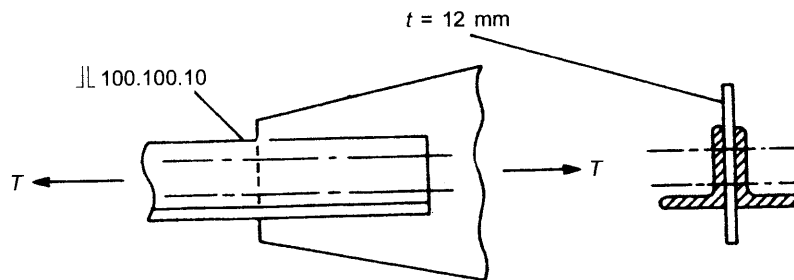


Gambar P.6.2

**P.6.3**

Tentukan jumlah baut yang diperlukan untuk menahan gaya tarik sekuat profil  $\angle 100.100.10$  seperti tampak dalam gambar, untuk beberapa tipe sambungan sebagai berikut:

Kasus	Mutu baja	$\varnothing$ baut	Tipe sambungan
a	BJ 37	$\frac{3}{4}$ " - A 325	Ulir di luar bidang geser
b	BJ 37	$\frac{3}{4}$ " - A 325	Sambungan tanpa slip
c	BJ 37	$\frac{7}{8}$ " - A 325	Ulir di dalam bidang geser
d	BJ 37	$\frac{7}{8}$ " - A 325	Sambungan tanpa slip



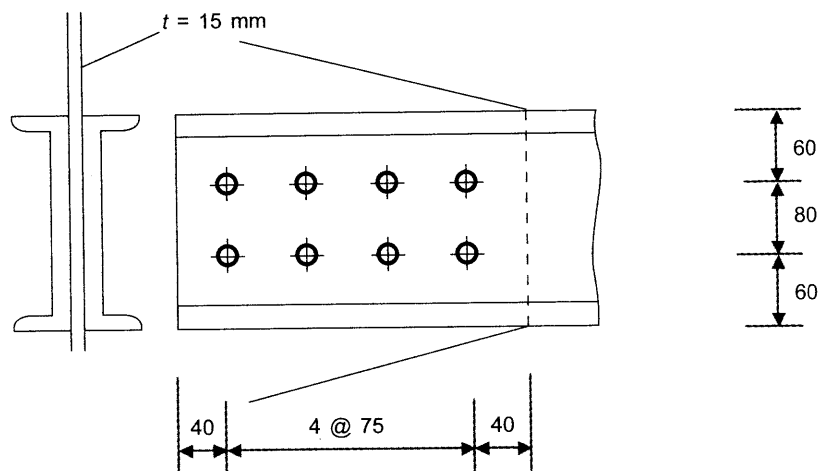
Gambar P.6.3

**P.6.4**

Sebuah batang tarik dari siku tunggal 120.120.12 (BJ 37) digunakan untuk menahan gaya tarik yang terdiri dari 40 kN beban mati dan 120 kN beban hidup. Asumsikan tebal pelat sambung adalah 12 mm. Jika digunakan baut A325 berdiameter  $\frac{1}{2}$ " dengan ulir di luar bidang geser, hitunglah jumlah baut yang dibutuhkan !

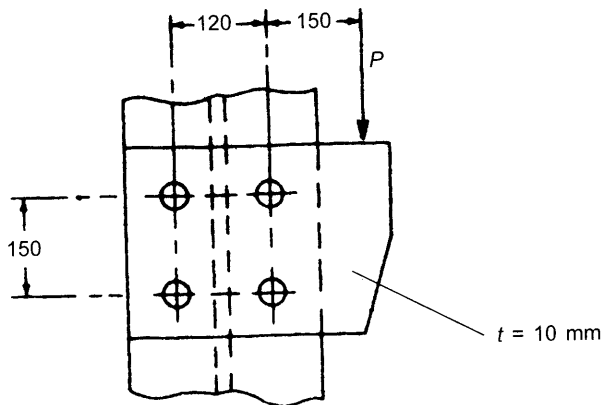
**P.6.5**

Hitunglah besarnya beban layan yang dapat dipikul oleh profil 2CNP20 dari baja BJ 37 seperti pada gambar berikut. Baut yang digunakan adalah A325 berdiameter  $\frac{7}{8}$ " dengan ulir di luar bidang geser. Beban terdiri dari 25% beban mati dan 75% beban hidup.



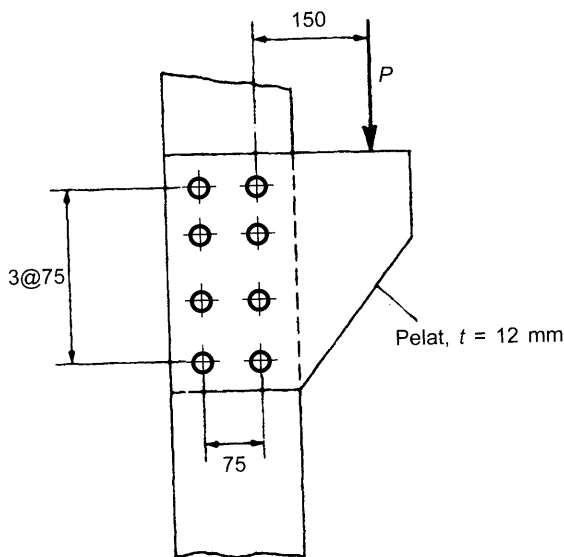
Gambar P.6.5

- P.6.6** Hitunglah besarnya beban layan maksimum,  $P$ , yang menimbulkan geser eksentris pada sambungan dalam Gambar P.6.6. Beban terdiri dari 25% beban mati dan 75% beban hidup. Baut yang digunakan adalah A325 berdiameter  $7/8"$  dengan ulir di luar bidang geser. Asumsikan pelat cukup kuat menahan beban tersebut (BJ 37)
- Gunakan metode elastis
  - Gunakan metode plastis



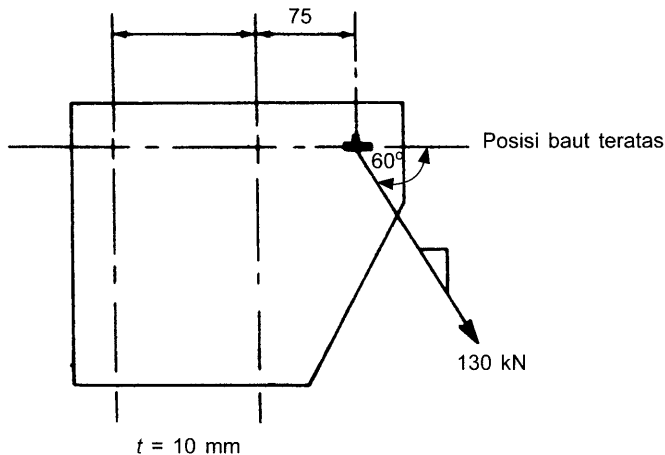
Gambar P.6.6

- P.6.7** Hitunglah besarnya beban layan,  $P$ , yang terdiri dari 20% beban mati dan 80% beban hidup, pada sambungan yang terlihat dalam Gambar P.6.7, gunakan baut A325 berdiameter  $7/8"$  dengan ulir di dalam bidang geser. Mutu baja BJ 37
- Gunakan metode elastis
  - Gunakan metode plastis



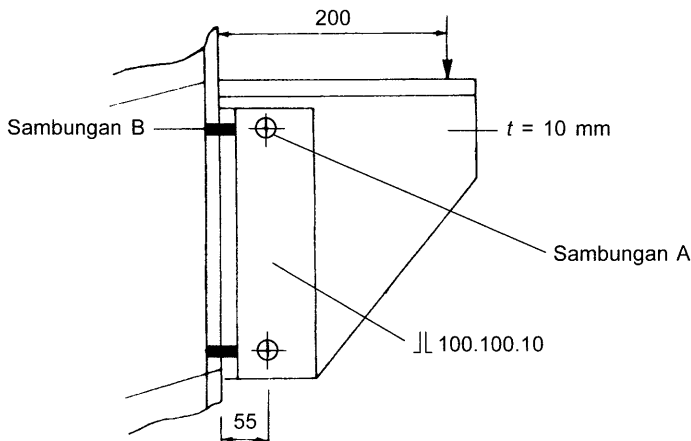
Gambar P.6.7

- 6.8 Rencanakan sambungan geser eksentris dalam Gambar P.6.8 dengan baut A325 berdiameter  $\frac{7}{8}$ ". Disyaratkan bahwa baut disusun dalam dua lajur dengan jarak vertikal antar baut adalah 75 mm. Beban terdiri dari 40% beban mati dan 60% beban hidup. Gunakan metode elastis. Mutu baja BJ 37.



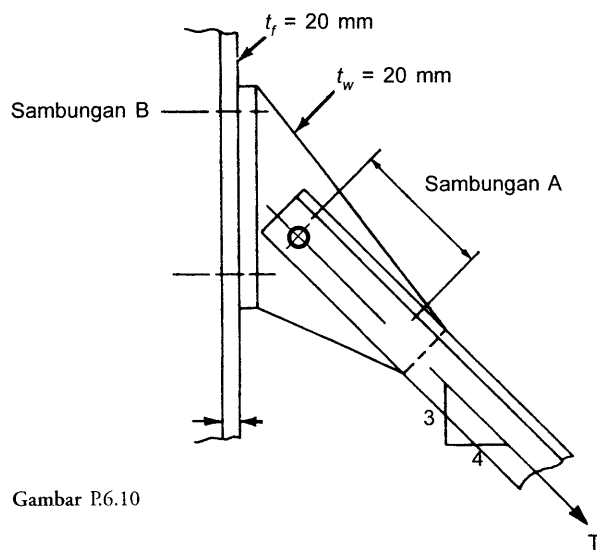
Gambar P.6.8

- 6.9 Sambungan geser eksentris (sambungan A) dalam Gambar P.6.9 berikut ini menggunakan baut A325 berdiameter  $\frac{7}{8}$ " dengan ulir di luar bidang geser. Beban terdiri dari 30 kN beban mati dan 150 kN beban hidup. Hitunglah jumlah baut yang dibutuhkan dengan cara elastis. Berikutnya rencanakan pula sambungan profil  $\angle 100.100.10$  ke flens kolom (sambungan B),  $t_{\text{flens}} = 20$  mm.



Gambar P.6.9

- 6.10 Hitunglah jumlah baut yang dibutuhkan pada sambungan dalam Gambar P.6.10, jika sambungan A direncanakan sebagai sambungan sekuat profil. Gunakan baut A325 berdiameter  $\frac{1}{2}$ " dengan ulir di luar bidang geser.



Gambar P.6.10

# 7

## Sambungan Las

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Mampu membedakan jenis-jenis sambungan las
- Menghitung kapasitas las dari masing-masing jenis las
- Melakukan proses analisis dan desain sambungan konstruksi baja dengan menggunakan berbagai jenis las yang ada

### Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Jenis-jenis Sambungan
- 1.3 Jenis-jenis Las
- 1.4 Pembatasan Ukuran Las Sudut
- 1.5 Luas Efektif Las
- 1.6 Tahanan Nominal Sambungan Las
- 1.7 Geser Eksentris – Metode Elastik
- 1.8 Geser Eksentris – Metode Plastis
- 1.9 Beban Eksentris Normal pada Bidang Las

### 1 PENDAHULUAN

Pengelasan adalah suatu proses penyambungan bahan logam yang menghasilkan peleburan bahan dengan memanaskannya hingga suhu yang tepat dengan atau tanpa pemberian tekanan dan dengan atau tanpa pemakaian bahan pengisi. Meskipun pengetahuan tentang las sudah ada sejak beberapa ribu tahun silam, namun pemakaian las dalam bidang konstruksi dapat terbilang masih baru, hal ini antara lain disebabkan pemikiran para ahli mengenai beberapa kerugian las yaitu bahwa las dapat mengurangi tahanan lelah bahan (*fatigue strength*) dibandingkan paku keling dan mereka juga berpendapat bahwa tidak mungkin untuk memastikan kualitas las yang baik.

Melalui banyak penelitian tentang las, belakangan las mulai banyak digunakan dalam bidang konstruksi. Hal ini antara lain karena proses penyambungan dengan las memberikan beberapa keuntungan, yakni:

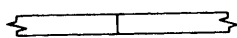
1. dari segi ekonomi, harga konstruksi dengan menggunakan las lebih murah dibandingkan dengan pemakaian baut atau keling, hal ini dikarenakan pemakaian pelat-pelat sambungan maupun pelat buhul dapat dikurangi. Pada konstruksi rangka jembatan bahkan dapat mengurangi berat baja hingga 15% jika dipakai sambungan las
2. pada beberapa jenis elemen struktur tertentu, tidak mungkin memakai baut atau keling untuk menyambungnya, seperti contoh adalah proses penyambungan kolom bundar, tentu lebih memungkinkan untuk memakai las
3. struktur yang disambung dengan las akan lebih kaku daripada baut/keling
4. komponen struktur dapat tersambung secara kontinu
5. mudah untuk membuat perubahan desain dalam struktur
6. tingkat kebisingan dalam pekerjaan las lebih rendah daripada baut/keling



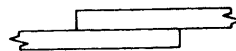
## 7.2 JENIS-JENIS SAMBUNGAN

Beberapa jenis sambungan yang sering ditemui dalam sambungan las adalah:

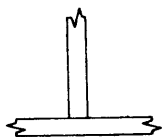
1. **Sambungan sebidang (*butt joint*)**, sambungan ini umumnya dipakai untuk pelat-pelat datar dengan ketebalan sama atau hampir sama, keuntungan sambungan ini adalah tak adanya eksentrisitas. Ujung-ujung yang hendak disambung harus dipersiapkan terlebih dulu (diratakan atau dimiringkan) dan elemen yang disambung harus dipertemukan secara hati-hati.
2. **Sambungan lewatan (*lap joint*)**, jenis sambungan ini paling banyak dijumpai karena sambungan ini mudah disesuaikan keadaan di lapangan dan juga penyambungannya relatif lebih mudah. Juga cocok untuk tebal pelat yang berlain-lain.
3. **Sambungan tegak (*tee joint*)**, sambungan ini banyak dipakai terutama untuk membuat penampang tersusun seperti bentuk I, pelat girder, stiffener,
4. **Sambungan sudut (*corner joint*)**, dipakai untuk penampang tersusun berbentuk kotak yang digunakan untuk kolom atau balok yang menerima gaya torsi yang besar
5. **Sambungan sisi (*edge joint*)**, sambungan ini bukan jenis struktural dan digunakan untuk menjaga agar dua atau lebih pelat tidak bergeser satu dengan lainnya



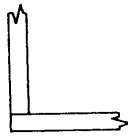
(a) *butt joint*



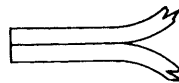
(b) *lap joint*



(c) *tee joint*



(d) *corner joint*



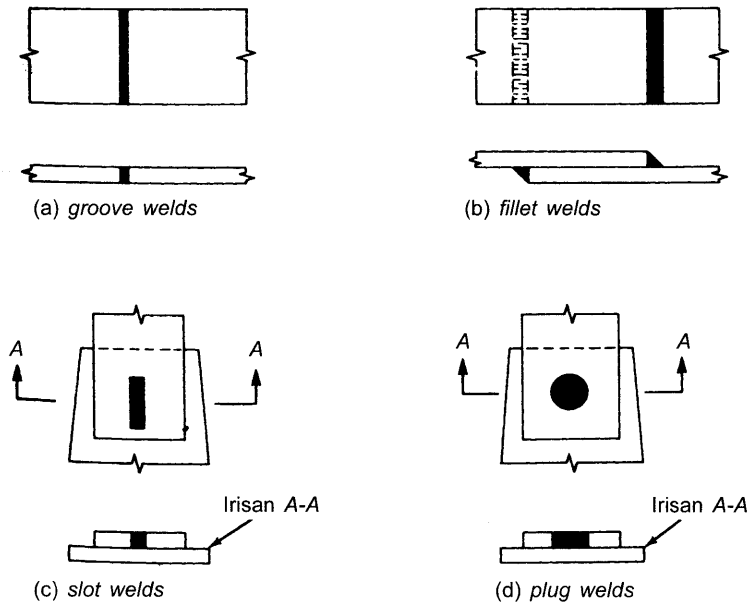
(e) *edge joint*

Gambar 7.1 Tipe-tipe Sambungan Las

## 7.3 JENIS-JENIS LAS

Jenis-jenis las yang sering dijumpai antara lain:

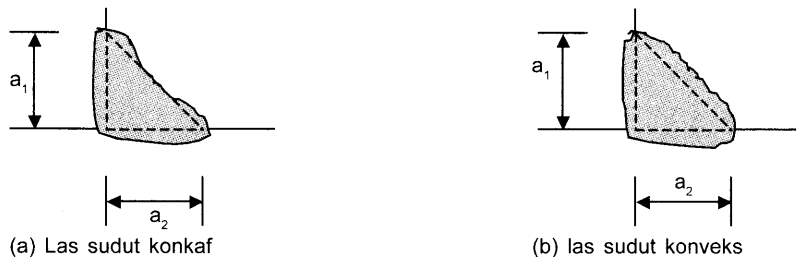
1. **Las tumpul (*groove welds*)**, las ini dipakai untuk menyambung batang-batang sebidang, karena las ini harus menyalurkan secara penuh beban yang bekerja, maka las ini harus memiliki kekuatan yang sama dengan batang yang disambunginya. Las tumpul di mana terdapat penyatuan antara las dan bahan induk sepanjang tebal penuh sambungan dinamakan las tumpul penetrasi penuh. Sedangkan bila tebal penetrasi lebih kecil daripada tebal penuh sambungan, dinamakan las tumpul penetrasi sebagian.
2. **Las sudut (*fillet welds*)**, tipe las ini paling banyak dijumpai dibandingkan tipe las yang lain, 80% sambungan las menggunakan tipe las sudut. Tidak memerlukan presisi tinggi dalam pengerjaannya.
3. **Las baji dan pasak (*slot and plug welds*)**, jenis las ini biasanya digunakan bersama-sama dengan las sudut. Manfaat utamanya adalah menyalurkan gaya geser pada sambungan lewatan bila ukuran panjang las terbatas oleh panjang yang tersedia untuk las sudut.



Gambar 7.2 Jenis-jenis Sambungan Las

#### 7.4 PEMBATASAN UKURAN LAS SUDUT

Ukuran las sudut ditentukan oleh panjang kaki. Panjang kaki harus ditentukan sebagai panjang  $a_1$  dan  $a_2$  (Gambar 7.3). Bila kakinya sama panjang, ukurannya adalah  $t_w$ . Ukuran minimum las sudut, ditetapkan dalam Tabel 7.1.



Gambar 7.3 Ukuran Las Sudut

TABEL 7.1 UKURAN MINIMUM LAS SUDUT

Tebal Pelat ( $t$ , mm) Paling Tebal	Ukuran Minimum Las Sudut ( $a$ , mm)
$t \leq 7$	3
$7 < t \leq 10$	4
$10 < t \leq 15$	5
$15 < t$	6

Sedangkan pembatasan ukuran maksimum las sudut:

- Untuk komponen dengan tebal kurang dari 6,4 mm, diambil setebal komponen
- Untuk komponen dengan tebal 6,4 mm atau lebih, diambil 1,6 mm kurang dari tebal komponen

Panjang efektif las sudut adalah seluruh panjang las sudut berukuran penuh dan paling tidak harus 4 kali ukuran las, jika kurang maka ukuran las untuk perencanaan dianggap sebesar  $\frac{1}{4}$  kali panjang efektif.



Gambar 7.4 Ukuran Maksimum Las

## 7.5 LUAS EFEKTIF LAS

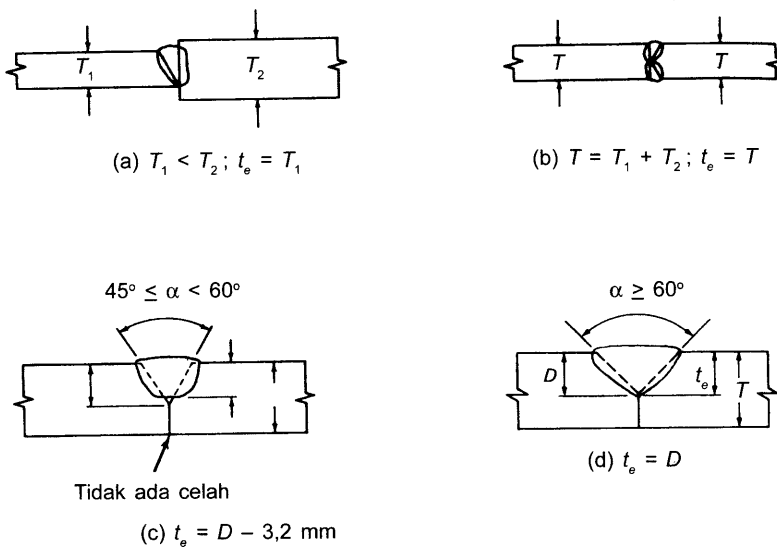
Kekuatan dari berbagai jenis las yang telah dibahas di depan, berdasarkan pada luas efektif las. Luas efektif las sudut dan las tumpul adalah hasil perkalian antara tebal efektif ( $t_e$ ) dengan panjang las. Tebal efektif las tergantung dari ukuran dan bentuk dari las tersebut, dan dapat dianggap sebagai lebar minimum bidang keruntuhan.

### Las Tumpul

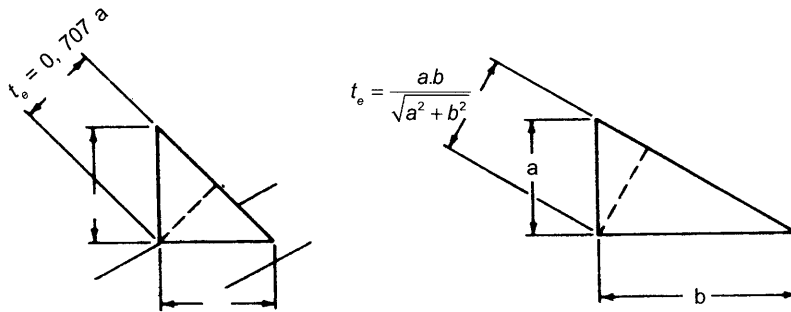
Tebal efektif las tumpul penetrasi penuh adalah tebal pelat yang tertipis dari komponen yang disambung. Untuk las tumpul penetrasi sebagian perhatikan Gambar 7.5.

### Las Sudut

Tebal efektif las sudut adalah jarak nominal terkecil dari kemiringan las dengan titik sudut di depannya. Asumsikan bahwa las sudut mempunyai ukuran kaki yang sama,  $a$ , maka tebal efektif  $t_e$  adalah  $0,707a$ . Jika ukuran las tak sama panjang, maka tebal efektif harus dihitung dengan memakai hukum-hukum trigonometri.



Gambar 7.5 Tebal Efektif Las Tumpul



Gambar 7.6 Tebal Efektif Las Sudut

## 7.6 TAHANAN NOMINAL SAMBUNGAN LAS

Filosofi umum dari LRFD terhadap persyaratan keamanan suatu struktur, dalam hal ini terutama untuk las, adalah terpenuhinya persamaan:

$$\phi \cdot R_{nw} \geq R_u \quad 7.1$$

Dengan:  $\phi$  adalah faktor tahanan  
 $R_{nw}$  adalah tahanan nominal per satuan panjang las  
 $R_u$  adalah beban terfaktor per satuan panjang las

### Las Tumpul

Kuat las tumpul penetrasi penuh ditetapkan sebagai berikut:

- a. Bila sambungan dibebani dengan gaya tarik atau gaya tekan aksial terhadap luas efektif, maka:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot f_y \quad (\text{bahan dasar}) \quad 7.2.a$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot f_{yw} \quad (\text{las}) \quad 7.2.b$$

- b. Bila sambungan dibebani dengan gaya geser terhadap luas efektif, maka:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,90 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_y) \quad (\text{bahan dasar}) \quad 7.3.a$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,80 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \quad (\text{las}) \quad 7.3.b$$

Dengan  $f_y$  dan  $f_u$  adalah kuat leleh dan kuat tarik putus.

### Las Sudut

Kuat rencana per satuan panjang las sudut, ditentukan sebagai berikut:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \quad (\text{las}) \quad 7.4.a$$

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot t_e \cdot (0,6 \cdot f_u) \quad (\text{bahan dasar}) \quad 7.4.b$$

### Las Baji dan Pasak

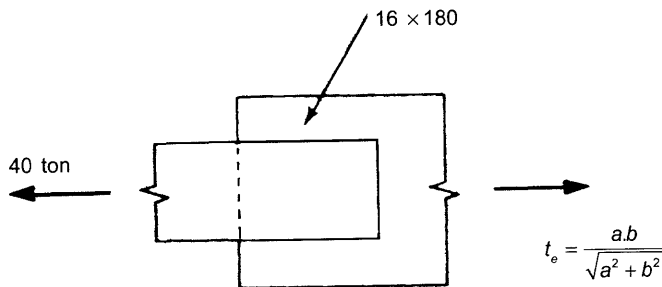
Kuat rencana bagi las baji dan pasak ditentukan:

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot (0,6 \cdot f_{uw}) \cdot A_w \quad 7.5$$

Dengan  $A_w$  adalah luas geser efektif las  
 $f_{uw}$  adalah kuat tarik putus logam las

### ■ CONTOH 7.1:

Tentukan ukuran dan tebal las sudut pada sambungan lewatan berikut ini. Sambungan menahan beban tarik  $D = 10$  ton dan  $L = 30$  ton. Diketahui  $f_{uw} = 490$  MPa;  $f_u = 400$  MPa.



### JAWAB:

Persyaratan ukuran las:

$$\begin{aligned} \text{Maksimum} &= \text{tebal pelat} - 1,6 = 16 - 1,6 = 14,4 \text{ mm} \\ \text{Minimum} &= 6 \text{ mm (Tabel 7.1)} \end{aligned}$$

Gunakan las ukuran 10 mm

$$t_e = 0,707 \cdot a = 0,707 \times 10 = 7,07 \text{ mm}$$

Kuat rencana las sudut ukuran 10 mm per mm panjang:

$$\phi R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot (0,60 \cdot f_{uw}) = 0,75(7,07)(0,60 \times 490) = 1558,935 \text{ N/mm}$$

Dan kapasitas las ini tak boleh melebihi kuat runtuh geser pelat:

$$\text{Max } \phi R_{nw} = \phi \cdot t \cdot (0,60 \cdot f_u) = 0,75(16)(0,60 \times 400) = 2880 \text{ N/mm}$$

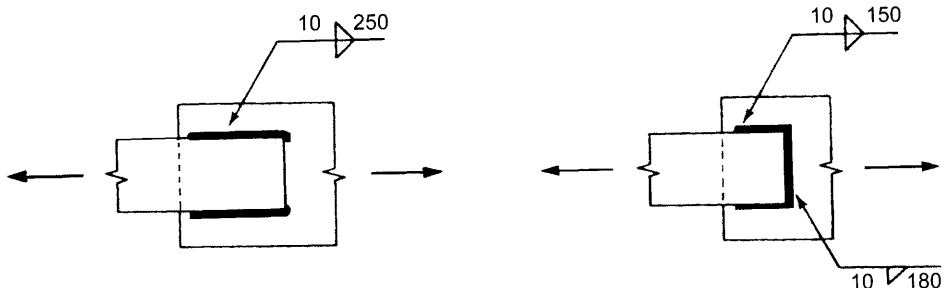
Beban tarik terfaktor,  $T_u$ :

$$T_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(10) + 1,6(30) = 60 \text{ ton}$$

Panjang total las dibutuhkan,  $L_w$ :

$$L_w = \frac{60 \cdot 10^4}{1558,935} = 384,8 \text{ mm} \approx 390 \text{ mm}$$

Jika las sudut yang digunakan hanya berupa las memanjang saja pada batang tarik datar, panjang tiap las sudut tidak boleh kurang dari jarak tegak lurus di antara keduanya, dan panjang total tidak melebihi 1,5 kali panjang yang dibutuhkan. Oleh karena itu, untuk persoalan di atas, maka diambil panjang las tiap sisi adalah 250 mm (Gambar (a)). Dapat pula digabung antara las memanjang dan las melintang, yang dapat mengurangi panjang sambungan lewatan (Gambar (b)).



### Sambungan Seimbang (*Balanced Connection*)

Dalam beberapa kasus, batang menerima tarik aksial yang memiliki eksentrisitas terhadap sambungan las. Perhatikan profil siku yang menerima beban tarik aksial dalam Gambar 7.7 dan disambung dengan memakai las sudut. Gaya  $T$  bekerja pada titik berat profil siku. Beban  $T$  ini akan ditahan oleh gaya  $F_1$ ,  $F_2$ , dan  $F_3$  dari sambungan las. Gaya  $F_1$  dan  $F_3$  diasumsikan bekerja tepat pada sisi profil siku. Gaya  $F_2$  akan bekerja pada titik berat las 2 yang berjarak  $d/2$  dari sisi profil siku. Ambil keseimbangan momen terhadap titik A:

$$\sum M_A = -F_1 \cdot d - F_2 \cdot d/2 + T \cdot e = 0 \quad 7.6$$

atau:

$$F_1 = \frac{T \cdot e}{d} - \frac{F_2}{2} \quad 7.7$$

Gaya  $F_2$  dihitung berdasarkan tahanan las  $\phi \cdot R_{nw}$  kali panjang las,  $L_w$ :

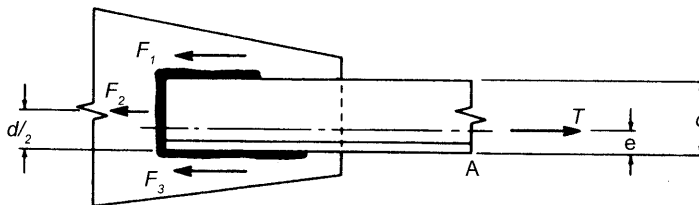
$$F_2 = \phi \cdot R_{nw} \cdot L_w \quad 7.8$$

Dari keseimbangan gaya horizontal diperoleh:

$$\sum F_H = T - F_1 - F_2 - F_3 = 0 \quad 7.9$$

Selesaikan persamaan 7.6 dan 7.9 didapatkan:

$$F_3 = T \left( 1 - \frac{e}{d} \right) - \frac{F_2}{2} \quad 7.10$$



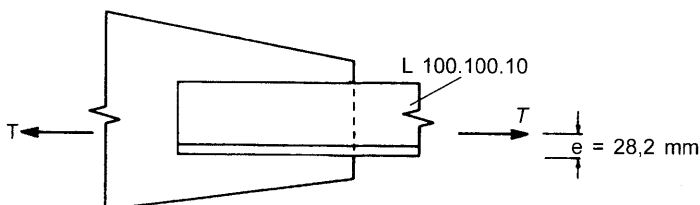
**Gambar 7.7** Penyeimbangan Sambungan Las

Selanjutnya panjang las 1 dan 3 dihitung sebagai berikut:

$$L_{w1} = \frac{F_1}{\phi \cdot R_{nw}} \quad L_{w3} = \frac{F_3}{\phi \cdot R_{nw}} \quad 7.11$$

### ■ CONTOH 7.2 :

Rencanakan sambungan las sudut untuk menahan gaya tarik sekuat profil siku L 100.100.10 dari BJ 37. Mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa.



**JAWAB:**

Hitung tahanan rencana dari profil siku, diambil harga terkecil dari:

$$\phi \cdot T_n = 0,90 \cdot f_y \cdot A_g = 0,90(240)(1920) = 41,472 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75 \cdot f_u \cdot A_e = 0,75(370)(0,85 \times 1920) = 45,288 \text{ ton}$$

Sambungan akan didesain terhadap  $\phi \cdot T_n = 41,472 \text{ ton}$

Pilih ukuran las dan hitung  $\phi \cdot R_{nw}$

$$\text{Ukuran minimum} = 4 \text{ mm (Tabel 7.1)}$$

$$\text{Ukuran maksimum} = 10 - 1,6 = 8,4 \text{ mm}$$

Pakai ukuran las 4 mm

$$\phi \cdot R_{nw} = \phi \cdot t \cdot 0,60 \cdot f_{uw} = 0,75(0,707 \times 4)(0,60)(490) = 623,6 \text{ N/mm}$$

$$\max \phi \cdot R_{nw} = \phi \cdot t \cdot 0,60 \cdot f_u = 0,75(10)(0,60)(370) = 1665 \text{ N/mm}$$

Menentukan ukuran las

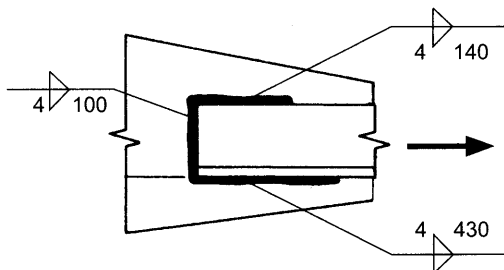
$$F_2 = \phi \cdot R_{nw} \cdot L_{w2} = 623,6 \times 100 = 6,236 \text{ ton}$$

$$F_1 = \frac{T \cdot e}{d} - \frac{F_2}{2} = \frac{41,472 \times 28,2}{100} - \frac{6,236}{2} = 8,58 \text{ ton}$$

$$F_3 = 41,472 - 8,58 - 6,236 = 26,656 \text{ ton}$$

$$L_{w1} = \frac{F_1}{\phi \cdot R_{nw}} = \frac{8,58 \times 10^4}{623,6} = 137,58 \approx 140 \text{ mm}$$

$$L_{w3} = \frac{F_3}{\phi \cdot R_{nw}} = \frac{26,656 \times 10^4}{623,6} = 427,45 \approx 430 \text{ mm}$$

**■ CONTOH 7.3:**

Rencanakan kembali contoh 7.2, namun tanpa las ujung (las 2).

**JAWAB:**

$$F_1 = \frac{T \cdot e}{d} - \frac{F_2}{2} = \frac{41,472 \times 28,2}{100} = 11,7 \text{ ton}$$

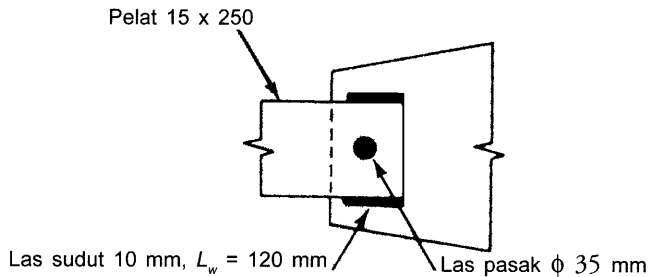
$$F_3 = 41,472 - 11,7 = 29,772 \text{ ton}$$

$$F_1 = \frac{T \cdot e}{d} - \frac{F_2}{2} = \frac{41,472 \times 28,2}{100} = 137,58 \approx 140 \text{ mm}$$

$$L_{w1} = \frac{F_1}{\phi \cdot R_{nw}} = \frac{8,58 \times 10^4}{623,6} = 427,45 \approx 430 \text{ mm}$$

#### ■ CONTOH 7.4:

Hitung beban kerja yang boleh bekerja pada sambungan berikut ini, jika diketahui persentase beban mati adalah 20% dan beban hidup 80%. Pelat yang disambung terbuat dari baja BJ 37 dan mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa.



#### JAWAB:

Hitung kuat rencana dari las sudut berukuran 10 mm dengan panjang 120 mm

$$\phi R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot 0,60 \cdot f_{uw} = 0,75(0,707 \times 10)(0,60)(490) = 1558,935 \text{ N/mm}$$

$$\max \phi R_{nw} = \phi \cdot t \cdot 0,60 \cdot f_u = 0,75(15)(0,60)(370) = 2497,5 \text{ N/mm}$$

$$T_l = L_{wl} \cdot \phi R_{nw} = 2(120)(1558,935) = 37,41 \text{ ton}$$

Kuat rencana yang diberikan oleh las pasak berdiameter 35 mm:

$$T_2 = \phi R_n = 0,75 \times \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 35^2 \times 0,60 \times 490 = 21,21 \text{ ton}$$

$$\phi T_n = T_l + T_2 = 37,41 + 21,21 = 58,62 \text{ ton}$$

Periksa kekuatan pelat:

$$\phi T_n = 0,90 \cdot f_y \cdot A_g = 0,9(240)(15)(250) = 81 \text{ ton}$$

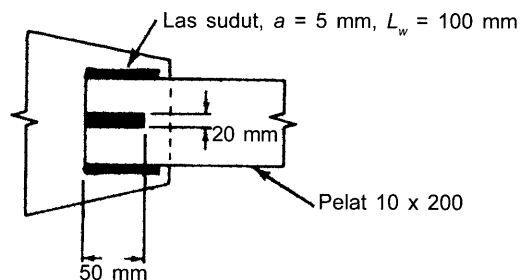
$$\phi T_n = 0,75 \cdot f_u \cdot A_e = 0,75(370)(15)(250) = 104,1 \text{ ton}$$

Kuat rencana las menentukan!!

$$\begin{aligned} \phi T_n = 58,62 &\geq 1,2D + 1,6L \\ &\geq 1,2(0,2T) + 1,6(0,8T) \\ &\geq 1,52T \\ T &\leq 38,56 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### ■ CONTOH 7.5:

Hitung beban kerja sambungan las sudut dan baji berikut ini. Bila diketahui perbandingan beban mati dan hidup adalah 1 : 5 ( $D/L = 1/5$ ). Pelat yang disambung dari baja BJ 37 dan mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa.





**JAWAB:**

Kuat rencana las sudut:

$$\phi \cdot R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot (0,60 \cdot f_{uw}) = 0,75(0,707 \times 5)(0,60)(490) = 779,4675 \text{ N/mm}$$

$$T_1 = L_w \cdot \phi \cdot R_{nw} = 2(100)(779,4675) = 15,58 \text{ ton}$$

Kuat rencana las baji:

$$A_w = (50 - 10) \cdot 20 + 1/8 \cdot \pi \cdot 20^2 = 957 \text{ mm}^2$$

$$T_2 = \phi \cdot R_n = \phi \cdot A_w \cdot 0,60 \cdot f_{uw} = 0,75(957)(0,60)(490) = 21,1 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = T_1 + T_2 = 15,58 + 21,1 = 36,68 \text{ ton}$$

Periksa kekuatan pelat:

$$\phi \cdot T_n = 0,90 \cdot f_y \cdot A_g = 0,90(240)(10)(200) = 43,2 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75 \cdot f_u \cdot A_e = 0,75(370)(10)(200) = 55,5 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} \text{Sehingga } \phi \cdot T_n = 36,68 \text{ ton} &\geq 1,2D + 1,6L \\ &\geq 1,2D + 1,6(5D) \\ &\geq 9,2D \end{aligned}$$

Didapat  $D \leq 3,98 \text{ ton}$  dan  $L \leq 19,9 \text{ ton}$ . Beban kerja  $T \leq 3,98 + 19,9 (= 23,88 \text{ ton})$ .

**7.7 GESER EKSENTRIS – METODA ELASTIK**

Analisa didasarkan pada prinsip mekanika bahan homogen, menggabungkan antara geser langsung dengan puntir. Tegangan pada penampang homogen:

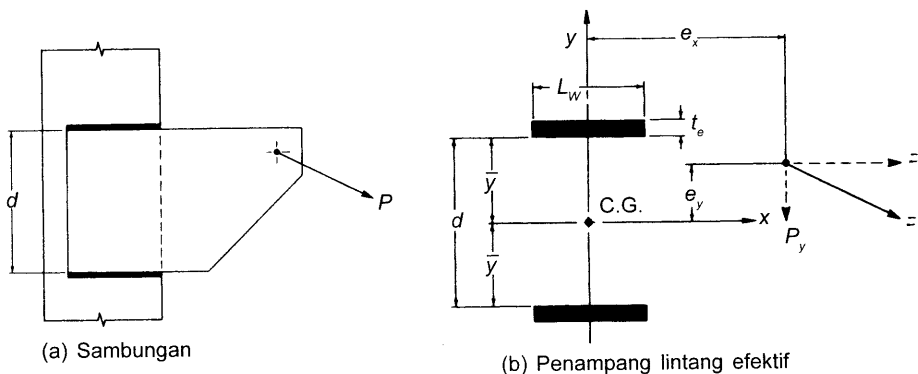
$$f' = \frac{P}{A} \quad (\text{tegangan akibat geser langsung}) \quad 7.12$$

$$f'' = \frac{T \cdot r}{I_p} \quad (\text{tegangan akibat momen puntir}) \quad 7.13$$

Dengan  $r$  adalah jarak dari titik berat ke titik tegangan  
 $I_p$  adalah momen inersia polar

Untuk kasus dalam Gambar 7.8, komponen tegangan yang diakibatkan oleh geser langsung adalah:

$$f'_x = \frac{P_x}{A} \quad f'_y = \frac{P_y}{A} \quad 7.14$$



**Gambar 7.8** Sambungan Konsol dengan Geser Eksentris

Dan tegangan akibat puntiran:

$$f_x'' = \frac{T \cdot y}{I_p} = \frac{(P_x \cdot e_y + P_y \cdot e_x) \cdot y}{I_p} \quad 7.15.a$$

$$f_y'' = \frac{T \cdot x}{I_p} = \frac{(P_x \cdot e_y + P_y \cdot e_x) \cdot x}{I_p} \quad 7.15.b$$

Dengan:

$$I_p = I_x + I_y = \sum I_{xx} + \sum A \cdot \bar{y}^2 + \sum I_{yy} + \sum A \cdot \bar{x}^2 \quad 7.16$$

Momen Inersia polar,  $I_p$ , untuk las dalam Gambar 7.8.b adalah:

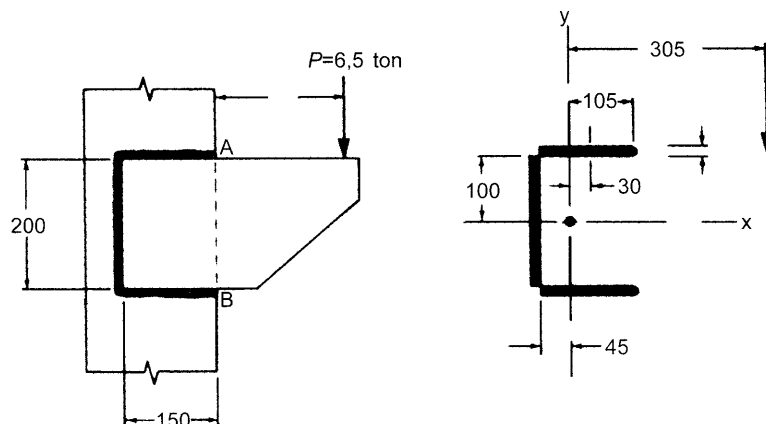
$$\begin{aligned} I_p &= 2 \left[ \frac{L_w \cdot t_e^3}{12} \right] + 2 \left[ L_w \cdot t_e \cdot \bar{y}^2 \right] + 2 \left[ \frac{t_e \cdot L_w^3}{12} \right] \\ &= \frac{t_e}{6} \left[ L_w \cdot t_e^2 + 12 \cdot L_w \cdot \bar{y}^2 + L_w^3 \right] \end{aligned} \quad 7.17$$

Untuk keperluan praktis suku pertama dalam 7.17 diabaikan karena  $t_e$  cukup kecil, sehingga persamaan 7.17 dapat dituliskan kembali sebagai :

$$I_p = \frac{t_e}{6} \left[ 12 \cdot L_w \cdot \bar{y}^2 + L_w^3 \right] \quad 7.18$$

#### ■ CONTOH 7.6:

Hitung beban maksimum (N/mm) pada konfigurasi las berikut ini. Asumsikan ketebalan pelat tak mempengaruhi. Jika diketahui pula beban terdiri dari beban mati 20% dan beban hidup 80%, rencanakan ukuran las yang mencukupi ( $f_{uw} = 490$  MPa)



#### JAWAB:

Hitung letak titik berat kelompok las, ambil statis momen terhadap las tegak:

$$\bar{x} = \frac{2 \times 150 \times 75}{(2 \times 150) + 200} = 45 \text{ mm}$$

Panjang las,  $L_w = (2 \times 150) + 200 = 500 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{1}{12} \cdot 200^3 + (150 \cdot 100^2 \cdot 2) + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 150^3 + (2 \cdot 150 \cdot 30^2) + 200 \cdot 45^2 \\ &= 4904166,67 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Komponen Gaya pada las di titik A dan B akibat geser langsung:

$$R_V = \frac{P}{L_w} = \frac{6,5 \cdot 10^4}{500} = 130 \text{ N/mm} \quad \downarrow$$

Komponen gaya akibat torsi terhadap titik berat las:

$$R_x = \frac{T \cdot y}{I_p} = \frac{6,5 \cdot 10^4 \times 305 \times 100}{4701666,667} = 404,25 \text{ N/mm} \quad \rightarrow$$

$$R_y = \frac{T \cdot x}{I_p} = \frac{6,5 \cdot 10^4 \times 305 \times 105}{4701666,667} = 424,46 \text{ N/mm} \quad \downarrow$$

Resultan gaya,  $R$ :

$$R = \sqrt{421,66^2 + (442,74 + 130)^2} = 686,18 \text{ N/mm}$$

Gaya terfaktor,  $P_u$ :

$$P_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(0,2 \times 6,5) + 1,6(0,8 \times 6,5) = 9,88 \text{ ton}$$

Gaya terfaktor yang bekerja pada las,  $R_u$ :

$$R_u = R \cdot (P_u/P) = 711,216 (9,88/6,5) = 1042,99 \text{ N/mm}$$

Tahanan oleh las,  $\phi \cdot R_{nw}$ :

$$\phi \cdot R_{nw} = 0,75 \cdot t_e \cdot 0,60 \cdot f_{uw} = 0,75 (0,707 \cdot a) 0,60 \times 490 = 155,8935 a$$

Untuk mencari ukuran las, samakan  $\phi \cdot R_{nw}$  dengan  $R_u$ :

$$155,8935 \cdot a = 1042,99 \quad \rightarrow \quad a = 6,69 \text{ mm} \approx 7 \text{ mm}$$

## 7.8 GESER EKSENTRIS – METODA PLASTIS

Metoda ini jauh lebih rumit daripada metoda elastik, seperti halnya pada saat pembahasan geser eksentris pada sambungan baut. Beban dianggap berputar terhadap pusat rotasi sesaat. Dalam analisa plastis ini kelompok las dibagi-bagi menjadi segmen-segmen yang lebih kecil. Dan tahanan  $R_i$  dari masing-masing segmen las ini proporsional terhadap jaraknya ke pusat rotasi sesaat. Arah kerja  $R_i$  diasumsikan tegak lurus terhadap garis jarak titik berat segmen las ke pusat rotasi sesaat.

Tahanan rencana dari segmen las per satuan panjang adalah:

$$\phi \cdot R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot 0,60 \cdot f_{uw} \cdot (1 + 0,50 \cdot \sin^{1,5} \theta) \quad 7.19$$

Dengan  $\phi = 0,75$

$\theta$  adalah sudut beban diukur dari sumbu memanjang arah las

Jika segmen las merupakan bagian dari suatu konfigurasi las yang terkena beban geser eksentris, maka persamaan 7.19 dimodifikasi menjadi:

$$R_i = 0,60 \cdot f_{uw} \cdot t_e \cdot (1 + 0,50 \cdot \sin^{1,5} \theta) \left[ \frac{\Delta_i}{\Delta_m} \left( 1,9 - 0,9 \cdot \frac{\Delta_i}{\Delta_m} \right) \right]^{0,3} \quad 7.20$$

Dengan:

- $R_i$  adalah tahanan nominal segmen las, N/mm  
 $\theta$  adalah sudut beban diukur dari sumbu memanjang las, derajat  
 $\Delta_i$  adalah deformasi elemen ke  $-i = r_i \left[ \frac{\Delta_U}{r} \right]_{\min}$   
 $\Delta_m = 5,31.(\theta + 2)^{-0,32}.a$ , mm  
 $\Delta_u = 27,61.(\theta + 6)^{-0,65}.a \leq 4,318.a$ , mm  
 $a$  adalah panjang kaki las sudut, mm

Langkah-langkah dalam menyelesaikan soal geser eksentris sambungan las (metoda plastis) adalah sebagai berikut:

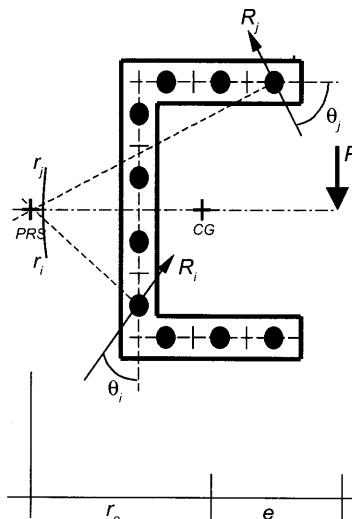
1. Bagilah konfigurasi las menjadi segmen-segmen yang lebih kecil
2. Tentukan letak pusat rotasi sesaat (coba-coba)
3. Asumsikan gaya  $R_i$  dan  $R_j$  dari tiap segmen las bekerja dalam arah tegak lurus terhadap garis yang menghubungkan pusat rotasi sesaat dengan titik berat segmen las
4. Hitung  $\theta$ , dalam derajat
5. Hitung  $\Delta_m$ ,  $\Delta_u$  dan kemudian cari harga  $\Delta_u/r$  minimum
6. Hitung  $\Delta_i$
7. Hitung  $R_i$  dari persamaan 7.20
8. Dari persamaan kesetimbangan:

$$\sum M = 0 \quad P_n (e + r_o) = \sum R_i r_i + \sum R_j r_j \quad 7.21$$

$$P_n = \frac{\sum R_i r_i + \sum R_j r_j}{e + r_o} \quad 7.22$$

$$\sum F_y = 0 \quad P_n = \sum (R_i) y + \sum (R_j) y \quad 7.23$$

$$P_n = \sum R_i \cos \theta_i + \sum R_j \sin \theta_j \quad 7.24$$



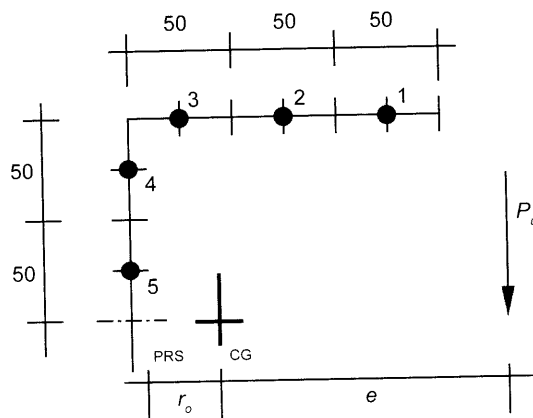
Gambar 7.9 Tahanan  $R$  dari Segmen Las Sudut

■ **CONTOH 7.7:**

Kerjakan kembali contoh 7.6, dengan metoda plastis. Dengan ukuran las  $a = 6,935$  mm. hitunglah  $P_u$  yang boleh bekerja pada sambungan tersebut, bandingkan hasilnya dengan metoda elastik.

**JAWAB:**

Las mendatar akan dibagi tiga segmen @ 50 mm, dan las tegak akan dibagi menjadi 2 segmen @ 50 mm. Perhitungan hanya dilakukan setengah bagian saja, mengingat konfigurasi las yang simetris.



Perhitungan ditampilkan dalam tabel berikut, diperoleh  $P_u = 18,57$  ton.

Dari hasil analisa elastik, dengan ukuran las yang sama ( $= 6,935$  mm) diperoleh  $P_u = 6,5$  ton ( $\pm 35\%$  analisa plastis).

Segmen	x	y	$r_i$	$\theta$	$\Delta_m$	$\Delta_u$	$\Delta_u/r_i$	$\Delta_i$	$\Delta_i/\Delta_m$	$R_i$	$(R_i)y$	$R_i r_i$
1	121.7231	100	157.5326	50.59564	10.36184	13.89325	0.088193	13.89325	1.340809	1889.17	1459.734	297605.9
2	71.7231	100	123.0618	35.64926	11.53185	16.95775	0.137799	10.85317	0.941148	1757.412	1024.258	216270.3
3	21.7231	100	102.3323	12.256	15.73482	28.98673	0.283261	9.024978	0.573567	1410.733	299.4705	144363.5
4	-3.2769	75	75.07155	87.49822	8.740985	10.02515	0.133541	6.620777	0.757441	2109.739	-92.0909	158381.4
5	-3.2769	25	25.21385	82.53247	8.90212	10.38714	0.411962	2.223682	0.249792	1657.889	-215.466	41801.77
						min	0.088193			setengah	2475.905	858422.8
										total	4951.811	1716846

$r_o$  -41.7231 mm  
 $e$  305 mm  
 $a$  6.935 mm  
 $f_{uw}$  490 MPa  
 $L_w$  50 mm  
 $e$  305 mm  
 $P_n$  18.57 ton

Dari persamaan 7.22 diperoleh:

$$P_n = 1716846 / (305 + 41,7231) = 4951,63 \text{ N/mm}$$

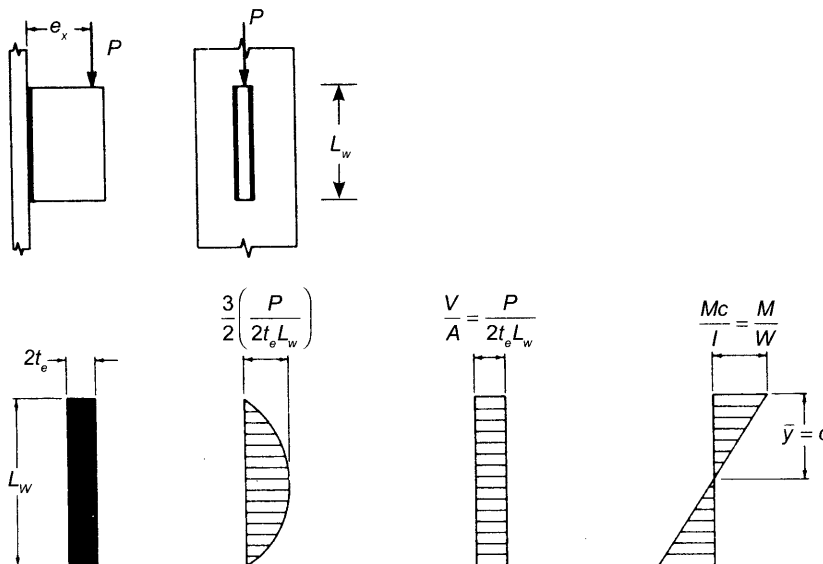
Dari persamaan 7.24 diperoleh:

$$P_n = 4951,811 \text{ N/mm}$$

Jadi, nilai  $r_o$  sudah benar

### 7.9 BEBAN EKSENTRIS NORMAL PADA BIDANG LAS

Perhatikan sambungan konsol menggunakan las, yang dikenai beban eksentris normal dalam Gambar 7.10.



Gambar 7.10 Tegangan pada Las Vertikal Akibat Geser dan Lentur

#### ■ CONTOH 7.8:

Hitung ukuran las yang diperlukan bagi sambungan pada Gambar 7.10 tersebut, bila diketahui beban kerja  $P = 4,5$  ton terdiri dari 20% beban mati dan 80% beban hidup. Eksentrisitas,  $e = 150$  mm dan panjang las  $L_w = 250$  mm. ( $f_{uw} = 490$  MPa)

#### JAWAB:

Beban kerja terfaktor,  $P_u$ :

$$P_u = 1,2 \cdot (0,20 \times 4,5) + 1,6 \cdot (0,8 \times 4,5) = 6,84 \text{ ton}$$

Akibat geser langsung:

$$(R_n)_v = \frac{P}{A} = \frac{P}{2 \times 1 \times L_w} = \frac{6,84 \cdot 10^4}{2 \times 1 \times 250} = 136,8 \text{ N/mm}$$

Akibat momen  $P \cdot e$ :

$$(R_n)_t = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{6,84 \cdot 10^4 \cdot 150 \cdot 125}{2 \cdot \frac{1}{12} \times 1 \times 250^3} = 492,48 \text{ N/mm}$$

Gaya Resultan:

$$\phi R_{n \text{ perlu}} = \sqrt{136,8^2 + 492,48^2} = 511,127 \text{ N/mm}$$

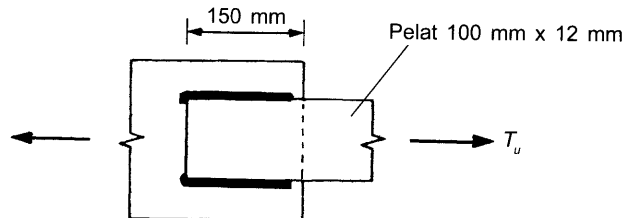
Tahanan las:

$$\phi R_{nw} = \phi \cdot t_e \cdot 0,60 \cdot f_{uw} = 0,75 \times 0,707 \cdot a \times 0,6 \times 490 = 155,8935 \cdot a$$

$$a_{\text{perlu}} = \frac{511,127}{155,8935} = 3,278 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

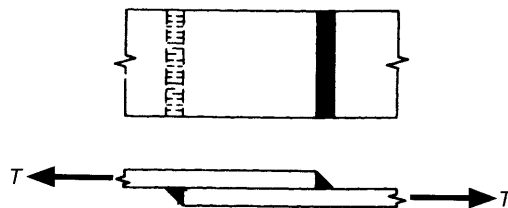
## SOAL-SOAL LATIHAN

- 7.1 Tentukan besarnya beban maksimum terfaktor,  $T_u$ , yang dapat bekerja pada sambungan seperti dalam Gambar P.7.1. Mutu baja yang digunakan adalah BJ 37, sedangkan mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa, dengan ukuran 6 mm.



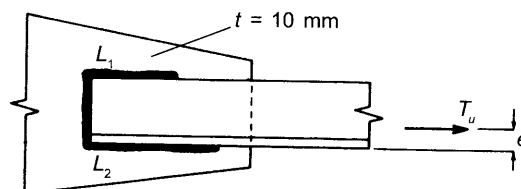
Gambar P.7.1

- 7.2 Jika sambungan dalam soal P.7.1 harus memikul beban mati sebesar 75 kN dan beban hidup sebesar 175 kN, tentukan panjang las yang diperlukan, gunakan mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa.
- 7.3 Tentukan besarnya beban layan maksimum,  $T$ , yang dapat dipikul oleh sambungan pada Gambar P.7.3. Kedua batang tersebut terbuat dari pelat berukuran 175 mm x 19 mm. Las yang digunakan berukuran 10 mm ( $f_{uw} = 490$  MPa) dan mutu baja adalah BJ 37. ( $L/D = 4$ )



Gambar P.7.3

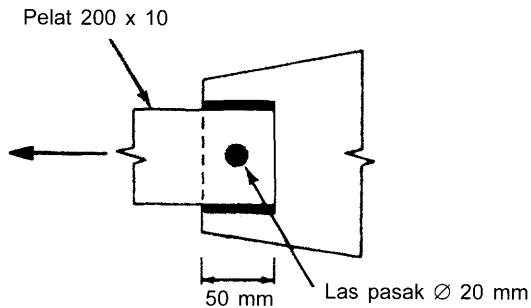
- 7.4 Hitunglah panjang las sudut  $L_1$  dan  $L_2$  pada sambungan yang direncanakan sekuat profil L 50.50.5. Gunakan ukuran minimum las dengan mutu  $f_{uw} = 490$  MPa dan mutu baja BJ 37.



Gambar P.7.4

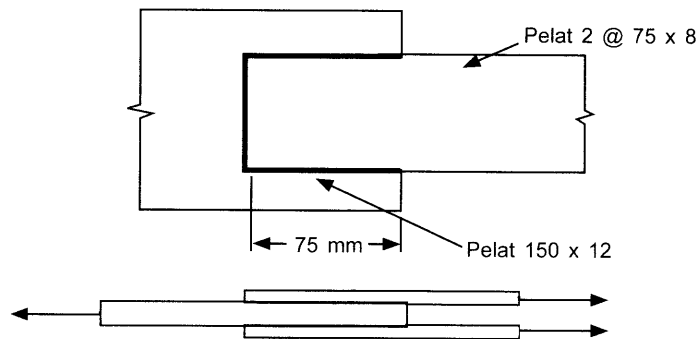


- P.7.5** Hitunglah beban terfaktor maksimum yang diperbolehkan bekerja pada sambungan dengan menggunakan las pasak dan las sudut dalam Gambar P.7.5. Gunakan mutu baja BJ 3<sup>+</sup> dan mutu las  $f_{uw} = 490$  MPa. Diketahui pula bahwa ukuran las sudut 6 mm.



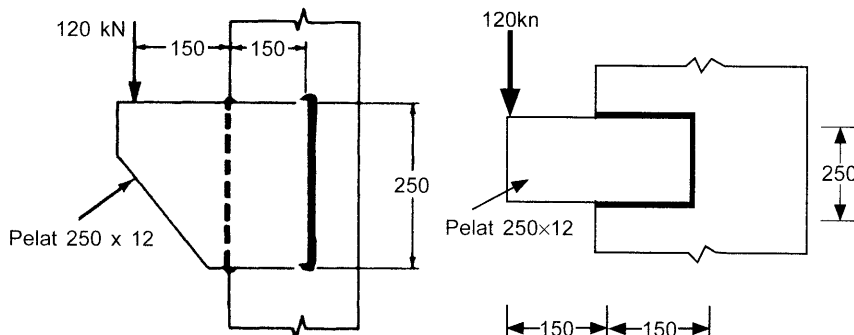
Gambar P.7.5

- P.7.6** Hitunglah beban layan,  $T$ , yang dapat dipikul oleh batang tarik yang disambung dengan menggunakan las sudut ukuran 6 mm ( $f_{uw} = 490$  MPa) seperti dalam Gambar P.7.6. Mutu baja yang digunakan adalah BJ 41. ( $L/D = 4$ )



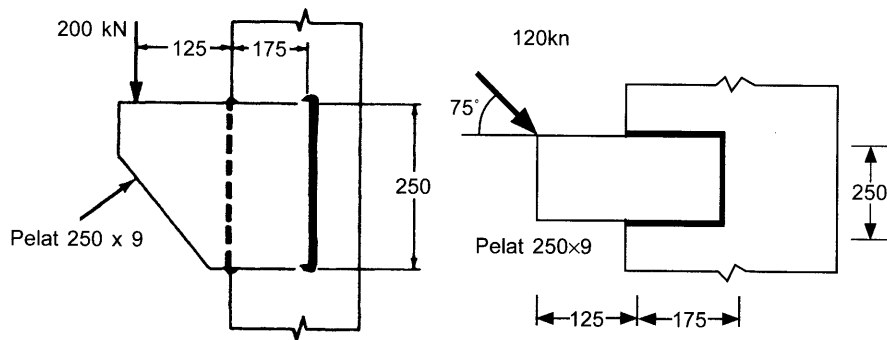
Gambar P.7.6

- P.7.7** Gunakan analisa elastis untuk menentukan beban maksimum pada las (dalam N/mm) untuk sambungan yang terdapat dalam Gambar P.7.7.



Gambar P.7.7

- P.7.8** Gunakan analisa elastis untuk menentukan beban maksimum pada las (dalam N/mm) untuk sambungan yang terdapat dalam Gambar P.7.8.



Gambar P.7.8

**P.7.9 – P.7.10**

Kerjakan kembali soal P.7.7 dan P.7.8 dengan menggunakan metode plastis!

# 8

## Torsi

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Mempelajari perilaku balok yang memikul beban momen torsi
- Menentukan besarnya tegangan-tegangan yang terjadi pada penampang profil
- Melakukan desain penampang berdasarkan momen torsi yang bekerja

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Torsi Murni pada Penampang Homogen
- 1.3 Pusat Geser (*Shear Center*)
- 1.4 Tegangan Puntir pada Profil I
- 1.5 Analogi Torsi dengan Lentur

### 8.1 PENDAHULUAN

Pengaruh torsi/puntir terkadang sangat berperan penting dalam desain struktur. Kasus torsi sering dijumpai pada balok induk yang memiliki balok-balok anak dengan bentang yang tak sama panjang. Profil yang paling efisien dalam memikul torsi adalah profil bundar berongga (seperti cincin). Penampang ini lebih kuat memikul torsi daripada penampang bentuk I, kanal, T, siku atau Z dengan luas yang sama.

Suatu batang pejal bulat bila dipuntir, maka tegangan geser pada penampang di tiap titik akan bervariasi sesuai jaraknya dari pusat batang, dan penampang yang semula datar akan tetap datar serta hanya berputar terhadap sumbu batang.

Pada tahun 1853 muncul teori klasik torsi dari Saint-Venant, ia mengatakan bahwa jika batang dengan penampang bukan lingkaran, bila dipuntir maka penampang yang semula datar tidak akan menjadi datar lagi setelah dipuntir, penampang ini menjadi terpelintir (*warping*) keluar bidang.

### 8.2 TORSI MURNI PADA PENAMPANG HOMOGEN

Perhatikan momen torsi,  $T$ , yang bekerja pada batang pejal homogen. Asumsikan tak ada pemilinan keluar bidang.

Kelengkungan torsi,  $\theta$ , diekspresikan sebagai:

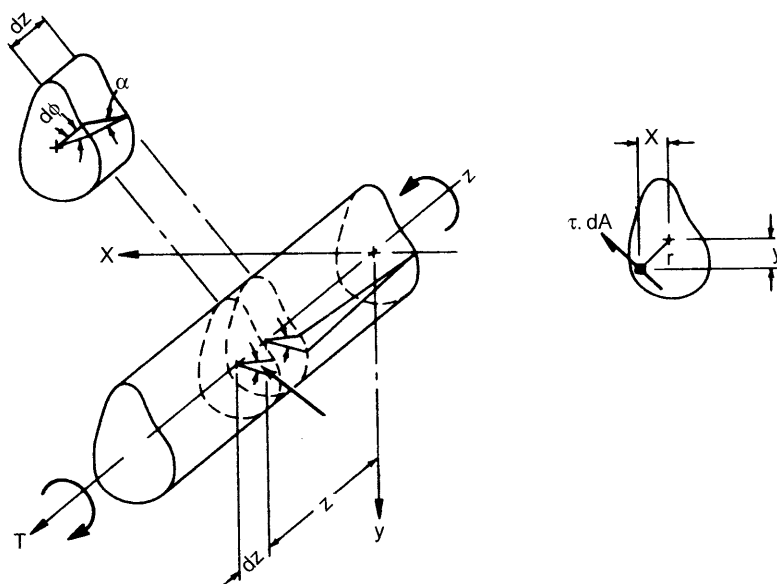
$$\theta = \frac{d\phi}{dz} \quad 8.1$$

Dan regangan geser,  $\gamma$ , dari suatu elemen sejauh  $r$  dari pusat adalah:

$$\gamma = r \frac{d\phi}{dz} = r \cdot \theta \quad 8.2$$

Dari hukum Hooke, tegangan geser akibat torsi:

$$\tau = \gamma \cdot G \quad 8.3$$



Gambar 8.1 Torsi pada Batang Pejal

Torsi  $T$  adalah sedemikian sehingga:

$$dT = \tau \cdot dA \cdot r = \gamma \cdot G \cdot dA \cdot r = r^2 \cdot (d\phi/dz) \cdot G \cdot dA \quad 8.4$$

Mengintegralkan persamaan 8.4 akan diperoleh:

$$T = \int_A r^2 \cdot \frac{d\phi}{dz} \cdot G \cdot dA = \frac{d\phi}{dz} \cdot G \int_A r^2 \cdot dA = G \cdot J \cdot \frac{d\phi}{dz} \quad 8.5$$

Dengan:  $G$  adalah Modulus Geser  $= \frac{E}{2(1+\nu)}$

$J$  adalah konstanta torsi, atau momen inersia polar (untuk penampang lingkaran)

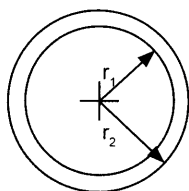
Tegangan geser,  $\tau$ , dari persamaan 8.2 dan 8.3 adalah:

$$\tau = r \cdot \frac{d\phi}{dz} \cdot G = \frac{T \cdot r}{J} \quad 8.6$$

Dari persamaan 8.6 dapat disimpulkan bahwa tegangan geser akibat torsi sebanding dengan jarak dari titik pusat torsi.

### Penampang Lingkaran

Perhatikan penampang berbentuk lingkaran dengan jari-jari  $r_1$  dan  $r_2$ , di mana  $r_1 < r_2$ .



$$\begin{aligned} J &= \int r^2 \cdot dA = \int_{r_1}^{r_2} 2 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \\ &= \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^4 \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (r_2^4 - r_1^4) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2)(r_2^2 + r_1^2) = \frac{\pi}{2} \cdot (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)(r_2^2 + r_1^2) \\ &= \frac{\pi \cdot t}{2} \cdot (r_2 + r_1)(r_2^2 + r_1^2) \end{aligned}$$

Jika  $r_2 = r_1 + t$  maka  $r_2^2 = (r_1 + t)^2 = r_1^2 + 2 r_1 t + t^2$

$$\text{Maka } J = \frac{\pi \cdot t}{2} \cdot (2 \cdot r_1 + t) (2 \cdot r_1^2 + 2 \cdot r_1 \cdot t + t^2)$$

Untuk  $r_1 = 0$ , maka:

$$J = \frac{\pi \cdot t}{2} \cdot t^3 = \frac{\pi \cdot t^4}{2} = \frac{\pi}{32} \cdot (2 \cdot t)^4 = \frac{1}{32} \cdot \pi \cdot d^4$$

$$\tau_{maks} = \frac{T \cdot (d/2)}{\frac{1}{32} \cdot \pi \cdot d^4} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^4}$$

Untuk  $t \rightarrow 0$ , maka:

$$J = \frac{\pi \cdot t}{2} \cdot r_1 \cdot \left(2 + \frac{t}{r_1}\right) \cdot r_1^2 \cdot \left(2 + 2 \frac{t}{r_1} + \frac{t^2}{r_1^2}\right) \approx 2 \pi \cdot t \frac{(2 \cdot r_1)^3}{8}$$

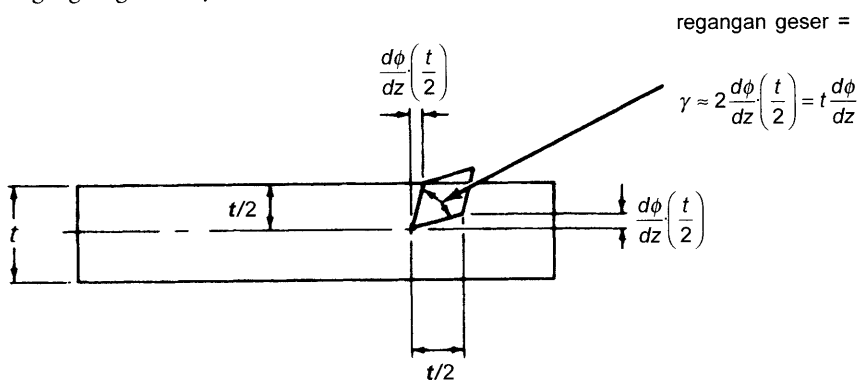
$$J = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot t \cdot d^3$$

$$\tau_{maks} = \frac{T \cdot \left(\frac{d}{2} + t\right)}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot t \cdot d^3} \approx \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot t \cdot d^2}$$

### Penampang Persegi

Perhatikan penampang persegi yang mengalami geser akibat torsi, pada Gambar 8.2.

Regangan geser =  $\gamma$



**Gambar 8.2** Torsi pada Penampang Persegi

Regangan geser,  $\gamma$  adalah:

$$\gamma = 2 \cdot \frac{d\phi}{dz} \cdot \left(\frac{t}{2}\right) = t \cdot \frac{d\phi}{dz}$$

Berdasarkan hukum Hooke, tegangan geser,  $\tau$ , diekspresikan sebagai:

$$\tau = \gamma \cdot G = t \cdot G \cdot \frac{d\phi}{dz} = \frac{T \cdot t}{J}$$

Dari teori elastisitas,  $\tau_{maks}$  terjadi di tengah dari sisi panjang penampang persegi dan bekerja sejajar sisi panjang tersebut. Besarnya merupakan fungsi dari rasio  $b/t$  dan dirumuskan sebagai:

$$\tau_{maks} = \frac{k_1 \cdot T}{b \cdot t^2} \quad 8.9$$

Dan konstanta torsi penampang persegi adalah:

$$J = k_2 \cdot b \cdot t^3 \quad 8.10$$

Besarnya  $k_1$  dan  $k_2$  tergantung dari rasio  $b/t$ , dan ditampilkan dalam Tabel 8.1.

**TABEL 8.1 HARGA  $K_1$  DAN  $K_2$  UNTUK PERSAMAAN 8.9 DAN 8.10**

$b/t$	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	$\infty$
$k_1$	4,81	4,57	4,33	3,88	3,88	3,75	3,55	3,44	3,0
$k_2$	0,141	0,166	0,196	0,229	0,249	0,263	0,281	0,291	0,333

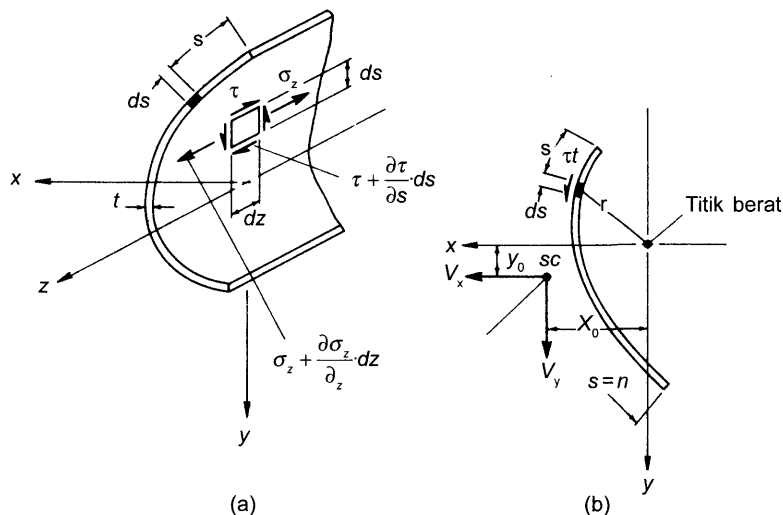
### Profil I, Kanal, T dan Siku

Dari Tabel 8.1 tampak untuk  $b/t$  yang besar maka harga  $k_1$  dan  $k_2$  akan cenderung konstan. Untuk penampang-penampang berbentuk I, kanal, T dan siku, maka perhitungan konstanta torsinya diambil dari penjumlahan konstanta torsi masing-masing komponennya yang berbentuk persegi, sehingga dalam hal ini:

$$J = \sum \frac{1}{3} \cdot b \cdot t^3 \quad 8.11$$

### 8.3 PUSAT GESER (SHEAR CENTER)

Perhatikan elemen pada Gambar 8.3 berikut ini.



**Gambar 8.3 Tegangan pada Penampang Tipis Terbuka Akibat Lentur**

Kesetimbangan gaya dalam arah  $z$  adalah:

$$\frac{\partial(\tau t)}{\partial s} ds \cdot dz + t \cdot \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \cdot ds = 0 \quad 8.12$$

atau

$$\frac{\partial(\tau t)}{\partial s} = -t \cdot \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad 8.13$$

Dari persamaan 5.46:

$$\sigma_z = \frac{M_x \cdot I_y - M_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot y + \frac{M_y \cdot I_x - M_x \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot x$$

$$\text{Maka: } \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \frac{V_y \cdot I_y - V_x \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot y + \frac{V_x \cdot I_x - V_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot x \quad 8.14$$

$$\text{Dan } \tau t = - \frac{V_y \cdot I_y - V_x \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot \int_0^S y t ds - \frac{V_x \cdot I_x - V_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot \int_0^S x t ds \quad 8.15$$

Dari Gambar 8.3.b, maka momen terhadap titik O (CG) adalah:

$$V_y \cdot x_o - V_x \cdot y_o = \int_0^n (\tau t) r \cdot ds = \int_0^n \bar{r} \times \left( \tau t \frac{d\bar{r}}{ds} \right) ds \quad 8.16$$

Karena:  $\bar{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$  maka  $d\bar{r} = dx\mathbf{i} + dy\mathbf{j}$

$$\bar{r} \times d\bar{r} = (x \cdot dy - y \cdot dx) \mathbf{k}$$

$$\text{Sehingga } V_y \cdot x_o - V_x \cdot y_o = \int_0^n \tau t (x \cdot dy - y \cdot dx) \quad 8.17$$

Mengingat persamaan 8.15, maka:

$$\begin{aligned} \int_0^n \tau t (x \cdot dy - y \cdot dx) &= \int_0^n \left[ - \frac{V_y \cdot I_y - V_x \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot \int_0^S y t \cdot ds - \frac{V_x \cdot I_x - V_y \cdot I_{xy}}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \cdot \int_0^S x t \cdot ds \right] (x \cdot dy - y \cdot dx) = \\ &= \frac{1}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \int_0^n \left[ V_y \left( I_{xy} \cdot \int_0^S x t \cdot ds - I_y \cdot \int_0^S y t \cdot ds \right) + V_x \left( I_{xy} \cdot \int_0^S y t \cdot ds - I_x \cdot \int_0^S x t \cdot ds \right) \right] (x \cdot dy - y \cdot dx) \quad 8.18 \end{aligned}$$

Dari persamaan 8.17 dan 8.18, maka diperoleh:

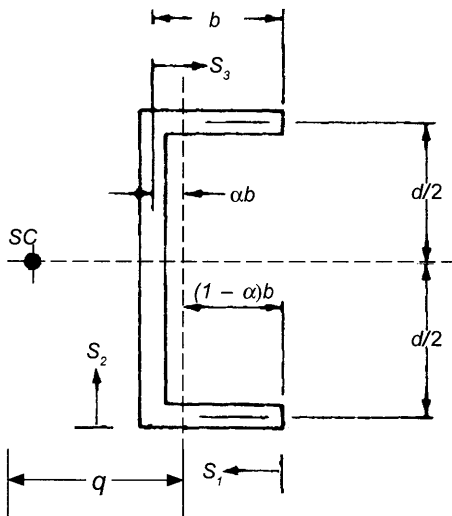
$$x_o = \frac{-1}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \int_0^n \left[ I_y \cdot \int_0^S y t \cdot ds - I_{xy} \cdot \int_0^S x t \cdot ds \right] (x \cdot dy - y \cdot dx) \quad 8.19.a$$

$$y_o = \frac{-1}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \int_0^n \left[ I_{xy} \cdot \int_0^S y t \cdot ds - I_x \cdot \int_0^S x t \cdot ds \right] (x \cdot dy - y \cdot dx) \quad 8.19.b$$

Titik  $(x_o, y_o)$  merupakan pusat geser penampang.

■ **CONTOH 8.1:**

Tentukan koordinat pusat geser bagi penampang berikut ini:



$$x_0 = q + \alpha b$$

$$\alpha = \frac{b \cdot t f}{2 \cdot b \cdot t f + d \cdot t w}$$

$$2\alpha - 1 = \frac{-d \cdot t w}{2 \cdot b \cdot t f + d \cdot t w}$$

**Mencari  $x_0$ :**

$$x_0 = \frac{-1}{I_x \cdot I_y - I_{xy}^2} \int_0^n \left[ I_y \cdot \int_0^S y t \cdot ds - I_{xy} \cdot \int_0^S x t \cdot ds \right] (x \cdot dy - y \cdot dx)$$

$$I_{xy} = 0, \text{ maka: } x_0 = \frac{-1}{I_x} \cdot \int_0^n \int_0^S y t \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx)$$

$$0 < s < b$$

$$\int_0^S y t \cdot ds = \int_0^{s_1} \frac{d}{2} \cdot t f \cdot ds_1 = \frac{d}{2} \cdot t f \cdot s_1$$

$$\begin{aligned} s_1 = 0 & \rightarrow x_1 = -(1 - \alpha) \cdot b \\ s_1 = b & \rightarrow x_1 = \alpha b \end{aligned} \quad s_1 = x + (1 - \alpha) b$$

$$\int_0^S y t \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot t f \cdot (x + (1 - \alpha) b) \quad \text{untuk } x = \alpha b \quad \int_0^S y t \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot t f \cdot b$$

$$\int_0^n \int_0^S y t \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx) = \int_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b} \frac{d}{2} \cdot t f \cdot (x + (1 - \alpha) b) \cdot \frac{d}{2} \cdot dx$$

$$= -\frac{d^2 \cdot t f}{4} \cdot \int_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b} (x + (1 - \alpha) b) dx$$

$$= -\frac{d^2 \cdot t f}{4} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot x^2 + (1 - \alpha) \cdot b \cdot x \right]_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b}$$

$$= -\frac{d^2 \cdot t f}{4} \cdot \left[ \frac{1}{2} \alpha^2 b^2 + (1 - \alpha) b^2 \cdot \alpha - \frac{1}{2} (1 - \alpha)^2 \cdot b^2 + (1 - \alpha)^2 \cdot b^2 \right]$$

$$= -\frac{d^2 \cdot t f}{4} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot b^2 \right] = -\frac{1}{8} \cdot d^2 \cdot t f \cdot b^2$$



$$\underline{b < s < b + d}$$

$$\int_0^s yt \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b + \int_0^{s_2} \left(-s_2 + \frac{d}{2}\right) \cdot tw \cdot ds_2$$

$$\begin{array}{l} s_2 = 0 \quad \rightarrow y = d/2 \\ s_2 = d \quad \rightarrow y = -d/2 \end{array} \quad y = -s_2 + d/2 \quad s_2 = -y + d/2$$

$$\int_0^s yt \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b + \int_0^{s_2} \left(-s_2 + \frac{d}{2}\right) \cdot tw \cdot ds_2$$

$$= \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b + tw \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot s_2^2 + \frac{d}{2} \cdot s_2 \right]$$

$$= \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{1}{2} \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right)$$

$$\text{Untuk } y = -d/2 \quad \int_0^s yt \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b$$

$$\int_0^s \int_0^s yt \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx) = \int_{d/2}^{-d/2} \left[ \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{1}{2} \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right) \right] \cdot \alpha b \cdot dy$$

$$= \int_{d/2}^{-d/2} \left[ \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{1}{2} \cdot tw \cdot \left(y^2 - d \cdot y + \frac{d^2}{4}\right) + \frac{1}{2} \cdot d \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right) \right] \cdot \alpha b \cdot dy$$

$$= \left[ \left( \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b \cdot y \right) \Big|_{d/2}^{-d/2} - \frac{1}{2} \cdot tw \cdot \left( \frac{1}{3} \cdot y^3 - \frac{1}{2} \cdot d \cdot y^2 + \frac{d^2}{4} \cdot y \right) \Big|_{d/2}^{-d/2} + \frac{1}{2} \cdot d \cdot tw \cdot \left( -\frac{1}{2} y^2 + \frac{d}{2} \cdot y \right) \Big|_{d/2}^{-d/2} \right] \alpha b$$

$$= \left[ \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b \cdot (-d) - \frac{1}{2} \cdot tw \cdot \left( -\frac{d^3}{3} \right) + \frac{1}{2} \cdot d \cdot tw \cdot \left( -\frac{d^2}{2} \right) \right] \alpha b$$

$$= \left[ -\frac{1}{2} \cdot tf \cdot b \cdot d^2 - \frac{1}{12} \cdot tw \cdot d^3 \right] \alpha b$$

$$= -\alpha b \left[ \frac{1}{12} tw \cdot d^3 + \frac{1}{2} \cdot tf \cdot b \cdot d^2 \right] = -\alpha \cdot b \cdot I_x$$

$$\underline{b + d < s < 2b + d}$$

$$\int_0^s yt \cdot ds = \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b + \int_0^{s_3} -\frac{d}{2} \cdot tf \cdot ds_3$$

$$= \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{d}{2} \cdot tf \cdot s_3$$

$$= \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{d}{2} \cdot tf \cdot (-x + \alpha b)$$

$$\int_0^s \int_0^s yt \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx) = \int_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} \left[ \frac{d}{2} \cdot tf \cdot b - \frac{d}{2} \cdot tf \cdot (-x + \alpha b) \right] \cdot \frac{d}{2} \cdot dx$$

$$= \left[ \frac{d^2}{4} \cdot tf \cdot b \cdot x \right] \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} - \left[ \frac{d^2}{4} \cdot tf \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot x^2 + \alpha \cdot b \cdot x \right) \right] \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b}$$

$$= -\frac{1}{4}.d^2.tf.b + \frac{1}{8}.d^2.tf.b = -\frac{1}{8}.d^2.tf.b^2$$

Sehingga:

$$x_0 = -\frac{1}{I_x} \left[ -\frac{1}{8}.d^2.tf.b^2 - \alpha b.I_x - \frac{1}{8}.d^2.tf.b^2 \right] = \frac{1}{I_x} \left[ \frac{d^2.tf.b^2}{4} + \alpha b.I_x \right]$$

$$x_0 = \frac{tf.(bd)^2}{4.I_x} + \alpha.b \quad \rightarrow \quad q = \frac{tf.(b.d)^2}{4.I_x}$$

Mencari  $y_0$ :

$$y_0 = \frac{-1}{I_x.I_y - I_{xy}^2} \int_0^n \left[ I_{xy} \int_0^S y.t.ds - I_x \int_0^S x.t.ds \right] (x.dy - y.dx)$$

$$I_{xy} = 0, \text{ maka: } y_0 = \frac{1}{I_y} \int_0^S \int_0^S x.t.ds (x.dy - y.dx)$$

$$0 < s < b$$

$$\begin{aligned} \int_0^S x.t.ds &= \int_0^{s_1} (s_1 - (1-\alpha)b).tf.ds_1 \\ &= \left[ \frac{1}{2}.s_1^2 - (1-\alpha)b.s_1 \right].tf \\ &= tf \cdot \left[ \frac{1}{2}.(x + (1-\alpha)b)^2 - (1-\alpha).(x + (1-\alpha)b).b \right] \end{aligned}$$

$$\text{Untuk } x = \alpha.b \quad \int_0^S x.t.ds = \frac{b^2.tf}{2}.(2\alpha-1)$$

$$\begin{aligned} \int_0^S \int_0^S x.t.ds (x.dy - y.dx) &= \int_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b} tf \cdot \left[ \frac{1}{2}.(x + (1-\alpha)b)^2 - (1-\alpha).(x + (1-\alpha)b).b \right] \cdot \frac{d}{2}.dx \\ &= -\frac{d.tf}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{6}.(x + (1-\alpha)b)^3 \right) \Big|_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b} - \left( \frac{1}{2}.(1-\alpha).(x + (1-\alpha)b)^2 \right) \Big|_{-(1-\alpha)b}^{\alpha b} \right] \\ &= -\frac{d.tf}{2} \cdot \left[ \frac{1}{6}.b^3 - \frac{1}{2}.b^3 + \frac{1}{2}.\alpha.b^3 \right] \\ &= -\frac{d.tf}{2} \cdot \left[ -\frac{1}{3}.b^3 + \frac{1}{2}.\alpha.b^3 \right] = -\frac{d.tf.b^3}{2} \cdot \left[ -\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2} \right] \\ &= -\frac{d.tf.b^3}{2} \cdot \left[ \frac{-2(2.b.tf + d.tw) + 3.b.tf}{6(2.b.tf + d.tw)} \right] \\ &= \frac{d.tf.b^3}{12} \cdot \left[ \frac{b.tf + 2.d.tw}{2.b.tf + d.tw} \right] \end{aligned}$$

$$b < s < b + d$$

$$\int_0^S x.t.ds = \frac{b^2.tf}{2}.(2\alpha-1) + \int_0^{s_2} x.tw.ds_2$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot s_2 \\
&= \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right)
\end{aligned}$$

Untuk  $y = -d/2$   $\int_0^s xt \cdot ds = \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d$

$$\begin{aligned}
\int_0^s \int_0^s xt \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx) &= \int_{d/2}^{-d/2} \left[ \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot \left(-y + \frac{d}{2}\right) \right] \cdot \alpha b \cdot dy \\
&= \left[ \frac{\alpha \cdot b^3 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) \cdot y \right]_{d/2}^{-d/2} + \left[ \alpha^2 \cdot b^2 \cdot tw \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot y^2 + \frac{d}{2} \cdot y\right) \right]_{d/2}^{-d/2} \\
&= \frac{\alpha \cdot b^3 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) \cdot (-d) + \alpha^2 \cdot b^2 \cdot tw \cdot \left(-\frac{d^2}{2}\right) \\
&= -\frac{\alpha \cdot b^3 \cdot tf \cdot d}{2} \cdot (2\alpha - 1) - \frac{\alpha^2 \cdot b^2 \cdot tw \cdot d^2}{2} \\
&= -\frac{\alpha \cdot b^2 \cdot d}{2} \cdot \left[ b \cdot tf \cdot \left(\frac{-d \cdot tw}{2 \cdot b \cdot tf + d \cdot tw}\right) + \frac{b \cdot tf \cdot d \cdot tw}{2 \cdot b \cdot tf + d \cdot tw} \right] \\
&= -\frac{\alpha \cdot b^2 \cdot d}{2} \cdot \left[ \frac{-b \cdot tf \cdot d \cdot tw + b \cdot tf \cdot d \cdot tw}{2 \cdot b \cdot tf + d \cdot tw} \right] = 0
\end{aligned}$$

$$\underline{b + d \leq s \leq 2b + d}$$

$$\begin{aligned}
\int_0^s xt \cdot ds &= \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d + \int_0^{s_3} x \cdot tf \cdot ds_3 \\
&= \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d - \frac{1}{2} \cdot tf \cdot s_3^2 + \alpha \cdot b \cdot tf \cdot s_3 \\
&= \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d - \frac{1}{2} \cdot tf \cdot (-x + \alpha b)^2 + \alpha \cdot b \cdot tf \cdot (-x + \alpha b) \\
&= \int_0^s \int_0^s xt \cdot ds (x \cdot dy - y \cdot dx) = \\
&\quad \int_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} \left[ \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d - \frac{1}{2} \cdot tf \cdot (-x + \alpha b)^2 + \alpha \cdot b \cdot tf \cdot (-x + \alpha b) \right] \cdot \frac{d}{2} \cdot dx \\
&= \frac{d}{2} \cdot \left[ \left( \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) \cdot x \right) \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} + \left( \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d \cdot x \right) \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} \right] + \\
&\quad \frac{d}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{6} \cdot tf \cdot (-x + \alpha b)^3 \right) \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} - \left( \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot b \cdot tf \cdot (-x + \alpha b)^2 \right) \Big|_{\alpha b}^{-(1-\alpha)b} \right] \\
&= \frac{d}{2} \cdot \left[ \frac{b^2 \cdot tf}{2} \cdot (2\alpha - 1) \cdot (-b) + \alpha \cdot b \cdot tw \cdot d \cdot (-b) + \frac{1}{6} \cdot tf \cdot b^3 - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot b \cdot tf \cdot b^2 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{d.b^2}{2} \left[ \frac{b.tf}{2}(2\alpha-1) + \alpha.tw.d - \frac{1}{6}.b.tf + \frac{1}{2}.\alpha.b.tf \right] \\
&= -\frac{d.b^2}{2} \left[ \frac{-b.tf.d.tw}{2(2b.tf+d.tw)} + \frac{b.tf.d.tw}{2b.tf+d.tw} - \frac{1}{6} \frac{b.tf(2b.tf+d.tw)}{2b.tf+d.tw} + \frac{(b.tf)^2}{2(2b.tf+d.tw)} \right] \\
&= -\frac{d.b^2}{2} \left[ \frac{2.b.tf.d.tw}{6(2b.tf+d.tw)} + \frac{(b.tf)^2}{6(2b.tf+d.tw)} \right] \\
&= -\frac{d.b^2}{2} \cdot \frac{b.tf}{6(2b.tf+d.tw)} (2.d.tw+b.tf) \\
&= -\frac{d.b^3.tf}{12} \left[ \frac{b.tf+2.d.tw}{2b.tf+d.tw} \right]
\end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned}
y_0 &= \frac{1}{I_y} \left[ \frac{d.b^3.tf}{12} \left( \frac{b.tf+2.d.tw}{2b.tf+d.tw} \right) + 0 - \frac{d.b^3.tf}{12} \left( \frac{b.tf+2.d.tw}{2b.tf+d.tw} \right) \right] \\
y_0 &= 0
\end{aligned}$$

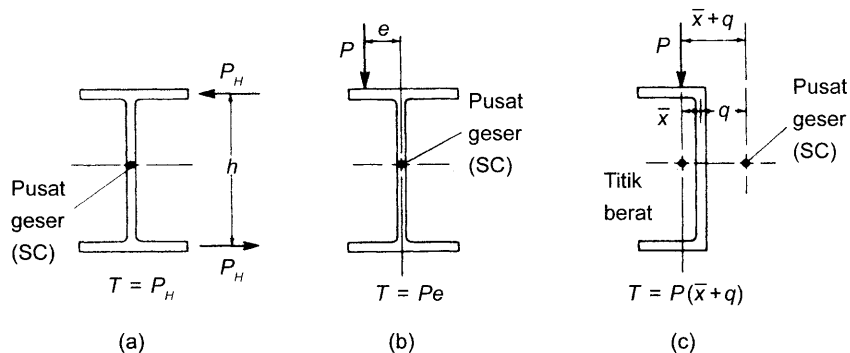
Dan koordinat pusat geser adalah:

$$SC(x_g, y_g) = \left( \left( \frac{tf.(b.d)^2}{4.I_x} + \alpha b \right); 0 \right)$$

### 3.4 TEGANGAN PUNTIR PADA PROFIL I

Pembebanan pada bidang yang tak melalui pusat geser akan mengakibatkan batang terpuntir jika tak ditahan oleh pengekang luar. Tegangan puntir akibat torsi terdiri dari tegangan lentur dan geser. Tegangan ini harus digabungkan dengan tegangan lentur dan geser yang bukan disebabkan oleh torsi.

Torsi dapat dibedakan menjadi dua jenis, yakni torsi murni (*pure torsion/Saint-Venant's Torsion*) dan torsi terpilin (*warping torsion*). Torsi murni mengasumsikan bahwa penampang melintang yang datar akan tetap datar setelah mengalami torsi dan hanya terjadi rotasi saja. Penampang bulat adalah satu-satunya keadaan torsi murni. Torsi terpilin timbul bila flens berpindah secara lateral selama terjadi torsi.



Gambar 8.4 Penampang dengan Beban Torsi

### Torsi Murni (*Saint-Venant's Torsion*)

Seperti halnya kelengkungan lentur (perubahan kemiringan per satuan panjang) dapat diekspresikan sebagai  $M/EI = d^2y/dz^2$ , yakni momen dibagi kekakuan lentur sama dengan kelengkungan, maka dalam torsi murni momen  $M$  dibagi kekakuan torsi  $GJ$  sama dengan kelengkungan torsi (perubahan sudut puntir  $\phi$  per satuan panjang).

$$M_t = GJ \frac{d\phi}{dz} \quad 8.20$$

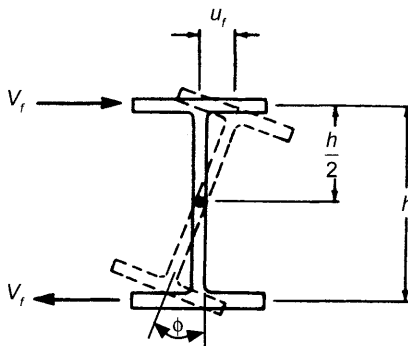
Dengan:  $M_t$  adalah momen torsi murni (*Saint-Venant's Torsion*)  
 $G$  adalah modulus geser  
 $J$  adalah konstanta torsi

Menurut persamaan 8.6 tegangan akibat  $M_t$  sebanding dengan jarak ke pusat torsi.

### Torsi Terpilin (*warping*)

Sebuah balok yang memikul torsi  $M_t$ , maka bagian flens tekan akan melengkung ke satu sisi lateral, sedang flens tarik melengkung ke sisi lateral lainnya. Penampang pada Gambar 8.5 memperlihatkan balok yang puntirannya ditahan di ujung-ujung, namun flens bagian atas berdeformasi ke samping (arah lateral) sebesar  $u_f$ . Lenturan ini menimbulkan tegangan normal lentur (tarik dan tekan) serta tegangan geser sepanjang flens.

Secara umum torsi pada balok dianggap sebagai gabungan antara torsi murni dan torsi terpilin.



Gambar 8.5 Torsi pada Profil I

### Persamaan Diferensial untuk Torsi pada Profil I

Dari Gambar 8.5, untuk sudut  $\phi$  yang kecil akan diperoleh:

$$u_f = \phi \cdot \frac{h}{2} \quad 8.21$$

Bila  $u_f$  didiferensialkan 3 kali ke- $z$ , maka:

$$\frac{d^3 u_f}{dz^3} = \frac{h}{2} \cdot \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad 8.22$$

Dari hubungan momen dan kelengkungan:

$$\frac{d^2 u_f}{dz^2} = - \frac{M_f}{E \cdot I_f} \quad 8.23$$

Dengan  $M_f$  adalah momen lentur pada satu flens.  $I_f$  adalah momen Inersia satu flens terhadap sumbu- $y$  dari balok. Karena  $V = dM/dz$ , maka:

$$\frac{d^3 u_f}{dz^3} = -\frac{V_f}{E.I_f} \quad 8.24$$

Dan menyamakan persamaan 8.22 dengan 8.24 akan diperoleh bentuk:

$$V_f = -E.I_f \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad 8.25$$

Dalam Gambar 8.5, komponen momen torsi  $M_w$ , yang menyebabkan lenturan lateral dari flens, sama dengan gaya geser flens dikalikan  $h$ , sehingga:

$$M_w = V_f \cdot h = -E.I_f \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \frac{d^3 \phi}{dz^3} = -E.C_w \cdot \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad 8.26$$

Dengan  $C_w = I_f h^2/2$ , disebut sebagai konstanta torsi terpilin (torsi *warping*).

Momen torsi total yang bekerja pada balok adalah jumlah dari  $M_s$  dan  $M_w$ , yakni:

$$M_z = M_s + M_w = G.J \frac{d\phi}{dz} - E.C_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \quad 8.27$$

Jika persamaan 8.27 dibagi dengan  $-E.C_w$ :

$$\frac{d^3 \phi}{dz^3} - \frac{G.J}{E.C_w} \frac{d\phi}{dz} = -\frac{M_z}{E.C_w} \quad 8.28$$

Dengan mensubstitusikan  $\lambda^2 = G.J/E.C_w$ , akan didapatkan suatu PD Linear Tak Homogen:

$$\frac{d^3 \phi}{dz^3} - \lambda^2 \frac{d\phi}{dz} = -\frac{M_z}{E.C_w} \quad 8.29$$

Solusi PD ini adalah:

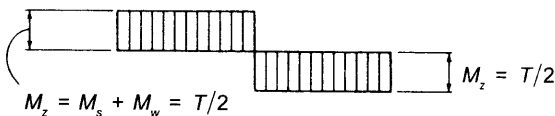
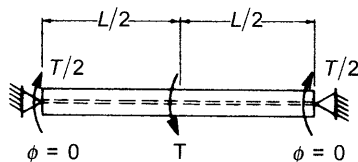
$$\phi = \phi_h + \phi_p = (A_1 e^{\lambda z} + A_2 e^{-\lambda z} + A_3) + (f_i(z)) \quad 8.30.a$$

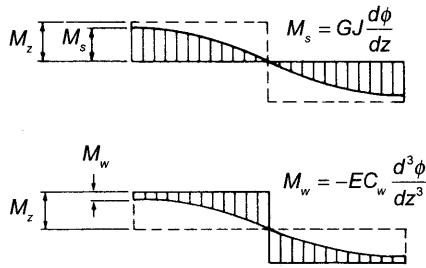
$$\text{Atau } \phi = A \sinh \lambda z + B \cosh \lambda z + C + f(z) \quad 8.30.b$$

$$\text{Dengan } \lambda = \sqrt{\frac{G.J}{E.C_w}}$$

### ■ CONTOH 8.2:

Turunkan persamaan bagi sudut puntir  $\phi$ , hitung pula turunan pertama, kedua dan ketiganya, untuk balok dengan momen torsi  $T$  pada tengah bentang. Balok tertumpu sederhana.



**JAWAB:**

Momen  $M_z$  adalah konstan yaitu  $T/2$ , misalkan

$$\phi_p = C_1 + C_2 z$$

Substitusikan  $\phi_p$  ke dalam persamaan 8.28:

$$-\lambda^2 \cdot C_2 = -\frac{1}{E \cdot C_w} \cdot \frac{T}{2} \rightarrow C_2 = \frac{T}{2 \cdot G \cdot J}$$

Sehingga solusi umum PD adalah:

$$\phi = A \sinh \lambda z + B \cosh \lambda z + C + \frac{T}{2 \cdot G \cdot J} \cdot z$$

Konstanta  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  diperoleh dari *Boundary Condition* berikut ini:

$$\phi_{(z=0)} = 0 \quad \text{dan} \quad \phi_{(z=L)} = 0$$

$$\phi''_{(z=0)} = 0 \quad \text{dan} \quad \phi''_{(z=L)} = 0$$

Dalam kasus ini, PD tak kontinu di  $L/2$ , sehingga pada  $L/2$  kemiringan sama dengan nol, atau  $\phi'_{(z=L/2)} = 0$ .

Dari  $\phi_{(z=0)} = 0$ :

$$0 = B + C$$

Dan dari  $\phi''_{(z=0)} = 0$

$$\phi'' = A \cdot \lambda^2 \cdot \sinh \lambda z + B \cdot \lambda^2 \cdot \cosh \lambda z$$

$$0 = B$$

Sehingga didapatkan pula  $C = 0$

Dari  $\phi'_{(z=L/2)} = 0$ :

$$0 = A \cdot \lambda \cdot \cosh \lambda L/2 + \frac{T}{2 \cdot G \cdot J}$$

$$A = -\frac{T}{2 \cdot G \cdot J \cdot \lambda} \left[ \frac{1}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

Sehingga solusi khusus PD adalah:

$$\phi = \frac{T}{2 \cdot G \cdot J \cdot \lambda} \left[ \lambda z - \frac{\sinh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

Diperoleh pula:

$$\phi' = \frac{T}{2 \cdot G \cdot J} \left[ 1 - \frac{\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\phi'' = \frac{T\lambda}{2.G.J} \left[ \frac{-\sinh\lambda z}{\cosh\lambda L/2} \right]$$

$$\phi''' = \frac{T\lambda^2}{2.G.J} \left[ \frac{-\cosh\lambda z}{\cosh\lambda L/2} \right]$$

### Tegangan Torsi

Tegangan geser akibat **torsi Saint Venant** adalah:

$$\tau_s = \frac{M_s.T}{J} = G.t.\frac{d\phi}{dz} \quad 8.31$$

Tegangan geser akibat **torsi warping**:

$$\tau_s = \frac{V_f.Q_f}{I_f.t_f} \quad 8.32$$

Besarnya  $Q_f$  diambil sebagai berikut:

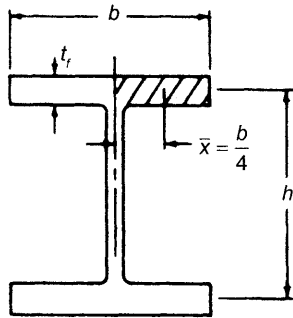
$$Q_f = A.\bar{x} = \frac{b.t_f}{2} \cdot \left( \frac{b}{4} \right) = \frac{1}{8}.b^2.t_f \quad 8.33$$

Dan  $V_f$  dari persamaan 8.25:

$$V_f = -E.I_f \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{d^3\phi}{dz^3}$$

Sehingga dengan mengambil harga mutlaknya:

$$\tau_w = E \cdot \frac{b^2.h}{16} \cdot \frac{d^3\phi}{dz^3} \quad 8.34$$



**Gambar 8.6** Perhitungan Statis Momen  $Q_f$

Tegangan tarik dan tekan akibat lentur lateral dari flens adalah:

$$\sigma_{bw} = \frac{M_f.x}{I_f} \quad 8.35$$

Tegangan ini bervariasi secara linear sepanjang sayap, dan mencapai maksimal pada  $x = b/2$ . Nilai  $M_f$  diperoleh dari substitusi persamaan 8.21 ke 8.23, yaitu:

$$M_f = E.I_f \cdot \left( \frac{h}{2} \right) \cdot \frac{d^2\phi}{dz^2} = \frac{E.C_w}{h} \cdot \frac{d^2\phi}{dz^2} \quad 8.36$$



Dan pada  $x = b/2$ :

$$\sigma_{bw} = E \cdot I_f \cdot \left( \frac{b}{2} \right) \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2} \cdot \left( \frac{b}{2 \cdot I_f} \right) \quad 8.37$$

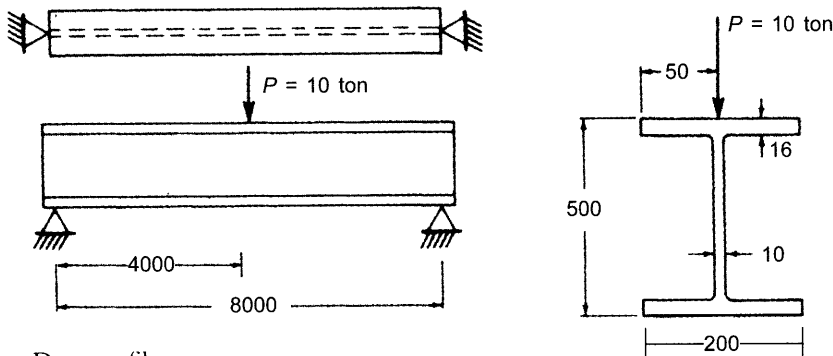
$$\sigma_{bw} = \frac{E \cdot b \cdot h}{4} \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2} \quad 8.38$$

Secara ringkas, 3 macam tegangan yang timbul pada profil I akibat torsi adalah:

- tegangan geser  $\tau_s$  pada web dan flens (Torsi Saint Venant,  $M_t$ )
- tegangan geser  $\tau_w$  pada flens akibat lentur lateral (torsi warping,  $M_w$ )
- tegangan normal (tarik dan tekan)  $\sigma_{bw}$  akibat lentur lateral flens ( $M_f$ )

### ■ CONTOH 8.3:

Sebuah balok WF 500.200.10.16 tertumpu sederhana menerima beban terpusat di tengah bentang ( $P = 10$  ton) dengan eksentrisitas 5 cm. Hitunglah kombinasi tegangan yang timbul akibat lentur dan torsi.



Data profil :

$$I_x = 47800 \text{ cm}^4$$

$$S_x = 1910 \text{ cm}^3$$

$$T = 10 \times 0,05 = 0,5 \text{ ton m} = 5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\frac{E}{G} = \frac{2 \cdot E \cdot (1 + \nu)}{E} = 2,6 \quad \text{untuk } \nu = 0,3$$

$$J = \sum \frac{1}{3} \cdot b \cdot t^3 = \frac{1}{3} \cdot \left[ 2 \cdot (200) \cdot 16^3 + (500 - 16) \cdot 10^3 \right] = 702133,33 \text{ mm}^4$$

$$C_w = \frac{I_f \cdot b^2}{2} = \frac{1}{12} \cdot 200^3 \cdot 16 \cdot \frac{(500 - 16)^2}{2} = 1,24936 \cdot 10^{12} \text{ mm}^6$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G \cdot J}{E \cdot C_w}} = \sqrt{\frac{702133,33}{2,6 \times 1,24936 \cdot 10^{12}}} = 4,649 \cdot 10^{-4} / \text{mm}$$

#### a. Torsi Murni (Saint Venant's Torsion)

$$\tau_s = G \cdot t \cdot \frac{d\phi}{dz} = G \cdot t \cdot \frac{T}{2 \cdot G \cdot J} \left[ 1 - \frac{\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\tau_s = \frac{T \cdot t}{2 \cdot J} \left[ 1 - \frac{\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\tau_s = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot t}{2 \times 702133,33} \left[ 1 - \frac{\cosh \lambda z}{3,288} \right] = 3,561 \cdot t \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh \lambda z}{3,288} \right]$$

Tegangan geser maksimum pada  $z = 0$ , dan nol pada  $z = L/2$

$$\tau_s (\text{flens pada } z = 0) = 3,561 \times 16 \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh 0}{3,288} \right] = \mathbf{39,65 \text{ MPa}}$$

$$\tau_s (\text{web pada } z = 0) = 3,561 \times 10 \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh 0}{3,288} \right] = \mathbf{24,78 \text{ MPa}}$$

**b. Torsi Warping**  
**Tegangan geser**

$$\tau_w = E \cdot \frac{b^2 \cdot h}{16} \cdot \frac{d^3 \phi}{dz^3}$$

$$\tau_w = E \cdot \frac{b^2 \cdot h}{16} \cdot \frac{T \cdot \lambda^2}{2 \cdot G \cdot J} \cdot \left[ \frac{-\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\tau_w = \frac{2,6 \times 200^2 \cdot (500 - 16) \times 5 \cdot 10^6 \times (4,649 \cdot 10^{-4})^2}{32 \times 702133,33} \cdot \left[ \frac{-\cosh \lambda z}{3,288} \right]$$

$$\tau_w = 2,421 \cdot \left[ \frac{-\cosh \lambda z}{3,288} \right]$$

Tegangan geser ini bekerja pada tengah tebal flens dan nilai maksimum terjadi pada  $z = L/2$ , sedangkan minimum pada  $z = 0$ .

$$\tau_w (\text{flens, } z = L/2) = \mathbf{2,421 \text{ MPa}}$$

$$\tau_w (\text{flens, } z = 0) = 2,421 \cdot \frac{1}{3,288} = \mathbf{0,736 \text{ MPa}}$$

**Tegangan normal**

$$\sigma_{bw} = \frac{E \cdot b \cdot h}{4} \cdot \frac{d^2 \phi}{dz^2}$$

$$\sigma_{bw} = \frac{E \cdot b \cdot h}{4} \cdot \frac{T \cdot \lambda}{2 \cdot G \cdot J} \cdot \left[ \frac{-\sinh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\sigma_{bw} = \frac{T \cdot \lambda \cdot b \cdot h}{8 \cdot J} \cdot \frac{E}{G} \cdot \left[ \frac{-\sinh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

$$\sigma_{bw} = \frac{5 \cdot 10^6 \times 4,649 \cdot 10^{-4} \times 200 \cdot (500 - 16)}{8 \times 702133,33} \cdot 2,6 \cdot \left[ \frac{-\sinh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right]$$

Tegangan ini mencapai maksimum di  $z = L/2$  dan nol di  $z = 0$ .

$$\sigma_{bw} (\text{flens, } z = L/2) = 104,15 \cdot \frac{3,131}{3,288} = \mathbf{99,18 \text{ MPa}}$$

**c. Lentur Biasa**

Tegangan normal

$$\sigma_b = \frac{P.L}{4.S_x} = \frac{10^5 \cdot 8000}{4 \times 1910 \cdot 10^3} = 104,712 \text{ MPa}$$

Tegangan geser akibat lentur, konstan dari  $z = 0$  sampai  $z = L/2$ 

$$\tau = \frac{V.Q}{I.t} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot Q}{47800 \cdot 10^4 \cdot t}$$

Tegangan geser maksimum di flens:

$$Q = \left( \frac{200-16}{2} \right) \times 16 \times \left( \frac{500-16}{4} \right) = 367840 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{(\text{flens}, z = 0 \text{ dan } z = L/2)} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 367840}{47800 \cdot 10^4 \times 16} = 2,4 \text{ MPa}$$

Tegangan geser maksimum di web:

$$Q = \left[ 200 \times 16 \cdot \left( \frac{500-16}{2} \right) \right] + \left[ \left( \frac{500-32}{2} \right) \times 10 \cdot \left( \frac{500-32}{4} \right) \right] = 1048180 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{(\text{web}, z = 0 \text{ dan } z = L/2)} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 1048180}{47800 \cdot 10^4 \times 10} = 10,96 \text{ MPa}$$

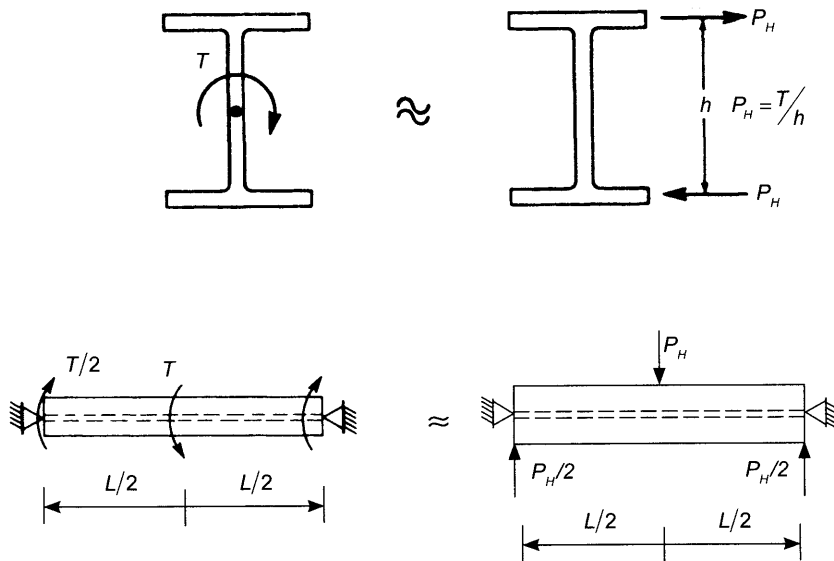
**Rangkuman:**

Jenis Tegangan	Tumpuan ( $z = 0$ )	Lapangan ( $z = L/2$ )
<b>Tegangan normal</b>		
- Lentur vertikal, $\sigma_b$	0	104,712
- Lentur torsi, $\sigma_{bw}$	0	99,18
		203,892
<b>Tegangan Geser, Web</b>		
- Saint Venant, $\tau_s$	24,78	0
- Lentur vertikal, $\tau$	10,96	10,96
	35,74	
<b>Tegangan Geser, Flens</b>		
- Saint Venant, $\tau_s$	39,65	0
- Torsi Warping, $\tau_w$	0,736	2,421
- Lentur vertikal, $\tau$	2,4	2,4
	42,786	

**8.5 ANALOGI TORSI DENGAN LENTUR**

Penyelesaian masalah torsi dengan menggunakan persamaan diferensial, memakan waktu yang cukup banyak, dan cukup digunakan dalam analisa saja. Untuk keperluan praktis, digunakan analogi antara torsi dan lentur biasa. Misalkan beban torsi  $T$  dalam Gambar 8.7 dikonversikan menjadi momen kopel  $P_H$  kali  $h$ , maka gaya  $P_H$  dapat dianggap sebagai beban lateral yang bekerja pada flens balok.

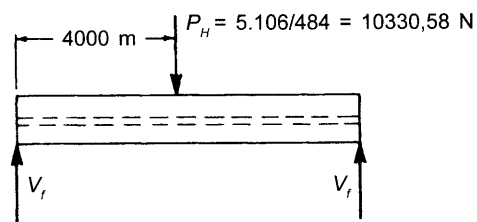
Sistem struktur pengganti mempunyai gaya geser konstan sepanjang setengah bentang balok, padahal distribusi gaya geser yang menimbulkan lenturan lateral hanyalah akibat warping/pemilinan saja. Sehingga struktur pengganti ini akan menimbulkan gaya lateral yang lebih besar dan akibatnya momen lentur  $M_f$  yang menimbulkan tegangan normal juga lebih besar dari keadaan sebenarnya.



Gambar 8.7 Analogi Torsi dan Lentur

#### ■ CONTOH 8.4:

Hitung tegangan pada profil WF 500.200.10.16 (soal 8.3) dengan memakai analogi lentur.



JAWAB:

$$M_f = V_f L/2 = \frac{10330,58}{2} \cdot 4000 = 20661160 \text{ Nmm (untuk satu flens)}$$

$$\sigma_{bw} = \frac{2 \cdot M_f}{S_y} = \frac{2 \times 20661160}{214 \cdot 10^3} = 193,1 \text{ MPa}$$

Tegangan geser akibat torsi, dengan  $M_z = T/2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

$$\tau_s = \frac{M_z \cdot t}{J} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \times 16}{702133,33} = 56,97 \text{ MPa (flens)}$$

$$\tau_s = \frac{M_z \cdot t}{J} = \frac{2,5 \cdot 10^6 \times 10}{702133,33} = 35,6 \text{ MPa} \quad (\text{web})$$

Tegangan geser pada flens akibat lentur lateral:

$$\tau_w = \frac{V_f \cdot Q_f}{I_f \cdot t_f} = \frac{(10330,58/2) \times 80000}{\frac{1}{12} \cdot 200^3 \cdot 16} = 2,42 \text{ MPa}$$

$$\text{Dengan } Q_f = \frac{200}{2} \cdot 16 \cdot \frac{200}{4} = 80000 \text{ mm}^3$$

### Rangkuman:

Jenis Tegangan	Analogi Lentur	Pers. Diferensial
Teg. Normal: $\sigma_b + \sigma_{bw}$	$104,712 + 193,1 = 297,812 \text{ MPa}$	$203,892 \text{ MPa}$
Teg. Geser Web: $\tau + \tau_s$	$10,96 + 35,6 = 46,56 \text{ MPa}$	$35,74 \text{ MPa}$
Teg. Geser Flens: $\tau + \tau_s + \tau_w$	$2,4 + 56,97 + 2,42 = 61,79 \text{ MPa}$	$42,786 \text{ MPa}$

Tampak hasil hitungan dengan memakai metoda analogi lentur memberikan hasil yang lebih besar, untuk itu dilakukan suatu modifikasi sebagai berikut:

Dari persamaan 8.25, untuk kasus pada contoh 8.2, maka  $V_f$  dapat dituliskan dalam bentuk:

$$V_f = \frac{T}{2 \cdot b} \cdot \left( \frac{\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \right) \quad 8.31$$

Dengan  $T/b$  merupakan beban lateral, dan  $T/2b$  adalah gaya geser akibat lentur lateral. Momen lentur lateral dapat diekspresikan sebagai :

$$M_f = \beta \cdot \frac{T}{2 \cdot b} \cdot \left( \frac{L}{2} \right) \quad 8.32$$

$$\text{Dengan } \beta = \frac{\cosh \lambda z}{\cosh \lambda L/2} \quad 8.33$$

Persamaan 8.40 dapat dimodifikasi lagi menjadi bentuk:

$$M_f \cdot b = \beta \times \left( \frac{T \cdot L}{4} \right) \quad 8.34$$

Di mana  $TL/4$  mirip dengan momen lentur biasa untuk beban terpusat pada balok tumpu sederhana. Harga  $\beta$  untuk berbagai tipe pembebanan dapat dibaca dalam lampiran 1 yang terdapat pada akhir buku ini.

### ■ CONTOH 8.5:

Hitung kembali tegangan akibat torsi dari contoh 8.4 dengan menggunakan metoda analogi lentur yang dimodifikasi.

$$M_f = 20661160 \text{ Nmm}$$

$$\lambda L = 4,649 \cdot 10^{-4} \times 8000 = 3,72$$

Dari tabel dengan  $a = 0,5$  dan  $\lambda L = 3,72$  diperoleh  $\beta = 0,5136$

$$M_f = 0,5136 \times 20661160 = 10611571,78 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{bw} = \frac{2 \cdot M_f}{S_y} = \frac{2 \times 10611571,78}{214 \cdot 10^3} = 99,17 \text{ MPa}$$

Bandingkan dengan hasil dari Persamaan Diferensial yang memberikan  $\sigma_{bw} = 99,18$  MPa

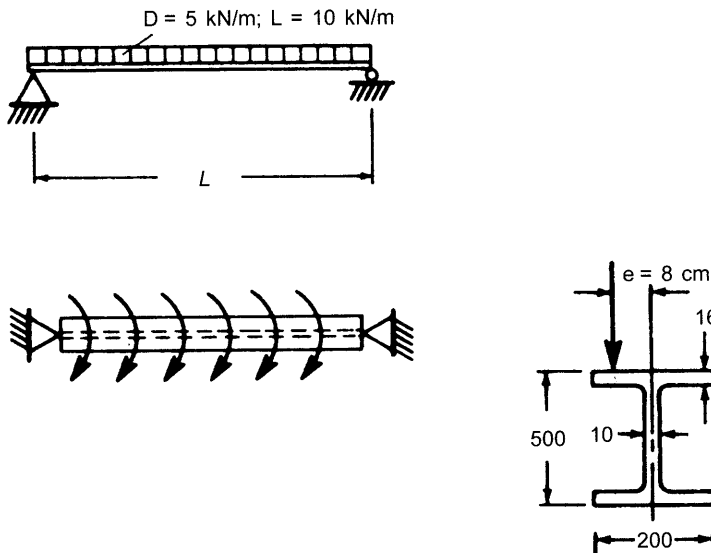
Untuk keperluan disain, maka dengan menggunakan persamaan lentur biaksial dan mengkonversikan momen torsi menjadi sepasang momen lentur lateral yang bekerja pada masing-masing flens, harus dipenuhi persamaan berikut:

$$\frac{M_{ux}}{S_x} + \frac{M_{uy}}{S_y} \leq \phi_b \cdot f_y \quad 8.43$$

Dengan:  $M_{ux}$  adalah momen lentur vertikal  
 $M_{uy}$  adalah momen lentur lateral (akibat torsi)  
 $S_x, S_y$  adalah tahanan momen terhadap sumbu  $x$  dan  $y$   
 $\phi_b$  adalah faktor reduksi = 0,90  
 $f_y$  adalah kuat leleh material

### ■ CONTOH 8.6:

Rencanakan profil bagi balok berikut ini yang memikul beban mati  $D = 5$  kN/m dan beban hidup  $L = 10$  kN/m. Beban bekerja dengan eksentrisitas 8 cm dari sumbu profil. Panjang balok  $L = 8$  m dan balok tertumpu sederhana di kedua ujungnya. BJ37.



### JAWAB:

Misalkan digunakan profil WF 500.200.10.16 (berat sendiri = 0,897 kN/m)

$$q_u = 1,2(5) + 1,6(10) = 22 \text{ kN/m}$$

$$M_{ux} = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot (22 + 1,2(0,897)) \cdot 8^2 = 184,6112 \text{ kN.m}$$

Momen torsi terbagi rata,  $m_u$  adalah:

$$m_u = 22 \times 0,08 = 1,76 \text{ m. kN/m}$$

Dari analogi lentur, momen lentur lateral  $M_f$  yang bekerja pada satu flens adalah:

$$M_f = \frac{1}{8} \cdot \frac{m_u}{h} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \times \frac{1,76}{0,484} \times 8^2 = 29,1 \text{ kNm}$$

Dengan memakai modifikasi analogi lentur, untuk  $a = 0,5$  dan  $\lambda L = 3,72$ ; maka dari tabel diperoleh  $\beta = 0,4092$ , sehingga momen lentur lateral menjadi:

$$M_f = 0,4092 \times 29,1 = 11,91 \text{ kNm}$$

Dari persamaan 8.43:

$$\frac{M_{wx}}{S_x} + \frac{M_{wy}}{S_y} \leq \phi_b \cdot f_y$$

$$\frac{184,6112 \cdot 10^6}{1910 \cdot 10^3} + \frac{2 \times 11,91 \cdot 10^6}{214 \cdot 10^3} \leq 0,90 \times 240$$

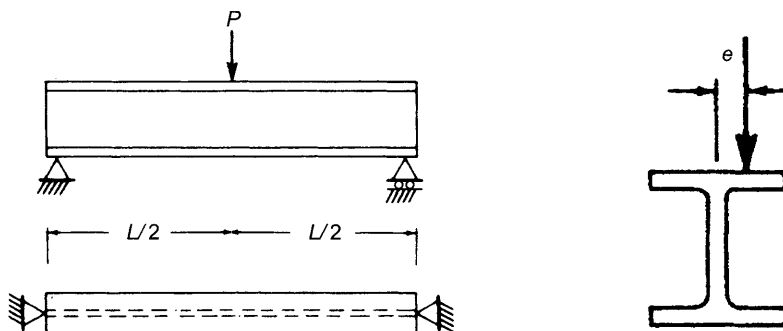
$$207,965 \text{ MPa} \leq 216 \text{ MPa}$$

OK

## SOAL-SOAL LATIHAN

### P.8.1 – P.8.3

Hitunglah nilai-nilai maksimum dari tegangan normal ( $\sigma_n$ ), tegangan geser web/badan ( $\tau_{web}$ ) dan tegangan geser flens/sayap ( $\tau_{flens}$ ) dari balok dalam Gambar P.8.1 – P.8.3 berikut ini!



Gambar P.8.1 – P.8.3

Soal	Profil	$P$ (kN)	$L$ (m)	$e$ (mm)
P.8.1	WF 600.200.11.17	50	10	100
P.8.2	WF 350.350.12.19	40	8	150
P.8.3	WF 250.250.9.14	20	6	10

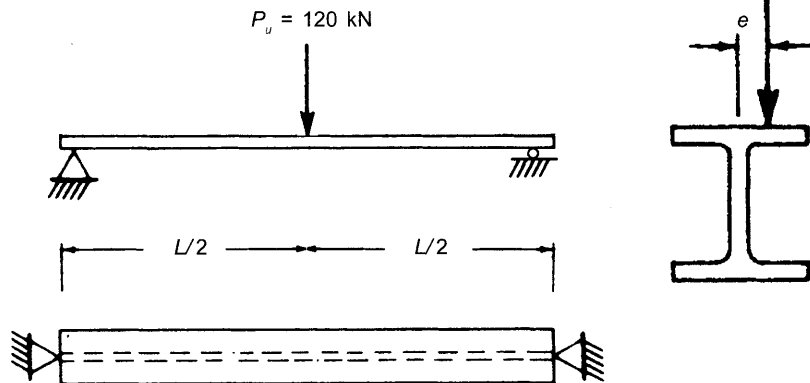
### P.8.4 – P.8.6

Kerjakan kembali soal P.8.1 – P.8.3 dengan menggunakan metode analogi lentur modifikasi!

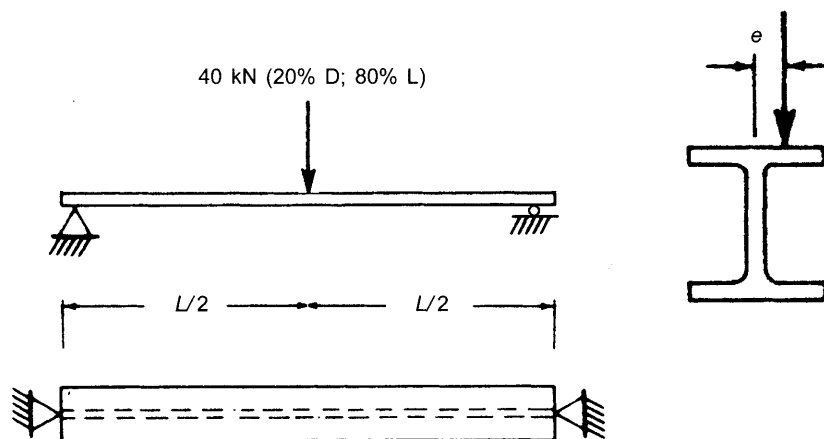
### P.8.7

Periksalah apakah profil WF 400.200.8.13 cukup untuk digunakan dalam komponen struktur dalam Gambar P.8.7. Gunakan cara analogi lentur modifikasi, dengan menganggap mutu baja adalah BJ 37!

maka



Sebuah balok dengan bentang 12 m tertumpu sederhana, memikul sebuah beban terpusat di tengah bentang sebesar 40 kN (20%  $D$  dan 80%  $L$ ). Jika beban membentuk eksentrisitas sebesar 10 cm dari sumbu badan profil, disainlah dimensi balok seekonomis mungkin (dari IWF BJ 37) dengan menggunakan metode analogi lentur modifikasi (abaikan berat sendiri balok)





# Tekuk Torsi Lateral

## TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Melakukan analisis dan desain komponen struktur lentur
- Memahami pengaruh tekuk torsi lateral akibat tidak adanya kekangan lateral menerus pada sisi sayap tekan

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Perilaku Balok I Akibat Beban Momen Seragam
- 1.3 Tekuk Torsi Lateral Elastis
- 1.4 Tekuk Torsi Inelastis
- 1.5 Desain LRFD Balok I
- 1.6 Lentur Dua Arah

## 9.1 PENDAHULUAN

Perhatikan struktur balok tanpa kekangan lateral dalam Gambar 9.1. Pembebanan pada bidang web balok akan menghasilkan tegangan yang sama besar antara titik A dan B (menurut teori umum balok). Namun adanya ketidaksempurnaan balok dan eksentrisitas beban, maka akan mengakibatkan perbedaan tegangan antara A dan B. Tegangan tersebut juga mengakibatkan distribusi tegangan yang tidak sama sepanjang lebar sayap.

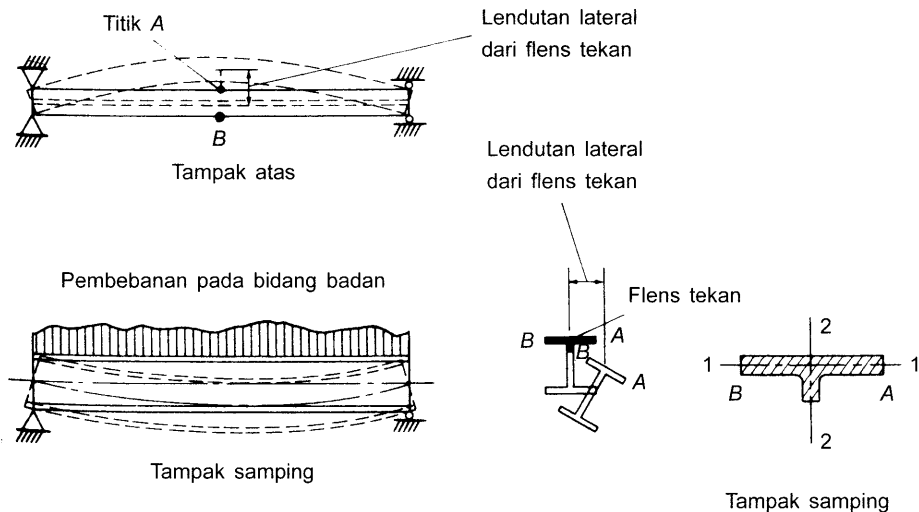
Flens tekan dari balok dapat dianggap sebagai kolom. Sayap yang diasumsikan sebagai kolom ini akan tertekuk dalam arah lemahnya akibat lentur terhadap suatu sumbu seperti kolom. Namun karena web balok memberikan sokongan untuk mencegah tekuk dalam arah ini, maka flens akan cenderung tertekuk oleh lentur pada sumbu 2-2. Karena bagian tarik dari balok berada dalam kondisi stabil, maka proses tekuk lentur dalam arah lateral tersebut akan dibarengi dengan proses torsi sehingga terjadilah tekuk lentur torsi (*Lateral Torsional Buckling*).

Ada dua macam kategori sokongan lateral, yakni:

1. sokongan lateral menerus yang diperoleh dengan menanamkan flens tekan balok ke dalam pelat lantai beton
2. sokongan lateral pada jarak-jarak tertentu yang diberikan oleh balok atau rangkai melintang dengan kekakuan yang cukup

## 9.2 PERILAKU BALOK I AKIBAT BEBAN MOMEN SERAGAM

Untuk menurunkan persamaan desain bagi balok yang mengalami tekuk torsi lateral, digunakan ilustrasi sebuah balok yang menerima beban momen seragam yang tidak terkekang secara lateral. Beban momen seragam tersebut menyebabkan tekanan konstan pada flens sepanjang bentang tak terkekang. Jika ada variasi momen, maka gaya tekan pada flens bervariasi sepanjang bentang tak terkekang. Hal ini mengakibatkan gaya tekan rata-rata yang lebih rendah sepanjang bentang tersebut. Gaya tekan rata-rata yang lebih rendah ini mengurangi peluang terjadinya tekuk torsi lateral.



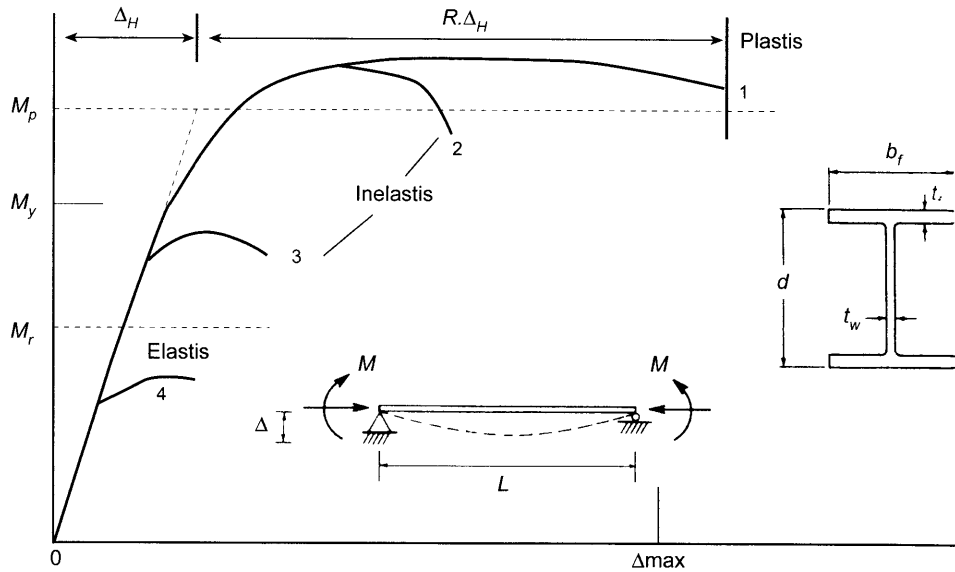
**Gambar 9.1** Balok Terkekang Lateral pada Ujung-ujungnya

Tekuk torsi lateral adalah kondisi batas yang menentukan kekuatan sebuah balok. Sebuah balok mampu memikul momen maksimum hingga mencapai momen plastis ( $M_p$ ). Tercapai atau tidaknya momen plastis, keruntuhan dari sebuah struktur balok adalah salah satu dari peristiwa berikut:

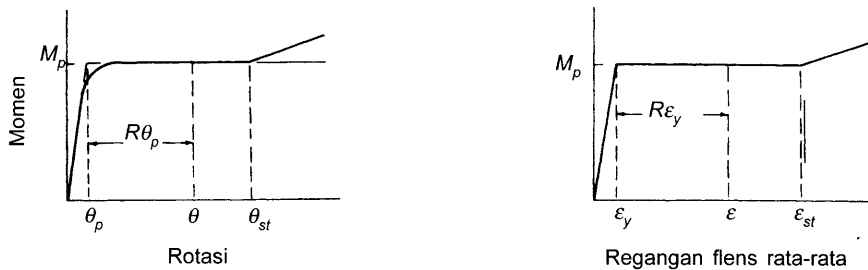
1. Tekuk lokal dari flens tekan
2. Tekuk lokal dari web dalam tekan lentur
3. Tekuk torsi lateral

Ketiga macam keruntuhan tersebut dapat terjadi pada kondisi elastis maupun inelastis. Gambar 9.2 menunjukkan perilaku dari sebuah balok yang dibebani momen konstan  $M$  dengan bentang tak terkekang  $L$ . Empat kategori dari perilaku balok tersebut adalah:

1. Jika  $L$  cukup kecil ( $L \leq L_{pd}$ ), maka momen plastis,  $M_p$ , tercapai dengan deformasi yang besar. Deformasi yang besar ditunjukkan oleh kapasitas rotasi  $R \cdot \Delta_H$ , dengan  $R \geq 3$  adalah faktor daktilitas. Kemampuan berdeformasi (kapasitas rotasi) adalah kemampuan menerima regangan flens yang besar dengan stabil. Perilaku ini ditunjukkan oleh kurva 1 pada Gambar 9.2
2. Jika  $L$  diperbesar sehingga  $L_{pd} < L < L_p$ , maka balok dapat mencapai  $M_p$  namun dengan kapasitas rotasi yang lebih kecil ( $R < 3$ ). Hal ini dikarenakan kurang cukupnya kekakuan flens dan/atau web untuk menahan tekuk lokal, atau kurangnya sokongan lateral untuk menahan tekuk torsi lateral. Perilaku inelastis ini ditunjukkan oleh kurva 2 pada Gambar 9.2
3. Bila panjang bentang tak terkekang diperbesar lagi ( $L_p < L < L_r$ ), maka  $M$  hanya mampu mencapai  $M_r$  dengan kapasitas rotasi yang sangat terbatas. Tekuk lokal flens dan web serta tekuk torsi lateral mencegah tercapainya  $M_p$
4. Perilaku elastis ( $L_r < L$ ), dengan tahanan momen  $M_{cr}$  ditentukan oleh tekuk elastis, serta tekuk lokal flens, tekuk lokal web dan tekuk torsi lateral



Gambar 9.2 Balok dengan Beban Momen Konstan Tanpa Kekangan Lateral



Gambar 9.3 Hubungan Deformasi dengan Momen Plastis,  $M_p$

Batasan untuk  $L_{pd}$ ,  $L_p$ , dan  $L_r$  akan dibahas dalam subbab 9.4.

### 9.3 TEKUK TORSI LATERAL ELASTIS

Untuk menurunkan persamaan pada balok I yang mengalami tekuk torsi lateral akibat beban momen seragam  $M_o$ , perhatikan gambar 9.4 yang menunjukkan posisi sebuah balok I yang tertekuk.

Beban momen  $M_o$  yang diberikan pada bidang  $yz$  dapat diuraikan terhadap sumbu  $x'$ ,  $y'$ , dan  $z'$  menjadi komponen-komponennya yaitu  $M_{x'}$ ,  $M_{y'}$ , dan  $M_{z'}$ . Dengan membuat asumsi deformasi kecil, maka kelengkungan pada bidang  $y'z'$  dapat dituliskan menjadi:

$$E \cdot I_{x'} \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{x'} = M_o$$

Demikian juga pada bidang  $x'z'$ :

$$E \cdot I_{y'} \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{y'} = M_o \cdot \phi$$

Persamaan diferensial untuk balok I yang menerima beban torsi telah diturunkan dalam bab VIII (persamaan 8.27):

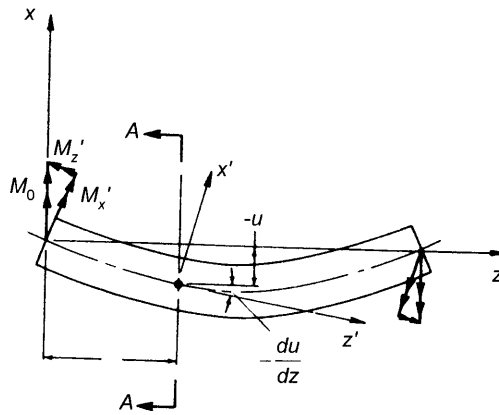
$$M_{z'} = GJ \frac{d\phi}{dz} - E \cdot C_w \frac{d^2\phi}{dz^2} \quad 9.3$$

Dari Gambar 9.4 (a) diperoleh hubungan:

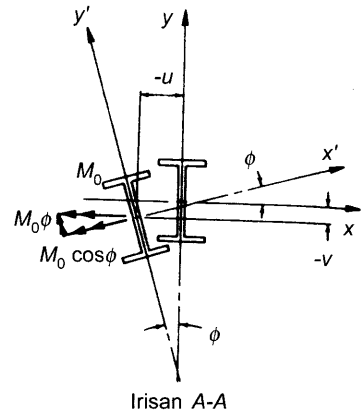
$$M_{z'} = -\frac{du}{dz} \cdot M_o \quad 9.4$$

Jika persamaan 9.3 dan 9.4 disamakan akan diperoleh:

$$-\frac{du}{dz} \cdot M_o = GJ \frac{d\phi}{dz} - E \cdot C_w \frac{d^3\phi}{dz^3} \quad 9.5$$

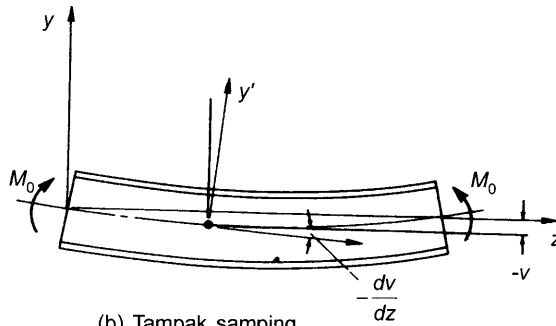


(a) Tampak atas



Irisan A-A

(c)



(b) Tampak samping

**Gambar 9.4** Balok I dengan Beban Momen Seragam,  $M_o$

Mendiferensialkan persamaan 9.5 ke-z didapatkan:

$$-\frac{d^2u}{dz^2} \cdot M_o = GJ \frac{d^2\phi}{dz^2} - E \cdot C_w \frac{d^4\phi}{dz^4} \quad 9.6$$

Dari persamaan 9.2 dapat dituliskan hubungan:

$$\frac{d^2u}{dz^2} = \frac{M_o \cdot \phi}{E \cdot I_y} \quad 9.7$$

Selanjutnya substitusikan persamaan 9.7 ke dalam persamaan 9.6:

$$E \cdot C_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_o^2}{E \cdot I_y} \phi = 0 \quad 9.9$$

Dengan memisalkan:

$$2\alpha = \frac{GJ}{E \cdot C_w} \quad \text{dan} \quad \beta = \frac{M_o^2}{E^2 \cdot C_w \cdot I_y} \quad 9.10$$

maka persamaan 9.8 dapat ditulis kembali menjadi:

$$\frac{d^4 \phi}{dz^4} - 2\alpha \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \beta \phi = 0 \quad 9.11$$

Untuk memperoleh solusi dari persamaan 9.10, maka dapat dimisalkan:

$$\phi = A \cdot e^{mz} \quad 9.11a$$

$$\frac{d^2 \phi}{dz^2} = A \cdot m^2 \cdot e^{mz} \quad 9.11b$$

$$\frac{d^4 \phi}{dz^4} = A \cdot m^4 \cdot e^{mz} \quad 9.11c$$

Substitusikan persamaan 9.11 ke dalam persamaan 9.10 untuk mendapatkan:

$$A \cdot m^4 \cdot e^{mz} - 2\alpha \cdot A \cdot m^2 \cdot e^{mz} - \beta \cdot A \cdot e^{mz} = 0 \quad 9.12a$$

$$A \cdot e^{mz} (m^4 - 2\alpha \cdot m^2 - \beta) = 0 \quad 9.12b$$

Karena  $e^{mz}$  dan  $A \neq 0$ , maka persamaan 9.12.b hanya terpenuhi bila

$$m^4 - 2\alpha \cdot m^2 - \beta = 0 \quad 9.13$$

Akar-akar dari persamaan 9.13 adalah:

$$m^2 = \alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad 9.14a$$

$$\text{atau } m = \pm \sqrt{\alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2}} \quad 9.14b$$

Dari persamaan 9.14.b tampak bahwa  $m$  dapat berupa dua akar real dan dua akar kompleks sebab  $\sqrt{\beta + \alpha^2} > \alpha$ .

$$\text{Misalkan: } n^2 = \alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (2 \text{ akar real}) \quad 9.15a$$

$$q^2 = -\alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2} \quad (2 \text{ akar kompleks}) \quad 9.15b$$

maka solusi dari persamaan 9.10 adalah:

$$\phi = A_1 \cdot e^{nz} + A_2 \cdot e^{-nz} + A_3 \cdot e^{iqz} + A_4 \cdot e^{-iqz} \quad 9.16$$

Dengan mengingat persamaan Euler yang menyatakan:

$$e^{iqz} = \cos qz + i \sin qz \quad 9.17a$$

$$e^{-iqz} = \cos qz - i \sin qz \quad 9.17b$$

maka persamaan 9.16 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\phi = A_1 \cdot e^{nz} + A_2 \cdot e^{-nz} + A_3 \cdot \cos qz + A_3 \cdot i \cdot \sin qz + A_4 \cdot \cos qz - A_4 \cdot i \cdot \sin qz \quad 9.18a$$

$$\phi = A_1 \cdot e^{nz} + A_2 \cdot e^{-nz} + (A_3 + A_4) \cos qz + (A_3 - A_4) \cdot i \cdot \sin qz \quad 9.18b$$

$$\phi = A_1 \cdot e^{nz} + A_2 \cdot e^{-nz} + A_5 \cdot \cos qz + A_6 \cdot \sin qz \quad 9.18c$$

serta diperoleh turunan kedua  $\phi$  terhadap  $z$  yaitu:

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = A_1 \cdot n^2 \cdot e^{nz} + A_2 \cdot n^2 \cdot e^{-nz} - A_5 \cdot q^2 \cdot \cos qz - A_6 \cdot q^2 \cdot \sin qz \quad 9.19$$

Selanjutnya konstanta  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_5$ , dan  $A_6$  diperoleh dari kondisi batas yang menyatakan:

$$\phi = 0 \quad \frac{d^2\phi}{dz^2} = 0 \quad \text{pada } z = 0 \text{ dan } z = L$$

Untuk  $\phi = 0$  pada  $z = 0$ , diperoleh:

$$0 = A_1 + A_2 + A_5 \quad 9.20$$

Untuk  $\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$  pada  $z = 0$ , diperoleh:

$$0 = A_1 \cdot n^2 + A_2 \cdot n^2 - A_5 \cdot q^2 \quad 9.21$$

Dari persamaan 9.20 dan 9.21 diperoleh persamaan:

$$0 = A_5 \cdot (n^2 + q^2) \Rightarrow A_5 = 0 \quad 9.22$$

sehingga persamaan 9.20 menjadi:

$$A_1 = -A_2 \quad 9.23$$

dan persamaan 9.18.c dapat dituliskan menjadi:

$$\phi = A_1 \cdot (e^{nz} - e^{-nz}) + A_6 \cdot \sin qz \quad 9.24.a$$

$$\text{atau } \phi = 2 \cdot A_1 \cdot \sinh nz + A_6 \cdot \sin qz \quad 9.24.b$$

$$\text{dan } \frac{d^2\phi}{dz^2} = 2 \cdot A_1 \cdot n^2 \cdot \sinh nz - A_6 \cdot q^2 \cdot \sin qz \quad 9.24.c$$

Dari kondisi batas  $\phi = 0$  pada  $z = L$  diperoleh:

$$0 = 2 \cdot A_1 \cdot \sinh nL + A_6 \cdot \sin qL \quad 9.25$$

dan untuk  $\frac{d^2\phi}{dz^2} = 0$  pada  $z = L$  diperoleh pula:

$$0 = 2 \cdot A_1 \cdot n^2 \cdot \sinh nL - A_6 \cdot q^2 \cdot \sin qL \quad 9.26$$

Kalikan persamaan 9.25 dengan  $q^2$  serta jumlahkan hasilnya dengan persamaan 9.26 untuk mendapatkan:

$$2 \cdot A_1 \cdot (n^2 + q^2) \cdot \sinh nL = 0 \quad 9.27$$

Karena  $(n^2 + q^2) \neq 0$  dan  $\sinh nL = 0$  hanya jika  $n = 0$ , sehingga  $A_1$  harus sama dengan nol, dan persamaan 9.13 menjadi:

$$A_1 = -A_2 = 0 \quad 9.28$$

Akhirnya persamaan 9.18.c dapat disederhanakan menjadi:

$$\phi = A_6 \cdot \sin qz \quad 9.29$$

Pada  $z = 0$  maka  $\phi = 0$ :

$$0 = A_6 \cdot \sin qL \quad 9.30$$

Karena  $A_6 \neq 0$ , maka

$$\sin qL = 0 \Rightarrow qL = N \cdot \pi$$

$$\text{atau } q = \frac{N \cdot \pi}{L}$$

Substitusikan persamaan 9.31.b dan 9.9 ke dalam persamaan 9.15.b untuk  $M_o$  diperoleh:

$$\frac{N^2 \cdot \pi^2}{L^2} = -\frac{GJ}{2 \cdot E \cdot C_w} + \sqrt{\frac{M_o^2}{E^2 \cdot C_w \cdot I_y} + \left(\frac{GJ}{2 \cdot E \cdot C_w}\right)^2}$$

untuk nilai  $N = 1$

$$\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{GJ}{2 \cdot E \cdot C_w} = \sqrt{\frac{M_o^2}{E^2 \cdot C_w \cdot I_y} + \left(\frac{GJ}{2 \cdot E \cdot C_w}\right)^2}$$

$$\text{atau } \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right)^2 + \frac{\pi^2 GJ}{L^2 \cdot E \cdot C_w} = \frac{M_o^2}{E^2 \cdot C_w \cdot I_y}$$

Untuk  $M_o = M_{cr}$ , maka:

$$\left(\frac{\pi^2}{L^2}\right)^2 \cdot E^2 \cdot C_w \cdot I_y + \frac{\pi^2 E^2 \cdot I_y \cdot GJ}{L^2 \cdot E} = M_{cr}^2$$

$$\text{atau } \frac{\pi^2}{L^2} \left\{ \frac{\pi^2 E^2}{L^2} C_w \cdot I_y + E \cdot G \cdot J \cdot I_y \right\} = M_{cr}^2$$

Akhirnya persamaan 9.36 dapat disusun menjadi:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y \cdot C_w}$$

Persamaan 9.37 merupakan persamaan yang menyatakan besarnya momen yang ditahan oleh profil I akibat tekuk torsi lateral. Untuk memperhitungkan pengaruh momen tak seragam, SNI 03-1729-2002 (pasal 8.3.1) menyatakan bahwa momen untuk kondisi tekuk torsi lateral untuk profil I dan kanal ganda, adalah:

$$M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y \cdot C_w}$$

#### 9.4 TEKUK TORSI INELASTIS

Sekarang perhatikan Gambar 9.3, ketika serat tekan mencapai regangan sebesar  $\epsilon_y$  lebih besar dari  $\epsilon_y$  ( $\epsilon > f_y/E$ ). Pada keadaan ini cukup potensial untuk terjadinya tekuk torsi lateral inelastis. Meskipun kekakuan torsi tidak terlalu terpengaruh oleh tegangan residu, namun tegangan residu ini memberi pengaruh cukup besar terhadap tahanan tekan.

Akibat adanya tegangan residu tahanan momen elastis maksimum,  $M_r$  adalah:

$$M_r = S_x(f_y - f_r)$$

Pada umumnya sokongan lateral dipasang pada lokasi yang direncanakan mampu mencapai momen plastis,  $M_p$ , dan jarak antar sokongan lateral relatif pendek. Dengan mengabaikan kekakuan torsi,  $GJ$ , maka persamaan 9.37 menjadi:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 E}{L^2} \sqrt{C_w \cdot I_y} \quad 9.40$$

Karena  $M_{cr}$  harus mencapai  $M_p$ , substitusikan  $M_p = Z_x \cdot f_y$  untuk  $M_{cr}$ . Substitusikan juga  $C_w = I_y h^2/4$ ,  $I_y = A \cdot r_y^2$ , serta  $L$  adalah panjang bentang tak terkekang, maka persamaan 9.41 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\frac{L}{r_y} \leq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{2 \cdot f_y} \left( \frac{hA}{Z_x} \right)} \quad 9.41$$

Dengan menganggap  $hA/Z_x = 1,5$ , maka:

$$\frac{L}{r_y} \leq \sqrt{\frac{\pi^2 E \cdot 1,5}{2 \cdot f_y}} = 2,72 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 9.42$$

Untuk dapat mencapai kapasitas rotasi  $R < 3$ , SNI 03-1729-2002 (Tabel 8.3-2) mengambil harga yang lebih rendah, yaitu:

$$\frac{L_p}{r_y} = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 9.43$$

Bila diinginkan kapasitas rotasi yang lebih besar ( $R \geq 3$ ) untuk digunakan dalam analisis plastis, SNI 03-1729-2002 (pasal 7.5.2) mensyaratkan:

$$\frac{L_{pd}}{r_y} = \frac{25000 + 15000 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)}{f_y} \quad 9.44$$

Dengan:

- $f_y$  adalah tegangan leleh material, MPa
- $M_1$  adalah momen ujung yang terkecil, N-mm
- $M_2$  adalah momen ujung yang terbesar, N-mm
- $r_y$  adalah jari-jari girasi terhadap sumbu lemah, mm
- $M_1/M_2$  bertanda positif untuk kasus kelengkungan ganda dan negatif untuk kelengkungan tunggal

Jika hanya dikehendaki  $M = M_p$ , maka panjang bentang tak terkekang diatur sedemikian rupa agar  $L = L_p$ , sehingga:

$$\frac{L_r}{r_y} = \frac{X_1}{f_L} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 \cdot f_L^2}} \quad 9.45$$

Dengan:

$$f_L = f_y - f_r$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJ A}{2}}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{GJ} \right)^2 \frac{C_w}{I_y}$$



## 9.5 DESAIN LRFD BALOK I

Setiap komponen struktur yang memikul momen lentur, harus memenuhi persyaratan:

$$\phi_b M_n \geq M_u$$

Dengan:

$\phi_b$  adalah faktor reduksi untuk lentur = 0,90

$M_n$  adalah kuat nominal momen lentur dari penampang

$M_u$  adalah beban momen lentur terfaktor

Besarnya kuat nominal momen lentur dari penampang ditentukan sebagai berikut:

### Kasus 1: $M_n = M_p$ ( $R \geq 3$ )

Agar penampang dapat mencapai kuat nominal  $M_n = M_p$ , maka penampang harus kompak untuk mencegah terjadinya tekuk lokal. Syarat penampang kompak ditentukan sesuai dengan Tabel 7.5-1 SNI 03-1729-2002, yaitu  $\lambda$  untuk flens ( $b/2t_f$ ) dan untuk web ( $h/t_w$ ) tidak boleh melebihi  $\lambda_p$ . Batasan nilai untuk  $\lambda_p$  ditampilkan pada Tabel 9.1. Untuk penampang harus kompak, pengaku lateral harus diberikan sehingga panjang bentang tak terkekang  $L$ , tidak melebihi  $L_{pd}$  yang diperoleh dari persamaan 9.47.

$$L_{pd} = \frac{25000 + 15000 \left( \frac{M_1}{M_p} \right)}{f_y} \times r_y$$

**TABEL 9.1 BATASAN RASIO KELANGSINGAN  $\lambda_p$  UNTUK PENAMPANG KOMPAK BALOK I**

(Modulus Elastisitas,  $E = 200000$  MPa)

Tegangan Leleh $f_y$ (MPa)	Tekuk Lokal Flens $\frac{b}{2t_f} = \frac{170}{\sqrt{f_y}}$	Tekuk Lokal Web $\frac{h}{t_w} = \frac{1680}{\sqrt{f_y}}$	Tekuk Torsi Lateral $\frac{L}{r_y} = \frac{790}{\sqrt{f_y}}$
210	11,73	115,93	54,52
240	10,97	108,44	50,99
250	10,75	106,25	49,96
290	9,98	98,65	46,39
410	8,4	82,97	39,02

### Kasus 2: $M_n = M_p$ ( $R < 3$ )

Agar penampang dapat mencapai momen plastis  $M_p$  dengan kapasitas rotasi  $R < 3$ , penampang harus kompak dan tidak terjadi tekuk lokal ( $b/2t_f$  dan  $h/t_w < \lambda_p$ ). Pengaku lateral harus diberikan sehingga panjang bentang tak terkekang  $L$  tidak melebihi  $L_p$  yang ditentukan oleh persamaan 9.43 (untuk  $C_b = 1$ ).

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \quad (\text{untuk } E = 200000 \text{ MPa})$$

### Kasus 3: $M_p > M_n \geq M_r$

Dalam kasus 3 terjadi tekuk torsi lateral untuk penampang kompak ( $\lambda \leq \lambda_p$ ). Kuat nominal didekati dengan hubungan linear antara titik 1 ( $L_p, M_p$ ) dengan titik 2 ( $L_r, M_r$ ) pada Gambar 9.5. Kuat momen lentur nominal dalam kasus 3 ditentukan dalam SNI 03-1729-2002 (pasal 8.3.4).

$$M_n = C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] \leq M_p \quad 9.49$$

$M_r$  adalah kuat nominal yang tersedia untuk beban layan ketika serat terluar penampang mencapai tegangan  $f_y$  (termasuk tegangan residu) dan dapat diekspresikan sebagai:

$$M_r = S_x(f_y - f_r)$$

9.50

Dengan:

$f_y$  adalah tegangan leleh profil

$f_r$  adalah tegangan residu (70 MPa untuk penampang dirol & 115 MPa untuk penampang dilas)

$S_x$  adalah modulus penampang

Panjang  $L_r$  diperoleh dari persamaan 9.52:

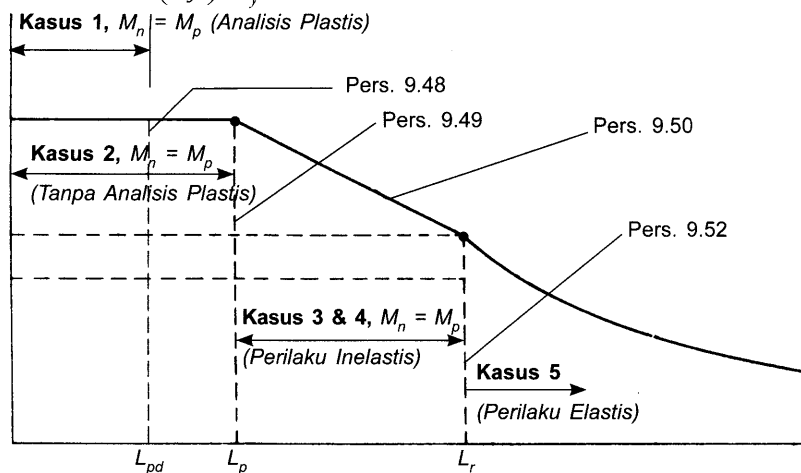
$$L_r = \frac{X_1 \cdot r_y}{f_L} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 \cdot f_L^2}} \quad 9.51$$

Dengan:

$$f_L = f_y - f_r \quad 9.52.a$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJ}{2}} \quad 9.52.b$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{GJ} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} \quad 9.52.c$$



Gambar 9.5 Kuat Momen Lentur Nominal Akibat Tekuk Torsi Lateral

**Kasus 4:**  $M_p > M_n \geq M_r$

Kasus ini terjadi jika:

1.  $L_p < L < L_r$
2.  $\lambda_p < (\lambda = b/2 \cdot t_f) < \lambda_r$  (flens tak kompak)
3.  $\lambda_p < (\lambda = h/t_w) < \lambda_r$  (web tak kompak)

Kuat momen lentur nominal dalam kasus 4 harus dihitung berdasarkan keadaan yang paling kritis dari tekuk lokal flens, tekuk lokal web serta tekuk torsi lateral. Untuk membatasi terhadap tekuk lokal flens serta tekuk lokal web, SNI 03-1729-2002 (pasal 8.2.4) merumuskan:

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

Sedangkan kondisi batas untuk tekuk torsi lateral ditentukan berdasarkan

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

Dengan faktor pengali momen,  $C_b$ , ditentukan oleh persamaan:

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{\max}}{2,5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C} \leq 2,3$$

Dengan:

$M_{\max}$  adalah momen maksimum pada bentang yang ditinjau

$M_A$  adalah momen pada  $1/4$  bentang tak terkekang

$M_B$  adalah momen pada tengah bentang tak terkekang

$M_C$  adalah momen pada  $3/4$  bentang tak terkekang

Kuat momen lentur nominal dalam kasus 4 ini diambil dari nilai yang terkecil antara persamaan 9.54 dan 9.55. Batasan rasio kelangsingan penampang,  $\lambda_r$  untuk penampang tak kompak ditampilkan dalam Tabel 9.2.

**TABEL 9.2 BATASAN RASIO KELANGSINGAN  $\lambda_R$  UNTUK PENAMPANG TAK KOMPAK BALOK I**

(Modulus Elastisitas,  $E = 200000$  MPa)

Tegangan Leleh $f_y$ (MPa)	Tekuk Lokal Flens $\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{370}{\sqrt{f_y - f_r}}$	Tekuk Lokal Web $\frac{h}{t_w} = \frac{2550}{\sqrt{f_y}}$
210	2,64	175,97
240	2,18	164,60
250	2,06	161,28
290	1,68	149,74
410	1,09	125,94

**Kasus 5:  $M_n < M_r$**

Kasus 5 terjadi bila  $L > L_r$  dan kelangsingan dari flens serta web tak melebihi  $\lambda_r$  (penampang kompak). Kuat nominal momen lentur dalam kondisi ini ditentukan sebagai berikut:

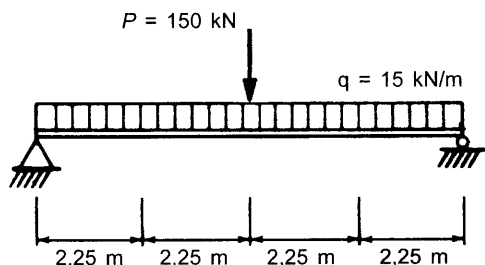
$$M_n = M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left( \frac{\pi E}{L} \right)^2 I_y \cdot C_w}$$

Persamaan 9.56 dapat pula dituliskan dengan menggunakan variabel  $X_1$  dan  $X_2$  seperti dalam persamaan 9.52.b dan c, sehingga menjadi:

$$M_n = M_{cr} = \frac{C_b \cdot S_x \cdot X_1 \cdot \sqrt{2}}{L/r_y} \sqrt{1 + \frac{X_1^2 \cdot X_2}{2(L/r_y)^2}}$$

### CONTOH 9.1:

Sebuah balok tertumpu sederhana dengan beban seperti dalam gambar di bawah ini.



Beban merata terdiri dari 15%  $D$  dan 85%  $L$ , beban terpusat terdiri dari 40%  $D$  serta 60%  $L$ . Balok tersebut diberi sokongan lateral pada ujung-ujungnya serta setiap jarak 2,25 m. Mutu baja adalah BJ 37.

JAWAB:

$$q_u = 1,2(0,15)(15) + 1,6(0,85)(15) = 2,7 + 20,4 = 23,1 \text{ kN/m}$$

$$P_u = 1,2(0,4)(150) + 1,6(0,6)(150) = 72 + 144 = 216 \text{ kN}$$

$$M_u = \frac{1}{8}(23,1)(9)^2 + \frac{1}{4}(216)(9) = 233,8875 + 486 = 719,8875 \text{ kN.m}$$

$$M_n \text{ perlu} = M_u / \phi_b = 719,8875 / 0,9 = 799,875 \text{ kN.m}$$

Estimasikan apakah sokongan lateral cukup dekat untuk mendesain balok agar dapat mencapai momen plastis,  $M_p$  (tanpa analisa plastis). Asumsikan penampang kompak untuk mencegah tekuk lokal, dan balok berada dalam kasus 2 ( $M_n = M_p$ ).

Panjang maksimal bentang tak terkekang adalah:

$$L_p = \frac{790 \cdot r_y}{\sqrt{f_y}} = \frac{790 \cdot r_y}{\sqrt{240}} = 50,99 \cdot r_y$$

$$M_n \text{ perlu} = M_p \text{ perlu} = 799,875 \text{ kN.m}$$

$$Z_x \text{ perlu} = \frac{M_p \text{ perlu}}{f_y} = \frac{799,875 \cdot 10^6}{240} = 3.332.812,5 \text{ mm}^3$$

Penampang terkecil yang memiliki  $Z_x \geq 3.332.812,5 \text{ mm}^3$  adalah 400.400.13.21 ( $Z_x = 3600,13 \text{ cm}^3$ ).

Periksa kuat momen lentur nominal dari penampang, dengan menyertakan berat sendiri balok:

$$M_u \text{ (berat sendiri)} = 1,2 \cdot \frac{1}{8}(1,72)(9)^2 = 20,898 \text{ kN.m}$$

$$M_u = 719,8875 + 20,898 = 740,7855 \text{ kN.m}$$

$$M_n = M_p = Z_x \cdot f_y = 3600,13 \cdot 10^3 (240) = 864,0312 \text{ kN.m}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9 \times 864,0312 = 777,628 \text{ kN.m} > M_u (= 740,7855 \text{ kNm})$$

Cek kelangsingan penampang:

$$\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{400}{2 \times 21} = 9,52 < \frac{170}{\sqrt{f_y}} (= 10,97)$$

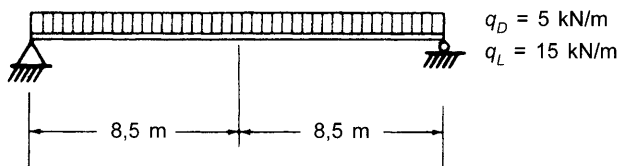
$$\frac{b}{t_w} = \frac{400 - 2(21)}{13} = 27,53 < \frac{1680}{\sqrt{f_y}} (= 108,44)$$

$$L_p = 50,99 \cdot r_y = 50,99(101) = 5149,99 \text{ mm} = 5,14999 \text{ m}$$

$$L_p > L (= 2,25 \text{ m}) \rightarrow \text{sesuai asumsi awal, termasuk kasus 2.}$$

### ■ CONTOH 9.2:

Periksa apakah profil WF 700.300.12.24 cukup kuat untuk memikul beban layan pada gambar berikut ini, jika pada balok diberi sokongan lateral pada tengah bentang serta pada tumpuan-tumpuan. (mutu baja BJ 37)



### JAWAB:

Berat sendiri profil WF 700.300.12.24 = 1,85 kN/m

$$q_u = 1,2(5 + 1,85) + 1,6(15) = 32,22 \text{ kN/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (32,22)(17)^2 = 1163,9475 \text{ kN.m}$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{240}} \times 67,8 = 3457,4122 \text{ mm} = 3,457 \text{ m}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = \frac{\pi}{5760 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 324,23 \cdot 10^4 \times 23550}{2}}$$

$$= 13480,14106 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{5760 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \times 324,23 \cdot 10^4} \right)^2 \frac{12338352 \cdot 10^6}{10800 \cdot 10^4}$$

$$= 2,2535 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 67,8 \cdot \left( \frac{13480,14106}{240 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 2,2535 \cdot 10^{-4} (240 - 70)^2}}$$

$$= 10398,342 \text{ mm} = 10,398 \text{ m}$$

$$L_p (= 3,457 \text{ m}) < L (= 8,5 \text{ m}) < L_r (= 10,398 \text{ m})$$

Cek kelangsingan:

$$\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{300}{2 \times 24} = 6,25 < \lambda_p (= 10,97)$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{700 - 2(24)}{13} = 50,15 < \lambda_p (= 108,44)$$

} Penampang Kompak  
Kasus 3

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{\max}}{2,5 \cdot M_{\max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$

$$M_{\max} = 1163,9475 \text{ kN.m}$$

$$M_A = 509,227 \text{ kN.m}$$

$$M_B = 872,96 \text{ kN.m}$$

$$M_C = 1091,2 \text{ kN.m}$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 1163,9475}{(2,5 \times 1163,9475) + (3 \times 509,227) + (4 \times 872,96) + (3 \times 1091,2)} = 1,3$$

$$M_r = S_x(f_y - f_r) = 5760 \cdot 10^3 \cdot (240 - 70) = 979,2 \text{ kN.m}$$

$$M_p = Z_x f_y = 6248,79 \cdot 10^3 \cdot 240 = 1499,7096 \text{ kN.m}$$

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

$$= 1,3$$

$$= 1458,027 \text{ kN.m} < M_p (= 1499,7096 \text{ kN.m})$$

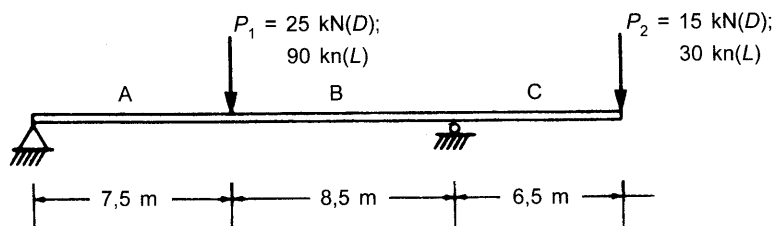
OK

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9 \times 1458,027 = 1312,2243 \text{ kN.m} > 1163,9475 \text{ kN.m}$$

OK

### ■ CONTOH 9.3:

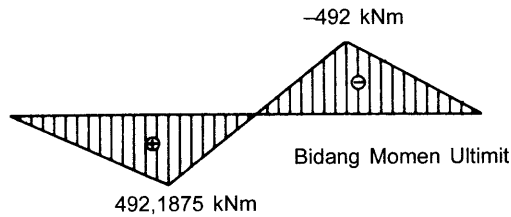
Pilihlah penampang WF yang ekonomis bagi balok pada struktur di bawah ini. Sokongan lateral dipasang pada kedua tumpuan serta pada kedua lokasi beban terpusat. (mutu baja BJ 37)



JAWAB:

$$P_{u1} = 1,2(25) + 1,6(90) = 174 \text{ kN}$$

$$P_{u2} = 1,2(15) + 1,6(30) = 66 \text{ kN}$$



Dicoba menggunakan profil WF 600.200.11.17.

Cek kelangsingan penampang:

$$\left. \begin{aligned} \frac{b}{2 \cdot t_f} &= \frac{200}{2 \times 17} = 5,88 < 10,97 \\ \frac{h}{t_w} &= \frac{600}{11} = 54,54 < 108,44 \end{aligned} \right\} \text{Penampang Kompak}$$

Segmen A dan C:

$$M_n \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{492,1875}{0,9} = 546,875 \text{ kN.m}$$

$$L = 7,5 \text{ m}$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{240}} \times 41,2 = 2100,96 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = \frac{\pi}{2590 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 90,62 \cdot 10^4 \times 134,4 \cdot 10^2}{2}}$$

$$= 11977,92346 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{2590 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \times 90,62 \cdot 10^4} \right)^2 \frac{1926037,67 \cdot 10^6}{2280 \cdot 10^4}$$

$$= 4,31282 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 41,2 \cdot \left( \frac{11977,92346}{240 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 4,31282 \cdot 10^{-4} (240 - 70)^2}}$$

$$= 6272,73 \text{ mm} = 6,273 \text{ m}$$

Karena  $L (= 7,5 \text{ m}) > L_r (= 6,273 \text{ m})$  dan penampang kompak, maka s.d. masuk kasus 5.

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 2863,18 \cdot 10^3 (240) = 687,16 \text{ kN.m}$$

$$M_n = M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left( \frac{\pi \cdot E}{L} \right)^2 \cdot I_y \cdot C_w}$$

Karena  $M_1/M_2 = 0$ , maka  $C_b = 1,67$

$$M_n = 1,67 \frac{\pi}{7500} \sqrt{2 \cdot 10^5 \times 2,28 \cdot 10^7 \times 8 \cdot 10^4 \times 90,62 \cdot 10^4 + \left( \frac{\pi \cdot 2 \cdot 10^5}{7500} \right)^2 \cdot 2,28 \cdot 10^7 \times 1926037,67 \cdot 10^6}$$

$$M_n = 559,4244 \text{ kN.m} < M_p$$

OK

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(559,4244) = 503,482 \text{ kNm} > M_u (= 492,1875 \text{ kN.m})$$

Segmen B:

$$L (= 8,5 \text{ m}) > L_r (= 6,273 \text{ m}) \rightarrow \text{kasus 5}$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$M_{\max} = 492,1875 \text{ kNm}$$

$$M_A = 261,890625 \text{ kNm}$$

$$M_B = 31,59375 \text{ kNm}$$

$$M_C = 198,703125 \text{ kNm}$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 492,1875}{(2,5 \times 492,1875) + (3 \times 261,890625) + (4 \times 31,59375) + (3 \times 198,703125)} = 2,24$$

$$M_n = M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left( \frac{\pi \cdot E}{L} \right)^2 \cdot I_y \cdot C_w}$$

$$M_n = 2,24 \frac{\pi}{8500} \sqrt{2 \cdot 10^5 \times 2,28 \cdot 10^7 \times 8 \cdot 10^4 \times 90,62 \cdot 10^4 + \left( \frac{\pi \times 2 \cdot 10^5}{8500} \right)^2 \cdot 2,28 \cdot 10^7 \times 1926037,67 \cdot 10^6}$$

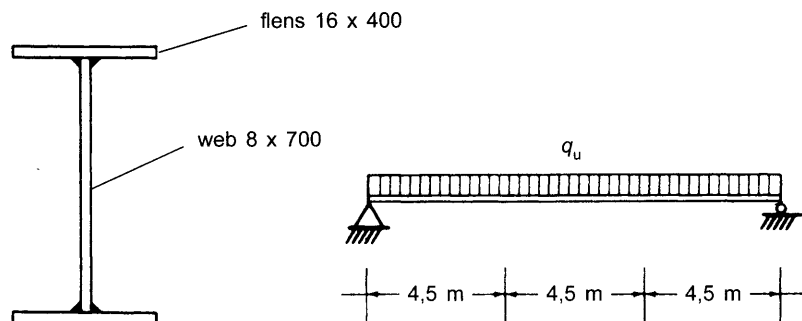
$$M_n = 625,702 \text{ kN.m} < M_p$$

OK

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(625,702) = 563,1315 \text{ kN.m} > M_u (= 492,1875 \text{ kN.m})$$

#### ■ CONTOH 9.4:

Sebuah penampang tersusun berbentuk I yang dilas seperti dalam gambar, digunakan sebagai balok tertumpu sederhana sepanjang 13,5 m. Hitunglah beban hidup layanan yang diijinkan bagi balok tersebut, jika diketahui beban mati = 20 kN/m (sudah termasuk berat sendiri). Mutu baja yang digunakan adalah BJ 55 ( $f_y = 410 \text{ MPa}$ )



Sokongan lateral diberikan pada setiap 1/3 bentang dan pada kedua tumpuan.



**JAWAB:**

Hitung properti dari penampang:

$$A = (2 \times 16 \times 400) + (8 \times 700) = 18400 \text{ mm}^2$$

$$I_x = \frac{1}{12}(8)(700)^3 + 2 \cdot \frac{1}{12}(400)(16)^3 + 2(400)(16)(350+8)^2$$

$$= 1869438933 \text{ mm}^4$$

$$S_x = \frac{I_x}{d/2} = \frac{1869438933}{366} = 5107756,648 \text{ mm}^3$$

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 16 \cdot (400)^3 + \frac{1}{12} \cdot (8)^3 \cdot 700 = 170696533,3 \text{ mm}^4$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{170696533,3}{18400}} = 96,3171 \text{ mm}$$

$$Z_x = 2(16)(400)(350+8) + 2(8)(350)\left(\frac{350}{2}\right) = 5562400 \text{ mm}^3$$

$$J = \frac{1}{3}[2(400)(16)^3 + 700 \cdot (8)^3] = 1211733,33 \text{ mm}^4$$

$$C_w = \frac{I_f \cdot b^2}{2} = \frac{\frac{1}{12} \times 16 \times 400^3 \times (700+16)^2}{2} = 21873322,67 \cdot 10^6 \text{ mm}^6$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = \frac{\pi}{5107756,648} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 1211733,33 \times 18400}{2}}$$

$$= 8217,73 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{5107756,648}{8 \cdot 10^4 \times 1211733,33} \right)^2 \frac{21873322,67 \cdot 10^6}{170696533,3}$$

$$= 1,423 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

Periksa terhadap tekuk lokal flens dan tekuk lokal web

**Flens:**  $\lambda = \frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{400}{2 \times 16} = 12,5$

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = \frac{170}{\sqrt{410}} = 8,3957$$

$$= \frac{700}{8} = 87,5$$

$$k_e = \frac{4}{\sqrt{\frac{b}{t_w}}} = \frac{4}{\sqrt{87,5}} = 0,4276 \rightarrow 0,35 < k_e < 0,763 \quad \text{OK!!}$$

$$\lambda_r = \frac{420}{\sqrt{(f_y - f_r)/k_e}} = \frac{420}{\sqrt{(410 - 115)/0,4276}} = 15,9903$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow \text{tak kompak}$$

$$\text{Web: } \lambda = \frac{b}{t_w} = \frac{700}{8} = 87,5$$

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = \frac{1680}{\sqrt{410}} = 82,97$$

$$\lambda_r = \frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{410}} = 125,935$$

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r \rightarrow \text{tak kompak}$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 5562400(410) = 2280,584 \text{ kN.m}$$

$$M_r = S_x \cdot (f_y - f_r) = 5107756,648 \cdot (410 - 115) = 1506,788 \text{ kN.m}$$

Hitung  $M_n$  berdasarkan batasan untuk tekuk lokal flens:

$$\begin{aligned} M_n &= M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \\ &= 2280,584 - (2280,584 - 1506,788) \left( \frac{125,935 - 82,97}{125,935 - 82,97} \right) \\ &= 1862,406 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Hitung  $M_n$  berdasarkan batasan untuk tekuk lokal web:

$$\begin{aligned} M_n &= M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \\ &= 2280,584 - (2280,584 - 1506,788) \left( \frac{87,5 - 82,97}{125,935 - 82,97} \right) \\ &= 2198,999 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Periksa terhadap tekuk torsi lateral:

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{410}} \times 96,3171 = 3757,842 \text{ mm} = 3,757842 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} L_r &= r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}} \\ &= 96,3171 \cdot \left( \frac{8217,73}{410 - 115} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 1,423 \cdot 10^{-3} (410 - 115)^2}} \\ &= 9275,96 \text{ mm} = 9,27596 \text{ m} \end{aligned}$$

Karena  $L_p (= 3,757842 \text{ m}) < L (= 4,5 \text{ m}) < L_r (= 9,27596 \text{ m})$  dan penampang tak kompak maka soal ini termasuk dalam kasus 4.

Kuat momen lentur nominal ditentukan berdasarkan persamaan:

$$M_n = C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] < M_p$$

Besarnya nilai  $C_b$  untuk segmen tengah adalah 1,01, sehingga:

$$\begin{aligned} M_n &= 1,01 \cdot \left[ 1506,788 + (2280,584 - 1506,788) \frac{9275,96 - 4500}{9275,96 - 3757842} \right] \\ &= 1924,411 \text{ kN.m} < M_p (= 2280,584) \end{aligned}$$

Kesimpulan:

$$\text{Tekuk lokal flens} : M_n = 1862,406 \text{ kN.m}$$

$$\text{Tekuk lokal web} : M_n = 2198,999 \text{ kN.m}$$

$$\text{Tekuk torsi lateral} : M_n = 1924,411 \text{ kN.m}$$

Kuat momen nominal  $M_n$  profil diambil yang terkecil,  $M_n = 1862,406 \text{ kN.m}$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(1862,406) = 1676,1654 \text{ kN.m}$$

$$\max M_u = \phi_b \cdot M_n = 1676,1654 \text{ kN.m}$$

$$M_u = 1,2 \cdot M_D + 1,6 \cdot M_L$$

$$1676,1654 = 1,2 \cdot \frac{1}{8}(20)(13,5)^2 + 1,6 \cdot M_L$$

$$M_L = 705,885 \text{ kNm}$$

$$q_L = \frac{8 \times M_{LL}}{L^2} = \frac{8 \times 705,885}{13,5^2} = 30,985 \text{ kN/m}$$

### ■ CONTOH 9.5:

Profil WF 200.200.8.12 digunakan sebagai balok tertumpu sederhana dengan bentang 8 m dan sokongan lateral pada kedua ujungnya. Balok ini diperlukan untuk menahan beban mati merata sebesar 2 kN/m. Hitunglah beban hidup layak yang diijinkan bekerja pada balok tersebut jika mutu baja yang digunakan adalah BJ 37! Hitunglah pula berapa persentase kenaikan beban hidup yang diijinkan jika mutu baja adalah BJ 55!

**JAWAB:**

Untuk mutu baja BJ 37

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{240}} \cdot 50,2 = 2559,913 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = \frac{\pi}{472 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 26,04 \cdot 10^4 \times 63,53 \cdot 10^2}{2}}$$

$$= 24213,79 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{472 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \times 26,04 \cdot 10^4} \right)^2 \frac{141376 \cdot 10^6}{1600 \cdot 10^4}$$

$$= 1,8144 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 50,2 \cdot \left( \frac{24213,79}{240 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 1,8144 \cdot 10^{-5} (240 - 70)^2}}$$

$$= 10688,64 \text{ mm} = 10,68864 \text{ m}$$

$$L_p (= 2,559 \text{ m}) < L (= 8 \text{ m}) < L_r (= 10,68864 \text{ m})$$

$$\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \times 12} = 8,33 < 10,97$$

$$\frac{b}{t_w} = \frac{200 - 2(12)}{8} = 22 < 108,44$$

$$M_r = S_x(f_y - f_r) = 472 \cdot 10^3(240 - 70) = 80,24 \text{ kN.m}$$

$$M_p = Z_x f_y = 513,15 \cdot 10^3(240) = 123,156 \text{ kN.m}$$

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

$$= 1,14 \left[ 80,24 + (123,156 - 80,24) \frac{10688,64 - 8000}{10688,64 - 2559,913} \right] = 107,656 \text{ kN.m}$$

$$M_u = \phi M_n = 0,9(107,656) = 96,8904 \text{ kN.m}$$

$$M_u = 1,2M_D + 1,6M_L$$

$$96,8904 = 1,2 \cdot \frac{1}{8} \cdot (2)(8)^2 + 1,6M_L$$

$$M_L = 48,5565 \text{ kN.m}$$

$$q_L = \frac{8 \times M_L}{L^2} = \frac{8 \times 48,5565}{8^2} = 6,07 \text{ kN/m}$$

untuk mutu baja BJ 55

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{410}} \cdot 50,2 = 1958,57 \text{ mm} \quad \left. \vphantom{\frac{790}{\sqrt{f_y}}} \right\} \begin{array}{l} \text{Penampang Kompak} \\ \text{Kasus 3} \end{array}$$

$$L_r = r_y \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 50,2 \cdot \left( \frac{24213,79}{410 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 1,8144 \cdot 10^{-5} (410 - 70)^2}}$$

$$= 5939,347 \text{ mm} = 5,939347 \text{ m}$$

$$L (= 8 \text{ m}) > L_r (= 5,939347 \text{ m}) \rightarrow \text{kasus 5}$$

$$M_n = M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_y \cdot G \cdot J + \left( \frac{\pi \cdot E}{L} \right)^2 \cdot I_y \cdot C_w}$$

$$M_n = 1,14 \cdot \frac{\pi}{8000} \sqrt{2 \cdot 10^5 \times 1,6 \cdot 10^7 \times 8 \cdot 10^4 \times 26,04 \cdot 10^4 + \left( \frac{\pi \times 2 \cdot 10^5}{8000} \right)^2 \cdot 1,6 \cdot 10^7 \times 141376 \cdot 10^6}$$

$$= 127,108 \text{ kN.m}$$

$$M_u = \phi M_n = 0,9(127,108) = 114,3972 \text{ kN.m}$$

$$M_u = 1,2M_D + 1,6M_L$$

$$114,3972 = 1,2 \cdot \frac{1}{8} \cdot (2)(8)^2 + 1,6M_L$$

$$M_L = 59,49825 \text{ kN.m}$$

$$q_L = \frac{8 \times M_L}{L^2} = \frac{8 \times 59,49825}{8^2} = 7,437 \text{ kN/m}$$

Persentase tambahan beban hidup yang dapat bekerja jika mutu baja diubah dari BJ 37 menjadi BJ 41 adalah sebesar  $\frac{7,437 - 6,07}{6,07} \times 100\% = 22,52\%$ .

### CONTOH 9.6:

Pilihlah profil WF yang ekonomis untuk digunakan sebagai balok lantai perpustakaan yang tertumpu sederhana. Sokongan lateral dipasang pada kedua ujungnya dan pada lokasi beban-beban terpusat. Lendutan akibat beban hidup tak boleh melebihi  $L/300$ . Gunakan mutu baja BJ 37!

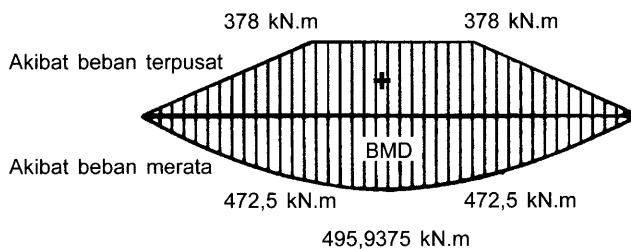
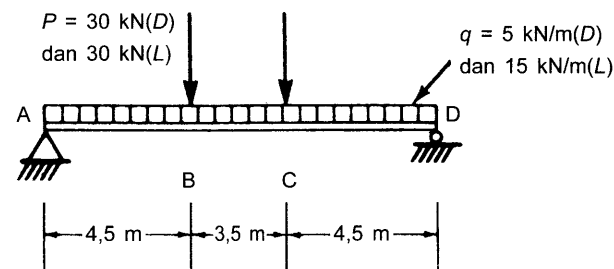
#### JAWAB:

$$P_u = 1,2(30) + 1,6(30) = 84 \text{ kN}$$

$$q_u = 1,2(5) + 1,6(15) = 30 \text{ kN/m}$$

Dicoba menggunakan profil WF 600.300.12.20

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} r_y = \frac{790}{\sqrt{240}} \times 68,5 = 3493,11 \text{ mm}$$



$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} = \frac{\pi}{4020 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 191,56 \cdot 10^4 \times 192,5 \cdot 10^2}{2}}$$

$$= 13422,598 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{4020 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \times 191,56 \cdot 10^4} \right)^2 \frac{7259040 \cdot 10^6}{9020 \cdot 10^4}$$

$$= 2,2151 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 68,5 \cdot \left( \frac{13422,598}{240 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 2,2151 \cdot 10^{-4} (240 - 70)^2}} = 10432,405 \text{ mm}$$

Cek penampang:

$$\left. \begin{aligned} \frac{b}{2 \cdot t_f} &= \frac{300}{2 \times 20} = 7,5 < \frac{170}{\sqrt{f_y}} \quad (= 10,97) \\ \frac{h}{t_w} &= \frac{588 - 2(20)}{12} = 45,67 < \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \quad (= 108,44) \end{aligned} \right\} \text{Penampang Kompak}$$

**Segmen AB = CD** ( $L = 4,5 \text{ m}$ )  
 $L_p (= 3,493 \text{ m}) < L (= 4,5 \text{ m}) < L_r (= 10,432 \text{ m})$  } Kasus 3  
 Penampang Kompak

Menghitung nilai  $C_b$ :

$$M_A = 269,578125 \text{ kN.m}$$

$$M_B = 501,1875 \text{ kN.m}$$

$$M_C = 694,828125 \text{ kN.m}$$

$$M_{max} = 850,5 \text{ kN.m}$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 850,5}{(2,5 \times 850,5) + (3 \times 269,578125) + (4 \times 501,1875) + (3 \times 694,828125)}$$

$$= 1,5135$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 4308,91 \cdot 10^3 (240) = 1034,1384 \text{ kN.m}$$

$$M_r = S_x \cdot (f_y - f_r) = 4020 \cdot 10^3 (240 - 70) = 683,4 \text{ kN.m}$$

$$M_n = C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right]$$

$$= 1,5135 \cdot \left[ 683,4 + (1034,1384 - 683,4) \frac{10432,405 - 4500}{10432,405 - 3493,11} \right]$$

$$= 1488,194 \text{ kN.m} > M_p (= 1034,1384 \text{ kN.m})$$

gunakan  $M_n = M_p = 1034,1384 \text{ kN.m}$

$$\phi \cdot M_n = 0,9(1034,1384) = 930,725 \text{ kN.m} > M_{u \max} (= 850,5 \text{ kN.m})$$

**Segmen BC** ( $L = 2,5 \text{ m}$ )

$$L (= 2,5 \text{ m}) < L_p (= 3,493 \text{ m}) \rightarrow \text{kasus 2}$$

$$M_n = M_p = 1034,1384 \text{ kN.m}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,9(1034,1384) = 930,725 \text{ kN.m}$$

$$\phi \cdot M_n < M_{u \max} (= 873,9375 \text{ kN.m})$$

Cek terhadap syarat lendutan:

$$\delta = \frac{P \cdot a}{24 E \cdot I} (3L^2 - 4a^2) + \frac{5q \cdot L^4}{384 E \cdot I}$$

dengan:

$$P = 30 \text{ kN} = 30000 \text{ N}$$

$$q = 15 \text{ kN/m} = 15 \text{ N/mm}$$

$$a = 4,5 \text{ m} = 4500 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$I = 1,18.10^9 \text{ mm}^4$$

$$L = 11,5 \text{ m} = 11500 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{30000 \times 4500}{24 \times 2.10^5 \times 1,18.10^9} \left( 3(11500)^2 - 4(4500)^2 \right) + \frac{5 \times 15 \times 11500^4}{384 \times 2.10^5 \times 1,18.10^9} \\ &= 7,526 + 14,475 = 22,001 \text{ mm} < \frac{L}{300} \quad \left( = \frac{11500}{300} = 38,333 \text{ mm} \right) \end{aligned}$$

## 9.6 LENTUR DUA ARAH

Jika penampang bentuk I dibebani oleh momen  $M_x$  yang mengakibatkan lentur pada sumbu kuat, serta momen  $M_y$  yang mengakibatkan lentur pada sumbu lemah, maka kondisi batas kekuatan komponen struktur tersebut ditentukan oleh leleh akibat tegangan kombinasi yang bekerja atau oleh tekuk torsi lateral. Contoh komponen yang mengalami lentur dalam dua arah adalah struktur gording atau struktur balok keran (*crane beam/girder*).

Perencanaan struktur baja metode LRFD untuk balok yang mengalami lentur dalam dua arah, mensyaratkan pemeriksaan terhadap:

1. kondisi batas leleh:

$$f_{un} = \frac{M_{ux}}{S_x} + \frac{M_{uy}}{S_y} \leq \phi_b f_y$$

2. kondisi batas tekuk torsi lateral:

$$\phi_b M_{nx} \geq M_{ux}$$

Dengan:

$f_{un}$  adalah tegangan normal (tarik atau tekan) akibat beban terfaktor

$M_{ux}$  adalah momen terfaktor terhadap sumbu-x (sumbu kuat)

$M_{uy}$  adalah momen terfaktor terhadap sumbu-y (sumbu lemah)

$\phi_b$  adalah faktor reduksi untuk lentur = 0,90

$M_{nx}$  adalah kuat momen nominal penampang

(dihitung seperti pada pemeriksaan tekuk torsi lateral)

### ■ CONTOH 9.7:

Rencanakanlah sebuah komponen struktur balok keran (BJ 37) dalam gambar berikut jika diketahui data-data sebagai berikut:

Bentang bangunan = 18 m

Kapasitas keran = 20 ton

Berat sendiri keran = 16 ton

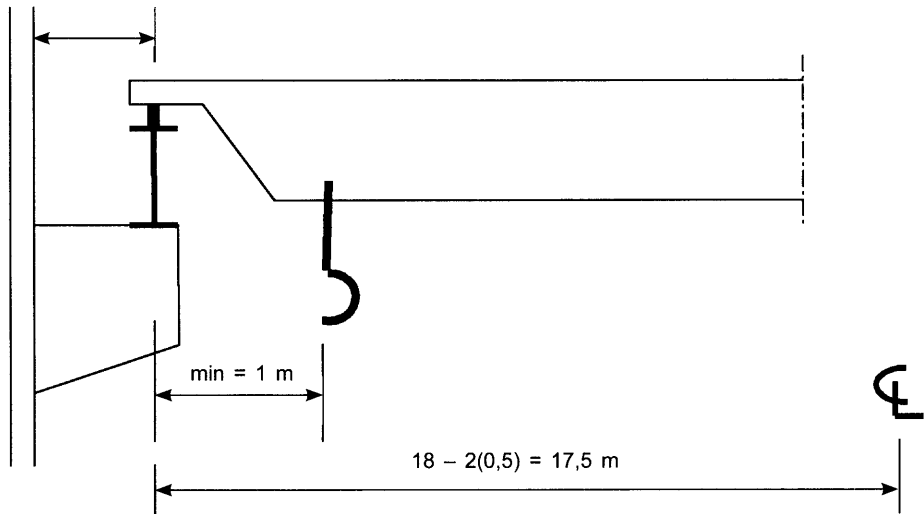
Berat takel = 7 ton

Berat sendiri rel = 30 kg/m

Jarak roda-roda = 3,8 m

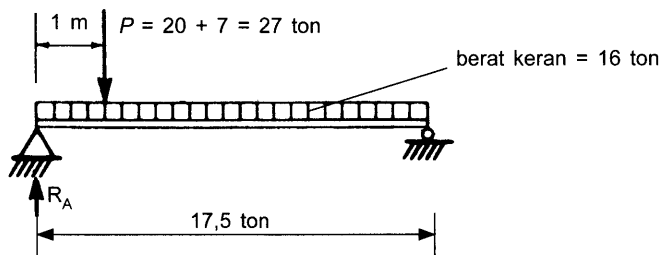
Jarak antar kolom = 6 m

Jarak minimum lokasi takel terhadap rel = 1 m



**JAWAB:**

**Menentukan reaksi pada roda-roda keran:**



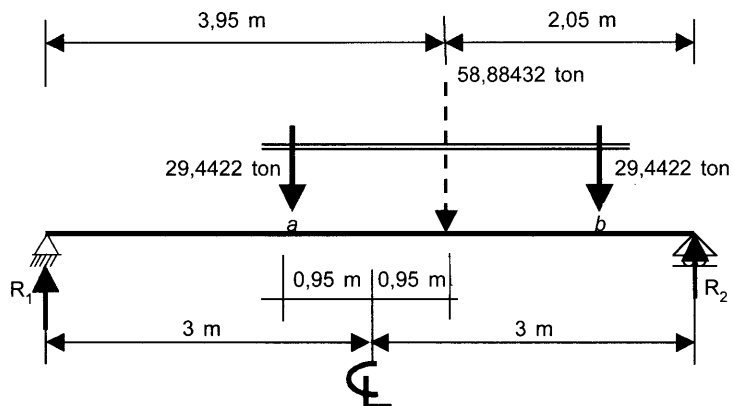
Berat takel + kapasitas keran =  $7 + 20 = 27$  ton

$$R_A = 1,6 \left( 27 \frac{16,5}{17,5} + \frac{16}{2} \right) = 53,5312 \text{ ton}$$

$$\text{Impak, 10 \%} = 5,35312 \text{ ton} +$$

$$R_A = 58,88432 \text{ ton}$$

Tinjau balok keran bentang 6 m





$$R_1 = 58,88432 \times \frac{2,05}{6} = 20,1188 \text{ ton}$$

$$R_2 = 58,88432 \times \frac{3,95}{6} = 38,7615 \text{ ton}$$

**Akibat beban hidup:**

Momen maksimum akibat beban hidup tercapai jika titik tengah dari salah satu roda dengan gaya resultan berada tepat pada tengah-tengah bentang balok. Dari gambar di atas, momen maksimum akan terjadi di titik a atau di titik b.

Momen maksimum di a =  $20,1188(3 - 0,95) = 41,24354$  ton.m

Momen maksimum di b =  $38,7655(2,05 - 1,9) = 5,814825$  ton.m

Dari hasil perhitungan di atas, diperoleh momen maksimum sebesar 41,24354 ton.m, dengan mempertimbangkan koefisien kejut sebesar 1,15, maka momen maksimum pada balok keran akibat beban hidup adalah sebesar  $1,15(41,24354) = 47,43$  ton.m.

**Akibat beban mati:**

$$\text{Berat sendiri rel} = 30 \text{ kg/m}$$

Berat sendiri balok keran = 150 kg/m +

Total = 180 kg/m

$$M_{DL} = 1,2 \cdot \frac{1}{8} \cdot (180)(6)2 = 972 \text{ kg.m} = 0,972 \text{ ton.m}$$

Sehingga momen total:

$$M_{ux} = 47,73 \text{ ton.m} + 0,972 \text{ ton.m} = 48,402 \text{ ton.m} = 484,02 \text{ kN.m}$$

**Momen akibat gaya rem melintang:**

Gaya rem melintang biasanya diambil sebesar  $1/15$  dari beban kapasitas keran + berat takel (untuk 2 roda). Sehingga:

$$\text{beban lateral per roda} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{15} (20+7)(1,6) = 1,44 \text{ ton}$$

Telah dihitung sebelumnya bahwa akibat beban roda 29,4422 ton menimbulkan momen maksimum sebesar 41,24354 ton.m. Sehingga dapat dihitung momen akibat  $w$  lateral sebesar 1,44 ton adalah:

$$M_{uy} = \frac{1,44}{29,4422} \times 41,24354 = 2,0172 \text{ ton.m} = 20,172 \text{ kN.m}$$

Sebagai balok keran dicoba profil WF 400.400.13.21. Selanjutnya profil ini harus diperiksa terhadap kondisi batas leleh dan kondisi tekuk torsi lateral.

i) Pemeriksaan terhadap kondisi batas leleh

$$\begin{aligned} f_{un} &= \frac{M_{ux}}{S_x} + \frac{M_{uy}}{S_y} \\ &= \frac{484,02 \cdot 10^6}{3330 \cdot 10^3} + \frac{20,172 \cdot 10^6}{1120 \cdot 10^3} \\ &= 163,36 \text{ MPa} < \phi_k f_y (= 0,9(240) = 216 \text{ MPa}) \end{aligned}$$

ii) Pemeriksaan terhadap tekuk torsi lateral

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} \cdot r_y = \frac{790}{\sqrt{240}} \times 101 = 5150,4 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} = \frac{\pi}{3330 \cdot 10^3} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 273,18 \cdot 10^4 \times 218,7 \cdot 10^2}{2}}$$

$$= 20633,56 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \left( \frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 \frac{C_w}{I_y} = 4 \left( \frac{3330 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^4 \times 273,18 \cdot 10^4} \right)^2 \frac{8043896 \cdot 10^6}{22400 \cdot 10^4}$$

$$= 3,30374 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = r_y \cdot \left( \frac{X_1}{f_y - f_r} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (f_y - f_r)^2}}$$

$$= 101 \cdot \left( \frac{20633,56}{240 - 70} \right) \sqrt{1 + \sqrt{1 + 3,30374 \cdot 10^{-4} (240 - 70)^2}} = 18983,8 \text{ mm}$$

$$L_p (= 5,1504 \text{ m}) < L (= 6 \text{ m}) < L_r (= 18,9838 \text{ m})$$

Cek penampang:

$$\frac{b}{2 \cdot t_f} = \frac{400}{2 \times 21} = 9,524 < \frac{170}{\sqrt{f_y}} \quad (= 10,97)$$

$$\frac{b}{t_w} = \frac{400 - 2(21)}{13} = 27,54 < \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \quad (= 108,44)$$

$$M_r = S_x \cdot (f_y - f_r) = 3330 \cdot 103(240 - 70) = 566,1 \text{ kN.m}$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 3600,13 \cdot 103(240) = 864,03 \text{ kN.m}$$

$$M_n = C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right]$$

$$= 1 \cdot \left[ 566,1 + (864,03 - 566,1) \frac{18983,8 - 6000}{18983,8 - 5150,4} \right]$$

$$= 845,73 \text{ kNm} < M_p (= 864,03 \text{ kN.m})$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(845,73) = 761,157 \text{ kNm} < M_{ux} (= 484,02 \text{ kN.m})$$

Jadi, WF 400.400.13.21 dapat dipakai sebagai balok keran tersebut.

## SOAL-SOAL LATIHAN

## P.9.1 – P.9.3

Tentukan besar beban layan terpusat maksimum, yang dapat bekerja di tengah bentang balok tertumpu sederhana, dalam masing-masing kasus berikut:

Soal	Penampang	Bentang (m)	$f_y$ (MPa)
P.9.1	WF 400.200.8.13	6	240
P.9.2	WF 450.200.9.14	7,25	250
P.9.3	WF 500.200.10.16	9	410

Kekangan lateral dipasang pada kedua ujung tumpuan, sedangkan beban layan terdiri dari 65% beban hidup dan 35% beban mati.

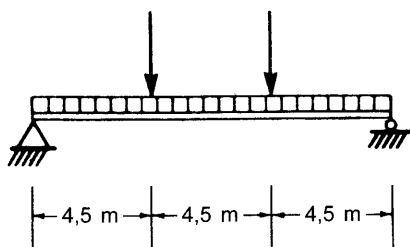
## P.9.4 – P.9.6

Tentukan/pilihlah profil WF yang ekonomis untuk digunakan sebagai balok yang menahan beban merata sebagai berikut :

Soal	$q_D$ (kN/m)	$q_L$ (kN/m)	Bentang (m)	$f_y$ (MPa)	Kekangan lateral
P.9.4	8.75	20	6	240	Menerus
P.9.5	8.75	20	6	240	Ujung & tengah bentang
P.9.5	3	8.5	9	410	Tiap 3 m dan pada ujung-ujung

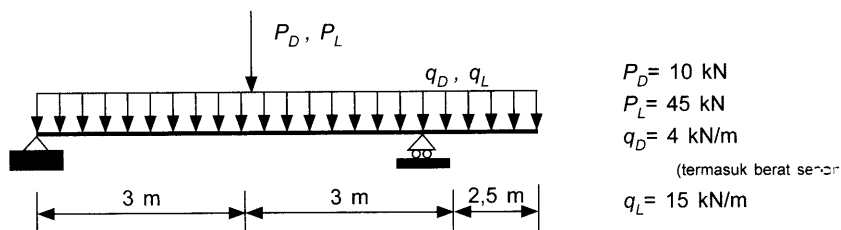
Asumsikan bahwa semua beban sudah termasuk berat sendiri profil!

**P.9.7** Pilihlah profil WF yang ekonomis untuk digunakan sebagai balok dalam struktur bentang tunggal ini: (gunakan baja BJ 37)



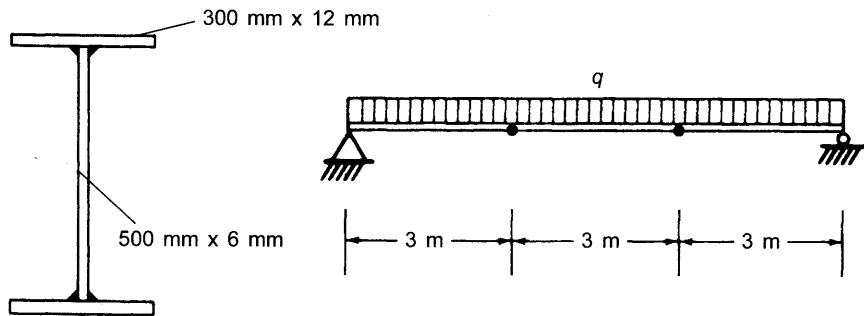
Kekangan lateral diberikan pada ujung-ujung balok dan pada lokasi beban terpusat.

**P.9.8** Periksalah apakah profil WF 350.175.7.11 terhadap lentur dan geser jika mutu baja yang dipakai BJ 41. Kekangan lateral hanya dipasang pada kedua tumpuan dan pada ujung dari kantilever.



Gambar P.9.8

- 2.3 Sebuah penampang tersusun berbentuk I seperti pada Gambar P.9.9, digunakan sebagai balok tertumpu sederhana sepanjang 15 m. Hitunglah beban layan maksimum,  $q_{maks}$ , yang dapat dipikul oleh balok tersebut, jika mutu baja yang digunakan adalah BJ 37, dan perbandingan beban hidup dengan beban mati adalah tiga ( $L/D = 3$ ). Sokongan lateral dipasang tiap jarak  $\frac{1}{3} L$ .



Gambar P.9.9

- 2.3 10 Rencanakanlah sebuah struktur balok keran dengan menggunakan profil WF (BJ 37) dengan data-data sebagai berikut:
- |   |           |
|---|-----------|
| Bentang bangunan                        | = 20 m    |
| Kapasitas keran                         | = 25 ton  |
| Berat sendiri keran                     | = 15 ton  |
| Berat takel                             | = 8 ton   |
| Berat sendiri rel                       | = 30 kg/m |
| Jarak roda-roda                         | = 3,5 m   |
| Jarak antar kolom                       | = 5 m     |
| Jarak minimum lokasi takel terhadap rel | = 1 m     |

## Balok Pelat Berdinding Penuh (Pelat Girder)

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Memahami perilaku suatu balok pelat berdinding penuh, termasuk perilaku lentur geser, aksi medan tarik serta pengaku vertikalnya
- Melakukan analisis dan desain suatu komponen struktur lentur bentang panjang dengan menggunakan balok pelat berdinding penuh

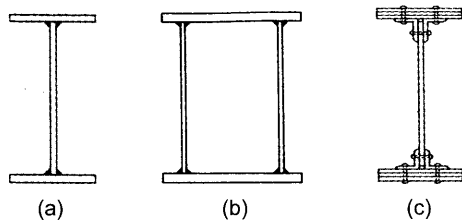
Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Pendahuluan
- 1.2 Persyaratan Balok Pelat Berdinding Penuh
- 1.3 Kuat Momen Nominal Balok Pelat Berdinding Penuh
- 1.4 Kuat Geser Nominal
- 1.5 Kuat Geser Nominal dengan Pengaruh Aksi Medan Tarik
- 1.6 Interaksi Geser dan Lentur
- 1.7 Pengaku Vertikal
- 1.8 Pengaku Penahan Gaya Tumpu
- 1.9 Desain Balok Pelat Berdinding Penuh

### 10.1 PENDAHULUAN

Balok pelat berdinding penuh atau yang lebih sering disebut pelat girder adalah merupakan komponen struktur lentur yang tersusun dari beberapa elemen pelat. Balok pelat berdinding penuh pada dasarnya adalah sebuah balok dengan ukuran penampang melintang yang besar serta bentang yang panjang. Penampang melintang yang besar tersebut merupakan konsekuensi dari panjangnya bentang balok. Jika profil baja gilas panas yang tersedia masih kurang cukup untuk memikul beban yang bekerja akibat panjangnya bentang, maka alternatif pertama yang ditempuh adalah dengan menambahkan elemen pelat pada salah satu atau kedua flens profil. Jika alternatif ini masih belum mampu memberikan tahanan momen yang mencukupi, maka biasanya dibuat sebuah balok yang tersusun dari elemen-elemen pelat yang disambung satu dengan yang lainnya (balok pelat berdinding penuh). Jika bentang yang diperlukan sangat panjang, maka tinggi dan berat balok pelat berdinding penuh akan cukup besar pula, sehingga alternatif lain adalah dengan menggunakan struktur rangka batang.

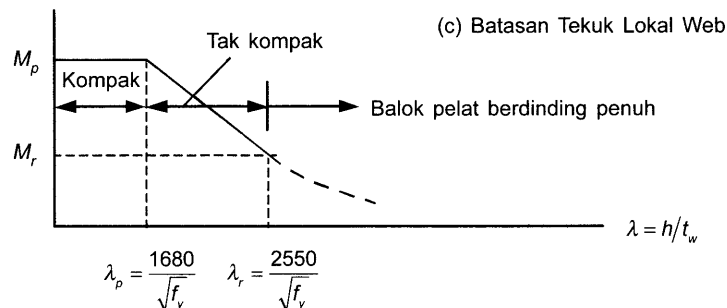
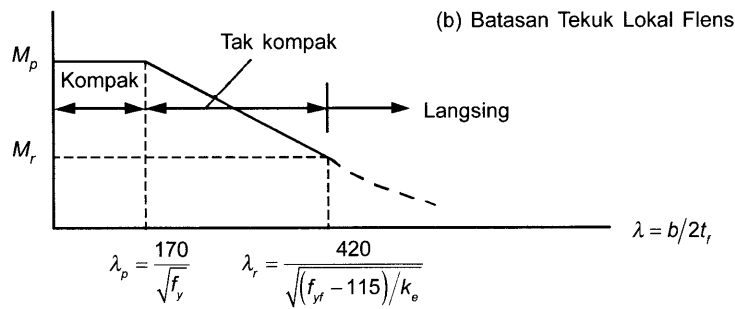
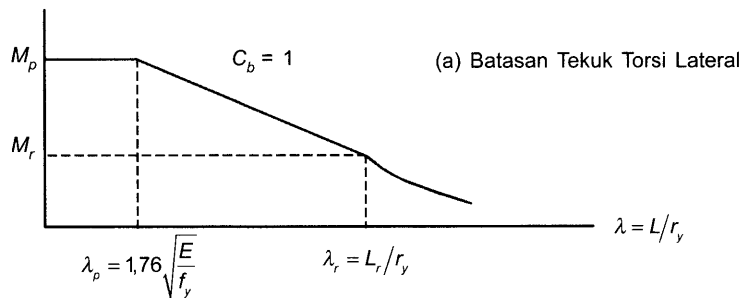
Beberapa penampang melintang dari balok pelat berdinding penuh ditunjukkan dalam Gambar 10.1. Bentuk penampang yang sering digunakan terdiri dari sebuah pelat badan (web) dengan dua buah pelat sayap (flens) yang dihubungkan satu sama lain dengan las (Gambar 10.1.a). Jenis penampang kotak (Gambar 10.1.b) yang mempunyai dua buah pelat badan dan dua buah pelat sayap, adalah bentuk penampang yang mempunyai tahanan torsi cukup baik dan dapat digunakan untuk panjang bentang tak terkekang yang besar.



**Gambar 10.1** Penampang Balok Pelat Berdinding Penuh

Sebelum dikenal metode pengelasan maka digunakan sambungan baut atau paku keling seperti pada Gambar 10.1.c. Jenis lain dari balok pelat berdinding penuh adalah balok hibrida yang terdiri dari pelat badan dan pelat sayap dengan mutu baja yang berbeda.

Pada dasarnya balok pelat berdinding penuh adalah merupakan sebuah balok yang tinggi. Batasan yang digunakan bagi sebuah balok seperti dibahas dalam Bab IX, masih akan digunakan. Gambar 10.2 menunjukkan kurva hubungan antara kuat momen nominal  $M_n$  vs rasio kelangsingan  $\lambda$ . Batasan untuk tekuk torsi lateral (Gambar 10.2.a) hanya berlaku untuk penampang yang kompak.



**Gambar 10.2** Kondisi Batas untuk Balok Terlentur

Kuat momen nominal,  $M_n$ , untuk penampang yang tak kompak ( $\lambda_p < \lambda < \lambda_r$ ) harus ditentukan berdasarkan ketiga macam kondisi batas, yaitu tekuk torsi lateral, tekuk lokal flens serta tekuk lokal web. Nilai  $M_n$  yang terkecil dari ketiganya adalah nilai yang menentukan besarnya kuat momen nominal dari suatu komponen struktur terlentur.

Profil baja dengan web yang langsing,  $\lambda (= h/t_w) < \lambda_r (= 2550/\sqrt{f_y})$ , dikategorikan sebagai balok pelat berdinding penuh. Penampang dengan nilai  $\lambda$  tidak melebihi  $\lambda_r$  akan mampu mencapai  $f_y$  tanpa mengalami tekuk elastis. Kuat lentur dan geser dari suatu balok pelat berdinding penuh sangat tergantung dari web profil, web yang langsing akan menimbulkan beberapa hal sebagai berikut:

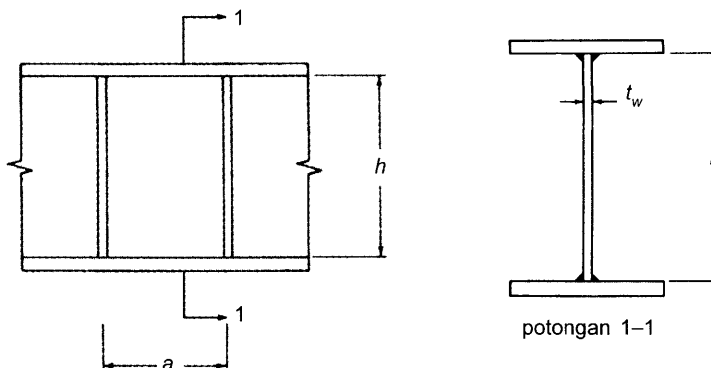
1. tekuk akibat lentur pada bidang web, akan mengurangi efisiensi dari web untuk memikul momen lentur
2. tekuk pada flens tekan dalam arah vertikal akibat kurang kakunya web
3. tekuk akibat geser

Hal khusus yang dijumpai pada komponen struktur balok pelat berdinding penuh ialah adanya pemasangan pengaku melintang (*stiffener*). Perencanaan pengaku yang tepat dapat meningkatkan kuat geser pasca tekuk (*post buckling strength*) dari balok pelat berdinding penuh. Pengaku yang dipasang pada balok pelat berdinding penuh akan mengakibatkan balok tersebut memiliki perilaku seperti rangka batang, bagian web akan memikul gaya tarik diagonal sedangkan pengaku akan memikul gaya tekan. Perilaku ini disebut sebagai aksi medan tarik (*tension-field action*).

## 10.2 PERSYARATAN BALOK PELAT BERDINDING PENUH

Komponen struktur dapat dikategorikan sebagai balok biasa atau sebagai balok pelat berdinding penuh, tergantung dari rasio kelangsingan web,  $h/t_w$ , dengan  $h$  adalah tinggi bersih bagian web dan  $t_w$  adalah tebal dari web. Jika  $h/t_w < 2550/\sqrt{f_y}$ , maka komponen struktur tersebut dikategorikan sebagai balok biasa, dan jika nilai  $h/t_w > 2550/\sqrt{f_y}$ , maka dalam perencanaannya harus dikategorikan sebagai balok pelat berdinding penuh. Untuk balok hibrida maka nilai  $f_y$  diambil dari nilai  $f_y$  flens, hal ini disebabkan karena stabilitas dari web untuk menahan tekuk lentur tergantung pada regangan yang terjadi dalam flens.

Batas atas dari kelangsingan web, harus ditetapkan untuk mencegah terjadinya tekuk vertikal dari flens. Batas atas dari  $h/t_w$  merupakan fungsi dari perbandingan  $a/h$ , dengan



$a$  adalah jarak antar pengaku vertikal, dan  $h$  adalah tinggi bersih dari web.

**Gambar 10.3** Nilai  $a$  dan  $b$  Balok Pelat Berdinding Penuh

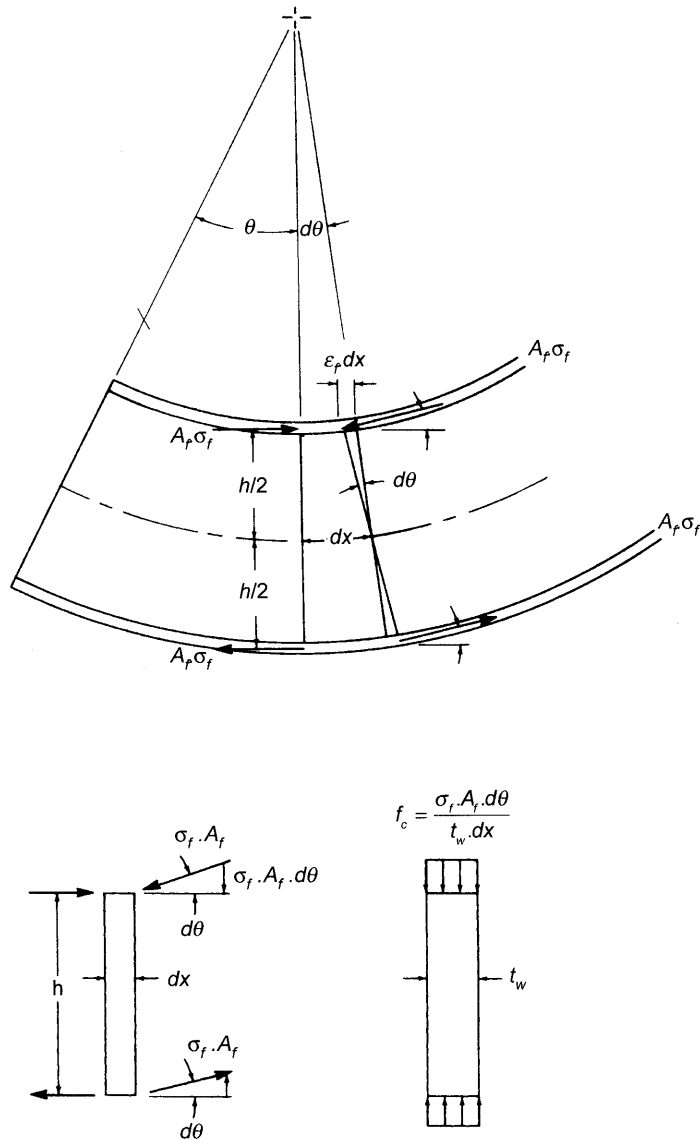
Dari Gambar 10.4, diperoleh hubungan:

$$\epsilon_f dx = d\theta \cdot \frac{h}{2} \quad 10.1$$

$$\text{atau } d\theta = \frac{2\epsilon_f}{h} \cdot dx \quad 10.2$$

Komponen gaya yang menyebabkan tekanan dalam arah vertikal pada Gambar 10.5 adalah  $\sigma_f A_f d\theta$ , sehingga jika gaya tersebut dibagi dengan luasan web  $t_w dx$ , akan diperoleh tegangan tekan  $f_c$ :

$$f_c = \frac{\sigma_f \cdot A_f \cdot d\theta}{t_w \cdot dx} = \frac{2 \cdot \sigma_f \cdot A_f \cdot \epsilon_f}{t_w \cdot h} \quad 10.3$$

**Gambar 10.4** Gaya pada Flens Akibat Kelengkungan Balok



**Gambar 10.5** Komponen Gaya Vertikal dari Flens

Tegangan tekuk elastis untuk elemen pelat didefinisikan sebagai:

$$f_{cr} = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2) \left( b/t \right)^2}$$

Untuk  $b = h$ ,  $t = t_w$  serta nilai  $k = 1$ , maka:

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2) \left( h/t_w \right)^2}$$

Dengan menyamakan persamaan 10.3 dan 10.5 maka diperoleh:

$$\frac{2 \cdot \sigma_f \cdot A_f \cdot \epsilon_f}{t_w \cdot h} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2) \left( h/t_w \right)^2}$$

mengingat bahwa  $t_w \cdot h = A_w$ , maka persamaan 10.6 dapat diselesaikan untuk  $h/t_w$ :

$$\frac{h}{t_w} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{24(1-\nu^2)} \left( \frac{A_w}{A_f} \right) \left( \frac{1}{\sigma_f \cdot \epsilon_f} \right)}$$

Besarnya  $\sigma_f$  harus mencapai tegangan leleh flens  $f_{yf}$  dan jika tegangan residu diperhitungkan maka:

$$\epsilon_f = (f_r + f_{yf})/E$$

Substitusikan  $\sigma_f = f_{yf}$ ,  $\epsilon_f$  dari persamaan 10.8 serta mengambil nilai  $E = 200.000$  MPa dan  $\nu = 0,3$ , maka diperoleh:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{134500 \sqrt{A_w/A_f}}{\sqrt{f_{yf}(f_{yf} + f_r)}}$$

Nilai  $A_w/A_f$  umumnya di bawah 0,5, dan besarnya tegangan residu untuk penampang adalah 115 MPa, sehingga persamaan 10.9 menjadi:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{95110}{\sqrt{f_{yf}(f_{yf} + 115)}} \quad 10.10$$

Untuk perencanaan besarnya  $h/t_w$  maksimum diambil sebesar:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{95000}{\sqrt{f_{yf}(f_{yf} + 115)}} \quad 10.11$$

Persamaan 10.11 berlaku untuk nilai  $a/h > 1,5$ , sedangkan untuk  $a/h \leq 1,5$  nilai  $h/t_w$  maksimum dapat diambil sebesar:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{5250}{\sqrt{f_{yf}}} \quad 10.12$$

### 10.3 KUAT MOMEN NOMINAL BALOK PELAT BERDINDING PENUH

Kuat momen nominal dari komponen struktur balok pelat berdinding penuh, ditentukan dalam SNI 03-1729-2002 pasal 8.4.1:

$$M_n = K_g \cdot S \cdot f_{cr} \quad 10.13$$

Dengan:

$f_{cr}$  adalah tegangan kritis yang besarnya akan ditentukan kemudian

$S$  adalah modulus penampang

$K_g$  adalah koefisien balok pelat berdinding penuh

Koefisien balok pelat berdinding penuh,  $K_g$ , diambil sebesar:

$$K_g = 1 - \left[ \frac{a_r}{1200 + 300 \cdot a_r} \right] \left[ \frac{h}{t_w} - \frac{2550}{\sqrt{f_{cr}}} \right] \leq 1 \quad 10.14$$

Dengan  $a_r$  adalah perbandingan luas pelat badan terhadap pelat sayap ( $a_r = A_w/A_f$ ). Kuat momen nominal dari balok pelat berdinding penuh diambil dari nilai terkecil dari keruntuhan tekuk torsi lateral (yang tergantung panjang bentang) dan tekuk lokal flens (yang tergantung pada tebal flens tekan).

### 10.10.2 Keruntuhan Tekuk Torsi Lateral

Kelangsingan yang diperhitungkan adalah kelangsingan dari bagian balok pelat berdinding penuh yang mengalami tekan.

$$\lambda_G = \frac{L}{r_T} \quad 10.15.a$$

$$\lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 10.15.b$$

$$\lambda_r = 4,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 10.15.c$$

Dengan  $L$  adalah panjang bentang tak terkekang, dan  $r_T$  adalah jari-jari girasi daerah pelat sayap ditambah sepertiga bagian web yang mengalami tekan.

Jika  $\lambda_G \leq \lambda_p$  keruntuhan akan terjadi akibat leleh, sehingga:

$$f_{cr} = f_y \quad 10.16.a$$

Jika  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$  keruntuhan yang terjadi adalah tekuk torsi lateral inelastis:

$$f_{cr} = C_b f_y \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_G - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq f_y \quad 10.16.b$$

Jika  $\lambda_G > \lambda_r$  maka keruntuhan yang terjadi adalah tekuk torsi lateral elastis:

$$f_{cr} = f_c \left( \frac{\lambda_r}{\lambda_G} \right)^2 \quad 10.16.c$$

Dengan:

$$f_c = \frac{C_b f_y}{2} \leq f_y \quad 10.16.d$$

### 10.10.3 Keruntuhan Tekuk Lokal Flens Tekan

Faktor kelangsingan yang diperhitungkan adalah berdasarkan perbandingan lebar dengan tebal flens tekan.

$$\lambda_G = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} \quad 10.17.a$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 10.1.1$$

$$\lambda_r = 1,35 \cdot \sqrt{\frac{k_e \cdot E}{f_y}} \quad 10.1.2$$

dengan:

$$k_e = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \quad 0,35 \leq k_e \leq 0,763$$

Jika  $\lambda_G \leq \lambda_p$  keruntuhan akan terjadi akibat leleh, sehingga:

$$f_{cr} = f_y \quad 10.1.3$$

Jika  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$  keruntuhan yang terjadi adalah tekuk lokal flens inelastis:

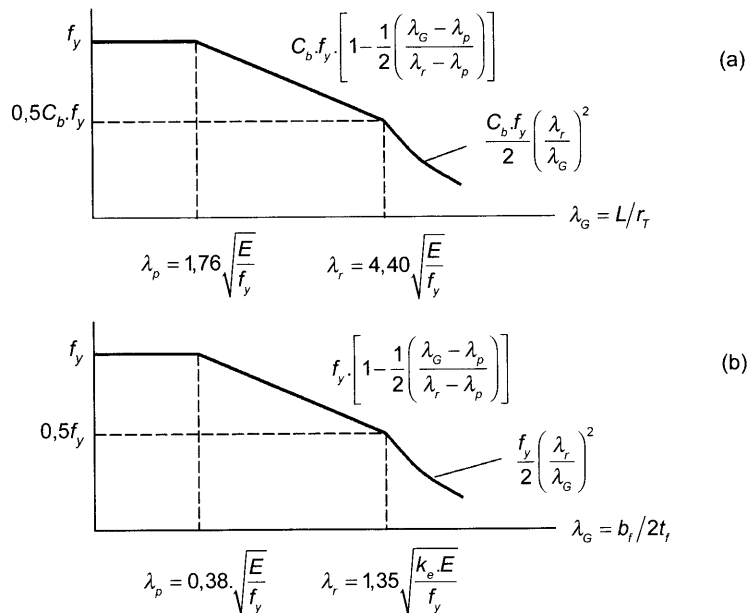
$$f_{cr} = f_y \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_G - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq f_y \quad 10.1.4$$

Jika  $\lambda_G > \lambda_r$  maka keruntuhan yang terjadi adalah tekuk lokal flens elastis,

$$f_{cr} = f_c \left( \frac{\lambda_r}{\lambda_G} \right)^2 \quad 10.1.5$$

Dengan:

$$f_c = \frac{f_y}{2} \quad 10.1.6$$



**Gambar 10.6** Batasan Balok Pelat Berdinding Penuh (a) Tekuk Torsi Lateral, (b) Tekuk Lokal Flens

Balok pelat berdinding penuh dengan kuat leleh yang berbeda antara flens dengan web, sering dinamakan sebagai balok hibrida. Pada umumnya kuat leleh bagian flens lebih tinggi daripada bagian web, sehingga bagian web akan mengalami leleh terlebih dahulu sebelum kuat maksimum flens tercapai. Kuat momen nominal dari balok hibrida adalah:

$$M_n = K_g \cdot S \cdot f_{cr} \cdot R_e \quad 10.19$$

Dengan:

$$R_e = \frac{12 + a_r (3m - m^3)}{12 + 2 \cdot a_r} \leq 1,0 \quad 10.20$$

dan:

$$a_r = A_w / A_f = \text{rasio antara luas penampang melintang web dengan penampang melintang flens}$$

$$m = f_{yw} / f_{yf} = \text{rasio antara kuat leleh web dengan kuat leleh flens}$$

#### 10.4 KUAT GESER NOMINAL

Kuat geser desain dari balok pelat berdinding penuh adalah  $\phi_v V_n$ , dengan  $\phi_v = 0,9$ . Kuat geser balok pelat berdinding penuh merupakan fungsi dari rasio tinggi dan tebal web ( $h/t_w$ ) serta dipengaruhi pula oleh jarak di antara pengaku vertikal yang dipasang. Kuat geser balok pelat berdinding penuh dapat dibedakan menjadi kuat geser pratekuk dan kuat geser pasca tekuk yang dihasilkan dari aksi medan tarik. Aksi medan tarik hanya terjadi jika pada balok pelat berdinding penuh dipasang pengaku vertikal. Jika tak ada pengaku vertikal, atau bila jarak antara pengaku vertikal cukup jauh, maka kuat geser balok berdinding penuh hanya disumbang oleh kuat geser pratekuk.

Perhatikan sebuah panel pada balok pelat berdinding penuh yang memiliki jarak antar pengaku vertikal sebesar  $a$  dan tinggi bersih sebesar  $h$ , pada Gambar 10.7. Dalam daerah yang memikul gaya geser besar serta momen lentur yang kecil, maka dapat diasumsikan bahwa panel tersebut akan memikul geser murni (Gambar 10.7.c).

##### Tekuk Elastis Akibat Geser Murni

Tegangan tekuk elastis untuk sebuah elemen pelat adalah:

$$f_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2) \left( \frac{b}{t} \right)^2} \quad 10.21$$

Untuk kasus geser murni pada balok pelat berdinding penuh, maka persamaan 10.21 dapat dituliskan menjadi:

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k_n}{12(1 - \nu^2) \left( \frac{b}{t} \right)^2} \quad 10.22$$

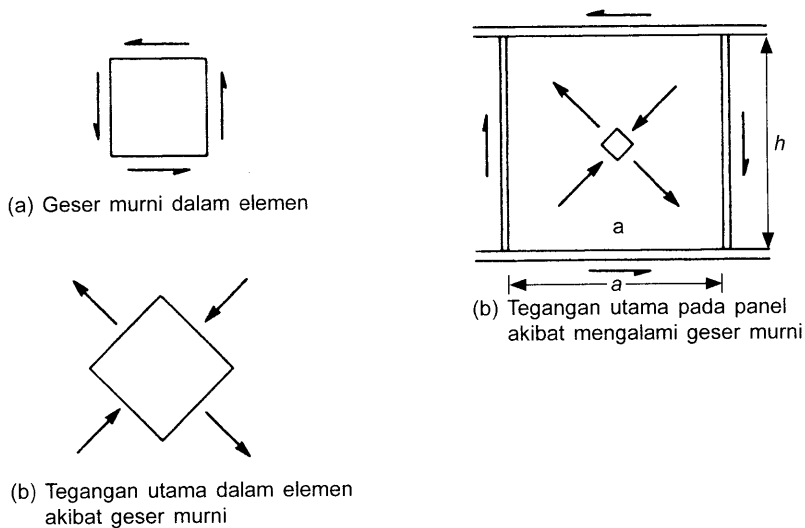
Nilai  $k_n$  merupakan fungsi dari rasio  $a/h$ , dalam SNI 03-1729-2002 pasal 8.8.2, ditetapkan:

$$k_n = 5 + \frac{5}{\left( \frac{a}{h} \right)^2} \quad 10.23$$

Jika didefinisikan besaran baru tanpa dimensi,  $C_v$  sebagai rasio antara tegangan tekuk geser  $\tau_{cr}$  dengan tegangan geser leleh  $\tau_y$ , maka:

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k_n}{\tau_y \cdot 12(1-\nu^2)(h/t)^2}$$

10.2-



Gambar 10.7 Teori Geser pada Balok Pelat Berdinding Penuh

Dengan mensubstitusikan  $\tau_y = 0,6 \cdot f_y$  serta  $\nu = 0,3$  maka diperoleh nilai  $C_v$  untuk daerah tekuk elastis:

$$C_v = 1,5 \frac{k_n \cdot E}{f_y} \cdot \frac{1}{(h/t_w)^2} \quad (\text{SNI 03-1729-2002, pasal 8.8.5})$$

10.3-

### Tekuk Inelastis Akibat Geser Murni

Pada daerah transisi antara tekuk elastis dengan leleh, besarnya  $\tau_{cr}$  adalah:

$$\tau_{cr} = \sqrt{(\tau_{proporsional}) \cdot (\tau_{cr \text{ elastis}})}$$

10.4-

Jika persamaan 10.26 dibagi dengan  $\tau_y$  serta mengambil nilai  $\tau_{proporsional} = 0,8 \cdot \tau_y$  maka diperoleh bentuk:

$$C_v = \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = \frac{1}{\tau_y} \sqrt{0,8 \cdot \tau_y \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k_n}{12(1-\nu^2)(h/t_w)^2}}$$

10.5-

Dengan mengambil  $\tau_y = 0,6 \cdot f_y$  serta  $\nu = 0,3$  maka diperoleh nilai  $C_v$  untuk daerah tekuk inelastis:

$$C_v = 1,10 \cdot \frac{\sqrt{k_n \cdot E / f_y}}{(h/t_w)} \quad (\text{SNI 03-1729-2002, pasal 8.8.4})$$

10.6-

Kuat geser nominal dari balok pelat berdinding penuh ditentukan sebagai berikut:

$$V_n = C_v(0,6 \cdot f_y) \cdot A_w$$

10.7-

Nilai  $C_v$  ditentukan dalam persamaan 10.25 untuk tekuk elastis ( $C_v < 0,8$ ) dan untuk tekuk inelastis nilai  $C_v$  ditentukan dalam persamaan 10.28 ( $C_v > 0,8$ ).

1. Untuk nilai  $C_v = 1$ , maka persamaan 10.28 dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\frac{h}{t_w} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} \quad 10.30$$

Jika nilai  $h/t_w$  tidak melebihi batas tersebut maka kuat geser nominal balok pelat berdinging penuh adalah:

$$V_n = 0,6 \cdot f_{yw} \cdot A_w \quad (\text{SNI 03-1729-2002, pers. 8.8-3.a}) \quad 10.31$$

2. Batas antara tekuk inelastis dengan tekuk elastis dicapai untuk nilai  $C_v = 0,8$ , sehingga persamaan 10.28 dapat dituliskan dalam bentuk:

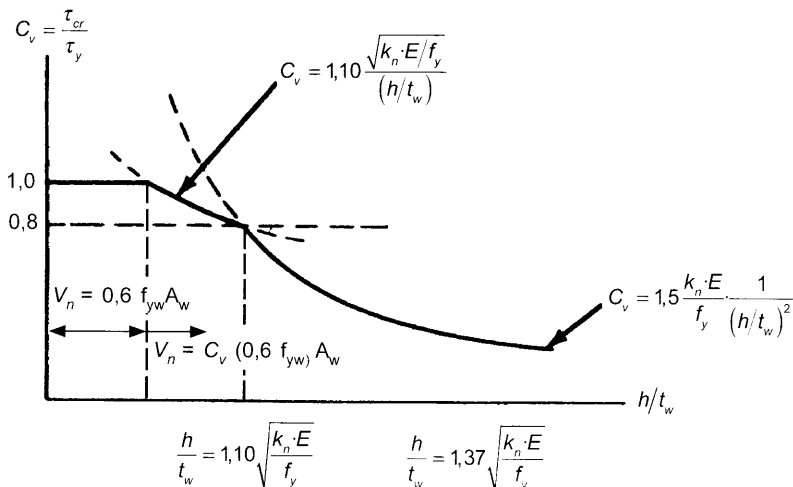
$$\frac{h}{t_w} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} \quad 10.32$$

Jika  $1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} < (h/t_w) < 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}}$ , maka kuat geser nominal balok pelat berdinging penuh adalah:

$$V_n = 0,6 \cdot f_{yw} \cdot A_w \cdot \left[ 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} \right] \cdot \frac{1}{(h/t_w)} \quad (\text{SNI 03-1729-2002, pers. 8.8-4.a}) \quad 10.33$$

3. Untuk  $\frac{h}{t_w} > 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}}$ , maka kuat geser nominal balok pelat berdinging penuh adalah:

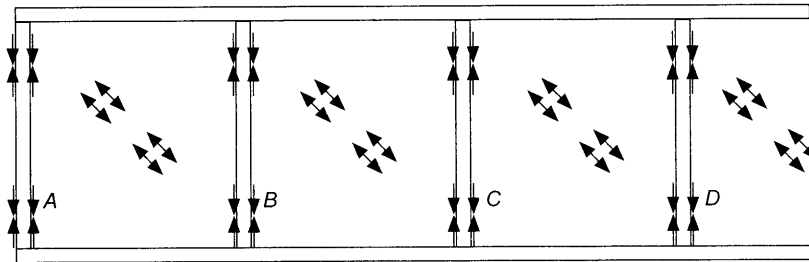
$$V_n = \frac{0,9 \cdot A_w \cdot k_n \cdot E}{(h/t_w)^2} \quad (\text{SNI 03-1729-2002, pers. 8.8-5.a}) \quad 10.34$$



Gambar 10.8 Tekuk pada Web Balok Pelat Berdinging Penuh Akibat Geser Murni

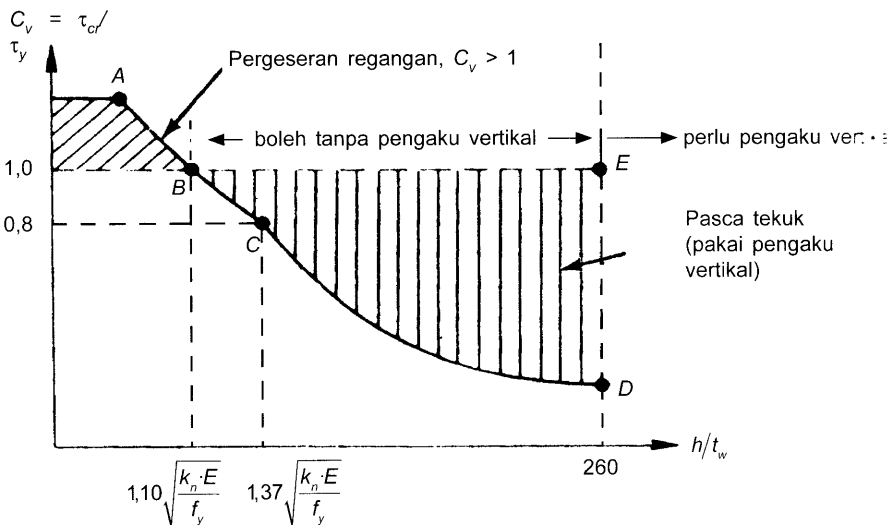
### 10.5 KUAT GESER NOMINAL DENGAN PENGARUH AKSI MEDAN TARIK

Gaya geser yang bekerja pada balok pelat berdinding penuh dapat menimbulkan tekuk (elastis dan inelastis). Tahanan pasca tekuk yang timbul dari mekanisme rangka batang yang bekerja pada panel balok pelat berdinding penuh yang dibatasi oleh pengaku-pengaku vertikal. Mekanisme rangka batang ini dinamakan sebagai aksi medan tarik, gaya-gaya tekan dipikul oleh pengaku vertikal sedangkan gaya-gaya tarik diterima oleh pelat (Gambar 10.9).



**Gambar 10.9** Aksi Medan Tarik Balok Pelat Berdinding Penuh

Kapasitas geser balok pelat berdinding penuh dengan mempertimbangkan tahanan pasca tekuk akibat medan tarik ditunjukkan dalam Gambar 10.10.



**Gambar 10.10** Kapasitas Geser dengan Aksi Medan Tarik

Aksi medan tarik boleh disertakan dalam perhitungan kuat geser balok pelat berdinding penuh apabila  $a/h < 3$  dan  $a/h < [260/h/t_w]^2$ . Selain itu aksi medan tarik tak boleh diperhitungkan untuk balok hibrida serta pada panel-panel ujung (panel A pada Gambar 10.9) balok pelat berdinding penuh.

Kuat geser nominal balok pelat berdinging penuh dengan mempertimbangkan aksi medan tarik dapat diekspresikan sebagai:

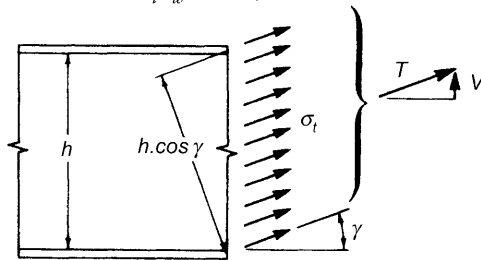
$$V_n = V_{cr} + V_{tf} \quad 10.35$$

Dengan  $V_{cr} = C_v \cdot (0,6 f_{yw}) \cdot A_w$  sesuai persamaan 10.29. Nilai  $C_v$  ditentukan dalam persamaan 10.25 dan 10.28 untuk tekuk elastis dan inelastis.  $V_{tf}$  merupakan sumbangan dari aksi medan tarik yang akan diturunkan dalam bab ini.

#### Optimum Aksi Medan Tarik

Perhatikan tegangan tarik  $\sigma_t$  yang timbul pada suatu panel balok pelat berdinging penuh dengan membentuk sudut  $\gamma$  terhadap bidang horizontal, pada Gambar 10.11. Besarnya gaya tarik diagonal total,  $T$  yang timbul sepanjang tinggi web adalah:

$$T = \sigma_t \cdot t_w \cdot h \cdot \cos \gamma \quad 10.36$$



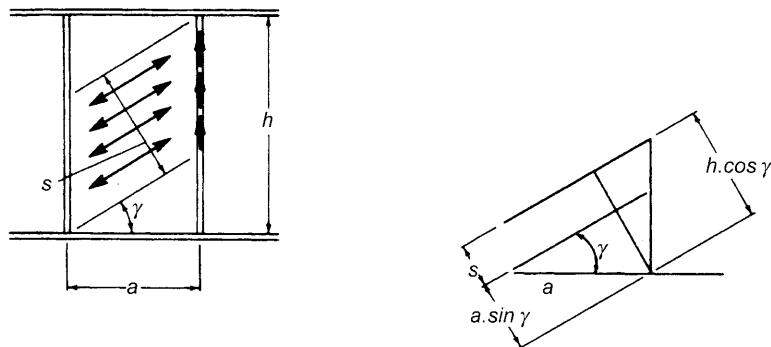
Gambar 10.11 Tegangan Tarik pada Web Akibat Aksi Medan Tarik

Komponen gaya dalam arah vertikal merupakan gaya geser  $V$  yang besarnya:

$$V = T \cdot \sin \gamma = \sigma_t \cdot t_w \cdot h \cdot \cos \gamma \cdot \sin \gamma \quad 10.37$$

Jika gaya tarik diagonal,  $T$ , ini timbul pada flens maka diperlukan pengaku vertikal, sebab kekakuan vertikal dari flens cukup kecil dan flens telah bekerja untuk memikul momen lentur yang diterima oleh balok pelat berdinging penuh. Dalam keadaan ini biasanya diberi pengaku vertikal yang dapat didisain untuk menahan komponen vertikal dari gaya tarik tersebut. Gaya geser  $\Delta V_{tf}$  yang timbul pada pengaku vertikal adalah:

$$\Delta V_{tf} = \sigma_t \cdot s \cdot t_w \cdot \sin \gamma \quad 10.38$$



Gambar 10.12 Gaya yang Timbul Akibat Aksi Medan Tarik





Dengan memperhatikan kesetimbangan gaya arah horizontal serta kesetimbangan momen terhadap titik O pada Gambar 10.13, maka:

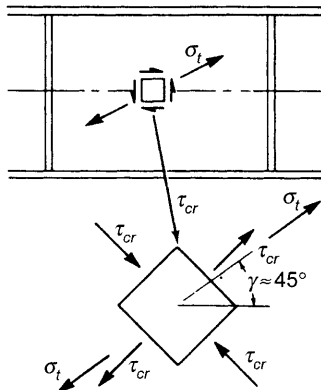
$$\begin{aligned}\Sigma F_H &= 0 \\ 0 &= (\sigma_t \cdot t_w \cdot a \cdot \sin \gamma) \cdot \cos \gamma + F_w + F_f - F_w - (\Delta F_f + F_f) \\ \Delta F_f &= \sigma_t \cdot t_w \cdot a \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma \\ &= \sigma_t \cdot \frac{t_w \cdot a}{2} \cdot \sin 2\gamma\end{aligned}\quad 10.45$$

$$\begin{aligned}\Sigma M_O &= 0 \\ 0 &= \Delta F_f (h/2) - (V_{yf}/2)(a/2) - (V_{yf}/2)(a/2) \\ \Delta F_f &= V_{yf} (a/h)\end{aligned}\quad 10.46$$

Samakan persamaan 10.45 dengan 10.46 untuk mendapatkan nilai  $V_{yf}$

$$\begin{aligned}\frac{V_{yf} \cdot a}{h} &= \sigma_t \cdot \frac{t_w \cdot a}{2} \cdot \sin 2\gamma \\ V_{yf} &= \sigma_t \cdot \frac{h \cdot t_w}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]\end{aligned}\quad 10.47$$

Kondisi aktual tegangan pada bagian web terdiri dari tegangan geser  $\tau$  dan tegangan normal  $\sigma_t$ , sehingga keruntuhan web akibat kombinasi kedua tegangan ini harus diperhitungkan.



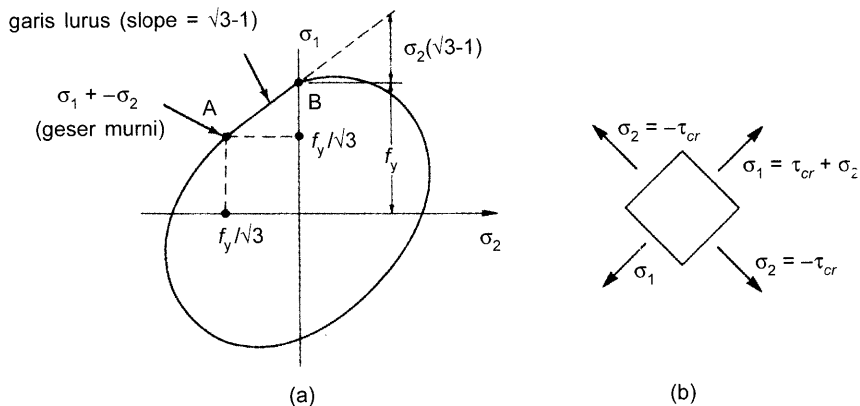
**Gambar 10.14** Tegangan Geser dan Tegangan Normal pada Web

Teori Energi Distorsi memberikan hubungan untuk keruntuhan tegangan dalam bidang dengan bentuk ellips seperti pada Gambar 10.15 (lihat kembali bab II), dan dapat dinyatakan sebagai sebuah persamaan:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = f_y^2 \quad 10.48$$

dengan  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  adalah tegangan utama.

Pada Gambar 10.15, Titik A merupakan kondisi geser murni, dan titik B merupakan kondisi tarik. Keruntuhan web dari balok pelat berdinding penuh akan terjadi di antara titik A dan titik B. Hubungan antara titik A dan titik B dapat didekati dengan sebuah garis lurus yang mempunyai persamaan:



Gambar 10.15 Teori Energi Distorsi

$$\sigma_1 = f_y + \sigma_2(\sqrt{3} - 1)$$

Untuk kondisi  $\sigma_1 = \tau_{cr} + \sigma_z$  dan  $\sigma_2 = -\tau_{cr}$ , maka persamaan 10.49 menjadi:

$$\frac{\sigma_z}{f_y} = 1 - \frac{\tau_{cr}}{f_y/\sqrt{3}} = 1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = 1 - C_v$$

Substitusikan persamaan 10.50 ke dalam persamaan 10.47 untuk memperoleh geser yang diberikan oleh aksi medan tarik.

$$V_{gf} = \frac{h \cdot t_w \cdot (1 - C_v)}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$

Kuat geser nominal balok pelat berdinding penuh dengan mempertimbangkan aksi medan tarik adalah:

$$\begin{aligned} V_n &= V_{cr} + V_{gf} \\ &= C_v \cdot (0,6 f_{yw}) \cdot h \cdot t_w + \frac{h \cdot t_w \cdot (1 - C_v)}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \end{aligned}$$

$$V_n = 0,6 f_{yw} \cdot A_w \cdot \left[ C_v + \frac{1 - C_v}{1,15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$

(SNI 03-1729-2002, pers. 8.8-4.b dan 8.8-5.b)

Nilai  $C_v$  dalam persamaan 10.51 ditentukan seperti pada persamaan 10.25 (untuk tekuk elastis) atau 10.28 (untuk tekuk inelastis).

Gaya yang bekerja pada pengaku vertikal didapat dengan menghitung kesetimbangan gaya dalam arah vertikal dari Gambar 10.13, dan diperoleh hubungan:

$$P_s = (\sigma_t \cdot \tau_w \cdot a \cdot \sin \gamma) \cdot \sin \gamma$$

Dengan mengingat persamaan trigonometri:

$$\sin^2 \gamma = \frac{1 - \cos 2\gamma}{2}$$

maka persamaan 10.52 dapat dituliskan menjadi:

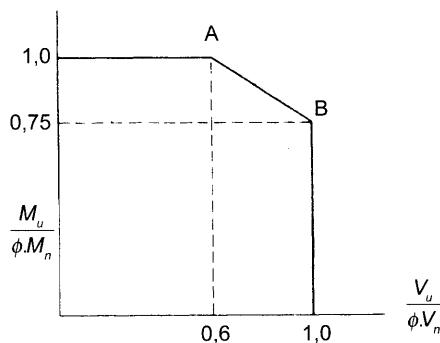
$$P_s = \sigma_t \left( \frac{a \cdot t_w}{2} \right) \left[ 1 - \frac{a/h}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad 10.53$$

Substitusikan nilai  $\sigma_t$  dari persamaan 10.50 ke dalam persamaan 10.53:

$$P_s = 0,5 \cdot f_{yw} \cdot (1 - C_v) \cdot a \cdot t_w \cdot \left[ 1 - \frac{a/h}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad 10.54$$

## 10.6 INTERAKSI GESER DAN LENTUR

Jika kuat geser balok pelat berdinging penuh diperhitungkan dengan mempertimbangkan aksi medan tarik, maka kombinasi lentur dan geser harus turut diperhitungkan pula. Hubungan interaksi antara kuat lentur dengan kuat geser ditunjukkan dalam Gambar 10.16.



Gambar 10.16 Interaksi Geser dan Lentur

Gambar 10.16 hendak menyatakan:

- a. Jika  $V_u / \phi \cdot V_n < 0,60$ , maka  $M_u = \phi \cdot M_n$
- b. Jika  $M_u / \phi \cdot M_n < 0,75$ , maka  $V_u = \phi \cdot V_n$

Dalam desain LRFD kedua kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai:

1. untuk  $V_u / \phi \cdot V_n \leq 0,60$ , berlaku

$$M_u \leq \phi \cdot M_n \quad 10.55$$

2. untuk  $M_u / \phi \cdot M_n \leq 0,75$ , berlaku

$$V_u \leq \phi \cdot V_n \quad 10.56$$

Apabila kedua kondisi di atas tidak terpenuhi maka harus diperhitungkan interaksi geser dan lentur, yang direpresentasikan sebagai garis lurus AB dalam Gambar 10.1e yang memiliki persamaan:

$$\frac{M_u}{\phi \cdot M_n} + \frac{5}{8} \frac{V_u}{\phi \cdot V_n} = 1,375 \quad 10.57$$

Dalam SNI 03-1729-2002 pasal 8.9.3, persamaan 8.9-2, interaksi geser dan lentur disyaratkan:

$$\frac{M_u}{\phi \cdot M_n} + 0,625 \cdot \frac{V_u}{\phi \cdot V_n} \leq 1,375 \quad 10.58$$

dengan:

- $V_n$  adalah kuat geser nominal balok pelat berdinding penuh
- $M_n$  adalah kuat lentur nominal balok pelat berdinding penuh
- $V_u$  adalah gaya geser ultimit yang bekerja
- $M_u$  adalah momen lentur ultimit yang bekerja

Kondisi 1 dan 2 dapat dikombinasikan untuk memperoleh batasan-batasan penggunaan persamaan interaksi geser-lentur. Asumsikan pertidaksamaan 10.57 dan 10.58 tidak terpenuhi, maka masing-masing akan memberikan sepasang pertidaksamaan baru.

$$V_u > \phi \cdot 0,6 \cdot V_n \quad 10.59.a$$

$$M_u < \phi \cdot M_n \quad 10.59.b$$

$$M_u > \phi \cdot 0,75 \cdot M_n \quad 10.60.a$$

$$V_u < \phi \cdot V_n \quad 10.60.b$$

Bagi persamaan 10.59.a dengan 10.59.b serta persamaan 10.60.a dengan 10.60.b sehingga menghasilkan:

$$\frac{V_u}{M_u} \geq \frac{0,6 \cdot V_n}{M_n} \quad 10.61.a$$

$$\frac{M_u}{V_u} \geq \frac{0,75 \cdot M_n}{V_n} \quad 10.61.b$$

Kedua persamaan ini dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\frac{0,6 \cdot V_n}{M_n} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{V_n}{0,75 \cdot M_n} \quad 10.62$$

Persamaan 10.62 memberikan batasan-batasan penggunaan persamaan interaksi geser-lentur (persamaan 10.58).

## 10.7 PENGAKU VERTIKAL

Ciri-ciri suatu balok pelat berdinding penuh adalah adanya pengaku-pengaku vertikal yang dipasang. Dua macam parameter stabilitas balok pelat berdinding penuh adalah rasio  $h/t_w$  serta  $a/h$ . Jika kedua parameter ini diambil serendah mungkin maka tekuk yang diakibatkan oleh geser dapat dihindarkan. Untuk profil-profil gilas panas yang ada umumnya memiliki rasio  $h/t_w$  yang kecil sehingga tekuk akibat geser tidak akan terjadi. Jika pengaku vertikal yang dipasang setiap jarak  $a$  sedemikian rupa sehingga nilai  $a/h$  cukup kecil maka akan timbul aksi medan tarik yang dapat meningkatkan kuat geser nominal dari balok pelat berdinding penuh. Dimensi pengaku vertikal harus direncanakan sedemikian hingga

mampu menahan gaya tekan yang timbul akibat aksi medan tarik, sehingga mekanisme rangka batang dapat timbul pada panel-panel balok pelat ber dinding penuh.

Pengaku vertikal boleh tidak digunakan jika kuat lentur penampang dapat tercapai tanpa terjadinya tekuk akibat geser. Dari Gambar 10.10 pengaku vertikal tak perlu digunakan jika:

$$\frac{h}{t_w} \leq 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} \quad 10.63$$

Nilai  $k_n$  dapat diambil sama dengan 5, jika pengaku vertikal tak digunakan sehingga persamaan 10.63 menjadi:

$$\frac{h}{t_w} \leq 2,46 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 10.64$$

Jika batasan pada persamaan 10.64 tak terlampaui, maka kuat geser nominal maksimum dapat tercapai:

$$V_n = 0,6 \cdot f_{yw} \cdot A_w \quad 10.65$$

Jika kuat geser rencana yang diperlukan lebih kecil dari kuat geser maksimum, maka pengaku vertikal tak dibutuhkan bila:

$$V_n \leq C_v \cdot 0,6 \cdot f_{yw} \cdot A_w \quad 10.66$$

Persamaan 10.66 tidak berlaku jika rasio  $h/t_w$  melebihi 260, sebab pengaku vertikal harus dipasang bila  $h/t_w$  melebihi 260. Nilai  $C_v$  dapat diambil sesuai persamaan 10.25 (untuk tekuk elastis) dan 10.28 (untuk tekuk inelastis) dengan nilai  $k_n = 5$ :

$$1. \quad \text{jika: } 2,46 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 3,06 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{tekuk inelastis})$$

$$C_v = \frac{2,46 \cdot \sqrt{E/f_y}}{h/t_w} \quad 10.67.a$$

$$2. \quad \text{jika: } 3,06 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 260 \quad (\text{tekuk elastis})$$

$$C_v = 7,5 \cdot \frac{E}{f_y} \frac{1}{(h/t_w)^2} \quad 10.67.b$$

Secara ringkas, pengaku vertikal tak diperlukan apabila kedua kriteria berikut terpenuhi:

$$1. \quad h/t_w \leq 260 \quad 10.68$$

$$2. \quad V_n \leq C_v \cdot 0,6 \cdot f_{yw} \cdot A_w \quad 10.69$$

Pengaku vertikal harus mempunyai kekakuan yang cukup untuk mencegah web berdeformasi keluar bidang ketika terjadi tekuk pada web. Oleh karena itu, perlu ditentukan momen inersia minimum yang harus dimiliki oleh pengaku vertikal, yaitu:

$$I_s \geq j \cdot a \cdot t_w^3 \quad 10.70$$

Dengan:

$I_s$  adalah momen inersia pengaku vertikal yang diambil terhadap tengah tebal pelat web untuk sepasang pengaku vertikal, dan diambil terhadap bidang kontak dengan web jika hanya ada sebuah pengaku vertikal

$$j = \frac{2,5}{(a/h)^2} - 2 \geq 0,5 \quad 10.71$$

Pengaku vertikal harus mempunyai luas yang cukup guna menahan gaya tekan yang timbul akibat aksi medan tarik. Akibat aksi medan tarik, pengaku vertikal memiliki tekanan sebesar:

$$P_s = 0,5 \cdot f_{yw} \cdot (1 - C_v) \cdot a \cdot t_w \cdot \left[ 1 - \frac{a/h}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad 10.72$$

Jika kedua ruas dalam persamaan 10.72 dibagi dengan kuat leleh dari pengaku vertikal ( $f_{yst}$ ), maka akan didapat luas minimum yang dibutuhkan dari pengaku vertikal.

$$A_{st} = \frac{P_s}{f_{yst}} = 0,5 \cdot \frac{f_{yw}}{f_{yst}} \cdot (1 - C_v) \cdot h \cdot t_w \cdot \left[ \frac{a}{h} - \frac{(a/h)^2}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad 10.73$$

Untuk balok non hibrida serta dengan mempertimbangkan pengaruh eksentrisitas pada pengaku vertikal maka SNI 03-1729-2002 (pasal 8.12.2, persamaan 8.12-1) mensyaratkan luas minimum pengaku vertikal adalah:

$$A_s \geq 0,5 \cdot A_w \cdot D \cdot (1 - C_v) \cdot \left[ \frac{a}{h} - \frac{(a/h)^2}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right] \quad 10.74$$

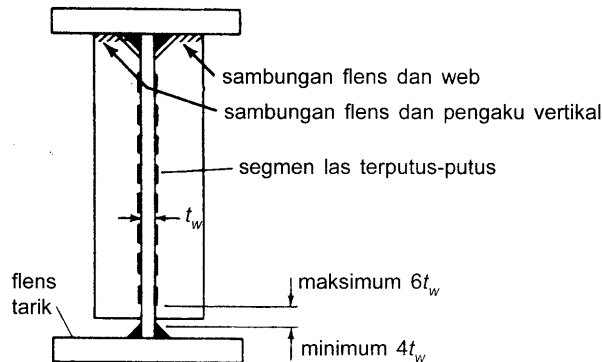
Dengan:

- $C_v$  ditentukan dari persamaan 10.25 atau 10.28
- $A_w = h \cdot t_w$ ; adalah luas web
- $D = 1,0$  untuk sepasang pengaku vertikal
- $\quad = 1,8$  untuk pengaku vertikal dari profil siku tunggal
- $\quad = 2,4$  untuk pengaku tunggal dari pelat

Sambungan pengaku vertikal ke web dan ke flens tekan harus diperhitungkan sedemikian rupa sehingga las dapat mentransfer gaya tekan,  $P_s$ , dengan baik. Sedangkan antara pengaku vertikal dengan flens tarik tidak perlu dilakukan penyambungan dengan las, sebab konsentrasi tegangan pada flens tarik akan menyebabkan terjadinya keruntuhan akibat lelah (*fatigue*) dan keruntuhan getas. Tanpa adanya pengelasan antara pengaku vertikal dengan web diharapkan dapat menimbulkan keruntuhan yang daktail. Jarak sambungan las web dan pengaku vertikal dengan sambungan las flens tarik dan web harus diambil sedemikian rupa sehingga tidak lebih dari 6 kali tebal web dan tidak kurang dari 4 kali tebal web. Gambar 10.17 menunjukkan sambungan-sambungan yang harus diperhitungkan pada balok pelat berdinding penuh.

## 10.8 PENGAKU PENAHAN GAYA TUMPU

Balok pelat berdinding penuh yang menerima beban terpusat, maka bagian web harus diperiksa terhadap kuat leleh, kuat tekuk dukung, kuat tekuk lateral serta kuat tumpu lenturnya. Prosedur pemeriksaannya sama seperti yang dilakukan terhadap balok biasa yang dibahas dalam bab V. Pemeriksaan kekuatan web terhadap gaya tekan terpusat dibahas dalam SNI 03-1729-2002 pasal 8.10.



Gambar 10.17 Sambungan Las pada Balok Pelat Berdinding Penuh

### Kuat Leleh Web

Kuat tumpu terhadap leleh suatu web adalah:

- a. Bila jarak beban terpusat terhadap ujung balok lebih besar dari tinggi balok:

$$R_b = (5 \cdot k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w \quad 10.75.a$$

- b. Bila jarak beban terpusat terhadap ujung balok lebih kecil atau sama dengan tinggi balok:

$$R_b = (2,5 \cdot k + N) \cdot f_{yw} \cdot t_w \quad 10.75.b$$

Dengan:

$k$  adalah tebal flens ditambah jari-jari peralihan

$N$  adalah dimensi longitudinal pelat perletakan atau tumpuan (minimal =  $k$ )

### Kuat Tekuk Dukung Web

Kuat web terhadap tekuk di sekitar flens yang dibebani adalah:

- a. Bila beban terpusat dikenakan pada jarak lebih dari  $d/2$  dari ujung balok

$$R_b = 0,79 \cdot t_w^2 \cdot \left[ 1 + 3 \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} \quad 10.76.a$$

- b. Bila beban terpusat dikenakan pada jarak kurang dari  $h/2$  dari ujung balok  
Untuk  $N/d \leq 0,2$ :

$$R_b = 0,39 \cdot t_w^2 \cdot \left[ 1 + 3 \left( \frac{N}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} \quad 10.76.b$$

Untuk  $N/d > 0,2$ :

$$R_b = 0,39 \cdot t_w^2 \cdot \left[ 1 + \left\{ 4 \left( \frac{N}{d} \right) - 0,2 \right\} \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_f}{t_w}} \quad 10.76.c$$

Dengan:

$d$  adalah tinggi total balok pelat berdinding penuh

$t_f$  adalah tebal flens balok pelat berdinding penuh



**Kuat Tekuk Lateral Web**

Kuat tekuk lateral web adalah:

- a. Untuk flens yang dikekang terhadap rotasi dan hanya dihitung bila  $(h/t_w) / (L/b_f) \leq 2,3$ :

$$R_b = \frac{C_r \cdot E \cdot t_w^3 \cdot t_f}{b^2} \left[ 1 + 0,4 \frac{(h/t_w)^3}{(L/b_f)^3} \right] \quad 10.77$$

- b. Untuk flens yang tidak dikekang terhadap rotasi dan hanya dihitung bila  $(h/t_w) / (L/b_f) \leq 1,7$ :

$$R_b = \frac{C_r \cdot E \cdot t_w^3 \cdot t_f}{b^2} \left[ 0,4 \frac{(h/t_w)^3}{(L/b_f)^3} \right] \quad 10.78$$

Dengan:

$$C_r = 6,6 \cdot 10^6 \quad \text{jika } M_u \leq M_y$$

$$= 3,3 \cdot 10^6 \quad \text{jika } M_u > M_y$$

$L$  adalah panjang bentang tak terkekang dari flens yang terbesar

**Kuat Tekuk Lentur Web**

Kuat tekuk lentur dari web adalah:

$$R_b = \frac{24,08 \cdot t_w^3}{b} \sqrt{E \cdot f_y} \quad 10.79$$

Jika pada tiap lokasi beban terpusat telah dipasang pengaku penahan gaya tumpu maka tidak perlu lagi dilakukan pemeriksaan kuat web terhadap leleh, tekuk dan tekuk lateral dan tekuk lentur.

Lebar pengaku pada setiap sisi web harus diambil lebih besar dari sepertiga dari flens dikurangi setengah tebal web, sedangkan tebal pengaku harus diambil lebih dari setengah tebal flens serta memenuhi syarat kelangsingan:

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad 10.80$$

dengan  $b_s$  adalah lebar pengaku dan  $t_s$  adalah tebal pengaku.

Tahanan tumpu dari sebuah pengaku penahan gaya tumpu diambil sebesar:

$$\phi \cdot R_n = 0,75(1,8 \cdot f_y \cdot A_{pb}) \quad 10.81$$

Dengan  $A_{pb}$  adalah luas penampang dari pengaku penahan gaya tumpu. Selanjutnya pengaku ini harus diperiksa seperti halnya sebuah batang tekan dengan persyaratan:

1. pengaku harus dipasang sepasang setinggi pelat web
2. penampang yang dihitung sebagai batang tekan adalah penampang melintang dari pengaku ditambah dengan  $12 \cdot t_w$  (untuk panel ujung) atau  $25 \cdot t_w$  (untuk panel dalam). Dengan  $t_w$  adalah tebal web
3. panjang tekuk diambil sebesar  $0,75 \cdot b$

**■ CONTOH 10.1:**

Sebuah komponen struktur balok pelat berdinding penuh seperti tampak pada gambar 10.1 memikul beban layan dengan rasio beban hidup terhadap beban mati adalah 3. Beban merata 6 ton/m sudah termasuk berat sendiri balok. Flens tekan diberi kekangan lateral

di kedua ujung tumpuan serta pada lokasi-lokasi beban terpusat. Pengaku penahan gaya tumpu dipasang pada tumpuan serta pada beban-beban terpusat. Tidak ada pengaku vertikal dan mutu baja yang menggunakan BJ 37. Asumsikan sambungan las sudah mencukupi. Periksa kuat lentur, kuat geser, interaksi geser lentur, dan pengaku penahan gaya tumpu!

**JAWAB:**

Hitung  $P_u$  dan  $q_u$ :

$$P_u = (1,2 \times \frac{1}{4} \times 18) + (1,6 \times \frac{3}{4} \times 18) = 5,4 + 21,6 = 27 \text{ ton}$$

$$q_u = (1,2 \times \frac{1}{4} \times 6) + (1,6 \times \frac{3}{4} \times 6) = 1,8 + 7,2 = 9 \text{ ton/m}$$

Periksa apakah komponen struktur tersebut memenuhi syarat untuk dianalisa sebagai balok pelat berdinding penuh:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{170}{1} = 170$$

$$\frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{240}} = 164,6$$

karena  $\frac{h}{t_w} > \frac{2550}{\sqrt{f_y}}$  maka balok ini memenuhi syarat untuk dianalisa sebagai balok pelat berdinding penuh.

Bagian web harus memenuhi syarat kelangsingan. Batasan  $\frac{h}{t_w}$  tergantung dari rasio  $\frac{a}{h}$ . Dalam soal di atas pengaku penahan gaya tumpu sekaligus dianggap sebagai pengaku vertikal, sehingga:  $\frac{a}{h} = \frac{365}{170} = 2,147$

Nilai  $a$  hanya sebuah perkiraan sebab  $a$  tidak tepat 365 cm. Pada panel-panel dalam, 365 cm adalah jarak dari as ke as antara pengaku vertikal dan bukan jarak bersihnya. Pada panel ujung (tumpuan) jarak  $a$  kurang dari 365 cm karena pada tumpuan dipasang dua pengaku vertikal.

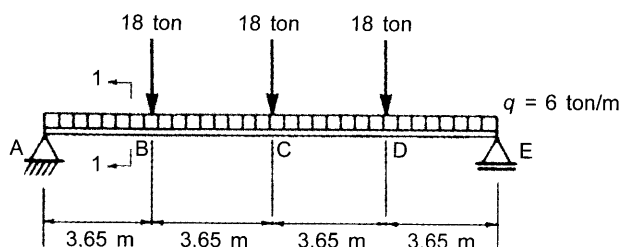
Karena  $\frac{a}{h} > 1,5$  maka:

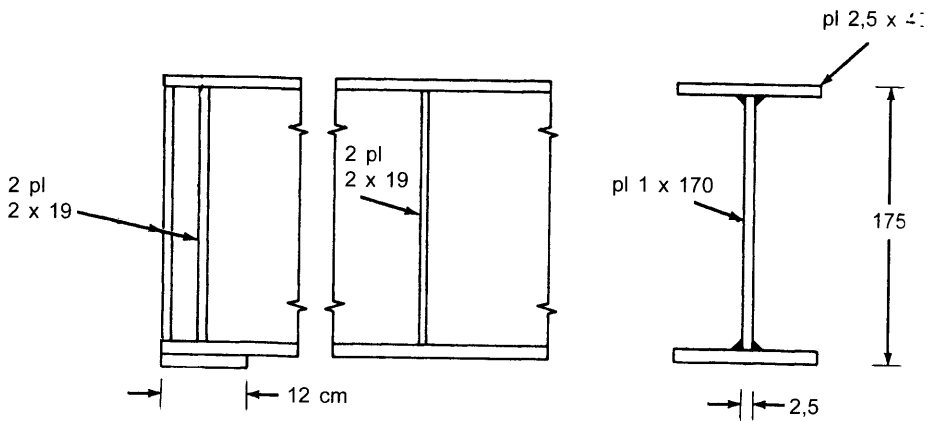
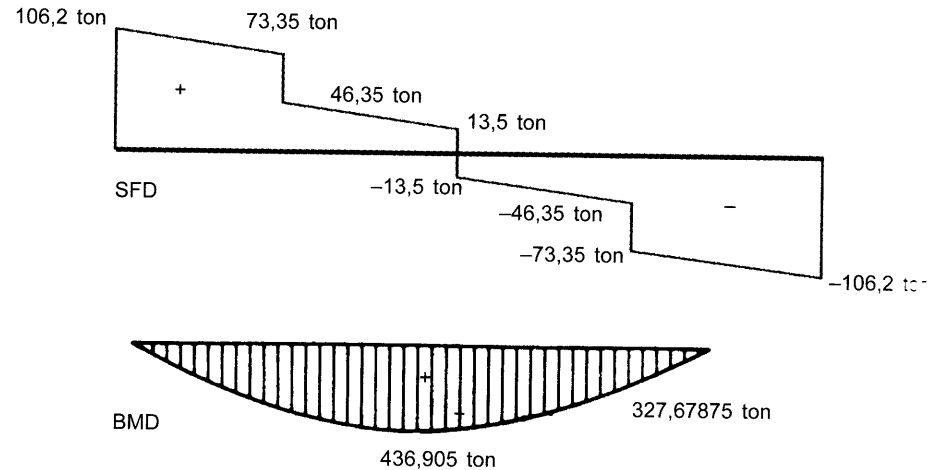
$$\frac{95000}{\sqrt{f_y}(f_y + 115)} = \frac{95000}{\sqrt{240}(240 + 115)} = 325,46 > \frac{h}{t_w} = 170$$

OK

**a. Tahanan Lentur**

diperoleh dari persamaan:  $M_n = K_g \times S \times f_{cr}$





Perhitungan momen inersia ditampilkan sebagai berikut:

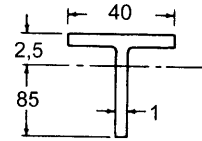
Komponen	$A$	$I_x$	$d$	$I_x + A \cdot d^2$
Web		409416,66		409416,66
Flens	100		86,25	743906,25
Flens	100		86,25	743906,25
Total				1897229,16

Modulus penampang elastis,  $S$  diperoleh dari:

$$S = \frac{I_x}{d/2} = \frac{1897229,16}{175/2} = 21682,62 \text{ cm}^3$$

Nilai  $f_{cr}$  didasarkan pada pemeriksaan terhadap tekuk torsi lateral dan tekuk lempeng flens. Untuk memeriksa terhadap tekuk torsi lateral diperlukan jari-jari girasi seperti pada gambar.

$$\begin{aligned}
 I_y &= 1/12 \times 2,5 \times 40^3 + 1/12 \times 85 \times 1^3 \\
 &= 13340,4133 \text{ cm}^4 \\
 A &= (40 \times 2,5) + (85 \times 1) \\
 &= 185 \text{ cm}^2 \\
 r_T &= \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{13340,4133}{185}} = 8,492 \text{ cm}
 \end{aligned}$$



Panjang bentang tak terkekang dari flens tekan adalah 3,65 m, sehingga kelangsingan untuk tekuk torsi lateral adalah

$$\begin{aligned}
 \lambda_G &= \frac{L}{r_T} = \frac{365}{8,492} = 42,982 \\
 \lambda_P &= 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \sqrt{\frac{200000}{240}} = 50,807
 \end{aligned}$$

karena  $\lambda_G < \lambda_P$  maka  $f_{cr} = f_y = 240$  MPa

Untuk pemeriksaan terhadap tekuk lokal flens

$$\begin{aligned}
 \lambda_G &= \frac{bf}{2 \cdot tf} = \frac{40}{2 \cdot 2,5} = 8 \\
 \lambda_P &= 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{200000}{240}} = 10,97
 \end{aligned}$$

karena  $\lambda_G < \lambda_P$  maka  $f_{cr} = f_y = 240$  MPa

Besarnya koefisien balok pelat berdingding penuh,  $K_g$  tergantung dari rasio  $a_r$ :

$$\begin{aligned}
 a_r &= \frac{A_w}{A_f} = \frac{1 \times 170}{2,5 \times 40} = 1,7 < 10 \\
 K_g &= 1 - \left[ \frac{a_r}{1200 + 300 \cdot a_r} \right] \left[ \frac{h}{t_{tw}} - \frac{2550}{\sqrt{f_{cr}}} \right] \leq 1,00 \\
 &= 1 - \left[ \frac{1,7}{1200 + 300(1,7)} \right] \left[ 170 - \frac{2550}{\sqrt{240}} \right] = 0,99463
 \end{aligned}$$

Tahanan lentur nominal dari balok pelat berdingding penuh:

$$\begin{aligned}
 M_n &= K_g \times S \times f_{cr} \\
 &= 0,99463 \times 21682,62 \times 10^3 \times 240 \\
 &= 5175884239,34 \text{ Nmm} = 517,5884 \text{ ton m} \\
 \phi M_n &= 0,9 \times 517,5884 \\
 &= 465,82956 \text{ ton m} > M_u (= 436,905 \text{ ton m})
 \end{aligned}$$

#### b. Tahanan geser

Kuat geser balok pelat berdingding penuh merupakan fungsi dari rasio kelangsingan web ( $h/t_w$ ) dan rasio jarak pengaku vertikal dengan tinggi web ( $a/h$ ). Aksi medan tarik dapat diperhitungkan jika  $a/h < 3,0$  dan tidak lebih dari:

$$\left( \frac{260}{h/t_w} \right)^2 = \left[ \frac{260}{170} \right]^2 = 2,339$$

Nilai  $a/h$  kurang lebih 2,147, sehingga aksi medan tarik dapat diperhitungkan dan menentukan kuat geser nominal balok pelat berdinding penuh. Aksi medan tarik dapat diperhitungkan pada panel-panel selain panel ujung. Hitung nilai  $k_n$  dan  $C_v$ :

$$k_n = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} = 5 + \frac{5}{2,147^2} = 6,085$$

$$1,10 \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} = 1,10 \sqrt{\frac{6,085 \times 200000}{240}} = 78,331$$

$$1,37 \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} = 1,37 \sqrt{\frac{6,085 \times 200000}{240}} = 97,557$$

karena  $\frac{b}{t_w} = 170 > 1,37 \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}}$ , maka  $C_v$  dihitung dari persamaan 10.25:

$$C_v = 1,5 \frac{k_n \cdot E}{f_y} \frac{1}{\left(\frac{b}{t_w}\right)^2} = 1,5 \frac{6,085 \times 200000}{240} \frac{1}{170^2} = 0,263$$

Kuat geser nominal balok pelat berdinding penuh dengan mempertimbangkan aksi medan tarik adalah:

$$\begin{aligned} V_n &= 0,6 \times f_{yw} \times A_w \left[ C_v + \frac{1 - C_v}{1,15 \sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2}} \right] \\ &= 0,6 \times 240 \times (10 \times 1700) \left[ 0,263 + \frac{1 - 0,263}{1,15 \sqrt{1 + 2,147^2}} \right] = 130,62 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 130,62 = 117,558 \text{ ton} > 46,35 \text{ ton}$$

Untuk panel ujung aksi medan tarik tidak boleh diperhitungkan, sehingga kuat geser nominal untuk panel ujung ditentukan dari persamaan 10.34:

$$\begin{aligned} V_n &= \frac{0,9 \times A_w \times k_n \times E}{\left(\frac{b}{t_w}\right)^2} \\ &= \frac{0,9 \times (10 \times 1700) \times 6,085 \times 200000}{170^2} = 64,43 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 64,43 = 57,987 \text{ ton} < 106,2 \text{ ton}$$

Karena kuat geser panel ujung kurang dari kuat geser perlu,  $V_u$ , maka dapat ditempuh 2 solusi. Solusi pertama adalah mengurangi kelangsingan web (dengan menambah tebal web), solusi kedua adalah dengan mengurangi rasio  $a/h$  pada tiap panel dengan menambah pengaku vertikal. Dalam contoh soal ini ditempuh solusi kedua.

Lokasi dari pengaku vertikal yang pertama ditempuh dengan strategi sebagai berikut:

$$\phi_v \times V_n = \phi_v \times (0,6 \times A_w \times f_{yw} \times C_v)$$

$$C_v = \frac{\phi_v \times V_n}{\phi_v \times (0,6 \times A_w \times f_y)} = \frac{106,2 \times 10^4}{0,9 \times (0,6) \times (10 \times 1700) \times (240)} = 0,482$$

Dengan mengingat persamaan 10.25:

$$C_v = 1,5 \cdot \frac{k_n \cdot E}{f_y} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2}$$

$$k_n = \frac{C_v \times f_y \times \left(\frac{h}{t_w}\right)^2}{1,5 \times E}$$

$$= \frac{0,482 \times 240 \times (170)^2}{1,5 \times 200000} = 11,144$$

$$k_n = 5 + \frac{5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2}$$

$$a/h = \sqrt{\frac{5}{k_n - 5}} = \sqrt{\frac{5}{11,144 - 5}} = 0,90211$$

sehingga jarak pengaku vertikal yang dibutuhkan adalah:

$$a = 0,90211 \times h = 0,90211 \times 170 = 153,3 \text{ cm} \approx 150 \text{ cm}$$

meskipun  $a$  didefinisikan sebagai jarak bersih antar pengaku vertikal, dalam contoh ini secara konservatif jarak antar pengaku vertikal diambil dari as ke as dan pengaku vertikal pertama diletakkan sejarak 150 cm dari ujung balok pelat berdinging penuh. Penambahan pengaku vertikal ini akan memberikan kuat geser balok pelat berdinging penuh yang lebih besar daripada beban geser terfaktor maksimum ( $= 106,2$  ton).

### c. Interaksi Geser-Lentur

Interaksi geser-lentur harus diperiksa jika ada aksi medan tarik, dengan demikian interaksi geser-lentur tidak perlu diperiksa untuk panel-panel ujung. Interaksi geser-lentur hanya diperiksa jika dipenuhi syarat:

$$\frac{0,6 \cdot V_u}{M_u} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{V_n}{0,75 \cdot M_n}$$

$$\frac{0,6(130,62)}{517,5884} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{130,62}{0,75(517,5884)}$$

$$0,1514 \leq V_u/M_u \leq 0,3365$$

$$\text{Nilai } V_u/M_u \text{ max} = 46,35/327,67875 = 0,1414$$

Karena nilai  $V_u/M_u$  di luar batas syarat pemeriksaan interaksi geser-lentur, maka dalam contoh ini tidak perlu diperiksa masalah interaksi geser-lentur.

### d. Pengaku penahan gaya tumpu

Karena pada tiap lokasi beban terpusat telah dipasang pengaku penahan gaya tumpu, maka tidak perlu lagi pemeriksaan kuat web terhadap leleh, tekuk dukung, tekuk lateral

dan tekuk lentur. Selanjutnya pengaku penahan gaya tumpu harus dianalisa seperti anal. batang tekan.

Untuk pengaku penahan gaya tumpu pada panel-panel ujung dan panel dalam:

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{19}{2} = 9,5$$

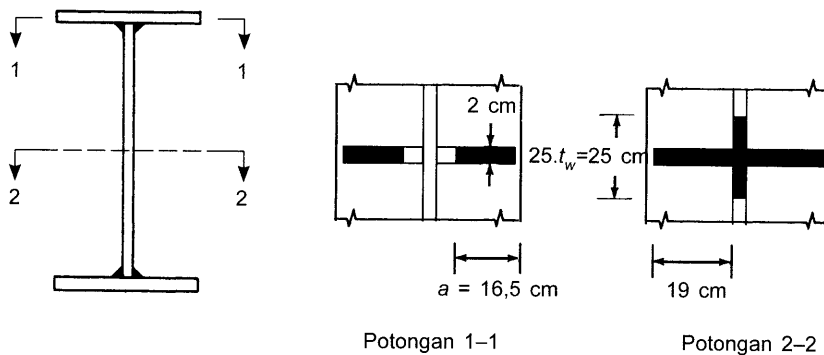
$$0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,56 \cdot \sqrt{\frac{200000}{240}} = 16,166 > 9,5 \quad \underline{\underline{C.}}$$

Tahanan tumpu untuk pengaku pada panel-panel dalam, dihitung sebagai berikut:

$$A_{pb} = 2 \cdot a \cdot t = 2(19 - 2,5)(2) = 66 \text{ cm}^2$$

$$R_n = 1,8 \cdot f_y \cdot A_{pb} = 1,8(240)(6600) = 285,12 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot R_n = 0,75 \cdot R_n = 0,75(285,12) = 213,84 \text{ ton} > 27 \text{ ton} \quad \underline{\underline{C.}}$$



Periksa kekuatan pengaku sebagai batang tekan dengan:

$$A_g = 2(2)(19) + (1)(25) = 101 \text{ cm}^2$$

Momen inersia terhadap sumbu web:

$$\begin{aligned} I &= \Sigma (I_o + A \cdot d^2) \\ &= \frac{25 \cdot (1)^3}{12} + 2 \left[ \frac{2 \cdot (19)^3}{12} + (19)(2) \left( \frac{19}{2} + \frac{1}{2} \right)^2 \right] \\ &= 9888,4166 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

Jari-jari girasi:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{9888,4166}{101}} = 9,8947 \text{ cm}$$

Rasio kelangsingan:

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r} = \frac{k \cdot h}{r} = \frac{0,75 \cdot (170)}{9,8947} = 12,8857$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} (12,8857) \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,142 \rightarrow \omega = 1$$

Kuat tekan nominal penampang:

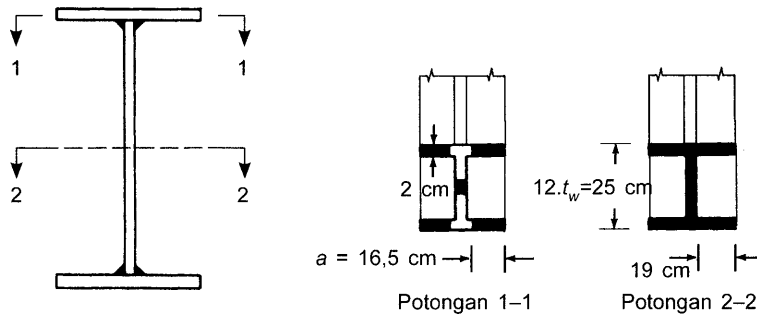
$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 101 \cdot 10^2 \cdot (240/1) = 242,4 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot N_n = 0,85(242,4) = 206,04 \text{ ton} > 27 \text{ ton} \quad \underline{\underline{C.}}$$

Untuk panel ujung, tahanan tumpu pengakunya adalah:

$$\begin{aligned}\phi R_n &= \phi(1,8 \cdot f_y \cdot A_{pb}) = 0,75(1,8)(240)(4)(165)(20) \\ &= 427,68 \text{ ton} > 106,2 \text{ ton}\end{aligned}$$

OK



Periksa kekuatan pengaku sebagai batang tekan:

$$\begin{aligned}A_g &= 12(1) + 4(19)(2) = 164 \text{ cm}^2 \\ I &= \Sigma (I_o + A \cdot d^2) \\ &= \frac{12(1)^3}{12} + 4 \left[ \frac{2(19)^3}{12} + (19)(2) \left( \frac{19}{2} + \frac{1}{2} \right)^2 \right] \\ &= 19773,66 \text{ cm}^4\end{aligned}$$

Jari-jari girasi:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{19773,66}{164}} = 10,9805 \text{ cm}$$

Rasio kelangsingan:

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r} = \frac{k \cdot h}{r} = \frac{0,75 \cdot (170)}{10,9805} = 11,6115$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} (11,6115) \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,1281 \rightarrow \omega = 1$$

Kuat tekan nominal penampang:

$$\begin{aligned}N_n &= A_g \cdot f_{cr} = 164 \cdot 10^2 \cdot (240/1) = 393,6 \text{ ton} \\ \phi N_n &= 0,85(393,6) = 334,56 \text{ ton} > 106,2 \text{ ton}\end{aligned}$$

OK

Hingga langkah ini semua persyaratan bagi balok pelat berdinding penuh telah diperiksa, sehingga profil balok tersebut beserta pengaku-pengakunya cukup kuat untuk memikul beban yang bekerja padanya.

## 10.9 DESAIN BALOK PELAT BERDINDING PENUH

Tujuan utama dari proses desain sebuah balok pelat berdinding penuh adalah menentukan ukuran-ukuran dari flens ataupun web, di samping itu perlu juga diputuskan terlebih dahulu pemakaian pengaku-pengaku vertikal serta pengaku-pengaku penahan gaya tumpu.



Proses akhir desain adalah menyambungkan bagian-bagian dari suatu balok pelat berdinding penuh dengan menggunakan alat sambung las. Secara umum proses desain balok pelat berdinding penuh adalah sebagai berikut:

1. **Tentukan tinggi dari balok pelat berdinding penuh**, secara praktis seperti halnya pada desain balok biasa, maka tinggi dari balok pelat berdinding penuh dapat diambil  $1/10 - 1/12$  dari panjang bentang
2. **Tentukan ukuran web**, tinggi web dapat ditentukan dengan cara mengurangkan tinggi total balok pelat berdinding penuh dengan dua kali tebal flens, tentunya tebal flens harus ditentukan dahulu. Selanjutnya tebal web ditentukan berdasarkan batasan-batasan berikut:

Untuk  $a/h > 1,5$ :

$$\frac{h}{t_w} = \frac{95000}{\sqrt{f_{yf}(f_{yf} + 115)}}$$

Untuk  $a/h \leq 1,5$ :

$$\frac{h}{t_w} = \frac{5250}{\sqrt{f_{yf}}}$$

3. **Tentukan ukuran dari flens**, ukuran dari flens dapat ditentukan berdasarkan momen yang bekerja pada balok pelat berdinding penuh. Prosedur penentuan ukuran flens dilakukan dengan menghitung dahulu nilai momen inersia balok pelat berdinding penuh:

$$\begin{aligned} I_x &= I_{web} + I_{flens} \\ &= \frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h^3 + 2 \cdot A_f y^2 = \frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h^3 + 2 \cdot A_f (h/2)^2 \end{aligned}$$

Dengan  $A_f$  adalah luas satu buah flens. Selanjutnya modulus penampang dapat dihitung:

$$S = \frac{I_x}{c} = \frac{t_w \cdot h^3 / 12}{h/2} + \frac{2 \cdot A_f \cdot (h/2)^2}{h/2} = \frac{t_w \cdot h^2}{6} + A_f \cdot h$$

Dari persamaan kuat momen nominal:

$$\begin{aligned} M_n &= K_g \cdot S \cdot f_{cr} \\ S &= \frac{M_n}{K_g \cdot f_{cr}} = \frac{M_u / \phi}{K_g \cdot f_{cr}} \end{aligned}$$

Samakan dengan nilai  $S$  yang diperoleh sebelumnya:

$$\frac{M_u / \phi}{K_g \cdot f_{cr}} = \frac{t_w \cdot h^2}{6} + A_f \cdot h$$

$$\text{Atau } A_f = \frac{M_u}{\phi_b \cdot h \cdot K_g \cdot f_{cr}} - \frac{t_w \cdot h}{6}$$

Jika diambil nilai  $K_g = 1$ , dan  $f_{cr} = f_y$ , maka:

$$A_f = \frac{M_u}{0,90 \cdot h \cdot f_y} - \frac{A_w}{6}$$

Dengan  $A_w$  adalah luas web. Selanjutnya ukuran flens dapat ditentukan berdasarkan perhitungan berat sendiri balok juga dapat ditentukan, sehingga besar momen dan gaya lintang dapat dihitung ulang.

4. Periksa kuat momen nominal dari penampang yang sudah ada
5. Periksa kuat gesernya, juga tentukan jarak antar pengaku vertikal
6. Periksa interaksi geser-lentur
7. Periksa kekuatan web terhadap gaya tumpu yang bekerja, rencanakan pula pengaku penahan gaya tumpu jika diperlukan
8. Rencanakan sambungan-sambungan yang diperlukan

### ■ CONTOH 10.2:

Desainlah suatu balok pelat berdinding penuh yang tertumpu sederhana dengan bentangan 18 m. Tinggi balok maksimum yang diizinkan adalah 165 cm. Asumsikan balok terkekang lateral menerus dan mutu baja BJ 37.

### JAWAB:

Menghitung  $P_u$  dan  $q_u$ :

$$P_u = (1,2 \times 35) + (1,6 \times 25) = 82 \text{ ton}$$

$$q_u = (1,2 \times 2,5) + (1,6 \times 1,8) = 5,88 \text{ ton/m}$$

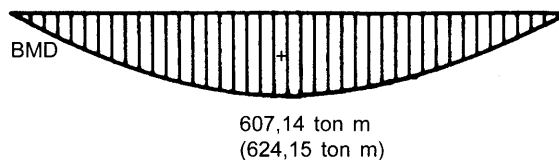
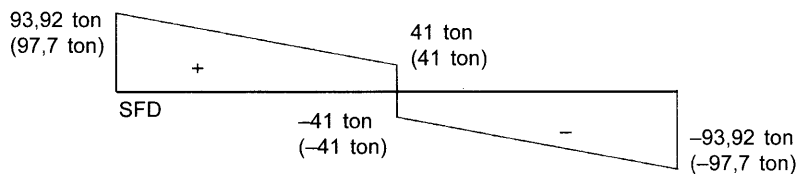
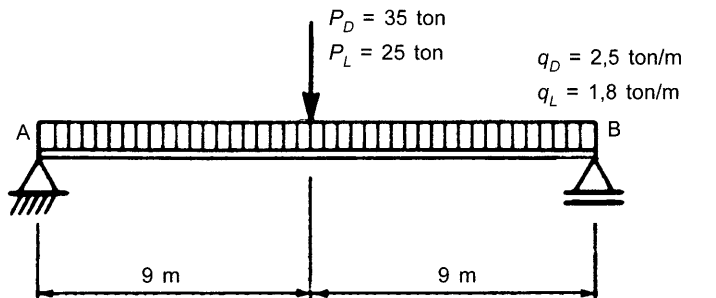
Menentukan tinggi dari balok pelat berdinding penuh:

$$L/10 = 1800/10 = 180 \text{ cm}$$

$$L/12 = 1800/12 = 150 \text{ cm}$$

Gunakan tinggi maksimum yang diijinkan, yaitu sebesar 165 cm. Jika tebal flens diambil sebesar 4 cm, maka tinggi dari web adalah:

$$h = 165 - 2(4) = 157 \text{ cm}$$



Untuk menentukan tebal web, dapat diambil dari nilai-nilai batas  $h/t_w$ :

1. agar dapat memenuhi syarat sebagai balok pelat berdinding penuh, maka:

$$\frac{h}{t_w} \geq \frac{2550}{\sqrt{f_y}} = \frac{2550}{\sqrt{240}} = 164,602$$

$$t_w \leq h/164,602 = 157/164,602 = 0,9538 \text{ cm}$$

2. untuk  $a/h \leq 1,5$ :

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{5250}{\sqrt{f_y}} = \frac{5250}{\sqrt{240}} = 338,886$$

$$t_w \geq 157/338,886 = 0,4633 \text{ cm}$$

3. untuk  $a/h > 1,5$ :

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{95000}{\sqrt{f_{yf}(f_{yf}+115)}} = \frac{95000}{\sqrt{240(240+115)}} = 325,4646$$

$$t_w \geq 157/325,4646 = 0,4824 \text{ cm}$$

Dicoba menggunakan ukuran web  $0,8 \text{ cm} \times 157 \text{ cm}$ .

Menentukan ukuran flens:

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{M_u}{0,9 \cdot b \cdot f_y} - \frac{A_w}{6} \\ &= \frac{607,14 \cdot 10^7}{0,9 \times 1570 \times 240} - \frac{8 \times 1570}{6} = 15810,06 \text{ mm}^2 = 158,1 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Berat sendiri balok sekarang dapat dihitung:

$$\text{Luas web} = 0,8 \times 157 = 125,6 \text{ cm}^2$$

$$\text{Luas flens} = 2(158,1) = 316,2 \text{ cm}^2$$

$$\text{Total} = 441,8 \text{ cm}^2$$

$$\text{Berat sendiri balok} = \frac{441,8}{10000} \times 7,85 = 0,3468 \text{ ton/m} \approx 0,35 \text{ ton/m}$$

Besar momen lentur dengan tambahan berat sendiri balok adalah:

$$M_u = 607,14 + \frac{(1,2 \times 0,35) \cdot 18^2}{8} = 624,15 \text{ ton m}$$

(Angka-angka di dalam kurung pada gambar bidang momen dan lintang menunjukkan besarnya gaya lintang dan momen lentur terfaktor setelah ditambah dengan berat sendiri balok)

Setelah menghitung ulang besar momen lentur, maka luas flens dihitung kembali:

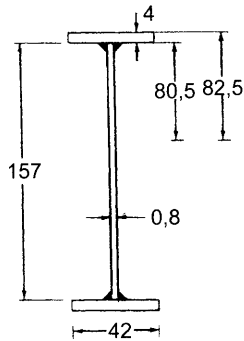
$$A_f = \frac{624,15 \times 10^7}{0,9 \times 1570 \times 240} - \frac{8 \times 1570}{6} = 16311,65 \text{ mm}^2 = 163,1 \text{ cm}^2$$

Jika tebal flens semula 4 cm masih digunakan, maka lebar flens menjadi:

$$b_f = \frac{A_f}{t_f} = \frac{163,1}{4} = 40,775 \text{ cm} \approx 42 \text{ cm}$$

Coba ukuran flens  $4 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}$ .

Hitung momen inersia penampang terhadap sumbu lentur:



$$I_x = \frac{0,8 \times 157^3}{12} + 2(4)(42)(80,5)^2$$

$$= 2435356,866 \text{ cm}^4$$

dan modulus penampang:

$$S_x = \frac{I_x}{d/2} = \frac{2435356,866}{82,5}$$

$$= 29519,47 \text{ cm}^3$$

Karena balok terkekang lateral secara menerus, maka tidak perlu dilakukan pemeriksaan terhadap tekuk torsi lateral, untuk batasan terhadap tekuk lokal flens tekan:

$$\lambda_G = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{42}{2 \times 4} = 5,25$$

$$\lambda_p = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 0,38 \cdot \sqrt{\frac{200000}{240}} = 10,97$$

$$\lambda_G < \lambda_p \text{ sehingga } f_{cr} = f_y = 240 \text{ MPa}$$

Selanjutnya dihitung pula nilai koefisien balok pelat berdinding penuh,  $K_g$ :

$$K_g = 1 - \left[ \frac{a_r}{1200 + 300 \cdot a_r} \right] \left[ \frac{h}{t_w} - \frac{2550}{\sqrt{f_y}} \right]$$

Dengan:

$$a_r = \frac{A_w}{A_f} = \frac{0,8 \times 157}{4 \times 42} = 0,7476$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{157}{0,8} = 196,25$$

$$K_g = 1 - \left[ \frac{0,7476}{1200 + (300 \times 0,7476)} \right] \left[ 196,25 - \frac{2550}{\sqrt{240}} \right] = 0,9834$$

Sehingga kuat momen lentur nominal balok:

$$M_n = K_g \cdot S \cdot f_{cr} = 0,9834(29519 \cdot 10^3)(240) = 696,7 \text{ ton m}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,9(696,7) = 627,03 \text{ ton m} > 624,15 \text{ ton m}$$

OK

Menghitung jarak antar pengaku vertikal!

Kuat geser untuk panel ujung (tanpa memperhitungkan aksi medan tarik):

$$\phi \cdot V_n = \phi(0,6 \cdot A_w \cdot f_{yw} \cdot C_v)$$

$$C_v = \frac{\phi \cdot V_n}{\phi \cdot 0,6 \cdot A_w \cdot f_{yw}} = \frac{97,7 \cdot 10^4}{0,9 \times 0,6 \times 8 \times 1570 \times 240} = 0,6$$

Dari persamaan 10.25: (asumsikan  $C_v$  berada dalam daerah elastis)

$$C_v = 1,5 \cdot \frac{k_n \cdot E}{f_y} \cdot \frac{1}{(h/t_w)^2}$$

$$k_n = \frac{C_v \cdot f_y \cdot (h/t_w)^2}{1,5 \cdot E} = \frac{0,6 \times 240 \times 196,25^2}{1,5 \times 200000} = 18,48675$$

$$a/h = \sqrt{\frac{5}{k_n - 5}} = \sqrt{\frac{5}{18,48675 - 5}} = 0,61$$

$$a = 0,61 \cdot h = 0,61(157) = 95,77 \text{ cm} \approx 95 \text{ cm dari ujung balok}$$

Periksa kembali kuat geser dari panel ujung dengan nilai  $a = 95$  cm:

$$k_n = 5 + \frac{5}{(95/157)^2} = 18,6559$$

$$1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{18,6559 \times 200000}{240}} = 170,8197 > h/t_w (=196,25)$$

Kuat geser nominal untuk panel ujung:

$$V_n = \frac{0,9 \cdot A_w \cdot k_n \cdot E}{(h/t_w)^2} = \frac{0,9 \times 8 \times 1570 \times 18,6559 \times 200000}{196,25^2} = 109,51 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot V_n = 0,9(109,51) = 98,559 \text{ ton} > 97,7 \text{ ton}$$

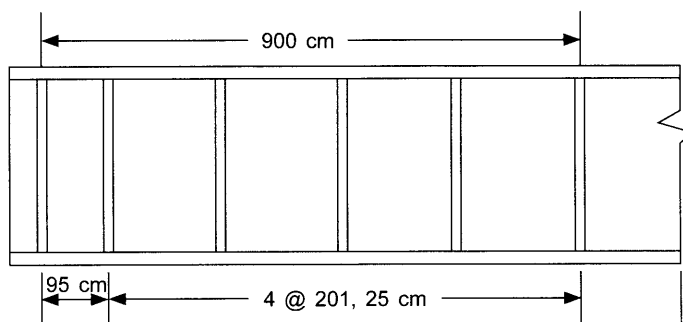
Q.E.D.

Untuk panel-panel tengah, aksi medan tarik dapat diperhitungkan jika:

$$a/h > \left[ \frac{260}{(h/t_w)} \right]^2 = 1,75$$

$$a/h \approx 1,6 \rightarrow a = 1,6(157) = 251,2 \text{ cm (max)}$$

Agar diperoleh jarak pengaku vertikal yang seragam, maka panjang yang tersisa antar pengaku vertikal ujung hingga tengah bentang balok pelat berdinding penuh dibagi secara seragam. Dalam contoh ini direncanakan 4 buah panel seperti pada gambar:



$$\text{Rasio } a/h = 201,25 / 157 = 1,2818$$

$$k_n = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} = 5 + \frac{5}{(1,2818)^2} = 8,0432$$

$$1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_n \cdot E}{f_y}} = 1,37 \cdot \sqrt{\frac{8,0432 \times 200000}{240}} = 112,6 < h/t_w (= 196,25)$$

maka  $C_v$  diambil dari persamaan 10.25:

$$C_v = 1,5 \cdot \frac{k_n \cdot E}{f_y} \cdot \frac{1}{(h/t_w)^2} = 1,5 \cdot \frac{8,0432 \times 200000}{240} \cdot \frac{1}{196,25^2} = 0,261$$

Kuat geser nominal balok pelat berdinding penuh dengan memperhitungkan aksi medan tarik:

$$V_n = 0,6 f_y A_w \cdot \left[ C_v + \frac{1 - C_v}{1,15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$

$$= 0,6(240)(8)(1570) \cdot \left[ 0,261 + \frac{1 - 0,261}{1,15 \sqrt{1 + 1,2818^2}} \right] = 118,69 \text{ ton}$$

$$\phi V_n = 0,9(118,69) = 106,821 \text{ ton} > 82 \text{ ton}$$

OK

Selanjutnya adalah merencanakan pengaku vertikal. Penampang melintang dari pengaku vertikal ditentukan berdasarkan 3 kriteria:

- luas minimum
- momen inersia minimum
- rasio lebar dan tebal yang maksimum

$$A_{s \min} = 0,5 A_w D (1 - C_v) \cdot \left[ \frac{a}{h} - \frac{(a/h)^2}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right]$$

$$= 0,5(8)(1570)(1)(1 - 0,261) \cdot \left[ 1,2818 - \frac{1,2818^2}{\sqrt{1 + 1,2818^2}} \right]$$

$$= 12,58 \text{ cm}^2$$

Dari persamaan 10.70:

$$I_{s \min} = j \cdot a \cdot t_w^3$$

$$\text{Dengan: } j = \frac{2,5}{(a/h)^2} - 2 = \frac{2,5}{1,2818^2} - 2 = -0,478 < 0,5 \rightarrow j = 0,5$$

$$I_s = 0,5(201,25)(0,8)^3 = 51,52 \text{ cm}^4$$

$$\text{Nilai maksimum } b/t_s \text{ adalah: } 0,56 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 16,1658$$

Dicoba pengaku vertikal berukuran 0,8 cm × 12 cm, sehingga:

$$A_s = 2(0,8)(12) = 19,2 \text{ cm}^2 > 12,58 \text{ cm}^2$$

OK

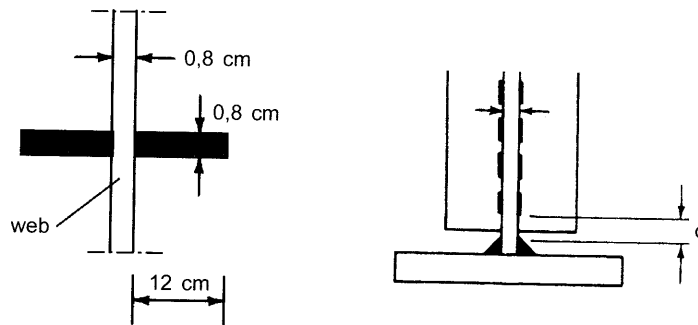
$$I_s = \Sigma (I_o + A \cdot d^2) = \frac{1}{12} (0,8)(12)^3 + (0,8)(12) \left( \frac{12}{2} + \frac{0,8}{2} \right)^2$$

$$= 508,416 \text{ cm}^4 > 51,52 \text{ cm}^4$$

OK

$$b/t_s = \frac{12}{0,8} = 15 < 16,1658$$

OK



Untuk menentukan panjang pengaku vertikal, hitung dahulu jarak  $c$ :

$$c_{\min} = 4 \cdot t_w = 4(0,8) = 3,2 \text{ cm}$$

$$c_{\max} = 6 \cdot t_w = 6(0,8) = 4,8 \text{ cm}$$

Jika diasumsikan ukuran las antara flens dengan web adalah 4 mm, serta mengasumsikan  $c = 3,2 \text{ cm}$ , maka panjang pengaku vertikal adalah:

$$b - \text{ukuran las} - 3,2 = 157 - 0,4 - 3,2 = 153,4 \text{ cm}$$

Gunakan pengaku vertikal  $0,8 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 153 \text{ cm}$ .

Periksa persyaratan interaksi geser-lentur untuk panel-panel yang diperhitungkan terhadap aksi medan tarik:

$$\frac{0,6 \cdot V_n}{M_n} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{V_n}{0,75 \cdot M_n}$$

$$\frac{0,6(118,69)}{696,7} \leq \frac{V_u}{M_u} \leq \frac{118,69}{0,75(696,7)}$$

$$0,1022 \leq V_u/M_u \leq 0,2271$$

Karena tidak ada nilai  $V_u/M_u$  yang berada dalam batasan tersebut, maka tidak perlu dilakukan pemeriksaan terhadap interaksi geser-lentur.

Untuk pengaku penahan gaya tumpu, dicoba menggunakan pengaku dengan lebar  $b = 20 \text{ cm}$ , sehingga lebar total menjadi  $2b + t_w = 2(20) + 0,8 = 40,8 \text{ cm} < \text{lebar flens} = 42 \text{ cm}$ . Tebal pengaku dihitung dari syarat kelangsingan:

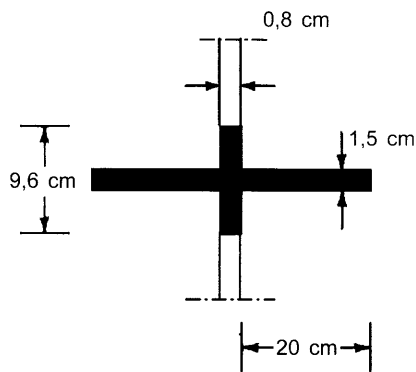
$$\frac{b}{t} \leq 0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \text{atau} \quad t \geq \frac{b}{0,56 \sqrt{\frac{f_y}{E}}} = \frac{20}{0,56 \sqrt{\frac{240}{200000}}} = 1,237 \text{ cm}$$

Gunakan pengaku berukuran  $1,5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  dengan ukuran las  $4 \text{ mm}$  serta pemotong selebar  $2,5 \text{ cm}$  untuk tempat pengelasan. Periksa tahanan tumpu pengaku pada tumpuan:

$$\begin{aligned} \phi \cdot R_n &= 0,75(1,8 \cdot f_y \cdot A_{pb}) \\ &= 0,75(1,8)(240)(15)(200 - 2,5)(2) \\ &= 191,97 \text{ ton} > 97,7 \text{ ton} \end{aligned}$$

OK

Selanjutnya pengaku penahan gaya tumpu dianalisa sebagai batang tekan. Panjang web yang dapat bekerja dengan pengaku sebagai batang tekan adalah sepanjang  $12 \text{ kali tebal web}$  ( $12 \times 0,8 = 9,6 \text{ cm}$ ).



$$A_g = 2(20)(1,5) + (0,8)(9,6) = 67,68 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{1}{12}(9,6)(0,8) + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot (1,5)(20)^3 + 2(20)(1,5)(10 + (0,8/2))^2 = 8490 \text{ cm}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_g}} = \sqrt{\frac{8490}{67,68}} = 11,2 \text{ cm}$$

$$l = \frac{k \cdot L}{r} = \frac{k \cdot h}{r} = \frac{0,75 \times 157}{11,2} = 10,51$$

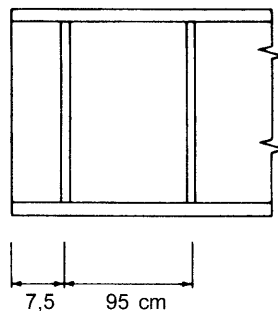
$$\lambda_c = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{10,51}{\pi} \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,1159 \rightarrow \omega = 1$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 67,68 \cdot 102(240/1) = 162,432 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot N_n = 0,85 \cdot N_n = 0,85(162,432) = 138,0672 > 97,7 \text{ ton}$$

**OK**

Karena pengaku penahan gaya tumpu harus terletak pada tengah-tengah panjang daerah web 9,6 cm, maka titik perletakan harus terletak di sekitar  $9,6/2 = 4,8$  cm dari ujung balok pelat berdinding penuh (dipasang sejarak 7,5 cm seperti pada gambar).



Pengaku penahan gaya tumpu dipasang pada masing-masing tumpuan dan pada lokasi beban terpusat. Karena pada tengah bentang beban lebih kecil daripada tumpuan, maka dapat digunakan pengaku penahan gaya tumpu yang sama dengan ukuran 1,5 cm x 20 cm.

Sambungan las akan dihitung dengan menggunakan mutu las  $f_{uw} = 490 \text{ MPa}$ .

a. Sambungan antara flens dengan web:

Hitung aliran geser pada pertemuan antara web dengan flens:

$$V_{u \text{ maks}} = 97,7 \text{ ton}$$

$$Q = \text{luas flens} \times 80,5 \text{ cm}$$

$$= (4 \times 42)(80,5) = 13524 \text{ cm}^3$$

$$I_x = 2435356,866 \text{ cm}^4$$

$$\frac{V_u \cdot Q}{I_x} \text{ maks} = \frac{97,7 \times 10^4 \times 13524 \times 10^3}{2435356,866 \times 10^4} = 542,546 \text{ N/mm}$$

Tebal pelat terkecil adalah 0,8 cm sehingga ukuran minimum las adalah 4 mm. Panjang minimum las:



$$\begin{aligned}
 L_{w \min} &= 4 \cdot t_w > 4 \text{ cm} \\
 &= 4(0,8) = 3,2 \text{ cm} \rightarrow \text{ambil } L_w = 4 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Tahanan nominal las:

$$\begin{aligned}
 \phi \cdot R_{nw} &= \phi \cdot t_e \cdot 0,6 \cdot f_{uw} \cdot 2 = 0,75(0,707 \times 4)(0,6)(490)(4) \\
 &= 1247,148 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{atau } \phi \cdot R_{nw} &= \phi \cdot t \cdot 0,6 \cdot f_u = 0,75(8)(0,6)(370) \\
 &= 1332 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

Gunakan  $\phi \cdot R_{nw} = 1247,148 \text{ N/mm}$ . Untuk panjang las 4 cm, maka kapasitas sepasang las adalah  $1247,148 \times 40 = 49885,92 \text{ N}$ .

Untuk menentukan jarak antar las maka harus dipenuhi hubungan:

$$\frac{49885,92}{s} = \frac{V_u \cdot Q}{I_x}$$

dengan  $s$  adalah jarak las dari as ke as:

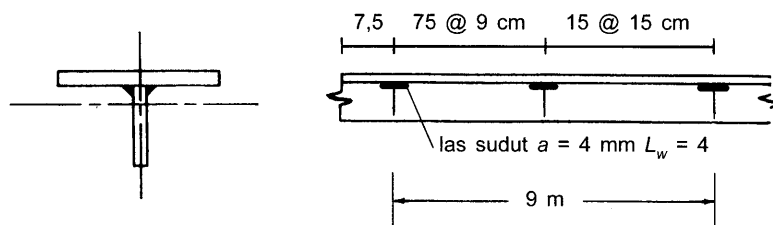
$$s = \frac{49885,92}{V_u \cdot Q / I_x} = \frac{49885,92}{542,546} = 91,95 \text{ mm} \rightarrow \text{ambil } s = 9 \text{ cm}$$

Jarak bersih antar las menjadi  $9 - 4 = 5 \text{ cm}$ . Meskipun jarak as ke as antar las sebesar 9 cm dapat digunakan untuk seluruh bentang balok, namun jarak ini dapat diperbesar pada daerah-daerah yang memikul geser kurang dari  $V_u = 97,7 \text{ ton}$ . Dicoba pengaturan las sebagai berikut: (untuk  $\frac{1}{2} L$ )

- 1) Daerah 0 – 6,75 m dari tumpuan digunakan jarak antar las sebesar 9 cm sesuai perhitungan
- 2) Daerah 6,75 – 9 m dari tumpuan ( $V_u = 55,175 \text{ ton}$ ) jarak las dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{49885,92}{V_u \cdot Q} \cdot I_x = \frac{49885,92 \times 2435356,866 \times 10^4}{55,175 \times 10^4 \times 13524 \times 10^3} \\
 &= 162,81 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

diambil  $s = 150 \text{ mm}$  (15 cm)



- b. Sambungan las pengaku vertikal:

Ukuran minimum las = 4 mm

Panjang minimum =  $4 \cdot t_w = 4(0,8) = 3,2 \text{ cm} < 4 \text{ cm} \rightarrow L_w = 4 \text{ cm}$

Kapasitas las per mm untuk 4 buah las (2 buah per pengaku vertikal):

$$\begin{aligned}
 \phi \cdot R_{nw} &= \phi \cdot t_e \cdot 0,6 \cdot f_{uw} \cdot 2 = 0,75(0,707 \times 4)(0,6)(490)(4) \\
 &= 2494,296 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{atau } \phi \cdot R_{nw} &= \phi \cdot t \cdot 0,6 \cdot f_u = 0,75(8)(0,6)(370) \\
 &= 1332 \text{ N/mm}
 \end{aligned}$$

Sehingga kapasitas las per mm adalah 1332 N. Gaya geser yang harus dipikul adalah sebesar:

$$f = 0,045 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{f_y^3}{E}} = 0,045(1570) \cdot \sqrt{\frac{240^3}{200000}} = 587,373 \text{ N/mm}$$

Kapasitas las sudut dengan ukuran las 4 mm dan panjang 4 cm adalah sebesar  $1332 \times 40 = 53280 \text{ N}$ .

Jarak las yang dibutuhkan:  $\frac{53280}{s} = 587,373 \rightarrow s = 90,71 \text{ mm} \approx 9 \text{ cm}$

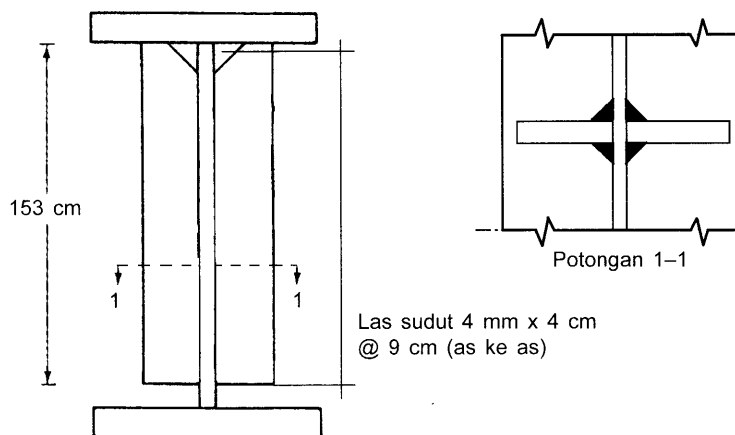
SNI 03-1729-2002 pasal 13.5.3.8 mensyaratkan jarak antar las sudut tidak boleh melebihi  $16 \cdot t_p$  dan tidak lebih dari 300 mm

$$16 \cdot t_w = 16(0,8) = 12,8 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$$

ambil jarak antar las sudut sesuai perhitungan yaitu sebesar 9 cm (as ke as).

Jarak bersih antar las =  $9 - 4 = 5 \text{ cm} < 12,8 \text{ cm}$

OK



Gunakan ukuran las 4 mm x 4 cm dengan jarak 9 cm diukur dari as ke as.

c. Sambungan las pengaku penahan gaya tumpu

Ukuran minimum las = 4 mm

Panjang minimum =  $4 \cdot t_w = 3,2 \text{ cm} < 4 \text{ cm} \rightarrow L_w = 4 \text{ cm}$

Gunakan 2 buah las untuk masing-masing pengaku, sehingga total ada 4 buah las, kapasitas las dari hitungan sebelumnya adalah 1332 N/mm atau 53280 N untuk 4 cm panjang las.

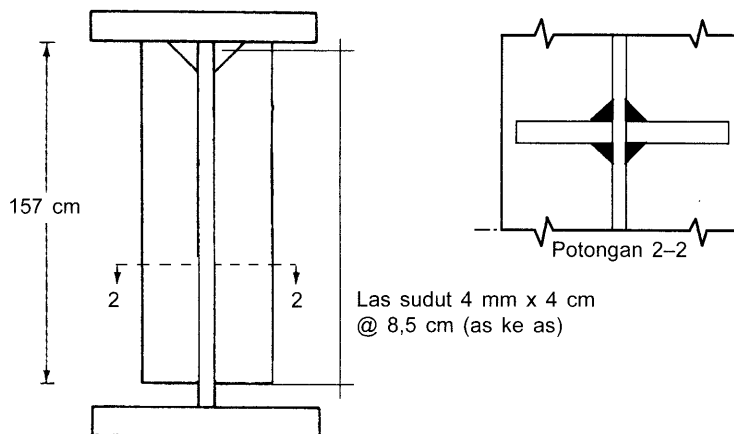
Untuk bagian tumpuan, beban per mm adalah sebesar:

$$\frac{\text{Reaksi}}{\text{panjang tersedia untuk las}} = \frac{97,7 \times 10^4}{1570 - 2(2,5)} = 624,7631 \text{ N/mm}$$

Jarak antar las dihitung sebagai berikut:

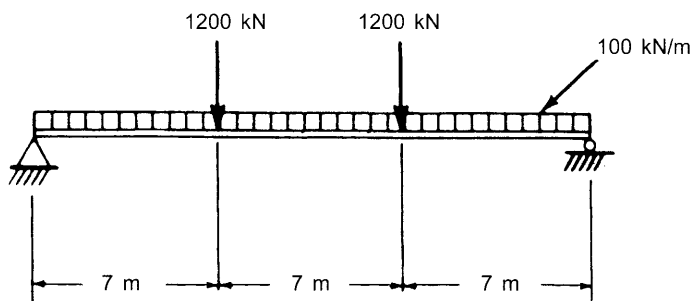
$$\frac{53280}{s} = 624,7631 \rightarrow s = 85,28 \text{ mm} \approx 8,5 \text{ cm}$$

Gunakan las sudut 4 mm x 4 cm dengan jarak 8,5 cm (as ke as).



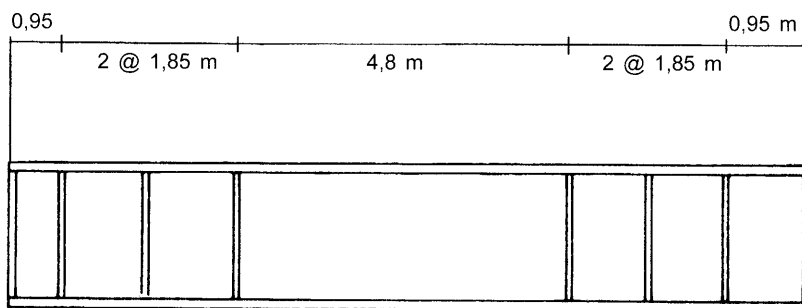
### SOAL-SOAL LATIHAN

- P.10.1** Hitunglah kuat lentur rencana dari suatu balok pelat berdinding penuh yang terdiri dari pelat badan 8 mm x 1750 mm dan pelat sayap 19 mm x 450 mm. Mutu baja B dan bagian sayap tekan diberi kekangan lateral secara menerus.
- P.10.2** Sebuah balok pelat berdinding penuh (BJ 37) mempunyai pelat badan 8 mm x 1500 mm dan pelat sayap 16 mm x 400 mm.
- Hitunglah kuat lentur rencana balok pelat berdinding penuh tersebut, jika terdapat pengekang lateral yang menerus pada bagian sayap tekan
  - Hitunglah kuat lentur rencana-nya jika panjang bentang tak terkekang adalah 5 m
- P.10.3** Balok pelat berdinding penuh (BJ 37) terdiri dari pelat badan 12 mm x 2000 mm dan pelat sayap 50 mm x 600 mm dengan panjang bentang 21 m. Pengekang lateral diberikan pada ujung-ujung balok serta pada tiap 1/3 bentang. Beban yang harus ditanggung ditunjukkan dalam Gambar P.10.3. Beban tersebut sudah merupakan beban terfaktor dan sudah termasuk pula berat sendiri struktur. Tentukan apakah balok pelat berdinding penuh tersebut memiliki kuat lentur yang cukup guna memikul beban yang bekerja!



Gambar P.10.3

- P.10.4** Sebuah balok pelat berdinding penuh dari baja BJ 37, memiliki pelat badan  $12 \text{ mm} \times 1750 \text{ mm}$  serta pelat sayap  $75 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ . Hitunglah kuat lentur rencana-nya, jika panjang bentang tak terkekang adalah sebesar  $12 \text{ m}$ . Gunakan nilai  $C_b = 1,30$ .
- P.10.5** Untuk soal P.10.4:
- Hitunglah kuat geser rencana pada panel ujung jika pengaku vertikal diletakkan  $165 \text{ cm}$  dari tumpuan
  - Hitunglah kuat geser rencana dari panel interior jika jarak pengaku vertikalnya adalah  $450 \text{ cm}$
  - Hitunglah kuat geser rencana dari balok pelat berdinding penuh tersebut jika tidak digunakan pengaku vertikal
- P.10.6** Sebuah balok pelat berdinding penuh dari baja BJ 37 dengan pelat badan  $9 \text{ mm} \times 2150 \text{ mm}$  serta pelat sayap  $22 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ . Panjang bentang balok adalah  $14 \text{ m}$ . Pengaku vertikal diletakkan pada jarak  $90 \text{ cm}$ ,  $275 \text{ cm}$  dan  $460 \text{ cm}$  dari ujung kiri, seperti pada gambar. Hitunglah kuat geser rencana masing-masing panel dari balok pelat berdinding penuh tersebut!



Gambar P.10.6

- P.10.7** Untuk soal P.10.2:
- Hitunglah kuat geser rencana pada panel ujung jika pengaku vertikal diletakkan  $165 \text{ cm}$  dari tumpuan
  - Hitunglah kuat geser rencana dari panel interior jika jarak pengaku vertikalnya adalah  $450 \text{ cm}$
  - Hitunglah kuat geser rencana dari balok pelat berdinding penuh tersebut jika tidak digunakan pengaku vertikal
- P.10.8** Desain awal dari suatu balok pelat berdinding penuh menghasilkan ukuran pelat badan  $10 \text{ mm} \times 1720 \text{ mm}$ . Momen lentur terfaktor maksimum adalah  $8000 \text{ kN.m}$ . Gunakan informasi ini untuk menentukan ukuran dari pelat sayap. Asumsikan terdapat sokongan lateral secara menerus pada bagian sayap tekan. Gunakan mutu baja BJ 37.

# 11

## Balok-Kolom

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Memahami pengaruh kombinasi antara beban aksial tekan serta momen lentur yang bekerja secara bersamaan pada suatu komponen struktur balok-kolom
- Menganalisis dan mendesain suatu komponen struktur balok-kolom

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Persamaan Diferensial untuk Kombinasi Gaya Aksial dan Lentur
- 1.2 Faktor Perbesaran Momen
- 1.3 Desain LRFD Komponen Struktur Balok-Kolom
- 1.4 Perbesaran Momen untuk Struktur Tak Bergoyang
- 1.5 Perbesaran Momen untuk Struktur Bergoyang
- 1.6 Tekuk Lokal Web pada Komponen Struktur Balok-Kolom

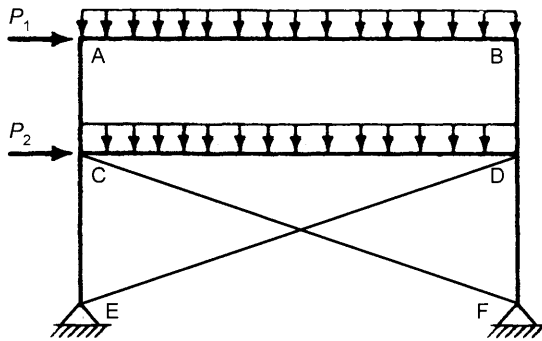
### 11.1 PENDAHULUAN

Suatu komponen struktur biasanya harus memikul beban aksial (tarik atau tekan) dan momen lentur. Apabila besarnya gaya aksial yang bekerja cukup kecil dibandingkan dengan momen lentur yang bekerja, maka efek dari gaya aksial tersebut dapat diabaikan, dan komponen struktur tersebut dapat didesain sebagai komponen balok terlentur yang telah dipelajari dalam bab 5 dan 9. Sedangkan jika gaya aksial yang bekerja lebih dominan daripada momen lentur, maka komponen struktur tersebut harus didesain menjadi komponen struktur tarik (jika yang bekerja adalah gaya aksial tarik) atau didesain sebagai komponen struktur tekan (jika yang bekerja adalah gaya aksial tekan). Komponen struktur tarik telah dibahas pada bab 3, sedangkan komponen struktur tekan dibahas dalam bab 4.

Pada suatu komponen struktur terkadang efek gaya aksial maupun momen lentur tidak dapat diabaikan salah satunya, kombinasi dari gaya aksial dan momen lentur harus dipertimbangkan dalam proses desain komponen struktur tersebut. Komponen struktur tersebut sering disebut sebagai elemen balok-kolom (*beam-column*). Pada struktur-struktur statis tak tentu umumnya sering dijumpai elemen balok-kolom ini. Perhatikan struktur portal statis tak tentu pada Gambar 11.1.

Akibat kondisi pembebanan yang bekerja, maka batang AB tidak hanya memikul beban merata saja, namun juga harus memikul beban lateral  $P_1$ . Dalam hal ini efek lentur dan efek gaya tekan  $P_1$  yang bekerja pada batang AB harus dipertimbangkan dalam proses desain penampang batang AB, atau dengan kata lain batang AB harus didesain sebagai suatu elemen balok-kolom.

Berbeda dengan batang CD yang hanya didominasi oleh efek lentur saja, gaya lateral  $P_2$  sudah dipikul oleh pengaku-pengaku (*bracing*) bentuk X, sehingga batang CD dapat didesain sebagai suatu elemen balok tanpa pengaruh gaya aksial. Batang CF dan DE harus



**Gambar 11.1** Struktur Portal Statis Tak Tentu

akan memikul gaya aksial tarik atau tekan saja, melihat kondisi pembebanan seperti pada Gambar 11.1 maka batang DE akan memikul gaya aksial tarik, sedangkan batang CF akan sedikit kendur.

Selain batang AB yang didesain sebagai elemen balok-kolom, batang-batang AC, BD, CE, DF juga harus didesain sebagai suatu elemen balok-kolom, karena selain memikul gaya aksial akibat reaksi dari balok-balok AB dan CD, batang-batang ini juga harus menerima transfer momen yang diberikan oleh batang AB dan CD, sehingga efek lentur dan efek gaya aksial yang bekerja tidak boleh diabaikan salah satunya.

Contoh lain dari elemen balok-kolom dapat ditemukan pada struktur rangka atap. Jika letak gording pada bagian atas rangka atap tepat terletak pada titik buhul, maka batang-batang atas dapat didesain sebagai suatu komponen struktur tekan saja. Namun terkadang gording terletak pada tengah-tengah batang atas, sehingga reaksi dari gording akan memberikan efek lentur pada batang atas tersebut. Dalam hal ini maka kombinasi aksial dan lentur harus diperhitungkan, sehingga batang-batang atas tersebut harus didesain sebagai suatu elemen balok-kolom.

Tipe-tipe keruntuhan dari suatu komponen struktur yang memikul beban kombinasi antara gaya aksial dan lentur, secara ringkas dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. Aksial tarik dan lentur, keruntuhan biasanya disebabkan oleh leleh
- b. Aksial tekan dan lentur satu sumbu, keruntuhan disebabkan oleh ketidakstabilan dalam bidang lentur, tanpa terpuntir (sebagai contoh adalah balok-balok dengan beban transversal tanpa ada pengaruh tekuk torsi lateral)
- c. Aksial tekan dan lentur terhadap sumbu kuat, keruntuhan disebabkan oleh pengaruh tekuk torsi lateral
- d. Aksial tekan dan lentur dua arah, untuk penampang yang memiliki kekakuan torsi yang cukup besar, keruntuhan disebabkan oleh ketidakstabilan dalam salah satu sumbu utama (sebagai contoh adalah penampang IWF)
- e. Aksial tekan dan lentur dua arah, untuk penampang terbuka berdinding tipis, keruntuhan akan disebabkan oleh kombinasi antara puntir dan lentur
- f. Aksial tekan, lentur dua arah dan torsi, keruntuhan akan disebabkan oleh kombinasi antara puntir dan lentur jika pusat geser tidak terletak pada bidang lentur

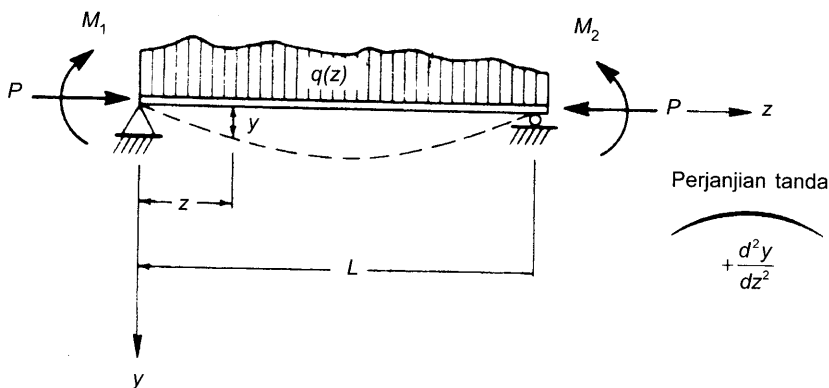
Beberapa prosedur desain yang dapat digunakan untuk suatu elemen balok-kolom antara lain adalah (1) pembatasan tegangan kombinasi, (2) pemakaian rumus interaksi semi-

empiris berdasarkan tegangan kerja (metode ASD), serta (3) pemakaian rumus interaksi semi-empiris berdasarkan kekuatan penampang (metode LRFD). Buku ini hanya menguraikan prosedur desain yang ketiga yaitu proses desain metode LRFD sesuai dengan "Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung" SNI 03-1729-2002.

## 11.2 PERSAMAAN DIFERENSIAL UNTUK KOMBINASI GAYA AKSIAL DAN LENTUR

Perhatikan sebuah balok yang memikul beban merata  $q(z)$ , momen-momen ujung  $M_1$  dan  $M_2$  serta gaya aksial tekan,  $P$  yang bekerja pada kedua ujungnya. Momen primer yang timbul akibat beban merata dan momen ujung  $M_1$ ,  $M_2$  dinotasikan sebagai  $M_z$ , maka akibatnya lendutan balok sebesar  $y$ . Momen sekunder timbul sebesar  $P \cdot y$ . Besarnya momen pada jarak  $z$  dari tepi kiri balok adalah:

$$M_z = M_i + P \cdot y = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} \quad 11.1$$



Gambar 11.2 Pembebanan pada Elemen Balok-Kolom

Untuk nilai  $EI$  yang konstan, maka persamaan 11.1 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + \frac{P}{EI} \cdot y = -\frac{M_i}{EI} \quad 11.2$$

Persamaan 10.2 dapat didiferensialkan dua kali ke- $z$  sehingga menjadi:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{P}{EI} \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = -\frac{1}{EI} \cdot \frac{d^2 M_i}{dz^2} \quad 11.3$$

Dari persamaan 10.1:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = -\frac{M_z}{EI} \quad \text{dan} \quad \frac{d^4 y}{dz^4} = -\frac{1}{EI} \cdot \frac{d^2 M_z}{dz^2} \quad 11.4$$

Substitusikan persamaan-persamaan tersebut ke dalam persamaan 11.3:

$$-\frac{1}{EI} \cdot \frac{d^2 M_z}{dz^2} + \frac{P}{EI} \left( -\frac{M_z}{EI} \right) = -\frac{1}{EI} \cdot \frac{d^2 M_i}{dz^2} \quad 11.5$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan dengan memisalkan  $k^2 = P/EI$ :

$$\frac{d^2 M_z}{dz^2} + k^2 \cdot M_z = \frac{d^2 M_i}{dz^2} \quad 11.6$$

Solusi homogen dari persamaan 11.6 adalah:

$$M_z = C_1 \cdot \sin kz + C_2 \cdot \cos kz \quad 11.7$$

Untuk memperoleh solusi lengkap dari persamaan diferensial 11.6, maka persamaan 11.7 masih harus ditambahkan solusi partikularnya. Karena  $M_i = f(z)$ , dengan  $f(z)$  pada umumnya adalah sebuah polinomial dalam  $z$ , maka solusi partikular akan mempunyai bentuk yang sama pula. Solusi lengkap dari persamaan 11.6 adalah:

$$M_z = C_1 \cdot \sin kz + C_2 \cdot \cos kz + f_1(z) \quad 11.8$$

Dengan  $f_1(z)$  sama dengan nilai  $M_z$  yang memenuhi persamaan 11.6. Jika  $M_z$  adalah fungsi kontinu, maka nilai maksimum dari  $M_z$  dapat dicari dengan melakukan diferensiasi:

$$\frac{dM_z}{dz} = 0 = C_1 \cdot k \cdot \cos kz - C_2 \cdot k \cdot \sin kz + \frac{df_1(z)}{dz} \quad 11.9$$

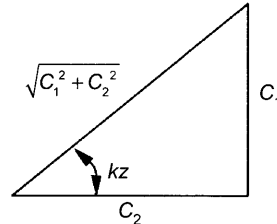
Pada beberapa kasus pembebanan, seperti beban terpusat, beban merata, momen ujung atau kombinasi keduanya, dapat ditunjukkan bahwa:

$$\frac{df_1(z)}{dz} = 0 \quad 11.10$$

Dari persamaan 11.10 dan 11.9, maka dapat dituliskan hubungan:

$$C_1 \cdot k \cdot \cos kz = C_2 \cdot k \cdot \sin kz \quad 11.11$$

$$\text{atau} \quad \tan kz = \frac{C_1}{C_2}$$



$$11.12$$

Pada saat  $M_z$  maksimum:

$$\sin kz = \frac{C_1}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \quad \cos kz = \frac{C_2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} \quad 11.13$$

Substitusikan persamaan 11.13 ke dalam persamaan 11.8:

$$\begin{aligned} M_{z \text{ maks}} &= \frac{C_1^2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} + \frac{C_2^2}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2}} + f_1(z) \\ &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2} + f_1(z) \end{aligned} \quad 11.14$$

Jika  $df_1(z)/dz \neq 0$ , maka persamaan 11.9 harus diselesaikan dan hasilnya dapat disubstitusikan kembali ke persamaan 11.8.

### Kasus I: Momen Ujung tak Seragam tanpa Beban Transversal

Dari Gambar 10.3, momen primer  $M_i$  dapat diekspresikan sebagai:

$$M_i = M_1 + \frac{M_2 - M_1}{L} \cdot z \quad 11.15$$



Sehingga:

$$\frac{d^2 M_z}{dz^2} = 0 \quad 11.15$$

Dari hasil persamaan 11.16, maka persamaan 11.6 menjadi persamaan diferensial homogen, dan  $f_1(z)$  dalam persamaan 11.8 menjadi sama dengan nol. Momen maksimum pada persamaan 11.14 menjadi:

$$M_{z \text{ maks}} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} \quad 11.17$$

Konstanta  $C_1$  dan  $C_2$  ditentukan dengan menggunakan kondisi batas yang ada dalam persamaan 11.8. Solusi umum persamaan 11.6 menjadi:

$$M_z = C_1 \sin kz + C_2 \cos kz \quad 11.18$$

Kondisi batas yang digunakan adalah:

$$1) \text{ Pada } z = 0 \rightarrow M_z = M_1 \quad 11.19$$

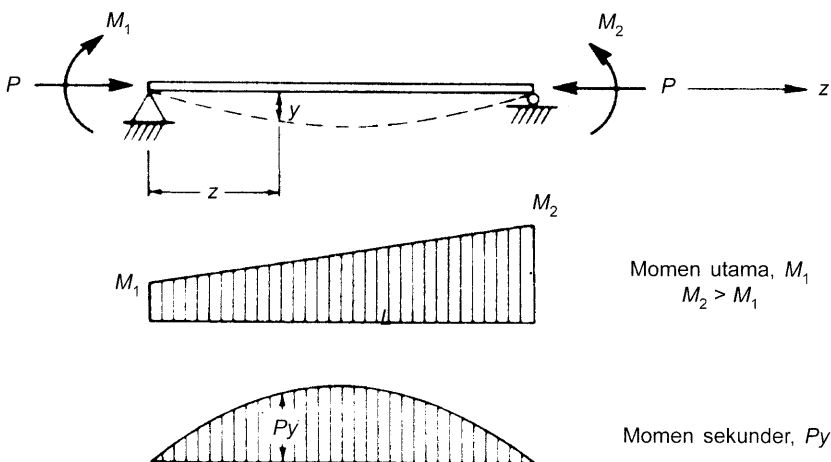
$$2) \text{ Pada } z = L \rightarrow M_z = M_2 \quad 11.20$$

Dari kondisi batas yang pertama diperoleh:

$$C_2 = M_1 \quad 11.21$$

Dan dari kondisi batas yang kedua diperoleh pula:

$$C_1 = \frac{M_2 - M_1 \cos kL}{\sin kL} \quad 11.22$$



**Gambar 11.3** Balok dengan Momen Ujung Tanpa Beban Transversal

Substitusikan persamaan 11.20 a dan b ke dalam 11.18, sehingga:

$$M_z = \left( \frac{M_2 - M_1 \cos kL}{\sin kL} \right) \sin kz + M_1 \cos kz \quad 11.23$$

Dan:

$$\begin{aligned}
 M_{z \text{ maks}} &= \sqrt{\left(\frac{M_2 - M_1 \cos kL}{\sin kL}\right)^2 + M_1^2} \\
 &= M_2 \cdot \sqrt{\frac{1 - 2(M_1/M_2) \cos kL + (M_1/M_2)^2}{\sin^2 kL}}
 \end{aligned}
 \quad 11.22$$

### Kasus II: Beban Merata

Momen primer akibat beban merata pada suatu potongan sejarak  $z$  dapat dinyatakan sebagai:

$$M_i = \frac{q}{2} \cdot z \cdot (L - z) \quad 11.23$$

Turunan kedua dari  $M_i$  adalah:

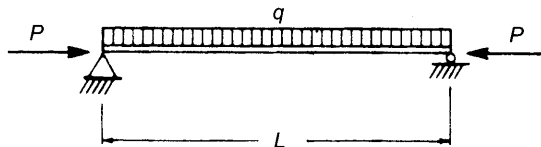
$$\frac{d^2 M_i}{dz^2} = -q \quad 11.24$$

Karena  $f_i(z) \neq 0$ , maka diperlukan solusi partikular dari persamaan diferensial tersebut, misalkan diambil  $f_i(z) = A + Bz$ , substitusikan solusi partikular ke dalam persamaan 10.6 sehingga diperoleh:

$$0 + k^2(A + Bz) = -q \quad 11.25$$

dari kesamaan kedua ruas maka didapatkan bahwa  $A = -q/k^2$  serta  $B = 0$ , sehingga persamaan 11.8 menjadi:

$$M_z = C_1 \sin kz + C_2 \cos kz - q/k^2 \quad 11.26$$



Gambar 11.4 Balok Sederhana dengan Beban Merata

Dari kondisi batas yang ada:

$$\begin{aligned}
 1) \quad &\text{Pada } z = 0 \quad \rightarrow \quad M_z = 0 ; C_2 = q/k^2 \\
 2) \quad &\text{Pada } z = L \quad \rightarrow \quad M_z = 0 ; C_1 = \frac{q}{k^2} \left( \frac{1 - \cos kL}{\sin kL} \right)
 \end{aligned}$$

Karena  $df_i(z)/dz = 0$ , maka momen maksimum diperoleh dari persamaan 11.14:

$$\begin{aligned}
 M_{z \text{ maks}} &= \frac{q}{k^2} \sqrt{\left(\frac{1 - \cos kL}{\sin kL}\right)^2 + 1} - \frac{q}{k^2} \\
 &= \frac{q}{k^2} \left( \sec \frac{kL}{2} - 1 \right) \\
 &= \frac{q \cdot L^2}{8 \left( (kL/2)^2 \right)} \left( \sec \frac{kL}{2} - 1 \right)
 \end{aligned}
 \quad 11.27$$

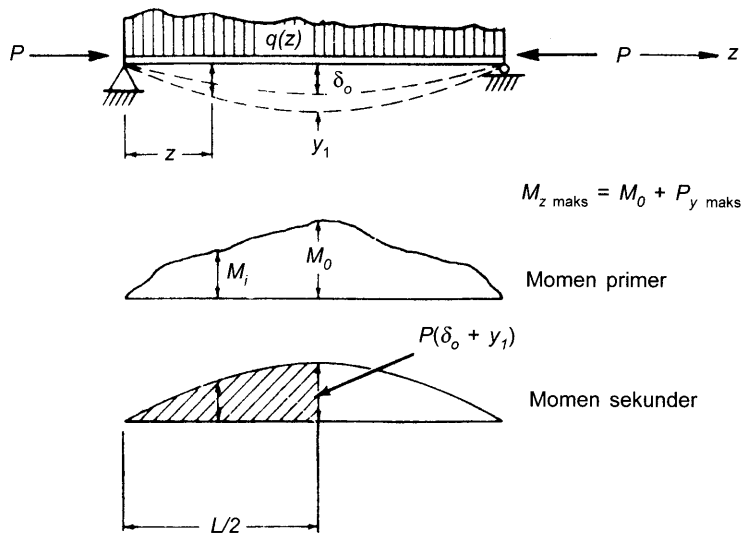
**Kasus III: Momen Ujung Seragam Tanpa Beban Transversal**

Jika pada Gambar 11.3,  $M_1 = M_2 = M$ , maka persamaan 11.22 menjadi:

$$\begin{aligned} M_{z \text{ maks}} &= M \cdot \sqrt{\frac{2(1 - \cos kL)}{\sin^2 kL}} \\ &= M \cdot \sqrt{\frac{2(1 - \cos kL)}{1 - \cos^2 kL}} = M \cdot \left( \frac{1}{\cos kL/2} \right) \\ \text{atau } M_{z \text{ maks}} &= M \cdot \sec (kL/2) \end{aligned} \quad 11.28$$

**11.3 FAKTOR PERBESARAN MOMEN**

Selain dengan menggunakan persamaan diferensial, prosedur yang lebih sederhana untuk menurunkan persamaan bagi elemen balok-kolom diturunkan dalam sub bab ini. Asumsikan sebuah elemen balok-kolom yang dikenai beban  $q(z)$  sehingga timbul lendutan  $\delta$  pada tengah bentang. Momen lentur sekunder diasumsikan berbentuk sinusoidal.



**Gambar 11.5** Momen Primer dan Momen Sekunder pada Elemen Balok-Kolom

Dengan menggunakan prinsip *Momen-Area* untuk menghitung lendutan, maka diperoleh:

$$y_1 = \frac{P}{EI} (y_1 + \delta_o) \left( \frac{L}{2} \right) \left( \frac{2}{\pi} \right) \left( \frac{L}{\pi} \right) = (y_1 + \delta_o) \frac{P \cdot L^2}{\pi^2 EI} \quad 11.29$$

$$\text{atau } y_1 = (y_1 + \delta_o) \cdot \frac{P}{P_e} \quad 11.30$$

dengan  $P_e = \pi^2 EI / L^2$ , selesaikan persamaan 11.30 untuk  $y_1$ , maka didapatkan hubungan:

$$y_1 = \delta_o \cdot \left[ \frac{P/P_e}{1 - P/P_e} \right] = \delta_o \cdot \left[ \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right] \quad 11.31$$

Dengan  $\alpha = P/P_e$ . Lendutan maksimum yang terjadi dengan mempertimbangkan efek momen sekunder adalah:

$$y_{maks} = \delta_o + y_I = \delta_o + \delta_o \cdot \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \right] = \frac{\delta}{1-\alpha} \quad 11.32$$

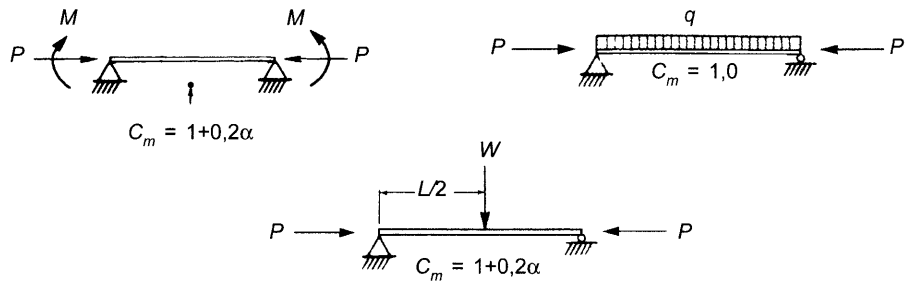
Momen lentur maksimum dengan memasukkan efek gaya tekan aksial adalah:

$$M_{z\ maks} = M_o + P \cdot y_{maks} \quad 11.33$$

Substitusikan  $y_{maks}$  dari persamaan 11.32 serta  $P = \alpha \cdot P_e = \alpha \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2$ , maka persamaan 11.33 menjadi:

$$M_{z\ maks} = M_o \cdot \left( \frac{1}{1-\alpha} \right) \left[ 1 + \underbrace{\left( \frac{\pi^2 E \cdot I \cdot \delta_o}{M_o \cdot L^2} - 1 \right) \alpha}_{C_m} \right] \quad 11.34$$

Dari persamaan 11.34, maka besarnya faktor perbesaran momen dapat dinyatakan sebagai  $C_m / (1-\alpha)$ . Berbagai nilai  $C_m$  untuk tipe pembebanan yang umum dijumpai ditampilkan dalam gambar



**Gambar 11.6** Variasi Nilai  $C_m$  pada Berbagai Pembebanan

### ■ CONTOH 11.1:

Bandingkan besarnya faktor perbesaran momen untuk struktur balok pada Gambar 11.4 yang diperoleh dari hasil solusi persamaan diferensial (persamaan 11.27) dengan hasil pendekatan (persamaan 11.34)!

#### JAWAB:

Hasil dari solusi persamaan diferensial:

$$B_I = \text{faktor perbesaran momen} = \left( \frac{2}{(kL/2)^2} \right) \left( \sec \frac{kL}{2} - 1 \right) \quad (a)$$

$$\text{Dengan } \frac{kL}{2} = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\alpha}$$

Hasil pendekatan dari persamaan 11.34:

$$B_I = \frac{C_m}{1-\alpha} \quad \text{nilai } C_m \text{ diambil} = 1,0 \text{ dari Gambar 11.6}$$

$$B_I = 1 / (1 - \alpha) \quad (b)$$

$\alpha$	kL/2	sec kL/2	(a)	(b)
0,1	0,50	1,14	1,11	1,11
0,2	0,70	1,31	1,26	1,25
0,3	0,86	1,53	1,44	1,43
0,4	0,99	1,83	1,69	1,67
0,5	1,11	2,25	2,03	2,00
0,6	1,22	2,88	2,54	2,50
0,7	1,31	3,93	3,40	3,33
0,8	1,40	6,03	5,10	5,00
0,9	1,49	12,30	10,19	10,00

Dari hasil perbandingan di atas, nampaknya nilai faktor perbesaran momen yang diperoleh dari solusi persamaan diferensial dan cara pendekatan tidak menunjukkan hasil yang berbeda terlalu jauh.

#### 11.4 DESAIN LRFD KOMPONEN STRUKTUR BALOK – KOLOM

Perencanaan komponen struktur balok-kolom, diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 11.4 yang menyatakan bahwa suatu komponen struktur yang mengalami momen lentur dan gaya aksial harus direncanakan untuk memenuhi ketentuan sebagai berikut:

Untuk  $\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} \geq 0,2$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + 8 \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad 11.5a$$

Untuk  $\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} < 0,2$

$$\frac{N_u}{2 \cdot \phi \cdot N_n} + \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right) < 1,0 \quad 11.5b$$

Dengan:

$N_u$  adalah gaya tekan aksial terfaktor

$N_n$  adalah tahanan tekan nominal dengan menganggap batang sebagai suatu elemen tekan murni (seperti dibahas dalam bab IV)

$\phi$  adalah faktor reduksi tahanan tekan = 0,85

$M_{ux}$  adalah momen lentur terfaktor terhadap sumbu  $x$ , dengan memperhitungkan efek orde kedua, yang akan dibahas kemudian

$M_{nx}$  adalah tahanan momen nominal untuk lentur terhadap sumbu  $x$

$\phi_b$  adalah faktor reduksi tahanan lentur = 0,90

$M_{uy}$  sama dengan  $M_{ux}$ , namun dihitung dengan acuan sumbu  $y$

$M_{ny}$  sama dengan  $M_{nx}$ , namun dihitung dengan acuan sumbu  $y$

Dalam pembahasan di atas disebutkan bahwa besarnya momen lentur terfaktor pada suatu komponen struktur balok kolom dihitung dengan menggunakan analisis orde kedua. SNI 03-1729-2002 menyatakan bahwa pengaruh orde kedua harus diperhatikan melalui salah satu dari dua analisis berikut:

1. suatu analisis orde pertama dengan memperhitungkan perbesaran momen
2. analisis orde kedua menurut cara-cara yang telah baku dan telah diterima secara umum

Dalam buku ini pengaruh orde kedua akan diperhitungkan dengan menggunakan cara yang pertama, yaitu analisis orde pertama dengan memperhitungkan perbesaran momen.

### 11.5 PERBESARAN MOMEN UNTUK STRUKTUR TAK BERGOYANG

Untuk suatu komponen struktur tak bergoyang, maka besarnya momen lentur terfaktor harus dihitung sebagai:

$$M_u = \delta_b \cdot M_{ntu} \quad 11.37$$

$M_{ntu}$  adalah momen lentur terfaktor orde pertama yang diakibatkan oleh beban-beban yang tidak menimbulkan goyangan, sedangkan  $\delta_b$  adalah faktor perbesaran momen untuk komponen struktur tak bergoyang, yang besarnya ditentukan sebagai berikut:

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \left( \frac{N_u}{N_{e1}} \right)} \geq 1,0 \quad 11.38$$

Dengan:

$N_u$  adalah gaya tekan aksial terfaktor

$N_{e1}$  adalah gaya tekan menurut Euler dengan  $kL/r$  terhadap sumbu lentur dan  $k \leq 1,0$  (untuk komponen struktur tak bergoyang)

Nilai  $C_m$  ditentukan sebagai berikut:

1. untuk komponen struktur tak bergoyang dengan beban transversal di antara kedua tumpuannya, maka besar  $C_m$  dapat ditentukan berdasarkan analisis rasional sebagai berikut:

$C_m$  = diambil dari persamaan 11.34 atau Gambar 11.6

$C_m$  = 1,0, untuk komponen struktur dengan ujung sederhana

$C_m$  = 0,85, untuk komponen struktur dengan ujung ujung kaku

2. sedangkan untuk komponen struktur tak bergoyang tanpa beban transversal di antara kedua tumpuannya, namun mempunyai momen ujung  $M_1$  dan  $M_2$  ( $M_1 < M_2$ ), maka  $C_m$  akan mengkonversikan momen lentur yang bervariasi secara linear menjadi momen lentur seragam  $M_E = C_m \cdot M_2$

$$C_m = 0,6 - 0,4(M_1/M_2) \quad 11.38$$

Rasio  $M_1/M_2$  bernilai negatif untuk kelengkungan tunggal, dan bernilai positif untuk kelengkungan ganda.

### 11.6 PERBESARAN MOMEN UNTUK STRUKTUR BERGOYANG

Untuk komponen struktur bergoyang, maka besarnya momen lentur terfaktor, harus diperhitungkan sebagai berikut:

$$M_u = \delta_b \cdot M_{ntu} + \delta_s \cdot M_{ltu} \quad 11.39$$

$M_{ltu}$  adalah momen lentur terfaktor orde pertama yang diakibatkan oleh beban-beban yang dapat menimbulkan goyangan. Faktor perbesaran momen,  $\delta_s$ , ditentukan sebagai berikut:

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \sum N_u \left( \frac{\Delta_{oh}}{HL} \right)} \quad 11.40$$

$$\text{atau } \delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum N_u}{\sum N_{e2}}} \quad 11.41$$

dengan:

$\sum N_u$  adalah jumlah gaya aksial tekan terfaktor akibat beban gravitasi untuk seluruh kolom pada satu tingkat yang ditinjau

$N_{e2}$  sama dengan  $N_{e1}$  namun dengan menggunakan  $k$  untuk komponen struktur bergoyang,  $k \geq 1,0$

$\Delta_{oh}$  adalah simpangan antar lantai pada tingkat yang sedang ditinjau

$\sum H$  adalah jumlah gaya horizontal yang menghasilkan  $\Delta_{oh}$  pada tingkat yang ditinjau

$L$  adalah tinggi tingkat

## 11.7 TEKUK LOKAL WEB PADA KOMPONEN STRUKTUR BALOK-KOLOM

Untuk menentukan tahanan lentur rencana dari suatu profil, maka terlebih dahulu harus diperiksa kekompakan dari penampang tersebut. Dengan menggunakan notasi  $\lambda = b/t_f$ , maka kelangsingan dari web dapat dikategorikan menjadi tiga bagian:

1. jika  $\lambda \leq \lambda_p$ , maka penampang kompak
2. jika  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ , maka penampang tak kompak
3. jika  $\lambda > \lambda_r$ , maka penampang langsing

Tabel 7.5.1 SNI 03-1729-2002 memberikan batasan nilai untuk  $\lambda_p$  dan  $\lambda_r$  sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} < 0,125, \lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \left[ 1 - \frac{2,75 \cdot N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right] \quad 11.42$$

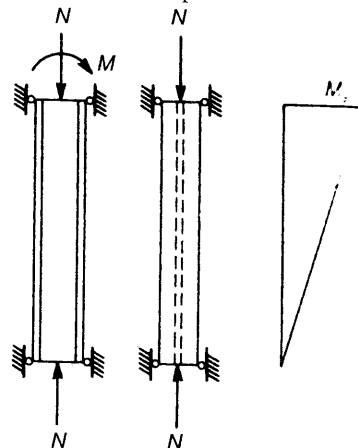
$$\text{Untuk } \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} > 0,125, \lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left[ 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right] > \frac{665}{\sqrt{f_y}} \quad 11.43$$

$$\text{Untuk semua nilai, } \lambda_r = \frac{2550}{\sqrt{f_y}} \left[ 1 - \frac{0,74 \cdot N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right] \quad 11.44$$

Dengan  $N_y = A_g f_y$  adalah gaya aksial yang diperlukan untuk mencapai kondisi batas leleh.

### ■ CONTOH 11.2:

Periksalah kecukupan profil WF 400.200.8.13 sebagai elemen balok-kolom dari portal tak bergoyang seperti pada gambar berikut. (mutu baja BJ 41)



Diketahui bahwa kolom menerima beban aksial tekan sebesar 15 ton (D) dan 30 ton (L) serta momen lentur sebesar 2 ton.m (D) dan 6 ton.m (L). Panjang kolom diketahui sebesar 3,5 m.

**JAWAB:**

- a. Menghitung beban terfaktor

$$N_u = 1,2 N_D + 1,6 N_L = 1,2(15) + 1,6(30) = 66 \text{ ton}$$

$$M_u = 1,2 M_D + 1,6 M_L = 1,2(2) + 1,6(6) = 12 \text{ ton.m}$$

- b. Aksi kolom

Menghitung rasio kelangsingan maksimum:

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r_y} = \frac{1,0 \times 350}{4,54} = 77,1$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 77,1 \times \sqrt{\frac{250}{200000}} = 0,8677$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,8677)} = 1,4038$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = A_g (f_y / \omega) = 8412(250 / 1,4038) = 149,8 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{66}{0,85 \times 149,8} = 0,52 > 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.35}$$

- c. Aksi balok

Periksa apakah WF 400.200.8.13 kompak atau tidak:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \times 13} = 7,6923 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,75$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{66 \cdot 10^4}{0,9 \times 250 \times 8412} = 0,3487 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{250}} (2,33 - 0,3487) = 62,65 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,06$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{400 - 2(13)}{8} = 46,75 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

$$L_p (= 2,2684 \text{ m}) < L (= 3,5 \text{ m}) < L_r (= 6,582 \text{ m})$$

Karena  $L_p < L < L_r$ , maka  $M_n$  terletak antara  $M_p$  dan  $M_r$  (untuk  $C_b = 1$ ). Namun dalam kasus ini  $C_b = 1,67$  sehingga ada kemungkinan  $M_n$  sama dengan  $M_p$ .

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 1285,95 \cdot 10^3 (250) = 32,14875 \text{ ton.m}$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r) = 1190 \cdot 10^3 (250 - 70) = 21,42 \text{ ton.m}$$



$$\begin{aligned}
 M_n &= C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] \leq M_p \\
 &= 1,67 \cdot \left[ 21,42 + (32,14875 - 21,42) \frac{6,582 - 3,5}{6,582 - 2,2684} \right] \\
 &= 48,57 \text{ ton.m}
 \end{aligned}$$

Karena  $M_n$  tidak boleh melebihi  $M_p$ , maka dalam kasus ini  $M_n = M_p$ , sehingga  $\phi_b M_{nx} = 0,9(52,72395) = 47,451555 \text{ ton.m}$

d. Perbesaran momen

Rasio kelangsingan  $kL/r$  yang diperhitungkan dalam perbesaran momen berhubungan dengan sumbu lenturnya, dalam soal ini sumbu lentur adalah sumbu x, sehingga:

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,0 \times 350}{16,8} = 20,83$$

$$C_m = 0,6 - 0,4M_1/M_2 = 0,6 - 0,4(0/12) = 0,6$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 8412}{20,83^2} = 3826,93 \text{ ton}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,6}{1 - \frac{66}{3826,93}} = 0,61 < 1,0$$

Ambil  $\delta_b = 1,0$ .

e. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{nu} = 1,0(12) = 12 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

$$0,52 + \frac{8}{9} \left( \frac{12}{32,14875} \right) = 0,89 < 1,0$$

O.K.

Jadi, profil WF 400.200.8.13 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut sesuai dengan desain LRFD.

### ■ CONTOH 11.3:

Periksalah kekuatan profil WF 400.400.13.21 dari suatu portal bergoyang pada gambar berikut ini:

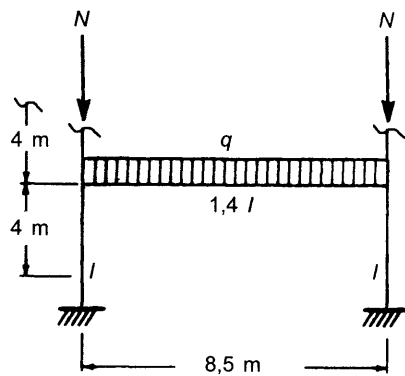
#### JAWAB:

a. Perhitungan beban terfaktor

Kombinasi 1, beban gravitasi:

$$N_u = 1,2N_D + 1,6N_L = 1,2(60) + 1,6(25) = 112 \text{ ton}$$

$$q_u = 1,2q_D + 1,6q_L = 1,2(0,4) + 1,6(1,25) = 2,48 \text{ ton/m}$$



$$\begin{aligned} N &= 60 \text{ ton (D)} \\ &25 \text{ ton (L)} \\ q &= 0,4 \text{ ton/m (D)} \\ &1,25 \text{ ton/m (L)} \\ H &= 20 \text{ ton} \\ &\text{Mutu baja BJ 37} \end{aligned}$$

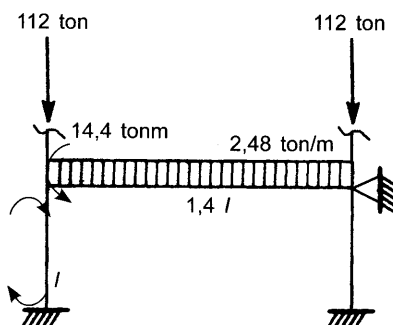
Kombinasi 2, beban gravitasi + angin:

$$N_u = 1,2N_D + 0,5N_L = 1,2(60) + 0,5(25) = 84,5 \text{ ton}$$

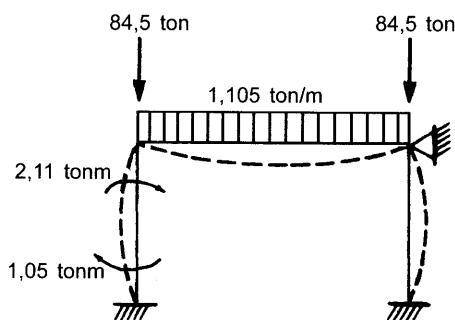
$$H_u = 1,3(20) = 26 \text{ ton}$$

$$q_u = 1,2q_D + 0,5q_L = 1,2(0,4) + 0,5(1,25) = 1,105 \text{ ton/m}$$

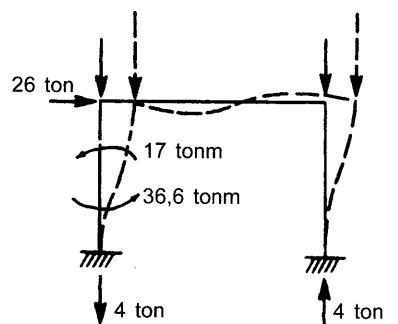
- b. Asumsikan beban gravitasi terfaktor (kombinasi 1) menghasilkan momen-momen terfaktor pada gambar (a) Beban gravitasi + angin (kombinasi 2) dianalisa dengan 2 bagian: analisa portal tak bergoyang akibat beban gravitasi saja dan analisa portal bergoyang akibat beban lateral saja. Hasil analisa ditunjukkan dalam gambar (b) dan (c) Analisa portal bergoyang menimbulkan beban tekan terfaktor sebesar 4 ton pada masing-masing kolom. Asumsikan kombinasi beban (2) adalah yang menentukan dalam analisa balok-kolom struktur tersebut.



(a) beban gravitasi



(b) analisa portal bergoyang



(c) analisa portal tak bergoyang

## c. Aksi kolom

Faktor panjang efektif  $k_x$ , ditentukan dengan menggunakan faktor  $G$ :

$$G_A = 1,0 \quad (\text{jepit})$$

$$G_B = \frac{\Sigma(I/L)_{kolom}}{\Sigma(I/L)_{balok}} = \frac{2(I/4)}{1,4 \cdot I/8,5} = 3,04$$

$$k_x = 1,57$$

Dalam arah  $y$  kolom diasumsikan tertumpu sendi di ujung atas dan bawahnya sehingga  $k_y = 1,0$ .

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,57 \times 400}{17,5} = 35,88 \quad \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1,0 \times 400}{10,1} = 39,60$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 39,60 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,4366$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,4366)} = 1,0937$$

$$N_n = A_g f_{cr} = 21870(240/1,0937) = 479,91 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{84,5 + 4 + 1,105(8,5/2)}{0,85 \times 479,91} = 0,2284 > 0,2$$

Gunakan persamaan 11.35

## d. Aksi balok

Periksa apakah WF 400.400.13.21 kompak atau tidak:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{400}{2 \times 21} = 9,52 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{93,19625 \cdot 10^4}{0,9 \times 240 \times 21870} = 0,1973 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b N_y} \right) \geq \frac{500}{\sqrt{240}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,1973) = 68,8325 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,925$$

$$\lambda = \frac{b}{t_w} = \frac{400 - 2(21)}{13} = 27,54 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

$$L_p (= 5,15 \text{ m}) > L (= 3,5 \text{ m})$$

Karena  $L < L_p$ , maka  $M_n$  dapat mencapai  $M_p$ .

$$M_p = Z_x f_y = 3600,13 \cdot 10^3 (240) = 86,40312 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b M_{nx} = 0,9(86,40312) = 77,7628 \text{ ton.m}$$

e. Perbesaran momen,  $\delta_b$ 

Untuk menghitung  $\delta_b$  diperlukan rasio kelangsingan dari portal tak bergoyang

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,0 \times 400}{17,5} = 22,857$$

$$C_m = 0,6 - 0,4(M_1/M_2) = 0,6 - 0,4(1,05/2,11) = 0,4$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 21870}{22,857^2} = 8263,04 \text{ ton}$$

$$N_u = 84,5 + 1,105(8,5/2) = 89,19625 \text{ ton}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,4}{1 - \frac{89,19625}{8263,04}} = 0,4044 < 1,0$$

Ambil  $\delta_b = 1,0$ .

f. Perbesaran momen,  $\delta_s$ 

$$\Sigma N_u = 2(84,5) + 1,105(8,5) = 178,3925 \text{ ton}$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 21870}{35,88^2} = 3356 \text{ ton}$$

$$\Sigma N_{el} = 2(3356) = 6712 \text{ ton}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_u}{\Sigma N_{el}}} = \frac{1}{1 - \frac{178,3925}{6712}} = 1,0273$$

## g. Periksa persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} + \delta_s \cdot M_{lu} = 1,0(2,11) + 1,0273(36,6) = 39,7373 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

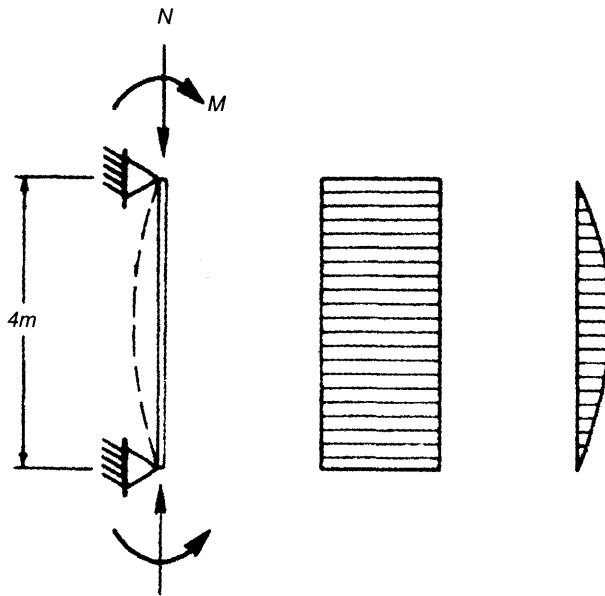
$$0,2284 + \frac{8}{9} \left( \frac{39,7373}{77,7628} \right) = 0,6826 < 1,0$$

OK

Jadi, profil WF 400.400.13.21 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut, sesuai dengan desain LRFD.

#### ■ CONTOH 11.4:

Periksalah apakah profil WF 350.350.12.19 cukup untuk memikul beban aksial tekan yang terdiri dari beban mati 40 ton dan beban hidup 10 ton, serta momen lentur sebesar 10 ton.m(D) dan 10 ton.m (L) serta 30 ton.m (beban angin). Struktur tersebut adalah bagian dari portal dengan pengaku (tak bergoyang). Asumsikan momen lentur menimbulkan kelengkungan tunggal pada struktur (mutu baja BJ 37).

**JAWAB:**

- a. Menghitung beban terfaktor

Kombinasi 1, beban gravitasi:

$$N_u = 1,2N_D + 1,6N_L = 1,2(40) + 1,6(10) = 64 \text{ ton}$$

$$M_u = 1,2M_D + 1,6M_L = 1,2(10) + 1,6(10) = 28 \text{ ton.m}$$

Kombinasi 2, beban gravitasi + angin:

$$N_u = 1,2N_D + 0,5N_L = 1,2(40) + 0,5(10) = 53 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned} M_u &= 1,2M_D + 0,5M_L + 1,3M_W \\ &= 1,2(10) + 0,5(10) + 1,3(20) = 43 \text{ ton.m} \end{aligned}$$

Asumsikan kombinasi 2 yang menentukan.

- b. Aksi kolom

Menghitung rasio kelangsingan maksimum:

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r_y} = \frac{1,0 \times 400}{8,84} = 45,2488$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 45,2488 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,4987$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,4987)} = 1,1296$$

$$N_n = A_g f_{cr} = A_g (f_y / \omega) = 17390 (240 / 1,1296) = 369,476 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{43}{0,85 \times 369,476} = 0,1369 < 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.36}$$

## c. Aksi balok

Periksa apakah WF 350.350.12.19 kompak atau tidak:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{350}{2 \times 19} = 9,2105 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{53 \cdot 10^4}{0,9 \times 240 \times 17390} = 0,1411 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,1411) = 70,6466 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,925$$

$$\lambda = \frac{b}{t_w} = \frac{350 - 2(19)}{12} = 26 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

$$L_p (= 4,5078 \text{ m}) > L (= 4 \text{ m}), \text{ sehingga } M_n = M_p$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 2493,18 \cdot 10^3 (240) = 59,836 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_{nx} = 0,9(59,836) = 53,8524 \text{ ton.m}$$

## d. Perbesaran momen

Perhitungan rasio kelangsingan terhadap sumbu lentur:

$$\frac{k \cdot L}{r_x} = \frac{1,0 \times 400}{15,2} = 26,3158$$

$$C_m = 1,0 \quad (\text{untuk momen konstan})$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L / r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 17390}{26,3158^2} = 4960,73 \text{ ton}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{1,0}{1 - \frac{53}{4960,73}} = 1,011 < 1,0$$

## e. Cek terhadap persamaan 11.36

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} = 1,011(43) = 43,473 \text{ ton.m.}$$

$$\frac{N_u}{2 \cdot \phi \cdot N_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \leq 1,0$$

$$\frac{53}{2 \times 0,85 \times 369,476} + \frac{43,473}{0,9 \times 59,836} = 0,8917 < 1,0$$

OK

Jadi, profil WF 350.350.12.19 cukup untuk memikul beban-beban tersebut, sesuai dengan desain LRFD.

### ■ CONTOH 11.5:

Pilihlah profil WF yang seekonomis mungkin untuk memikul gaya aksial tekan sebesar 10 ton ( $D$ ) dan 30 ton ( $L$ ) yang bekerja dengan eksentrisitas sebesar 5 cm seperti pada gambar. Struktur tersebut adalah bagian dari portal dengan pengaku (tak bergoyang). Asumsikan batang memiliki kelengkungan tunggal. (Mutu baja BJ 37)

#### JAWAB:

Coba menggunakan profil WF 350.175.7.11

##### a. Aksi kolom

Rasio kelangsingan maksimum:

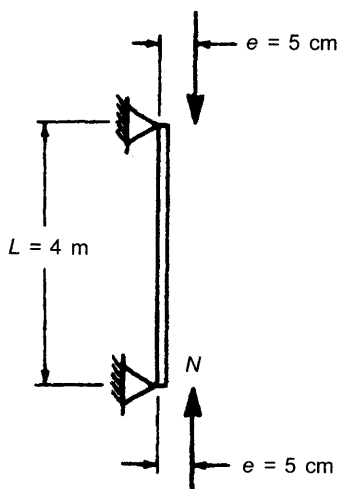
$$\frac{k \cdot L}{r_y} = \frac{1,0 \times 400}{3,95} = 101,266$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 101,266 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 1,1166$$

$$\omega = 1,25 \cdot \lambda_c^2 = 1,25(1,1166)^2 = 1,5585$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 6314(240/1,5585) = 97,232 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{60}{0,85 \times 97,232} = 0,726 > 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.35}$$



Beban-beban terfaktor:

$$\begin{aligned} N_u &= 1,2ND + 1,6NL \\ &= 1,2(10) + 1,6(30) = 60 \text{ ton} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{ntu} &= P_u \cdot e \\ &= 60(0,05) = 3 \text{ ton.m} \end{aligned}$$

##### b. Aksi balok

Periksa rasio kelangsingan penampang:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{175}{2 \times 11} = 7,95 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{60 \cdot 10^4}{0,9 \times 240 \times 6314} = 0,44 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,44) = 60,99 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,925$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{350 - 2(11)}{7} = 46,857 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

$$L_p (= 2,006 \text{ m}) < L (= 4 \text{ m}) < L_r (= 5,925 \text{ m})$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 840,85 \cdot 10^3 (240) = 20,1804 \text{ ton.m}$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r) = 775 \cdot 10^3 (240 - 70) = 13,175 \text{ ton.m}$$

$$\begin{aligned} M_n &= C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] \leq M_p \\ &= 1,67 \cdot \left[ 13,175 + (20,1804 - 13,175) \frac{5,925 - 4}{5,925 - 2,006} \right] \\ &= 16,616 \text{ ton.m} \end{aligned}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9 (16,616) = 14,9544 \text{ ton.m}$$

c. Perbesaran momen

Rasio kelangsingan dalam sumbu lentur:

$$\frac{k \cdot L}{r_x} = \frac{1,0 \times 400}{14,7} = 27,211$$

$$C_m = 1,0$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L / r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 6314}{27,211^2} = 1683,24 \text{ ton}$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{1,0}{1 - \frac{60}{1683,24}} = 1,037$$

d. Periksa persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} = 1,037(3) = 3,111 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

$$0,726 + = 0,911 < 1,0$$

**OK**

Jadi, profil WF 350.175.7.11 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut, sesuai dengan desain LRFD.

■ **CONTOH 11.6:**

Desainlah sebuah komponen struktur balok-kolom dari profil WF yang memikul beban seperti tampak pada gambar. Beban aksial tekan  $P$  sebesar 20 ton( $D$ ) dan 40 ton( $L$ ). Beban  $W$  dari sebuah crane adalah sebesar 2 ton( $D$ ) dan 15 ton( $L$ ). Gaya horizontal  $H$  sebesar 4 ton( $L$ ) timbul akibat pergerakan crane. Struktur dianggap merupakan bagian dari portal tak bergoyang serta diberi sokongan lateral pada sumbu lemah tepat di tengah-tengah bentang. (Mutu baja BJ 37)





## c. Aksi balok

Periksa kelangsingan penampang:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{250}{2 \times 14} = 8,93 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{114,4 \cdot 10^4}{0,9 \times 240 \times 10150} = 0,522 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,522) = 58,35 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,925$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{350 - 2(14)}{9} = 35,77 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

karena  $L_p (= 3,0596 \text{ m}) > L (= 2,5 \text{ m})$ , maka  $M_n = M_p$ 

$$M_n = Z_x \cdot f_y = 1360,02 \cdot 10^3 (240) = 32,64 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(32,64) = 29,376 \text{ ton.m}$$

## d. Perbesaran momen

Rasio kelangsingan terhadap sumbu lentur:

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,0 \times 500}{14,6} = 34,246$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 10150}{34,246^2} = 1709,72 \text{ ton}$$

Nilai  $C_m$  diperoleh dari Gambar 11.6

$$C_m = 1 - 0,2 \cdot \frac{N_u}{N_{el}} = 1 - 0,2 \cdot \frac{114,4}{1709,72} = 0,9866$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,9866}{1 - \frac{114,4}{1709,72}} = 1,05733$$

## e. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} = 1,05733(11,3) = 11,95 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

$$0,6114 + \frac{8}{9} \left( \frac{11,95}{29,376} \right) = 0,973 < 1,0$$

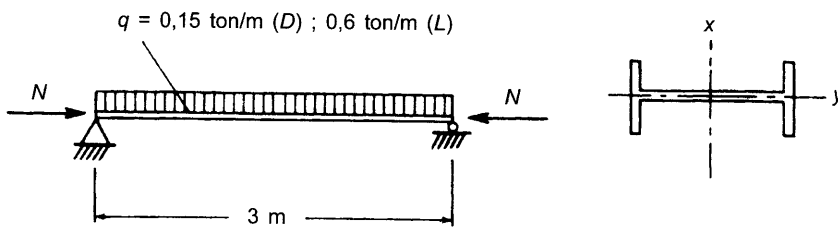
**OK**

Jadi, profil WF 350.250.9.14 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut, sesuai dengan desain LRFD.

**CONTOH 11.7:**

Periksalah kekuatan profil WF 250.125.6.9 (BJ 37) yang digunakan untuk memikul beban seperti pada gambar berikut ini. Diketahui pula besarnya beban tekan aksial adalah sebesar

2 ton(D) dan 8 ton(L) serta beban merata sebesar 0,15 ton/m (D) dan 0,3 ton/m (L) yang mengakibatkan lentur terhadap sumbu lemah profil.



**JAWAB:**

- a. Menghitung beban terfaktor:

$$N_u = 1,2N_D + 1,6N_L = 1,2(2) + 1,6(8) = 15,2 \text{ ton}$$

$$q_u = 1,2q_D + 1,6q_L = 1,2(0,15 + 0,0296) + 1,6(0,3) = 0,69552 \text{ ton/m}$$

(tambahan beban mati sebesar 0,0296 ton/m berasal dari berat sendiri profil)

$$M_{nu} = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (0,69552)(3)^2 = 0,78246 \text{ ton.m}$$

- b. Aksi kolom

Dalam contoh ini tekuk dan lentur terjadi pada bidang yang sama

$$\frac{k \cdot L}{r_y} = \frac{1,0 \times 300}{2,79} = 107,53$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 107,53 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 1,185$$

$$\omega = 1,25 \cdot \lambda_c^2 = 1,25(1,185)^2 = 1,755$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 3766(240/1,755) = 51,5 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{15,2}{0,85 \times 51,5} = 0,347 > 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.35}$$

- c. Aksi balok

Karena lentur terjadi pada sumbu lemah, maka tidak terjadi tekuk torsi lateral dan tekuk lokal web. Sedangkan kelangsingan flens diperiksa sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{125}{2 \times 9} = 6,94 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

penampang kompak, sehingga  $M_n = M_p$

$$M_n = Z_y \cdot f_y = 72400(240) = 1,7376 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(1,7376) = 1,56384 \text{ ton.m}$$

- d. Perbesaran momen

$$\text{Rasio kelangsingan dalam sumbu lentur } \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = 107,53$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3766}{107,53^2} = 64,343 \text{ ton}$$

Nilai  $C_m$  diperoleh dari Gambar 11.6

$$C_m = 1$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_d}} = \frac{1,0}{1 - \frac{15,2}{64,343}} = 1,31$$

e. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ny} = \delta_b \cdot M_{nu} = 1,31(0,78246) = 1,025 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right) \leq 1,0$$

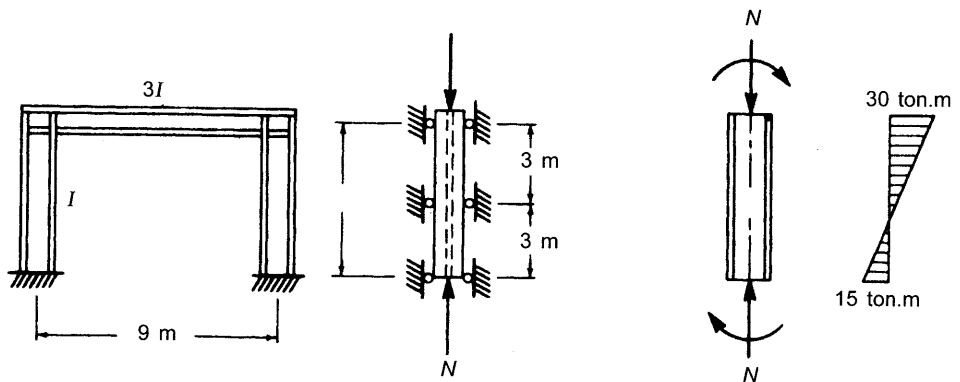
$$0,347 + \frac{8}{9} \left( \frac{1,025}{1,56384} \right) = 0,93 < 1,0$$

OK

Jadi, profil WF 250.125.6.9 mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut.

### ■ CONTOH 11.8:

Pilihlah profil WF yang dapat digunakan sebagai elemen kolom dalam struktur portal berikut ini. Portal dihubungkan dengan bresing, sehingga dapat diasumsikan portal tersebut sebagai sistem struktur tak bergoyang. Dari hasil perhitungan analisa struktur didapatkan gaya aksial terfaktor yang bekerja pada kolom tersebut adalah sebesar 70 ton dan momen terfaktor pada ujung atas  $M_{nu2} = 30 \text{ ton.m}$  serta momen terfaktor pada ujung bawah  $M_{nu1} = 15 \text{ ton.m}$ . Gunakan mutu baja BJ 37.



### JAWAB:

Coba gunakan profil WF 500.12.10.16, asumsikan  $k_x = 0,7$

a. Aksi kolom

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{0,7 \times 600}{20,5} = 20,488 \quad \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1,0 \times 300}{4,33} = 69,284$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 69,284 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,7636$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,7636)} = 1,314$$

$$N_n = A_g f_{cr} = 11420(240/1,314) = 208,58 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{70}{0,85 \times 208,58} = 0,3948 > 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.35}$$

**b. Aksi balok**

Periksa kelangsingan penampang:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \times 16} = 6,25 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{70 \cdot 10^4}{0,9 \times 240 \times 11420} = 0,284 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,284) = 66,034 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 42,925$$

$$\lambda = \frac{b}{t_w} = \frac{500 - 2(16)}{10} = 46,8 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$

$$L_p (=2,19 \text{ m}) < L (=3 \text{ m}) < L_r (=6,68 \text{ m})$$

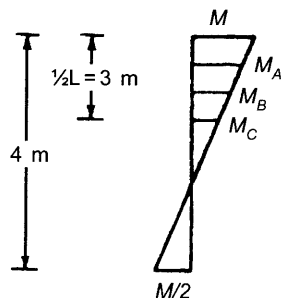
Nilai  $M_n$  harus diinterpolasi antara  $M_p$  dan  $M_r$ !

$$M_p = Z_x f_y = 2096,36 \cdot 10^3 (240) = 50,31264 \text{ ton.m}$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r) = 1910 \cdot 10^3 (240 - 70) = 32,47 \text{ ton.m}$$

Nilai  $C_b$  diperoleh dari persamaan:

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$



$$\begin{aligned} M_{\max} &= M \\ M_A &= 0,8125M \\ M_B &= 0,625M \\ M_C &= 0,4375M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_b &= \frac{12,5 \times M}{(2,5M) + (3 \times 0,8125M) + (4 \times 0,625M) + (3 \times 0,4375M)} \\ &= 1,43 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_n &= C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] < M_p \\
 &= 1,43 \cdot \left[ 32,47 + (50,31264 - 32,47) \frac{6,68 - 3}{6,68 - 2,19} \right] \\
 &= 67,34 \text{ ton.m}
 \end{aligned}$$

Karena  $M_n$  tidak boleh lebih dari  $M_p$ , maka  $M_n = M_p = 50,31264 \text{ ton.m}$

$$\phi_b \cdot M_{nx} = 0,9(50,31264) = 45,281 \text{ ton.m}$$

c. Perbesaran momen

$$\text{Dalam sumbu lentur: } \frac{k \cdot L}{r} = \frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = 20,488$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 11420}{20,488^2} = 5374,6 \text{ ton}$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \frac{M_1}{M_2} = 0,6 - 0,4 \cdot \left( \frac{15}{30} \right) = 0,4$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,4}{1 - \frac{70}{5374,6}} = 0,405 < 1,0$$

Ambil  $\delta_b = 1,0$

d. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{nu} = 1,0(30) = 30 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + 8 \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

$$0,3948 + 8 \left( \frac{30}{45,281} \right) = 0,9837 < 1,0$$

OK

Jadi, profil WF 500.12.10.16 dapat digunakan sebagai kolom dalam struktur tersebut.

■ CONTOH 11.9:

Ulangi kembali contoh 11.7, namun dengan menganggap bahwa portal adalah portal bergoyang. Beban aksial terfaktor 70 ton dan momen terfaktor hasil analisa portal tanpa goyangan adalah sebesar  $M_{nu} = 4,5 \text{ ton.m}$  dan 2 ton.m untuk kolom bagian atas dan bawah. Sedangkan hasil analisa portal bergoyang adalah  $M_{lu} = 25 \text{ ton.m}$  untuk kolom bagian atas dan bawah.

JAWAB:

a. Aksi kolom

$$G_A = 1,0 \text{ (jepit)}$$

$$G_B = \frac{I/9}{3I/6} = 0,22$$

Dari nomogram untuk portal bergoyang, diperoleh  $k_x = 1,2$

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,2 \times 600}{20,5} = 35,12 \quad \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1,0 \times 300}{4,33} = 69,284$$

Sama seperti contoh 11.7, tekuk terjadi pada sumbu lemah, sehingga:

$$\phi N_n = 177,293 \text{ ton}$$

$$N_u / \phi N_n = 0,3948$$

**b. Aksi balok**

Sama dengan perhitungan dalam contoh 11.7:

$$\phi_b \cdot M_{nx} = 45,281 \text{ ton.m}$$

**c. Perbesaran momen**

$$\delta_b = 1,0 \quad (\text{sama seperti contoh 11.7})$$

Mencari  $\delta_s$ :

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 11420}{35,12^2} = 1829 \text{ ton}$$

Dalam contoh ini, dua buah kolom memiliki ukuran yang sama dan memikul beban yang sama pula, sehingga:

$$\Sigma N_{el} = 2(1829) = 3658 \text{ ton}$$

$$\Sigma N_u = 2(70) = 140 \text{ ton}$$

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_u}{\Sigma N_{el}}} = \frac{1}{1 - \frac{140}{3658}} = 1,0398$$

**d. Periksa terhadap persamaan 11.35**

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} + \delta_s \cdot M_{ltu}$$

$$= 1,0(4,5) + 1,0398(25) = 30,495 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) \leq 1,0$$

$$0,3948 + \frac{8}{9} \left( \frac{30,495}{45,281} \right) = 0,993 < 1,0$$

OK

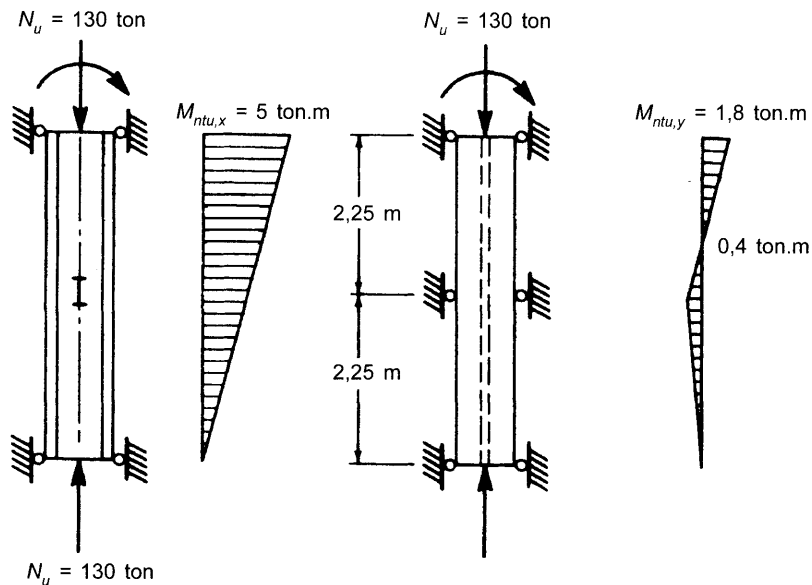
**■ CONTOH 11.10:**

Periksalah kecukupan profil WF 400.200.8.13 untuk memikul beban-beban seperti pada gambar berikut. Gunakan mutu baja BJ 55.

**JAWAB:**

**a. Aksi kolom**

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = \frac{1,2 \times 450}{16,8} = 26,78 \quad \frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = \frac{1,0 \times 225}{4,54} = 49,56$$



$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 49,56 \times \sqrt{\frac{410}{200000}} = 0,714$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,714)} = 1,275$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 8412(410/1,275) = 270,5 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{130}{0,85 \times 270,5} = 0,5654 > 0,2$$

Gunakan persamaan 11.35

**b. Aksi balok**

Periksa kelangsingan penampang:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \times 13} = 7,69 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 8,3957$$

$$\frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} = \frac{130 \cdot 10^4}{0,9 \times 410 \times 8412} = 0,4188 > 0,125$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{f_y}} \left( 2,33 - \frac{N_u}{\phi_b \cdot N_y} \right) \geq \frac{665}{\sqrt{f_y}}$$

$$\lambda_p = \frac{500}{\sqrt{240}} (2,33 - 0,4188) = 47,195 > \frac{665}{\sqrt{f_y}} = 32,84$$

$$\lambda = \frac{b}{t_w} = \frac{400 - 2(13)}{8} = 46,75 < \lambda_p \quad (\text{penampang kompak})$$



Mencari  $M_{nx}$ :

Karena  $L_p (=1,764 \text{ m}) < L (=2,25 \text{ m}) < L_r (=4,427 \text{ m})$ , maka  $M_n$  harus diinterpolasi antara  $M_p$  dan  $M_r$ .

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 1285,95 \cdot 10^3 (410) = 52,72 \text{ ton.m}$$

$$M_r = S_x (f_y - f_r) = 1190 \cdot 10^3 (410 - 70) = 40,46 \text{ ton.m}$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$= \frac{12,5 \times 5}{(2,5 \times 5) + (3 \times 4,375) + (4 \times 3,75) + (3 \times 3,125)} = 1,25$$

$$M_n = C_b \cdot \left[ M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right] < M_p$$

$$= 1,25 \cdot \left[ 40,46 + (52,72 - 40,46) \frac{4,427 - 2,25}{4,427 - 1,764} \right]$$

$$= 63,10 \text{ ton.m} > M_p$$

$$M_{nx} = M_p = 52,72 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_{nx} = 0,9 (52,72) = 47,448 \text{ ton.m}$$

Mencari  $M_{ny}$ :

Karena pada sumbu  $y$  tidak ada pengaruh tekuk torsi lateral, maka:

$$M_{ny} = M_p = Z_y \cdot f_y = 265,98 \cdot 10^3 (410) = 10,9 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_{ny} = 0,9 (10,9) = 9,81 \text{ ton.m}$$

c. Perbesaran momen

Sumbu -  $x$ :

$$\frac{k_x \cdot L_x}{r_x} = 26,78$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 8412}{26,78^2} = 2317,17 \text{ ton}$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \frac{M_1}{M_2} = 0,6 - 0,4 \cdot \left( \frac{0}{30} \right) = 0,6$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,6}{1 - \frac{130}{2317,17}} = 0,635 < 1,0$$

Ambil  $\delta_{bx} = 1,0$

Sumbu -  $y$ :

$$\frac{k_y \cdot L_y}{r_y} = 49,56$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 8412}{49,56^2} = 676,57 \text{ ton}$$

$$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \frac{M_1}{M_2} = 0,6 - 0,4 \cdot \left( \frac{0,4}{1,8} \right) = 0,51$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,51}{1 - \frac{130}{676,57}} = 0,635 < 1,0$$

Ambil  $\delta_{by} = 1,0$

d. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_{bx} \cdot M_{ntxu} = 1,0(5) = 5 \text{ ton.m}$$

$$M_{uy} = \delta_{by} \cdot M_{nty} = 1,0(1,8) = 1,8 \text{ ton.m}$$

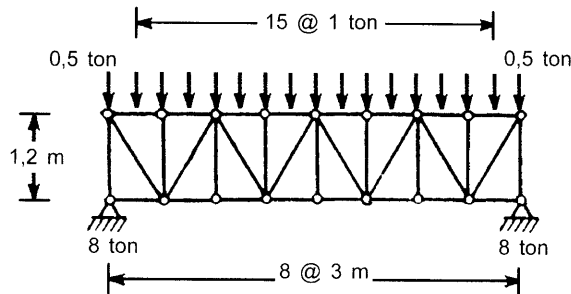
$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b \cdot M_{ny}} \right) < 1,0$$

$$0,5654 + \frac{8}{9} \left( \frac{5}{47,448} + \frac{1,8}{9,81} \right) = 0,822 < 1,0$$

OK

#### ■ CONTOH 11.11:

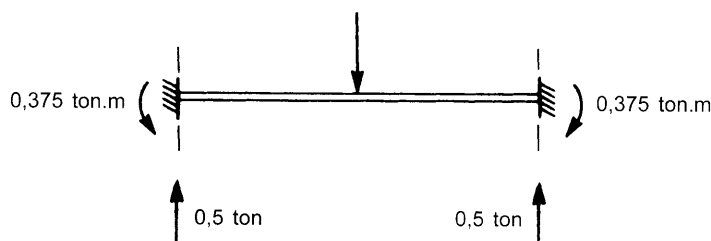
Suatu struktur rangka atap seperti pada gambar memikul gording-gording pada sisi atas. Beban terfaktor dari gording ditunjukkan pada gambar. Desainlah batang-batang atas untuk struktur rangka atap tersebut!



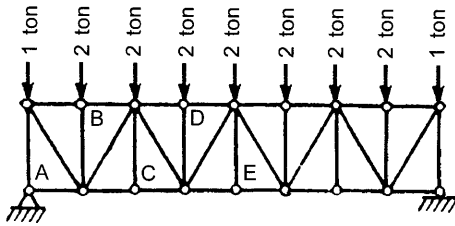
#### JAWAB:

Pada masing-masing batang atas timbul *fixed end moment*:

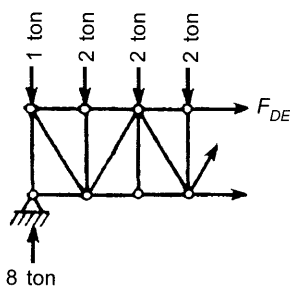
$$M = M_{ntu} = \frac{P \times L}{8} = \frac{1 \times 3}{8} = 0,375 \text{ ton.m}$$



Jika reaksi-reaksi yang timbul akibat pembebanan di tengah batang tersebut ditambahkan pada beban-beban yang bekerja pada joint, maka diperoleh konfigurasi pembebanan sebagai berikut:



Gaya tekan aksial maksimum akan terjadi pada batang DE dan besarnya gaya tekan akan dicari dengan menggunakan cara Ritter



$$\Sigma M_I = 0$$

$$9 \cdot (8 - 1) - 2(6 + 3) + F_{DE} \cdot 1,2 = 0$$

$$F_{DE} = -37,5 \text{ ton}$$

Dicoba menggunakan profil T 300.150.10.15 sebagai batang DE untuk memikul gaya tekan aksial  $N_u = 37,5$  ton dan momen lentur sebesar  $M_{ntu} = 0,375$  ton.m.

a. Aksi kolom

$$\frac{k \cdot L}{r_{maks.}} = \frac{k \cdot L}{r_x} = \frac{1,0 \times 300}{3,65} = 82,1917$$

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{k \cdot L}{r} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1}{\pi} \times 82,1917 \times \sqrt{\frac{240}{200000}} = 0,9059$$

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - (0,67 \times 0,9059)} = 1,44$$

$$N_n = A_g \cdot f_{cr} = 5989(240/1,44) = 99,8167 \text{ ton}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} = \frac{37,5}{0,85 \times 99,8167} = 0,442 > 0,2 \quad \text{Gunakan persamaan 11.35}$$

b. Aksi balok

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{300}{2 \times 15} = 10 < \lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,97$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{400 - 2(13)}{8} = 46,75 < \lambda_r = \frac{335}{\sqrt{f_y}} = 21,624$$

Penampang kompak. Karena lentur terjadi pada sumbu lemah profil, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap tekuk torsi lateral.

$$M_n = M_p = Z_x \cdot f_y = 115,60 \cdot 10^3 (240) = 2,7744 \text{ ton.m}$$

$$M_{n \text{ maks}} = 1,5 \cdot f_y \cdot S_x = 1,5(240)(63,7 \cdot 10^3) = 2,2932 \text{ ton.m}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,9(2,2932) = 2,06388 \text{ ton.m}$$

- c. Perbesaran momen

$$\frac{k \cdot L}{r_x} = 82,1917$$

$$N_{el} = \frac{\pi^2 E \cdot A_g}{(k \cdot L / r)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 5989}{82,1917^2} = 175,137 \text{ ton}$$

$$C_m = 0,85$$

$$\delta_b = \frac{C_m}{1 - \frac{N_u}{N_{el}}} = \frac{0,85}{1 - \frac{37,5}{175,137}} = 1,0814$$

- d. Periksa terhadap persamaan 11.35

$$M_{ux} = \delta_b \cdot M_{ntu} = 1,0814(0,375) = 0,405525 \text{ ton.m}$$

$$\frac{N_u}{\phi \cdot N_n} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{\phi_b \cdot M_{nx}} \right) < 1,0$$

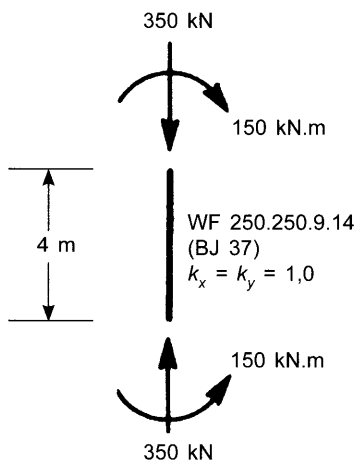
$$0,442 + \frac{8}{9} \left( \frac{0,405525}{2,06388} \right) = 0,617 < 1,0$$

OK

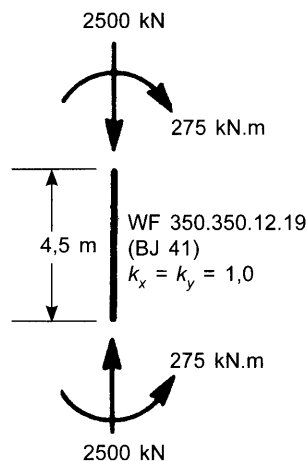
## SOAL-SOAL LATIHAN

### P.11.1 – P.11.3

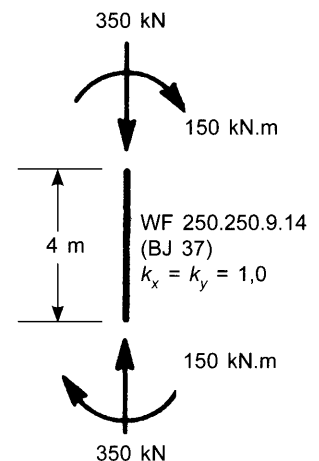
Periksalah apakah komponen struktur balok kolom dalam gambar berikut memenuhi persamaan interaksi balok kolom dengan mengabaikan faktor perbesaran momen. Gaya aksial dan momen yang tercantum dalam gambar merupakan beban-beban terfaktor dan lentur terjadi dalam arah sumbu kuat.



Gambar P.11.1



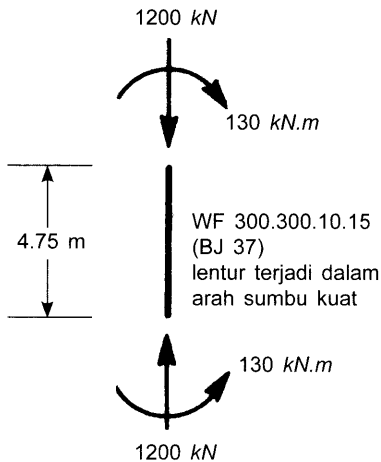
Gambar P.11.2



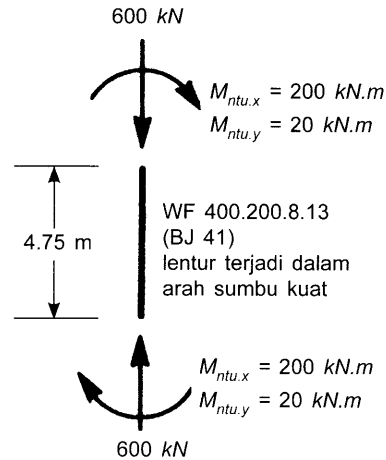
Gambar P.11.3

**P.11.4 – P.11.5**

Sebuah komponen struktur balok-kolom yang merupakan bagian dari portal tak bergoyang ditunjukkan dalam Gambar P.11.4 dan P.11.5. Dengan mengasumsikan  $k_x = k_y = 1$ , periksalah apakah komponen struktur balok-kolom tersebut memenuhi persamaan interaksi balok-kolom seperti yang disyaratkan dalam SNI 03-1729-2002.

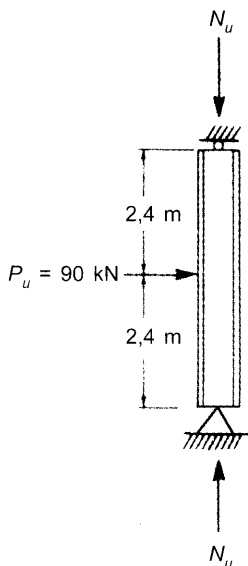


Gambar P.11.4



Gambar P.11.5

**P.11.6** Profil WF 250.250.9.14 dari baja BJ 41 dibebani seperti pada gambar. Lentur terjadi terhadap sumbu kuat profil, asumsikan  $k_x = k_y = 1,0$ . Pengekang lateral hanya diberikan pada kedua ujungnya, dan komponen struktur tersebut merupakan bagian dari portal tak bergoyang. Berapakah beban aksial terfaktor maksimum,  $N_u$ , yang dapat bekerja pada komponen struktur balok-kolom tersebut?



Gambar P.11.6

- P.11.7** Profil WF 400.400.13.21 dari BJ 41 digunakan sebagai komponen struktur balok-kolom pada suatu portal bergoyang. Panjang komponen struktur tersebut 4,25 m dan tidak terdapat beban transversal yang bekerja. Analisis orde pertama dilakukan terhadap kasus tanpa goyangan dan kasus dengan goyangan. Beban terfaktor dan momen lentur yang timbul ditampilkan dalam tabel berikut.

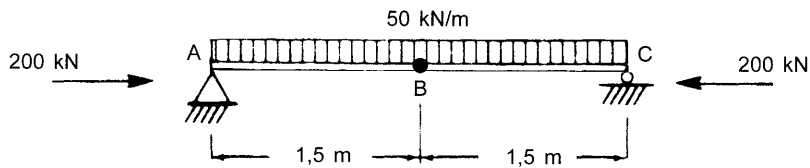
Tipe Analisis	$N_u$ (kN)	$M_{top}$ (kN.m)	$M_{bottom}$ (kN.m)
Tak bergoyang	1300	80	45
Bergoyang	-	70	180

Lentur terjadi dalam arah sumbu kuat dan semua momen lentur yang terjadi mengakibatkan lentur dengan kelengkungan ganda. Diperoleh juga data:

$$\Sigma N_{e2} = 240000 \text{ kN} \quad \Sigma N_u = 36000 \text{ kN}$$

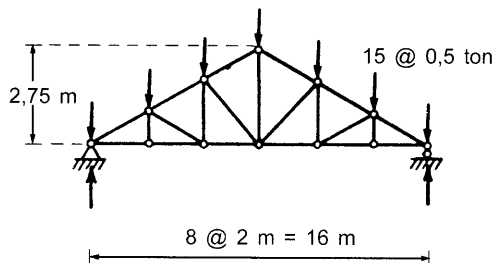
Gunakan  $k_x = 1,0$  (kasus tanpa goyangan),  $k_x = 1,7$  (untuk kasus bergoyang) dan  $k_y = 1,0$ . Periksa apakah komponen struktur balok-kolom ini memenuhi persamaan interaksi sesuai SNI 03-1729-2002?

- P.11.8** Pilihlah profil WF yang ekonomis untuk digunakan dalam komponen struktur balok-kolom berikut ini (mutu baja BJ 37). Lentur terjadi dalam arah sumbu kuat dan pengeang lateral diberikan pada titik A, B dan C. Asumsikan  $k_x = k_y = 1,0$ .



Gambar P.11.8

- P.11.9** Suatu struktur rangka kuda-kuda memikul beban-beban dari gording seperti pada gambar berikut. Desainlah batang-batang atas dari rangka tersebut, gunakan mutu baja BJ 37!



Gambar P.11.9

# Komponen Struktur Komposit

## TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Memahami perilaku beton dan baja yang digabungkan menjadi suatu komponen struktur komposit menggunakan penghubung geser
- Melakukan proses analisis dan desain suatu balok atau kolom komposit

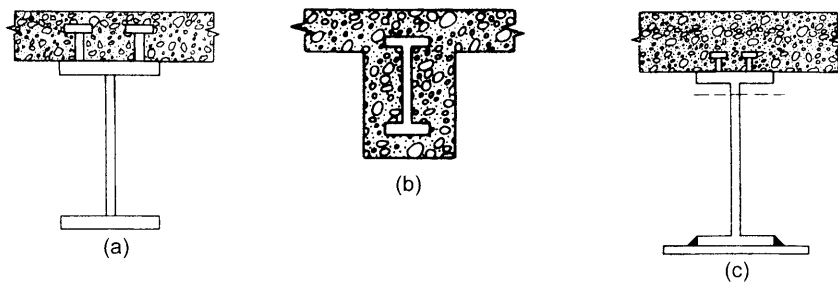
Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Struktur Komposit
- 1.2 Tegangan Elastis dalam Balok Komposit
- 1.3 Lebar Efektif Balok Komposit
- 1.4 Sistem Pelaksanaan Komponen Struktur Komposit
- 1.5 Kuat Lentur Nominal
- 1.6 Penghubung Geser
- 1.7 Balok Komposit pada Daerah Momen Negatif
- 1.8 Lendutan
- 1.9 Dek Baja Gelombang
- 1.10 Kolom Komposit

## 12.1 STRUKTUR KOMPOSIT

Penggunaan balok baja untuk menopang suatu pelat beton telah ditemukan sejak lama. Namun pada saat itu pelat beton dan balok baja tidak dihubungkan dengan suatu penghubung geser sehingga yang dihasilkan adalah suatu penampang non komposit. Pada penampang non komposit, pelat beton akan mengalami lendutan yang cukup besar yang disebabkan oleh besarnya beban yang harus dipikul oleh pelat beton tersebut. Seiring berkembangnya metode pengelasan yang baik serta ditemukannya alat-alat penghubung geser yang menahan gaya geser horizontal, maka lekatan antara pelat beton dan balok baja dapat ditingkatkan. Pada akhirnya kedua material ini (baja dan beton) akan menjadi satu kesatuan komponen struktur yang disebut dengan komponen struktur komposit. Komponen struktur komposit ini dapat menahan beban sekitar 33 hingga 50% lebih besar daripada beban yang dapat dipikul oleh balok baja saja tanpa adanya perilaku komposit.

Pada awal tahun 1930 konstruksi jembatan juga sudah mulai menggunakan penampang komposit, namun baru pada tahun 1944 dikeluarkan peraturan oleh AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) tentang spesifikasi jembatan jalan raya dengan struktur komposit. Pada sekitar tahun 1950 penggunaan lantai jembatan komposit mulai berkembang dengan pesat (terutama di Amerika). Pada jembatan ini gaya geser longitudinal ditransfer dari balok baja kepada pelat beton bertulang dengan menggunakan penghubung geser. Hal ini mengakibatkan pelat beton tersebut akan turut serta membantu memikul momen lentur yang timbul. Penampang komposit ini dapat dilihat dalam Gambar 12.1.a.



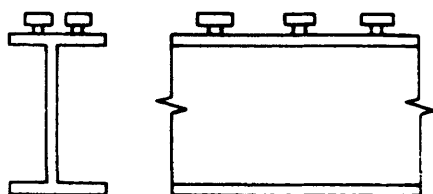
Gambar 12.1 (a) Lantai Jembatan Komposit dengan Penghubung Geser, (b) Balok Baja yang Diselubungi Beton, (c) Lantai Komposit Gedung dengan Penghubung Geser

Pada awal tahun 1960 mulai dikembangkan pula penggunaan komponen struktur komposit untuk bangunan gedung yang menganut pada spesifikasi yang dikeluarkan oleh AISC (*American Institute of Steel Construction*) pada tahun 1952. Komponen struktur komposit yang digunakan dapat berupa balok baja yang diselubungi dengan beton (Gambar 12.1.b) atau berupa balok baja yang menopang pelat beton tanpa penghubung geser (Gambar 12.1.c). Namun sekarang struktur balok baja yang diselubungi dengan beton sudah jarang digunakan, dan hampir seluruh struktur komposit untuk bangunan gedung mempunyai penampang seperti pada Gambar 12.1.a.

Perilaku komposit hanya akan terjadi jika potensi terjadinya slip antara kedua material ini dapat dicegah. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa hal ini dapat teratasi jika gaya geser horizontal pada kedua permukaan baja dan beton dapat ditahan dengan menggunakan penghubung geser. Tipe-tipe penghubung geser yang sering digunakan dapat berupa stud, baja tulangan spiral, atau profil kanal kecil yang pendek. Penghubung geser ini selanjutnya dihubungkan pada bagian flens atas balok dengan jarak tertentu dan akan memberikan sambungan secara mekanik melalui mekanisme pengankuran dalam beton yang telah mengeras. Penghubung geser tipe stud paling banyak digunakan, dan lebih dari satu buah stud dapat dipasangkan pada tiap lokasi, jika lebar flens memungkinkannya. Di samping itu pemasangan stud juga relatif lebih mudah dan hanya membutuhkan tenaga kerja dalam jumlah yang sedikit.

Sejumlah penghubung geser diperlukan untuk membuat sebuah balok dapat berfungsi komposit secara penuh. Namun terkadang jumlah penghubung geser dapat dipasang lebih sedikit daripada yang diperlukan untuk menimbulkan perilaku komposit penuh, hal ini akan mengakibatkan terjadinya slip antara baja dan beton; balok seperti ini dikatakan mengalami aksi komposit parsial.

Seiring dengan perkembangan teknologi, mulai ditemukan pula pelat baja gelombang yang digunakan dalam pembuatan struktur pelat komposit dan terbuat dari bahan yang mempunyai tegangan tarik tinggi serta dilapisi bahan anti karat. Pelat baja gelombang ini mempunyai dua macam fungsi yaitu sebagai bekisting tetap dan sebagai penulangan positif satu arah pada lantai beton bangunan gedung bertingkat. Arah gelombang (*rib*) dari pelat baja ini dapat diletakkan dalam arah tegak lurus atau sejajar terhadap balok. Namun pada



Gambar 12.2 Pelat Lantai Komposit dengan Pelat Baja Gelombang



sistem pelat lantai komposit, umumnya arah rib diletakkan tegak lurus terhadap balok induk lantai dan sejajar dengan arah balok induk. Gambar 12.2 memperlihatkan sistem pelat lantai yang menggunakan pelat baja gelombang dengan arah rib tegak lurus terhadap sumbu balok.

Pembahasan awal dalam bab ini akan difokuskan pada komponen struktur komposit biasa dengan penghubung geser (Gambar 12.1.c) dan akan dilanjutkan dengan pembahasan mengenai pelat lantai komposit dengan menggunakan pelat baja gelombang.

Dengan menggunakan konstruksi komposit dalam desain suatu komponen struktur ternyata dapat diperoleh beberapa keuntungan sebagai berikut:

- a. dapat mereduksi berat profil baja yang dipakai
- b. tinggi profil baja yang dipakai dapat dikurangi
- c. meningkatkan kekakuan lantai
- d. dapat menambah panjang bentang layan

Reduksi berat sekitar 20–30% dapat diperoleh dengan memanfaatkan perilaku sistem komposit penuh. Dengan adanya reduksi berat ini maka secara langsung juga dapat mengurangi tinggi profil baja yang dipakai. Berkurangnya tinggi profil baja yang dipakai akan mengakibatkan berkurangnya tinggi bangunan secara keseluruhan, dan membawa dampak pula berupa penghematan material bangunan, terutama untuk dinding luar dan tangga.

Kekakuan dari pelat lantai komposit pada dasarnya lebih besar daripada kekakuan pelat beton dan balok baja yang beraksi non komposit. Secara normal pelat beton berperilaku sebagai pelat satu arah yang membentang di antara balok-balok penopang. Dalam desain komposit, momen inersia balok akan bertambah sehingga kekakuan pelat lantai akan meningkat. Meningkatnya kekakuan ini akan memberikan beberapa keuntungan dalam pelaksanaan konstruksi, antara lain bahwa lendutan akibat beban hidup akan berkurang dan penggunaan perancah selama proses konstruksi struktur komposit akan mampu mengurangi lendutan akibat beban mati. Di samping itu dengan menggunakan asumsi desain komposit, maka kapasitas penampang dalam menahan beban akan jauh lebih besar daripada kapasitas pelat beton atau profil baja yang bekerja sendiri-sendiri. Namun dalam daerah momen negatif, kekakuan dari sistem komposit harus dihitung kembali karena dalam daerah ini beton (yang mengalami tarik) harus diabaikan. Dalam daerah momen negatif biasanya harus disediakan tulangan tekan pada pelat beton.

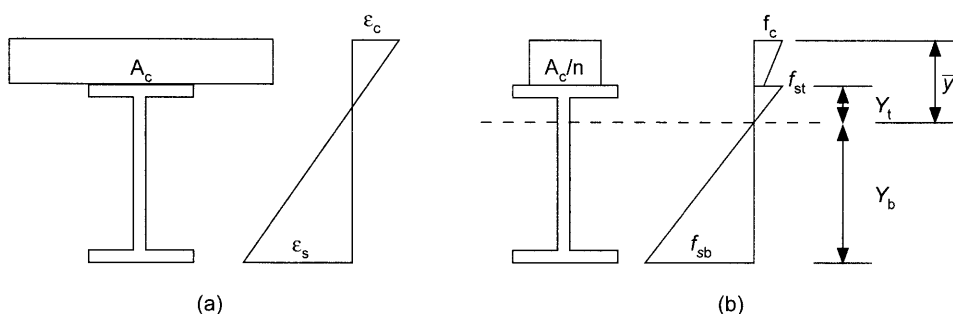
## 12.2 TEGANGAN ELASTIS DALAM BALOK KOMPOSIT

Kuat rencana dari balok komposit biasanya didasarkan pada kondisi saat terjadi keruntuhan, namun perilaku balok komposit pada saat beban layan merupakan salah satu hal penting yang harus dipahami. Lendutan harus selalu dikontrol pada saat beban layan. Dalam beberapa kasus kuat rencana bisa ditentukan oleh syarat kemampuan layan.

Tegangan lentur dan geser dalam balok homogen dapat dihitung berdasarkan rumus:

$$f_b = \frac{Mc}{I} \text{ dan } f_v = \frac{VQ}{I \cdot t} \quad 12.1$$

Balok komposit bukan merupakan suatu balok homogen, sehingga persamaan 12.1 atas tidak dapat digunakan. Untuk dapat menghitung tegangan-tegangan pada suatu penampang komposit, diperlukan transformasi penampang. Umumnya penampang beton ditransformasikan menjadi baja, namun mempunyai efek yang sama dengan beton. Gambar 12.3 menunjukkan sebuah segmen dari balok komposit dengan diagram tegangan dan regangannya. Jika pelat beton dihubungkan secara kaku terhadap profil baja, maka



Gambar 12.3 (a) Diagram Regangan Balok Komposit, (b) Diagram Tegangan pada Balok Komposit dengan Penampang Tertransformasi

diagram regangan akan mempunyai bentuk seperti pada gambar tersebut. Hal ini sesuai dengan teori lendutan kecil, yang menyatakan bahwa penampang melintang akan tetap datar sebelum atau sesudah terjadi lentur. Namun, distribusi tegangan linear seperti dalam gambar hanya tepat untuk balok yang homogen. Hubungan antara tegangan dan regangan baja dan beton dapat dinyatakan sebagai:

$$\epsilon_c = \epsilon_s \quad \text{atau} \quad \frac{f_c}{E_c} = \frac{f_s}{E_s} \quad 12.2$$

$$\text{atau} \quad f_s = \frac{E_s}{E_c} f_c = n f_c \quad 12.3$$

dengan:

$E_c$  = modulus elastisitas beton

$n = E_s/E_c$  = rasio modulus

Modulus elastisitas beton diberikan dalam SNI pasal 12.3.2:

$$E_c = 0,041 w^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad 12.4$$

Dengan  $w$  adalah berat jenis beton (2400 kg/m<sup>3</sup>)

$f'_c$  adalah kuat tekan beton berumur 28 hari (MPa)

Berat jenis beton normal dapat diambil sebesar 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Perhatikan penampang komposit yang ditunjukkan dalam Gambar 12.3 (tata cara perhitungan lebar efektif balok komposit akan dijelaskan kemudian). Untuk mentransformasi luas beton,  $A_c$ , maka lebar efektif pelat beton dapat dibagi dengan  $n$ , sedangkan tebal beton tidak perlu diubah. Hasil proses transformasi ini ditunjukkan dalam Gambar 12.3.b. Untuk menghitung tegangan, maka harus dihitung terlebih dahulu letak garis netral dan momen inersia dari penampang tersebut. Sehingga selanjutnya dapat dihitung besarnya tegangan lentur pada bagian atas dan bawah profil baja, dengan menggunakan persamaan:

$$f_{st} = \frac{M \cdot y_t}{I_{tr}} \quad 12.5$$

$$f_{sb} = \frac{M \cdot y_b}{I_{tr}} \quad 12.6$$

dengan:

$M$  adalah momen lentur yang harus dipikul

$I_{tr}$  adalah momen inersia terhadap sumbu netral

$y_t$  adalah jarak dari sumbu netral ke serat atas profil baja

$y_b$  adalah jarak dari sumbu netral ke serat bawah profil baja

Tegangan yang terjadi pada serat atas beton dihitung berdasarkan persamaan

$$f_c = \frac{M \cdot \bar{y}}{n \cdot I_{tr}} \quad 12.7$$

Prosedur ini hanya tepat untuk momen lentur positif, dengan serat atas penampang komposit berada dalam tekan, sedangkan untuk momen lentur negatif akan mengakibatkan beton berada dalam kondisi tarik, padahal tegangan tarik beton sangat kecil sehingga tidak dapat menahan tegangan tarik yang terjadi.

### 12.3 LEBAR EFEKTIF BALOK KOMPOSIT

Konsep lebar efektif sangat berguna dalam proses desain suatu komponen struktur (komposit), terutama ketika proses desain harus dilakukan terhadap suatu elemen yang mengalami distribusi tegangan yang tidak seragam. Besarnya lebar efektif dari suatu komponen struktur komposit dapat ditentukan sebagai berikut:

1. Untuk balok-balok interior:

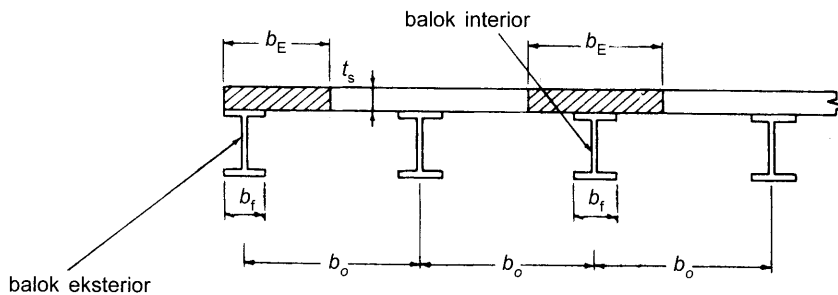
$$b_E \leq \frac{L}{4} \quad 12.8$$

$$b_E \leq b_o \quad 12.9$$

2. Untuk balok-balok eksterior:

$$b_E \leq \frac{L}{8} + (\text{jarak pusat balok ke tepi pelat}) \quad 12.10$$

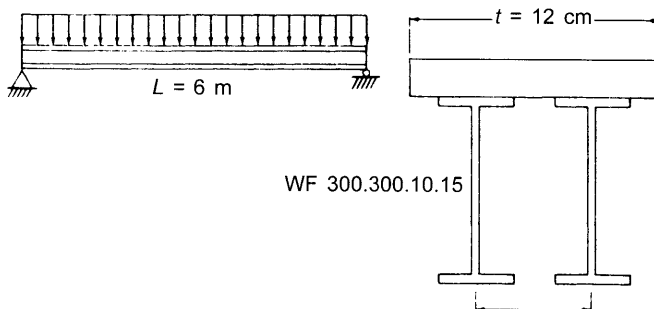
$$b_E \leq \frac{1}{2} b_o + (\text{jarak pusat balok ke tepi pelat}) \quad 12.11$$



Gambar 12.4 Lebar Efektif Balok Komposit

#### ■ CONTOH 12.1:

Hitunglah momen inersia ( $I$ ) dan modulus tampang ( $S$ ) untuk penampang komposit berikut ini, jika diketahui mutu beton untuk pelat adalah  $f'_c = 25$  MPa.



**JAWAB:**

Lebar efektif pelat beton diambil nilai terkecil dari:

$$\left. \begin{aligned} b_E &= L/4 = 600/4 = 150 \text{ cm} \\ b_E &= b_o = 300 \text{ cm} \end{aligned} \right\} b_E = 150 \text{ cm}$$

Menentukan nilai  $n$ :

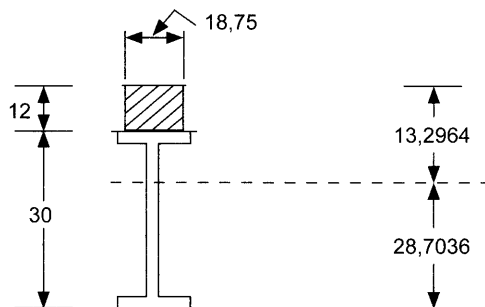
$$\begin{aligned} E_{\text{beton}} &= 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{25} = 23500 \text{ MPa} \\ E_{\text{baja}} &= 200000 \text{ MPa} \\ n &= \frac{E_{\text{baja}}}{E_{\text{beton}}} = \frac{200000}{23500} = 8,51 \approx 8 \end{aligned}$$

Pelat beton ditransformasi ke penampang baja, sehingga:

$$\frac{b_E}{n} = \frac{150}{8} = 18,75 \text{ cm}$$

Menentukan letak garis netral:

	Luas Transformasi $A \text{ (cm}^2\text{)}$	Lengan Momen $y \text{ (cm)}$	$A \cdot y \text{ (cm}^3\text{)}$
Pelat Beton	225	6	1350
Profil WF	119,8	27	3234,6
	344,8		4584,6



$$\bar{y} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = \frac{4584,6}{344,8} = 13,2964 \text{ cm}$$

Momen inersia penampang dihitung dengan menggunakan teorema sumbu sejajar

	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$I_o \text{ (cm}^4\text{)}$	$d \text{ (cm)}$	$I_o + Ad^2 \text{ (cm}^4\text{)}$
Pelat Beton	225	6	2700	7,2964	14678,42692
Profil WF	119,8	27	20400	13,7036	42897,08062
			$I_{tr} =$		57575,50754

Selanjutnya modulus penampang ( $S$ ) dapat dihitung sebagai berikut:

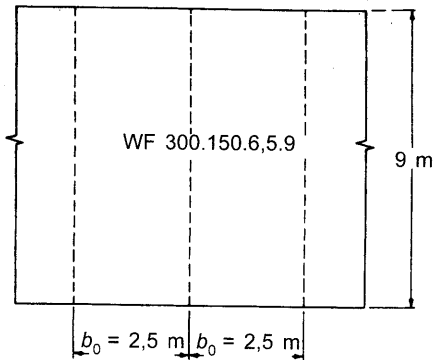
$$S_c = S_{\text{beton}} = \frac{57575,50754}{13,2964} = 4330,1576 \text{ cm}^3$$

$$S_{sa} = S_{\text{baja atas}} = \frac{57575,50754}{1,2964} = 44411,8386 \text{ cm}^3$$

$$S_{sb} = S_{\text{baja bawah}} = \frac{57575,50754}{28,7036} = 2005,8636 \text{ cm}^3$$

### ■ CONTOH 12.2:

Hitunglah tegangan-tegangan dari balok komposit dalam gambar berikut, jika diketahui mutu beton  $f'_c = 20 \text{ MPa}$  dan  $E_{\text{baja}} = 200000 \text{ MPa}$  dan momen lentur yang bekerja sebesar  $150 \text{ kNm}$ .



### JAWAB:

Mencari lebar efektif:

$$b_E = L/4 = 900/4 = 225 \text{ cm} \quad \left. \vphantom{b_E = L/4} \right\} b_E = 225 \text{ cm}$$

$$b_E = b_o = 250 \text{ cm}$$

Menentukan nilai  $n$ :

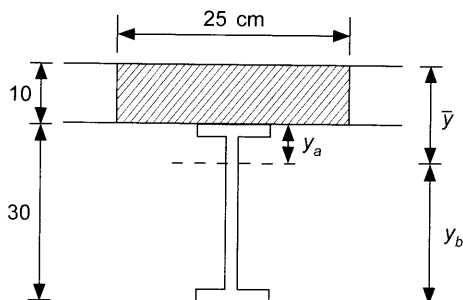
$$E_{\text{beton}} = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{20} = 21000 \text{ MPa}$$

$$E_{\text{baja}} = 200000 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_{\text{baja}}}{E_{\text{beton}}} = \frac{200000}{21000} = 9,52 \approx 9$$

pelat beton ditransformasi ke penampang baja, sehingga:

$$\frac{b_E}{n} = \frac{225}{9} = 25 \text{ cm}$$



$$y_a = \bar{y} - t = 8,1525 - 10$$

$$= -1,8475 \text{ cm}$$

$$y_b = t + d - \bar{y}$$

$$= 10 + 30 - 8,1525$$

$$= 31,8475 \text{ cm}$$

Menentukan lokasi sumbu netral:

	Luas Transformasi $A \text{ (cm}^2\text{)}$	Lengan Momen $y \text{ (cm)}$	$A \cdot y \text{ (cm}^3\text{)}$
Pelat Beton	250	5	1250
Profil WF	46,78	25	1169,5
	296,78		2419,5

$$\bar{y} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = \frac{2419,5}{296,78} = 8,1525 \text{ cm} \quad (\text{diukur dari bagian atas pelat})$$

Momen inersia penampang selanjutnya dihitung dengan menggunakan teori sumbu sejajar:

	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$I_o \text{ (cm}^4\text{)}$	$d \text{ (cm)}$	$I_o + A d^2 \text{ (cm}^4\text{)}$
Pelat Beton	250	5	2083,3	3,1525	4567,864
Profil WF	46,78	25	7210	16,8475	20487,954
			$I_{tr} =$		25055,818

Tegangan pada serat atas baja:

$$f_{sa} = \frac{M \times y_a}{I_{tr}} = \frac{150 \times 10^6 \times 18,475}{25055,818 \times 10^4} = 11,06 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

(bagian atas baja terletak di bawah sumbu netral, sehingga  $f_{sa}$  adalah tegangan tarik)

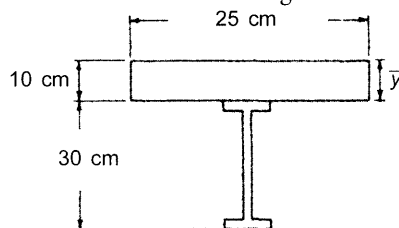
Tegangan pada serat bawah baja:

$$f_{sb} = \frac{M \times y_b}{I_{tr}} = \frac{150 \times 10^6 \times 318,475}{25055,818 \times 10^4} = 190,66 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

Tegangan pada serat atas beton:

$$f_c = \frac{M \times \bar{y}}{n \times I_{tr}} = \frac{150 \times 10^6 \times 81,525}{9 \times 25055,818 \times 10^4} = 5,42 \text{ MPa} \quad (\text{tekan})$$

Jika beton diasumsikan tidak memikul tegangan tarik, beton di bawah sumbu netral harus diabaikan. Perhitungan sumbu netral diulangi lagi sebagai berikut:



	$A$	$y$	$A \cdot y$
Beton	$25 \cdot \bar{y}$	$\bar{y}/2$	$12,5 \cdot \bar{y}^2$
Profil	46,78	25	1169,5

$$\bar{y} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = \frac{12,5 \bar{y}^2 + 1169,5}{25 \bar{y} + 46,78}$$

$$\bar{y}(25 \bar{y} + 46,78) = 12,5 \bar{y}^2 + 1169,5$$

$$25 \bar{y}^2 + 46,78 \bar{y} = 12,5 \bar{y}^2 + 1169,5$$

$$12,5 \bar{y}^2 + 46,78 \bar{y} - 1169,5 = 0$$

$$\bar{y} = 7,98 \text{ cm}$$

Momen inersia penampang:

$$I_{tr} = \frac{1}{3}(25)(7,98)^3 + 7210 + 46,78(25 - 7,98)^2 = 24995,996 \text{ cm}^4$$

Tegangan-tegangan pada penampang:

$$f_{sa} = \frac{150 \times 10^6 \times (100 - 79,8)}{24995,996 \times 10^4} = 12,12 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

$$f_{sb} = \frac{150 \times 10^6 \times (300 + 100 - 79,8)}{24995,996 \times 10^4} = 192,15 \text{ MPa} \quad (\text{tarik})$$

$$f_c = \frac{150 \times 10^6 \times 79,8}{9 \times 24995,996 \times 10^4} = 5,32 \text{ MPa} \quad (\text{tekan})$$

Perbedaan hasil analisis pertama dan kedua tidak terlalu besar, sehingga dalam praktiknya perhitungan kembali letak sumbu netral tidak terlalu perlu dilakukan.

## 12.4 SISTEM PELAKSANAAN KOMPONEN STRUKTUR KOMPOSIT

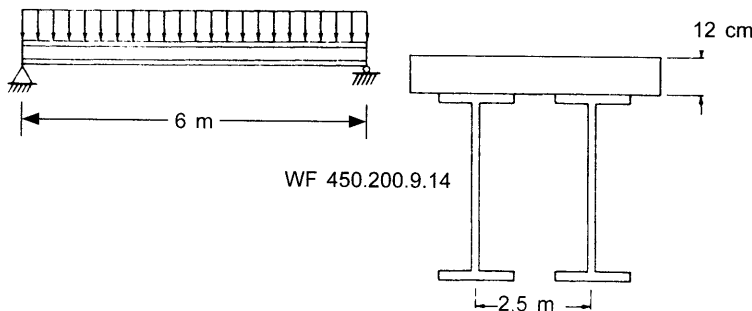
Metode pelaksanaan suatu komponen struktur komposit (khususnya untuk komponen struktur lentur), secara umum dapat dibedakan berdasarkan ada atau tidaknya tumpuan sementara (perancah).

Jika tumpuan sementara tidak digunakan (*unshored*) maka profil baja akan berperilaku sebagai penumpu dari bekisting pelat beton, selama beton belum mengeras. Dalam tahap ini, balok baja harus mampu memikul beban-beban yang meliputi berat sendiri, berat bekisting pelat serta berat beton yang masih belum mengeras. Setelah pelat beton mengeras maka aksi komposit akan mulai bekerja, sehingga semua beban layan yang ada (meliputi beban mati dan hidup) akan dipikul oleh komponen struktur komposit.

Sistem pelaksanaan yang lain adalah dengan menggunakan tumpuan sementara (*shored*) selama pelat beton belum mengeras. Tumpuan sementara ini akan memikul berat dari profil baja, bekisting pelat serta beton yang belum mengeras. Dengan digunakannya tumpuan sementara akan dapat mengurangi tegangan yang timbul pada profil baja selama proses konstruksi. Setelah beton mengeras, perancah dilepas dan beban-beban layan dipikul melalui aksi komposit baja dan pelat beton.

### ■ CONTOH 12.3:

Diketahui suatu penampang komposit dengan jarak antar balok 2,5 m. Mutu beton yang digunakan adalah  $f'_c = 20 \text{ MPa}$  dan mutu baja BJ 41. Beban hidup yang bekerja sebesar  $500 \text{ kg/m}^2$ . Hitunglah tegangan-tegangan yang terjadi pada penampang untuk sistem pelaksanaan tanpa perancah (*unshored*) dan untuk sistem pelaksanaan dengan perancah (*shored*)!



**JAWAB:**

Menentukan lebar efektif,  $b_E$ , diambil nilai terkecil dari:

$$\left. \begin{aligned} b_E &= L/4 = 600/4 = 150 \text{ cm} \\ b_E &= b_o = 250 \text{ cm} \end{aligned} \right\} b_E = 150 \text{ cm}$$

Menentukan nilai  $n$ :

$$E_{\text{beton}} = 4700\sqrt{f'_c} = 4700\sqrt{20} = 21000 \text{ MPa}$$

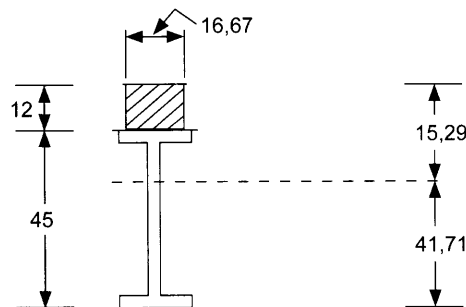
$$E_{\text{baja}} = 200000 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{E_{\text{baja}}}{E_{\text{beton}}} = \frac{200000}{21000} \approx 9$$

$$\text{lebar efektif ekivalen} = \frac{b_E}{n} = \frac{150}{9} = 16,67 \text{ cm}$$

Menentukan letak garis netral:

	Luas Transformasi $A \text{ (cm}^2\text{)}$	Lengan Momen $y \text{ (cm)}$	$A \cdot y \text{ (cm}^3\text{)}$
Pelat Beton	200,04	6	1200,24
Profil WF	96,76	34,5	3338,22
	296,80		4538,46



$$\bar{y} = \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} = \frac{4538,46}{296,80} = 15,29 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} I_{tr} &= 33500 + 96,76(34,5 - 15,29)^2 + \frac{1}{12}(16,67)(12)^3 + 200,04(15,29 - 6)^2 \\ &= 88871,524 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$S_c = \frac{88871,524}{15,29} = 5812,39 \text{ cm}^3$$

$$S_{sb} = \frac{88871,524}{41,71} = 2130,7 \text{ cm}^3$$

$$S_{sa} = \frac{88871,524}{15,29 - 12} = 27012,62 \text{ cm}^3$$



a. Pemeriksaan tegangan untuk sistem pelaksanaan tanpa perancah (*unshored*)

Perhitungan beban konstruksi:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| 1. berat profil WF                     | = 76 kg/m         |
| 2. berat pelat beton = 0,12(2400)(2,5) | = 720 kg/m        |
| 3. berat bekisting = 50(2,5)           | = <u>125 kg/m</u> |
| Total                                  | = 921 kg/m        |

Tahap I: pelat beton belum mengeras, beban seluruhnya dipikul oleh profil baja

$$M_{\max} = \frac{1}{8}(921)(6)^2 = 4144,5 \text{ kg.m} = 4,1445 \text{ ton.m} = 4,1445 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

$$f_{sa} = \frac{M_{\max}}{S_x} = \frac{4,1445 \times 10^7}{1490 \times 10^3} = 27,815 \text{ MPa}$$

$$f_{sb} = f_{sa} = 27,815 \text{ MPa}$$

Tahap II: beton sudah mengeras, beban hidup 500 kg/m<sup>2</sup> dipikul oleh penampang komposit. Beban hidup yang harus dipikul = 500(2,5) = 1250 kg/m

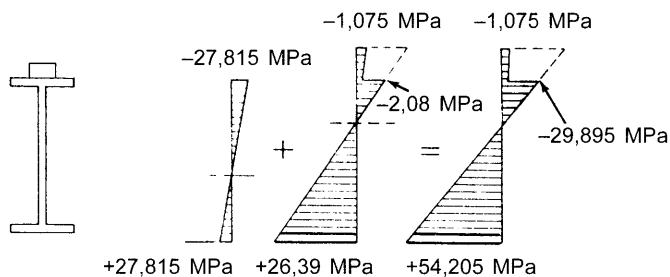
$$M_{\max} = \frac{1}{8}(1250)(6)^2 = 5625 \text{ kg.m} = 5,625 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

Tambahan tegangan yang terjadi:

$$f_c = \frac{M_{\max}}{n \times S_c} = \frac{5,625 \times 10^7}{9 \times 5812,39 \times 10^3} = -1,075 \text{ MPa}$$

$$f_{sa} = \frac{M_{\max}}{S_{sa}} = \frac{5,625 \times 10^7}{27012,62 \times 10^3} = -2,08 \text{ MPa}$$

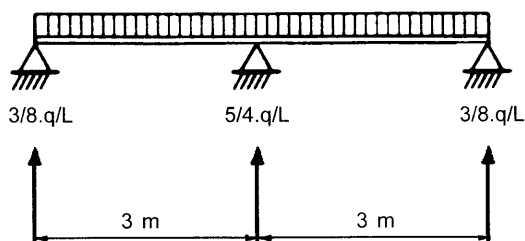
$$f_{sb} = \frac{M_{\max}}{S_{sb}} = \frac{5,625 \times 10^7}{2130,7 \times 10^3} = 26,39 \text{ MPa}$$

b. Pemeriksaan tegangan untuk sistem pelaksanaan dengan perancah (*shored*) di tengah bentang

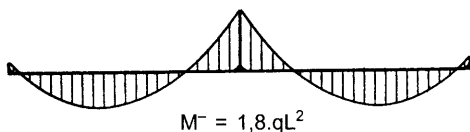
Tahap I: balok memikul 921 kg/m

$$M_{\max}^+ = \frac{9}{128} \cdot q \cdot L^2 = \frac{9}{128} (921)(3)^2 = 582,82 \text{ kg.m} = 0,58282 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$

$$M_{\max}^- = \frac{1}{8} \cdot q \cdot L^2 = \frac{1}{8} (921)(3)^2 = 1036,125 \text{ kg.m} = 1,036125 \cdot 10^7 \text{ N.mm}$$



$$M^+ = \frac{9}{128} \cdot qL^2$$



Pada  $M^+$  :  $-f_{sa} = f_{sb} = \frac{0,58282 \times 10^7}{1490 \times 10^3} = 3,91 \text{ MPa}$

Pada  $M^-$  :  $f_{sa} = -f_{sb} = \frac{1,036125 \times 10^7}{1490 \times 10^3} = 6,95 \text{ MPa}$

**Tahap II:** pelat beton sudah mengeras penunjang di tengah dilepaskan

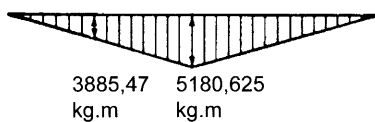
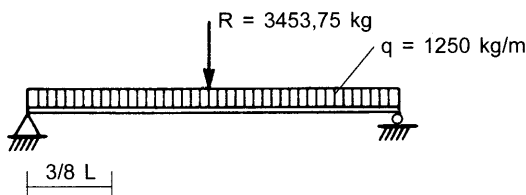
Pada tengah bentang timbul momen lentur akibat  $R_B$  dan beban hidup, yang besarnya:

$$M^+ = 5180,625 + 5625 = 10805,625 \text{ kg.m} = 10,805625 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

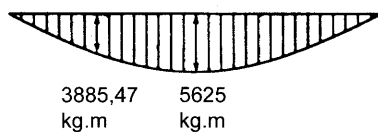
$$f_c = \frac{M}{n \times S_c} = \frac{10,805625 \times 10^7}{9 \times 5812,39 \times 10^3} = -2,06 \text{ MPa}$$

$$f_{sa} = \frac{M}{S_{sa}} = \frac{10,805625 \times 10^7}{27012,62 \times 10^3} = -4 \text{ MPa}$$

$$f_{sb} = \frac{M}{S_{sb}} = \frac{10,805625 \times 10^7}{2130,7 \times 10^3} = +50,71 \text{ MPa}$$



BMD akibat  $R_B$



BMD akibat  $q = 1250 \text{ kg/m}$

Pada  $3/8L$  dari tepi kiri timbul momen sebesar:

$$M^* = 3885,47 + 3427,73 = 7313,2 \text{ kg.m} = 7,3132 \cdot 10^7 \text{ Nmm}$$

$$f_c = \frac{M}{n \times S_c} = \frac{7,3132 \times 10^7}{9 \times 5812,39 \times 10^3} = -1,39 \text{ MPa}$$

$$f_{sa} = \frac{M}{S_{sa}} = \frac{7,3132 \times 10^7}{27012,62 \times 10^3} = -2,71 \text{ MPa}$$

$$f_{sb} = \frac{M}{S_{sb}} = \frac{7,3132 \times 10^7}{2130,7 \times 10^3} = +34,32 \text{ MPa}$$

Tegangan total:

	Pada tengah bentang	Pada $3/8L$ dari kiri
$f_c$	- 2,06 MPa	- 1,39 MPa
$f_{sa}$	+ 6,95 - 4 = + 2,95 MPa	- 3,91 - 2,71 = - 6,62 MPa
$f_{sb}$	- 6,95 + 50,71 = + 54,62 MPa	+ 3,91 + 34,32 = + 38,23 MPa

## 12.5 KUAT LENTUR NOMINAL

Kuat lentur nominal dari suatu komponen struktur komposit (untuk momen positif) menurut SNI 03-1729-2002 pasal 12.4.2.1 ditentukan sebagai berikut:

a. Untuk  $\frac{b}{t_w} \leq \frac{1680}{\sqrt{f_y}}$

$M_n$  kuat momen nominal yang dihitung berdasarkan distribusi tegangan plastis pada penampang komposit

$$\phi_b = 0,85$$

b. Untuk  $\frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_E}$

$M_n$  kuat momen nominal yang dihitung berdasarkan superposisi tegangan-tegangan elastis yang memperhitungkan pengaruh tumpuan sementara (perancah)

$$\phi_b = 0,90$$

Kuat lentur nominal yang dihitung berdasarkan distribusi tegangan plastis, dapat dikategorikan menjadi dua kasus sebagai berikut:

1. Sumbu netral plastis jatuh pada pelat beton

Dengan mengacu pada Gambar 12.5, maka besar gaya tekan  $C$  adalah:

$$C = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b_E \quad 12.12$$

Gaya tarik  $T$  pada profil baja adalah sebesar:

$$T = A_s \cdot f_y \quad 12.13$$

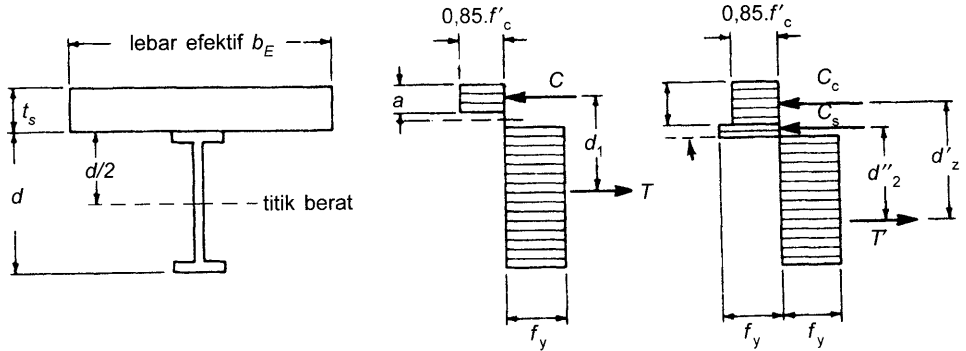
Dari keseimbangan gaya  $C = T$ , maka diperoleh:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_E} \quad 12.14$$

Kuat lentur nominal dapat dihitung dari Gambar 12.5.b:

$$M_n = C \cdot d_1 \quad 12.15$$

$$\text{Atau} \quad T \cdot d_1 = A_s \cdot f_y \cdot \left( \frac{d}{2} + t_s - \frac{a}{2} \right) \quad 12.16$$



Gambar 12.5 Kuat Lentur Nominal Berdasarkan Distribusi Tegangan Plastis

Jika dari hasil perhitungan persamaan 12.14 ternyata  $a > t_s$ , maka asumsi harus diubah. Hasil ini menyatakan bahwa pelat beton tidak cukup kuat untuk mengimbangi gaya tarik yang timbul pada profil baja.

2. Sumbu netral plastis jatuh pada profil baja

Apabila ke dalam blok tegangan beton,  $a$ , ternyata melebihi tebal pelat beton, maka distribusi tegangan dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 12.5.c. Gaya tekan,  $C_c$ , yang bekerja pada beton adalah sebesar:

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_s \quad 12.17$$

Dari keseimbangan gaya, diperoleh hubungan:

$$T' = C_c + C_s \quad 12.18$$

Besarnya  $T'$  sekarang lebih kecil daripada  $A_s \cdot f_y$ , yaitu:

$$T' = A_s \cdot f_y - C_s \quad 12.19$$

Dengan menyamakan persamaan 12.18 dan 12.19 diperoleh:

$$C_s = \frac{A_s \cdot f_y - C_c}{2} \quad 12.20$$

Atau dengan mensubstitusikan persamaan 12.17, diperoleh bentuk:

$$C_s = \frac{A_s \cdot f_y - 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_s}{2} \quad 12.21$$

Kuat lentur nominal diperoleh dengan memperhatikan Gambar 12.5.c:

$$M_n = C_c \cdot d_2' + C_s \cdot d_2'' \quad 12.22$$

### ■ CONTOH 12.4:

Hitunglah kuat lentur rencana dari komponen struktur balok komposit pada contoh 12.2. Asumsikan terdapat cukup penghubung geser sehingga balok dapat berperilaku sebagai komponen struktur komposit penuh.

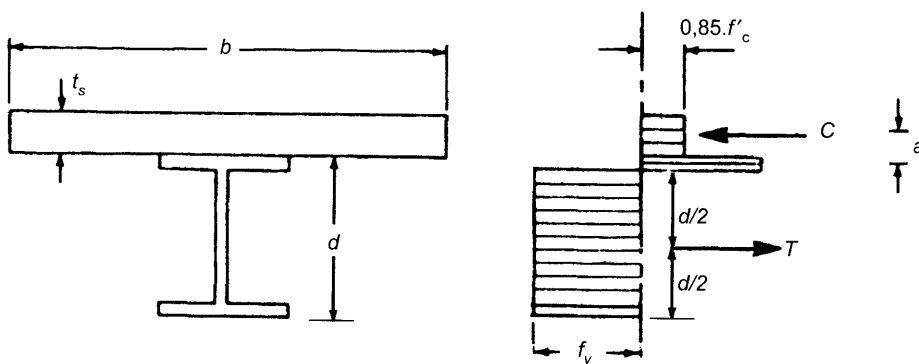
#### JAWAB:

Tentukan gaya tekan  $C$  dalam beton (gaya geser horizontal pada pertemuan antara beton dan baja). Karena balok diasumsikan berperilaku sebagai balok komposit penuh, maka nilai diambil dari nilai terkecil antara  $A_s f_y$  dan  $0,85 f'_c A_c$ :

$$A_s f_y = 4678(240) = 1122720 \text{ N}$$

$$0,85 f'_c A_c = 0,85(20)(100)(2250) = 3825000 \text{ N}$$

$$\text{sehingga } C = 1122720 \text{ N}$$



Gaya tekan resultan dapat diekspresikan sebagai:

$$C = 0,85 f'_c A_c$$

$$\text{Atau } a = \frac{C}{0,85 f'_c b} = \frac{1122720}{0,85 \times 20 \times 2250} = 29,3521 \text{ mm}$$

Gaya tekan resultan  $C$  terletak pada jarak  $a/2$  dari serat atas beton. Gaya tarik resultan  $T$  terletak pada titik berat profil WF, lengan momen dari momen kopel  $C$  dan  $T$  adalah sebesar:

$$y = d/2 + t - a/2 = (300/2) + 100 - (29,3521/2) = 235,32395 \text{ mm}$$

Kuat lentur nominal dari komponen struktur komposit tersebut:

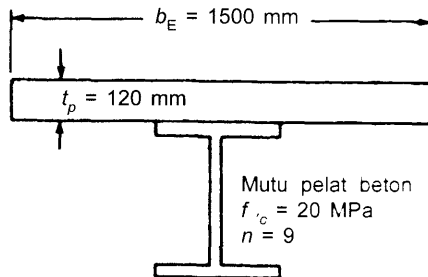
$$M_n = C \cdot y = T \cdot y = 1122720(235,32395) = 264202905,1 \text{ Nmm}$$

Kuat lentur rencana:

$$\begin{aligned} \phi_b M_n &= 0,85(264202905,1) \\ &= 224572469,3 \text{ Nmm} = 22,457 \text{ ton.m} \end{aligned}$$

### ■ CONTOH 12.5:

Hitunglah kuat lentur nominal  $M_n$  dari penampang komposit berikut:



### JAWAB:

Asumsikan sumbu netral plastis jatuh di pelat beton, sehingga:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b_E} = \frac{13440 \times 240}{0,85 \times 20 \times 1500} = 126,49 \text{ mm} > t_p (=120 \text{ mm})$$

Karena tebal pelat beton hanya 12 cm, maka pelat beton tidak dapat mengimbangi gaya tarik  $A_s \cdot f_y$  yang timbul pada baja, sehingga lokasi sumbu netral plastis akan jatuh pada profil baja (kasus 2).

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_s = 0,85(20)(1500)(120) = 3060000 \text{ N}$$

$$C_s = \frac{A_s \cdot f_y - 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot t_s}{2} = \frac{(13440 \times 240) - 3060000}{2} = 82800 \text{ N}$$

Tinggi blok tekan pada sayap profil baja dihitung sebagai berikut:

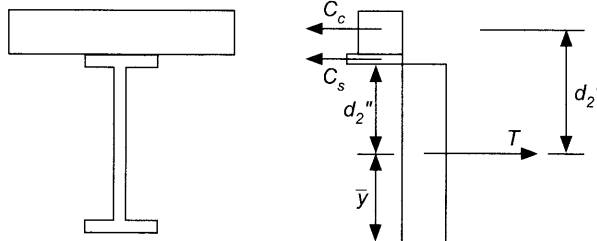
$$d_f = \frac{C_s}{b_f \times f_y} = \frac{82800}{200 \times 240} = 1,725 \text{ mm} < t_f (= 17 \text{ mm})$$

Lokasi titik berat dari bagian tarik profil baja diukur dari serat bawah profil adalah

$$\bar{y} = \frac{134,4(30) - 0,1725(20)(59,91375)}{134,4 - 0,1725(20)} = 29,21 \text{ cm}$$

Kuat lentur nominal

$$\begin{aligned} M_n &= C_c \cdot d_2' + C_s \cdot d_2'' \\ &= 3060000(367,9) + 82800(307) \\ &= 1151193600 \text{ Nmm} \end{aligned}$$



## 12.6 PENGHUBUNG GESER

Gaya geser yang terjadi antara pelat beton dan profil baja harus dipikul oleh sejumlah penghubung geser, sehingga tidak terjadi slip pada saat masa layan.

Besarnya gaya geser horizontal yang harus dipikul oleh penghubung geser diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.6.2. Pasal ini menyatakan bahwa untuk aksi komposit di mana beton mengalami gaya tekan akibat lentur, gaya geser horizontal total yang bekerja pada daerah yang dibatasi oleh titik-titik momen positif maksimum dan momen nol yang berdekatan, harus diambil sebagai nilai terkecil dari :  $A_s \cdot f_y$ ,  $0,85 \cdot f'_c \cdot A_c$  atau  $\Sigma Q_n$ . Selanjutnya kita notasikan gaya geser horizontal ini dengan  $V_h$ .

Jika besarnya  $V_h$  ditentukan oleh  $A_s \cdot f_y$  atau  $0,85 \cdot f'_c \cdot A_c$ , maka yang terjadi adalah perilaku aksi komposit penuh, dan jumlah penghubung geser yang diperlukan antara titik momen nol dan momen maksimum adalah:

$$N_1 = \frac{V_h}{Q_n} \quad 12.23$$

Dengan  $Q_n$  adalah kuat geser nominal satu buah penghubung geser. Jenis penghubung geser yang disyaratkan dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.6.1 adalah berupa jenis paku berkepala (stud) dengan panjang dalam kondisi terpasang tidak kurang dari 4 kali diameternya, atau berupa profil baja kanal hasil gilas panas.

Kuat nominal penghubung geser jenis paku yang ditanam di dalam pelat beton masif ditentukan sesuai pasal 12.6.3, yaitu:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sc} \sqrt{f'_c \cdot E_c} \leq A_{sc} \cdot f_u \quad 12.24$$

Dengan:

- $A_{sc}$  adalah luas penampang penghubung geser jenis paku, mm<sup>2</sup>
- $f_u$  adalah tegangan putus penghubung geser jenis paku, MPa
- $Q_n$  adalah kuat geser nominal untuk penghubung geser, N

Kuat nominal penghubung geser jenis kanal yang ditanam dalam pelat beton masif diatur sesuai pasal 12.6.4, yaitu:

$$Q_n = 0,3(t_f + 0,5 \cdot t_w) \cdot L_c \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \quad 12.25$$

Dengan:

- $L_c$  adalah panjang penghubung geser jenis kanal, mm
- $t_f$  adalah tebal pelat sayap, mm
- $t_w$  adalah tebal pelat badan, mm

Persamaan 12.23 memberikan jumlah penghubung geser antara titik dengan momen nol dan momen maksimum, sehingga untuk sebuah balok yang tertumpu sederhana, diperlukan penghubung geser sejumlah  $2 \cdot N_1$  yang harus diletakkan dengan jarak/spasi yang sama.

Persyaratan mengenai jarak antar penghubung geser diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.6.6 yang antara lain mensyaratkan:

1. selimut lateral minimum = 25 mm, kecuali ada dek baja
2. diameter maksimum =  $2,5 \times$  tebal flens profil baja
3. jarak longitudinal minimum =  $6 \times$  diameter penghubung geser
4. jarak longitudinal maksimum =  $8 \times$  tebal pelat beton
5. jarak minimum dalam arah tegak lurus sumbu longitudinal =  $4 \times$  diameter
6. jika digunakan dek baja gelombang, jarak minimum penghubung geser dapat diperkecil menjadi  $4 \times$  diameter

Jika jumlah penghubung geser tidak cukup banyak untuk mencegah terjadinya slip antara pelat beton dan balok baja, maka analisis harus didasarkan pada perilaku aksi komposit parsial. Untuk komponen struktur komposit yang dianggap berperilaku sebagai komposit parsial, maka momen inersia efektif  $I_{eff}$  balok komposit harus dihitung sebagai berikut:

$$I_{eff} = I_s + (I_{tr} - I_s) \sqrt{\Sigma Q_n / C_f} \quad 12.26$$

Dengan:

$C_f$  adalah gaya tekan pada pelat beton untuk kondisi komposit penuh, N

$I_s$  adalah momen inersia penampang baja, mm<sup>4</sup>

$I_{tr}$  adalah momen inersia penampang balok komposit penuh yang belum retak, mm<sup>4</sup>

$\Sigma Q_n$  adalah jumlah kekuatan penghubung geser di sepanjang daerah yang dibatasi oleh momen positif dan momen nol, N

Rasio  $\Sigma Q_n / C_f$  minimal adalah 0,25 agar tidak terjadi slip berlebihan pada balok.

#### ■ CONTOH 12.6:

Hitunglah jumlah penghubung geser yang diperlukan pada komponen struktur komposit dalam contoh 12.4!

#### JAWAB:

Data yang ada: WF 300.150.6,5.9 BJ37

$$f'_c = 20 \text{ MPa}$$

tebal pelat beton,  $t = 10 \text{ cm}$

panjang bentang,  $L = 9 \text{ m}$

Gaya geser horizontal  $V_h$  akibat aksi komposit penuh adalah:

$$V_h = C = 1122720 \text{ N}$$

Gunakan *stud connector*  $\frac{1}{2}'' \times 5 \text{ cm}$ . Diameter maksimum stud yang diizinkan:

$$2,5 \cdot t_f = 2,5(9) = 22,5 \text{ mm} > \frac{1}{2}'' (= 12,7 \text{ mm})$$

Luas penampang melintang satu buah *stud connector*:

$$A_{sc} = \frac{\pi \times 12,7^2}{4} = 126,73 \text{ mm}^2$$

Modulus elastisitas beton:

$$E_c = 0,041 \cdot w^{1,5} \sqrt{f'_c} = 0,041(2400)^{1,5} \sqrt{20} = 21550 \text{ MPa}$$

Kuat geser satu buah *stud connector*:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sc} \sqrt{f'_c \cdot E_c} = 0,5(126,73) \sqrt{20 \times 21550} = 41599 \text{ N}$$

$$A_{sc} \cdot f_u = 126,73(400) = 50692 \text{ N} > 41599 \text{ N}$$

$$\therefore Q_n = 41599 \text{ N}$$



Persyaratan jarak antar penghubung geser:

$$\text{Jarak minimum longitudinal} = 6d = 6(12,7) = 76,2 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak maksimum longitudinal} = 8t = 8(100) = 800 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak transversal} = 4d = 4(12,7) = 50,8 \text{ mm}$$

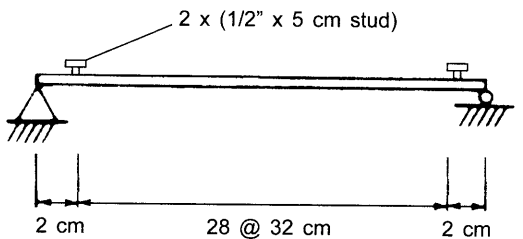
Jumlah stud yang diperlukan:

$$N = \frac{V_h}{Q_n} = \frac{1122720}{41599} = 26,98 \approx 28 \text{ buah}$$

Gunakan minimum 28 stud untuk  $\frac{1}{2}$  bentang balok, atau 56 buah untuk keseluruhan bentang. Jika satu buah stud dipasang tiap penampang melintang, jarak antar stud adalah:

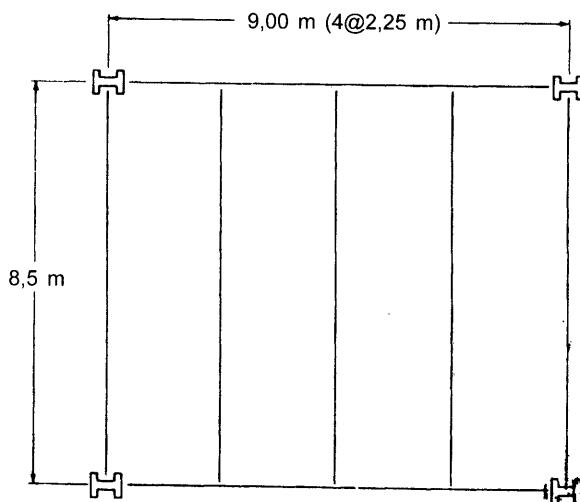
$$s = 9000 / \frac{56}{2} = 320 \text{ mm}$$

Gunakan 58 buah stud dengan penempatan seperti pada gambar berikut ini:



### ■ CONTOH 12.7:

Desainlah sebuah balok komposit interior pada denah lantai berikut. Asumsikan balok selama konstruksi tidak digunakan perancah (*unshored*). Gunakan mutu baja BJ 37 ( $f_y = 20 \text{ MPa}$  ( $n = 9$ )) dan tebal pelat lantai adalah 10 cm.



**JAWAB:****a.** perhitungan beban

beban mati:	pelat beton	$= 0,1 \times 2400$	$= 240 \text{ kg/m}^2$
	bekisting		$= 15 \text{ kg/m}^2$
	mekanikal		$= 20 \text{ kg/m}^2$
	plafond		$= 28 \text{ kg/m}^2$
	partisi		$= 95 \text{ kg/m}^2$
	$q_D$		$= 398 \text{ kg/m}^2$
beban hidup	$q_L$		$= 400 \text{ kg/m}^2$
beban konstruksi:	$D = 255 \text{ kg/m}^2$	(beton + bekisting)	
	$L = 100 \text{ kg/m}^2$		

**b.** desain terhadap beban konstruksi (aksi komposit belum bekerja, karena beton belum mengeras)

$$q_u = 2,25(1,2(255) + 1,6(100)) = 1048,5 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (1048,5)(8,5)^2 = 9469,26 \text{ kgm} = 9,4693 \text{ ton.m}$$

$$Z_{\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi_b \times f_y} = \frac{9,4693 \times 10^7}{0,9 \times 240} = 438,39 \text{ cm}^3$$

Kontrol terhadap lendutan selama konstruksi:

Batas lendutan  $= L/360$  (tanpa beban hidup)

$$q = 2,25(255) = 573,75 \text{ kg/m} = 5,7375 \text{ N/mm}$$

$$\Delta = \frac{5qL^4}{384EI} \rightarrow I_{\text{x perlu}} = \frac{5qL^4}{384E\Delta} = \frac{5 \times 5,7375 \times 8500^4}{384 \times 200000 \times 23,61} = 8258,7 \text{ cm}^4$$

**c.** desain balok komposit

$$q_u = 2,25(1,2(398) + 1,6(400)) = 2514,6 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (2514,6)(8,5)^2 = 22709,98 \text{ kgm} = 2,270998 \times 10^8 \text{ Nmm}$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi \times f_y \times \left( \frac{d}{2} + t - \frac{a}{2} \right)}$$

Untuk  $t = 100 \text{ mm}$  dan  $a$  diasumsikan sama dengan  $25 \text{ mm}$ , maka

$$t - \frac{1}{2} a = 87,5 \text{ mm}$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{2,270998 \times 10^8}{0,85(240)(150 + 87,5)} = 4687,3 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 300})$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{2,270998 \times 10^8}{0,85(240)(175 + 87,5)} = 4240,89 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 350})$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{2,270998 \times 10^8}{0,85(240)(200 + 87,5)} = 3872,11 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 400})$$

Dicoba WF 350.175 ( $I_x = 11100 \text{ cm}^4$ ,  $Z_x = 689,12 \text{ cm}^3$ ,  $A = 52,68 \text{ cm}^2$ )

Menentukan lebar efektif,  $b_E$ , diambil nilai terkecil dari:

$$b_E = \frac{1}{4} \cdot L = \frac{1}{4} (8,5) = 2,125 \text{ m}$$

$$b_E = b_o = 2,25 \text{ m}$$

sehingga  $b_E$  diambil sama dengan 2,125 m

Asumsikan sumbu netral plastis berada di pelat beton, sehingga:

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b_E} = \frac{5268 \times 240}{0,85 \times 20 \times 2125} = 35 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$$

Kuat lentur nominal dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_n &= A_s \cdot f_y \left( \frac{d}{2} + t - \frac{a}{2} \right) \\ &= 5268(240) \left( \frac{346}{2} + 100 - \frac{35}{2} \right) \end{aligned}$$

$$= 323033760 \text{ Nmm}$$

$$\phi_b \cdot M_n = 0,85(323033760)$$

$$= 274578696 \text{ Nmm} > M_u(2,3247 \cdot 10^8 \text{ Nmm})$$

( $M_u$  direvisi setelah ditambahkan berat sendiri balok)

d. menghitung jumlah stud

$$V_h = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b_E = A_s \times f_y = 5268(240) = 1264320 \text{ N}$$

Gunakan stud  $\frac{1}{2}'' \times 5 \text{ cm}$ , kuat geser 1 buah stud diambil dari nilai yang terkecil di antara:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sc} \sqrt{f'_c \times E_c} = 0,5(126,73) \cdot \sqrt{20 \times 21550} = 41599 \text{ N}$$

$$A_{sc} f_u = 126,73(400) = 50692 \text{ N} > 41599 \text{ N}$$

Ambil  $Q_n = 41599 \text{ N}$

Jumlah stud yang dibutuhkan:

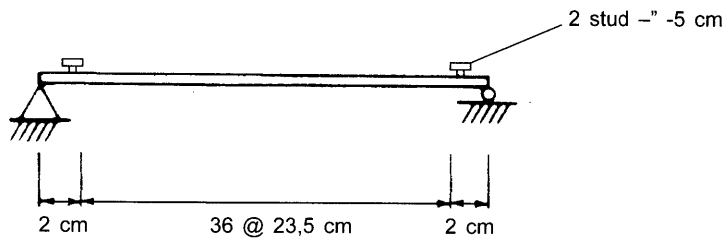
$$N = \frac{V_h}{Q_n} = \frac{1264320}{41599} = 30,39 \approx 32 \text{ buah} \quad (\text{untuk } \frac{1}{2} \text{ bentang})$$

Untuk keseluruhan bentang dipasang 64 buah stud, jika pada tiap penampang melintang dipasang 2 buah stud, maka jarak antar stud adalah:

$$s = \frac{8500}{31} = 274,2 \text{ mm} \approx 27,5 \text{ cm}$$

$$s_{\min} = 6d = 7,62 \text{ cm}$$

$$s_{\max} = 8t = 80 \text{ cm}$$



- e. menghitung kuat geser penampang

$$V_u = (2514,6 + 1,2(49,6))(8,5/2) = 10940 \text{ kg} = 10,94 \text{ ton}$$

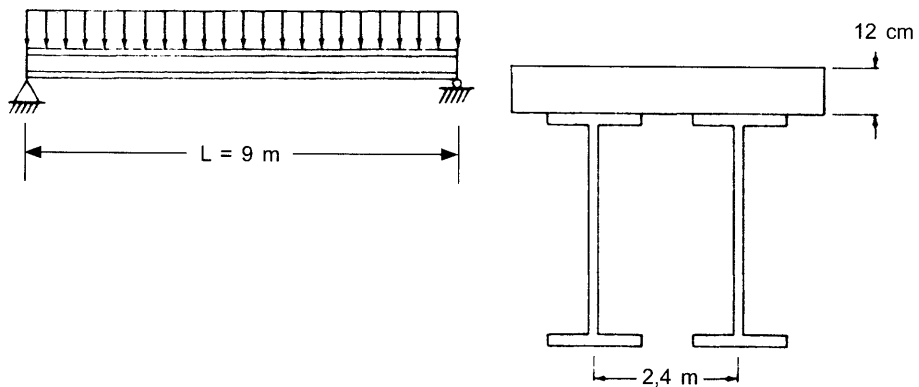
$$\phi V_n = 0,9(0,6 \cdot f_y) \cdot b \cdot t_w = 0,9(0,6)(240)(346)(6) = 26,9 \text{ ton} > V_u$$

OK

$$\frac{b}{t_w} = \frac{346 - 2(9 + 14)}{7} = 42,85 < \frac{1100}{\sqrt{f_y}} = 71$$

### ■ CONTOH 12.8:

Desainlah sebuah balok komposit interior dengan bentang 9 m dan jarak antar balok 2,4 m. Gunakan jumlah minimum stud  $\frac{3}{4}$  " - 7,5 cm. Tebal pelat beton adalah 12 cm. Tidak digunakan perancah selama konstruksi, dan mutu baja yang digunakan adalah BJ 41,  $f'_c = 20 \text{ MPa}$ ,  $n = 9$ .



### JAWAB:

- a. perhitungan beban

beban mati :	pelat beton	$= 0,12(2400)$	$= 288 \text{ kg/m}^2$
	bekisting		$= 15 \text{ kg/m}^2$
	mekanikal		$= 20 \text{ kg/m}^2$
	plafond		$= 28 \text{ kg/m}^2$
	partisi		$= 100 \text{ kg/m}^2$
	$q_D$		$= 451 \text{ kg/m}^2$
beban hidup :	$q_L$		$= 400 \text{ kg/m}^2$

beban konstruksi :  $D = 303 \text{ kg/m}^2$  (beton + bekisting)  
 $L = 100 \text{ kg/m}^2$

b. desain terhadap beban konstruksi (pelat beton belum mengeras)

$$q_u = 2,4(1,2(303) + 1,6(100)) = 1256,64 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (1256,64)(9)^2 = 12723,48 \text{ kgm}$$

$$= 12723,48 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

$$Z_{\text{perlu}} = \frac{M_u}{\phi \cdot f_y} = \frac{12723,48 \times 10^4}{0,9 \times 250} = 565488 \text{ mm}^3 = 565,488 \text{ cm}^3$$

Kontrol terhadap lendutan selama konstruksi

Batas lendutan =  $L/360 = 9000/360 = 25 \text{ mm}$

$$q = 2,4(303) = 727,2 \text{ kg/m} = 7,272 \text{ N/mm}$$

$$\Delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \rightarrow I_{\text{perlu}} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot \Delta}$$

$$I_{\text{perlu}} = \frac{5 \times 7,272 \times 9000^4}{384 \times 200000 \times 25} = 12424,9 \text{ cm}^4$$

c. desain balok komposit

$$q_u = 2,4(1,2(451) + 1,6(400)) = 2834,88 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (2834,88)(9)^2 = 28703,16 \text{ kgm}$$

$$= 28703,16 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{M_u}{\phi \cdot f_y \cdot \left( \frac{d}{2} + t - \frac{a}{2} \right)}$$

Untuk  $t = 120 \text{ mm}$  &  $a = 25 \text{ mm} \rightarrow t - a/2 = 120 - 25/2 = 107,5 \text{ mm}$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{28703,16 \times 10^4}{0,85(240)(150 + 107,5)} = 4687,3 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 300})$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{28703,16 \times 10^4}{0,85(240)(175 + 107,5)} = 4781,37 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 350})$$

$$A_s \text{ perlu} = \frac{28703,16 \times 10^4}{0,85(240)(200 + 87,5)} = 3872,11 \text{ mm}^2 \quad (\text{untuk WF 400})$$

Coba profil WF 350.175.7.11

Menentukan lebar efektif  $b_E$ :

$$\left. \begin{aligned} b_E &= \frac{1}{4}L = \frac{1}{4} \times 9 = 2,25 \text{ m} \\ b_E &= b_o = 2,4 \text{ m} \end{aligned} \right\} \text{Ambil } b_E = 2,25 \text{ m}$$

- d. untuk mendapatkan jumlah minimum penghubung geser maka jarak antar penghubung geser harus dibuat maksimal:

$$s = 8 \times t_{\text{pelat}} = 8(12) = 96 \text{ cm}$$

$$\text{jumlah penghubung geser} = \frac{1}{4}L = \frac{1}{4} \times 9 = 10,375 \approx 12 \text{ buah}$$

dipasang total 12 buah penghubung geser, sehingga untuk  $\frac{1}{2}$  bentang terdapat 6 buah penghubung geser.

Kuat geser nominal 6 buah penghubung geser tipe stud adalah:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_n &= 6 \times (0,5 \times A_{sc} \times \sqrt{f'_c \cdot E_c}) \\ &= 6 \times (0,5 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \times \sqrt{20 \times 21550}) = 967170 \text{ N} \end{aligned}$$

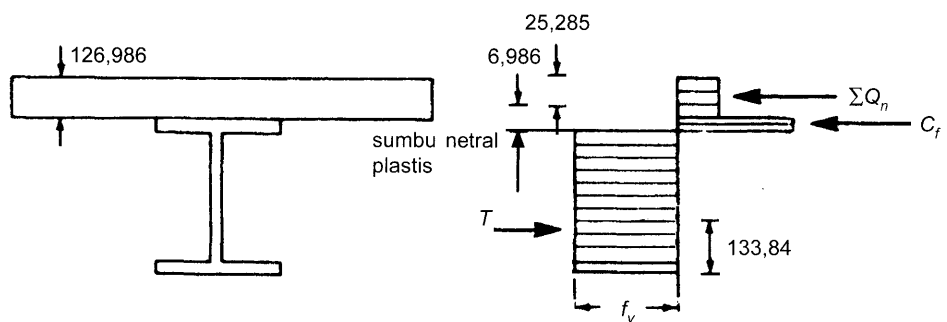
$$T_{\max} = A_s \times f_y = 6314 \times 250 = 1578500 \text{ N}$$

Karena  $\Sigma Q_n < T_{\max}$  maka sumbu netral plastis jatuh pada penampang baja.

- e. menentukan letak sumbu netral plastis  
asumsikan bahwa sumbu netral plastis jatuh pada flens tekan, sehingga dari keseimbangan gaya diperoleh hubungan:

$$\begin{aligned} \Sigma Q_n + C_f &= T_{\max} - C_f \\ 967170 + C_f &= 1578500 - C_f \\ 2 \cdot C_f &= 611330 \rightarrow C_f = 305665 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{letak sumbu netral plastis dari tepi atas flens} &= \frac{C_f}{b_f \times f_y} = \frac{305665}{250 \times 175} \\ &= 6,986 \text{ mm} \end{aligned}$$



Letak garis kerja  $T$  diukur dari tepi bawah flens baja dihitung sebagai berikut

	Luas, $A(\text{cm}^2)$	Lengan, $y(\text{cm})$	$A \times y (\text{cm}^3)$
Profil WF	63,14	17,5	1104,95
flens	- 12,22	34,65	- 423,423
	50,92		681,527

$$\bar{y} = \frac{681,527}{50,92} = 13,384 \text{ cm} = 133,84 \text{ mm}$$

- f. menghitung kuat lentur nominal  
 untuk menghitung kuat lentur nominal, terlebih dahulu harus dihitung nilai  $a$  dengan menyamakan  $\Sigma Q_n$  dengan  $C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot b_E \cdot a$

$$a = \frac{\Sigma Q_n}{0,85 \times 20 \times 2250} = 25,285 \text{ mm}$$

Tentukan momen internal terhadap titik kerja T

$$\begin{aligned} \Sigma Q_n : M_{n1} &= \Sigma Q_n (d - \bar{y} + t_s - a/2) \\ &= 967170(350 - 133,84 + 120 - (25,285/2)) \\ &= 312896420,5 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_f : M_{n2} &= C_f (d - \bar{y} - (6,986/2)) \\ &= 175(6,986)(250)(350 - 133,84 - 3,493) \\ &= 64999010,2 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 377895430,7 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} \phi_b \cdot M_n &= 0,85 \times 377895430,7 \\ &= 321211116,1 \text{ Nmm} \approx 32,12 \text{ ton.m} > M_u (= 29,3056 \text{ ton.m}) \end{aligned}$$

$M_u$  yang diperhitungkan adalah  $M_u$  setelah ditambahkan berat sendiri balok, yaitu

$$= 28703,16 \text{ kg.m} + \frac{1}{8} (1,2)(49,6)(9)^2 = 29305,8 \text{ kg.m} = 29,3056 \text{ ton.m}$$

## 12.7 BALOK KOMPOSIT PADA DAERAH MOMEN NEGATIF

Pada umumnya daerah momen positif pada suatu struktur balok menerus dapat didesain sebagai suatu komponen struktur komposit, sedangkan daerah momen negatif lebih sering didesain sebagai komponen struktur non komposit. Namun SNI 03-1729-2002 mengizinkan penggunaan sistem komposit ini pada daerah momen negatif. Pada pasal 12.4.2.3 dinyatakan bahwa penampang komposit dapat didesain untuk memikul momen negatif sejauh hal-hal berikut dipenuhi:

1. balok baja mempunyai penampang kompak yang diberi pengaku memadai
2. pelat beton dan balok baja di daerah momen negatif harus disatukan dengan penghubung geser
3. tulangan pelat yang sejajar dengan balok baja di sepanjang daerah lebar efektif pelat beton harus diangker dengan baik

Tulangan yang diletakkan sejajar dengan sumbu longitudinal balok baja, dan terletak pada pelat beton yang memiliki lebar efektif  $b_E$  dapat digunakan sebagai bagian dari penampang komposit efektif. Hal ini dapat digunakan pada daerah momen positif maupun negatif. Namun pada daerah momen positif, tulangan hanya memberikan kontribusi yang sedikit. Hal yang sebaliknya terjadi pada pelat beton, di daerah momen negatif pelat beton berada dalam keadaan tarik, padahal beton tidak memiliki kemampuan yang cukup dalam menahan gaya tarik, sehingga pada daerah momen negatif pelat beton dapat diabaikan.

Jika tulangan yang dipasang pada pelat beton hendak diperhitungkan kontribusinya pada penampang komposit, maka gaya yang timbul pada tulangan harus ditransfer oleh penghubung geser. Kuat nominal yang timbul pada tulangan dapat dihitung sebesar:

$$T_n \text{ (untuk daerah momen negatif)} = A_{sr} \cdot f_{yr} \quad 12.27$$

$$C_n \text{ (untuk daerah momen positif)} = A_s' \cdot f_{yr} \quad 12.28$$

Dengan:

$A_{sr}$  adalah luas total tulangan longitudinal pada tumpuan interior yang terletak di dalam lebar efektif flens  $b_E$

$A_s'$  adalah luas total tulangan tekan, pada lokasi momen positif maksimum dan terletak di dalam lebar efektif  $b_E$

$f_{yr}$  adalah tegangan leleh minimum dari tulangan longitudinal

### ■ CONTOH 12.9:

Tentukan letak sumbu netral plastis dan hitung kuat lentur nominal  $M_n$  dari suatu balok komposit yang memikul momen negatif. Profil WF 300×150×6,5×9 dengan mutu baja BJ 37 serta tulangan berdiameter 16 mm ( $f_{yr} = 400$  MPa).

#### JAWAB:

- a. menentukan letak sumbu netral plastis

Akibat momen negatif pelat beton berada dalam kondisi tarik, sehingga pelat diabaikan dalam analisa. Tulangan memberikan kontribusi berupa tahanan tarik nominal  $T_{sr}$  yang besarnya adalah:

$$T_{sr} = A_{sr} \times f_{yr} = 10 \left( \frac{1}{4} \times \pi \times 16^2 \right) (400) = 804247 \text{ N}$$

Gaya tekan nominal maksimum dari profil WF 300 adalah sebesar:

$$C_{maks} = A_s \times f_y = 4678(240) = 1122720 \text{ N}$$

Karena  $C_{maks} > T_{sr}$ , sumbu netral plastis akan jatuh pada profil WF, dan kesetimbangan gaya dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$T_{sr} + T_s = C_{maks} - T_s$$

$$2T_s = C_{maks} - T_{sr} = 1122720 - 804247 = 318473 \text{ N}$$

$$T_s = 159236,5 \text{ N}$$

Jika sumbu netral plastis jatuh di flens, maka jarak sumbu netral plastis dari tepi atas flens adalah sebesar:

$$\frac{T_s}{f_y \times b_f} = \frac{159236,5}{240 \times 150} = 4,42 \text{ mm} < t_f (= 9 \text{ mm})$$

OK

- b. menghitung kuat lentur nominal,  $M_n$ . Terlebih dahulu tentukan letak garis kerja gaya  $C_s$  yang diukur dari bagian bawah profil.

	Luas, $A(\text{cm}^2)$	Lengan, $y(\text{cm})$	$A \times y (\text{cm}^3)$
Profil WF	46,78	15	701,7
flens	- 6,63	29,779	- 197,435
	40,15		504,265

$$\bar{y} = \frac{504,265}{40,15} = 12,56 \text{ cm} = 125,6 \text{ mm}$$



Hitung momen terhadap garis kerja  $C_s$ :

$$\begin{aligned} T_{sr} : M_{n1} &= T_{sr}(d - \bar{y} + t - 50) \\ &= 804247(300 - 125,6 + 100 - 50) \\ &= 180473026,8 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_s : M_{n2} &= T_s(d - \bar{y} - (4,42/2)) \\ &= 159236,5(300 - 125,6 - 2,21) \\ &= 27418932,94 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 207891959,7$$

$$\phi_b M_n = 0,85(207891959,7) = 176708165,8 \text{ Nmm} \approx 17,67 \text{ ton.m}$$

## 12.8 LENDUTAN

Komponen struktur komposit memiliki momen inersia yang lebih besar daripada komponen struktur non komposit, akibatnya lendutan pada komponen struktur komposit akan lebih kecil. Momen inersia dari komponen struktur komposit hanya dapat tercapai setelah beton mengeras, sehingga lendutan yang diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja sebelum beton mengeras, dihitung berdasarkan momen inersia dari profil baja saja.

Pada daerah momen positif, beton akan mengalami tekan secara berkesinambungan yang akan mengakibatkan beton mengalami gejala rangkak (*creep*). Rangkak adalah salah satu bentuk deformasi struktur yang terjadi akibat beban tekan yang bekerja secara terus menerus. Setelah deformasi awal tercapai, deformasi tambahan yang diakibatkan rangkakan akan terjadi secara perlahan dan dalam jangka waktu yang cukup lama. Lendutan jangka panjang yang terjadi pada komponen struktur komposit dapat diperkirakan dengan cara mengurangi luas pelat beton sehingga momen inersia akan mengecil. Luasan pelat beton biasanya direduksi dengan cara membagi lebar pelat dengan angka  $2n$  atau  $3n$ , dengan  $n$  adalah rasio modulus.

Pada konstruksi tanpa perancah (*unshored*), diperlukan sebanyak tiga buah momen inersia yang berbeda untuk menentukan lendutan jangka panjang, yaitu:

1.  $I_s$ , momen inersia dari profil baja, yang digunakan untuk menghitung lendutan yang ditimbulkan oleh beban-beban yang bekerja sebelum beton mengeras
2.  $I_{tr}$ , momen inersia dari penampang komposit yang dihitung berdasarkan lebar efektif  $b/n$ , digunakan untuk menghitung lendutan yang ditimbulkan oleh beban hidup dan beban mati yang bekerja setelah beton mengeras
3.  $I_{tr'}$ , yang dihitung berdasarkan lebar efektif  $b/2n$ , untuk menentukan besar lendutan jangka panjang yang disebabkan oleh beban mati yang bekerja setelah beton mengeras

### ■ CONTOH 12.10:

Tentukan lendutan pada saat konstruksi serta lendutan jangka panjang dari konstruksi komposit dengan profil WF 300 × 150 × 6,5 × 9 dan data-data sebagai berikut:

Tebal pelat,  $t = 12 \text{ cm}$

$$b_E = 225 \text{ cm}$$

$$b_o = 2,5 \text{ m}$$

$$f'_c = 27,5 \text{ MPa}$$

$$L = 6 \text{ m}$$

$$n = 8$$

**JAWAB:**

Perhitungan beban:

Beban mati:

Pelat beton	= 0,12(2400)2,5	= 720 kg/m = 7,2 N/mm
Bekisting	= 20(2,5)	= 50 kg/m = 0,5 N/mm
Mekanikal	= 20(2,5)	= 50 kg/m = 0,5 N/mm
Plafond	= 28(2,5)	= 70 kg/m = 0,7 N/mm
Partisi	= 100(2,5)	= 250 kg/m = 2,5 N/mm
B.s Profil		= 36,7 kg/m = 0,367 N/mm
Beban hidup	= 400(2,5)	= 1000 kg/m = 10 N/mm

Lendutan pada saat konstruksi:

Akibat pelat dan berat sendiri profil:

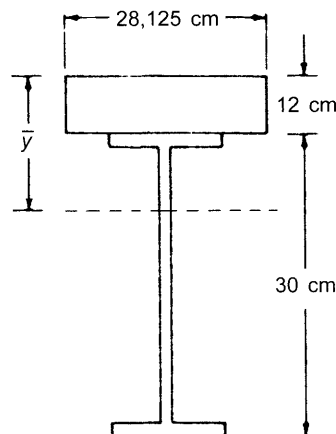
$$\Delta_1 = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_s} = \frac{5 \times (7,2 + 0,367) \times 6000^4}{384 \times 200000 \times 7210 \cdot 10^4} = 8,85 \text{ mm}$$

Akibat bekisting:

$$\Delta_2 = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_s} = \frac{5 \times 0,5 \times 6000^4}{384 \times 200000 \times 7210 \cdot 10^4} = 0,58 \text{ mm}$$

Total lendutan selama konstruksi =  $\Delta_1 + \Delta_2 = 9,43 \text{ mm}$ Setelah pelat beton mengeras, aksi komposit mulai bekerja sehingga momen inersia bertambah menjadi  $I_{tr}$ , yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{b_E}{n} = \frac{225}{8} = 28,125 \text{ cm}$$



Komponen	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$\bar{y} \text{ (cm)}$	$A \times \bar{y}$	$I_o$	$d$	$I_o + A \cdot d^2$
Pelat Beton	337,5	6	2025	4050	2,56	6261,84
WF 300	46,78	27	1263,06	7210	18,44	23116,77
	384,28		3288,06			29378,61

$$\bar{y} = \frac{3288,06}{384,28} = 8,56 \text{ cm}$$

Lendutan akibat beban mekanikal, plafond dan partisi:

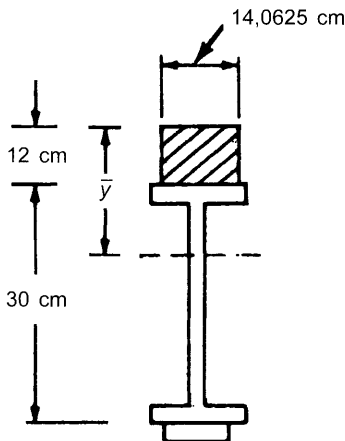
$$\Delta_3 = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{tr}} = \frac{5 \times (0,5 + 0,7 + 2,5) \times 6000^4}{384 \times 200000 \times 29378,61 \cdot 10^4} = 1,06 \text{ mm}$$

Lendutan akibat beban hidup:

$$\Delta_4 = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{tr}} = \frac{5 \times 10 \times 6000^4}{384 \times 200000 \times 29378,61 \cdot 10^4} = 2,87 \text{ mm}$$

Untuk menghitung lendutan jangka panjang akibat beban rangkai lebar efektif pelat beton direduksi sebesar 50% sehingga:

$$\frac{b_E}{2n} = \frac{225}{2 \times 8} = 14,0625 \text{ cm}$$



Komponen	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$A \times y$	$I_o$	$d$	$I_o + A \cdot d^2$
Pelat Beton	168,75	6	1012,5	2025	4,56	5533,92
WF 300	46,78	27	1263,06	7210	16,44	19853,4
	215,53		2275,56			25387,32

$$\bar{y} = \frac{2275,56}{215,53} = 10,56 \text{ cm}$$

Lendutan jangka panjang akibat rangkai:

$$\Delta_5 = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{tr}} = \frac{5 \times (0,5 + 0,7 + 2,5) \times 6000^4}{384 \times 200000 \times 25387,32 \cdot 10^4} = 1,23 \text{ mm}$$

#### RANGKUMAN:

1. Lendutan pada saat konstruksi (aksi komposit belum bekerja):  
 $\Delta_1 + \Delta_2 = 8,85 + 0,58 = 9,43 \text{ mm}$
2. Lendutan jangka pendek tanpa beban hidup:  
 $\Delta_1 + \Delta_3 = 8,85 + 1,06 = 9,91 \text{ mm}$
3. Lendutan jangka pendek dengan beban hidup:  
 $\Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_4 = 8,85 + 1,06 + 2,87 = 12,78 \text{ mm}$

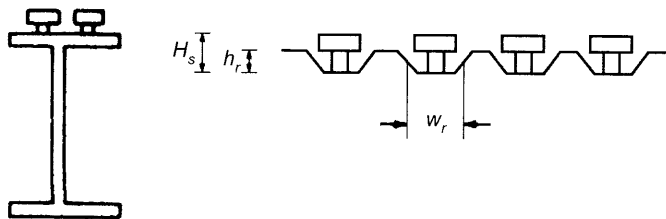
4. Lendutan jangka panjang tanpa beban hidup:  
 $\Delta_1 + \Delta_5 = 8,85 + 1,23 = 10,08 \text{ mm}$
5. Lendutan jangka panjang dengan beban hidup:  
 $\Delta_1 + \Delta_4 + \Delta_3 = 8,85 + 2,87 + 1,23 = 12,95 \text{ mm}$

## 12.9 DEK BAJA GELOMBANG

Perkembangan struktur komposit dimulai dengan digunakannya dek baja gelombang, yang selain berfungsi sebagai bekisting saat pelat beton dicetak, juga berfungsi sebagai tulangan positif bagi pelat beton. Penggunaan dek baja juga dapat dipertimbangkan sebagai dukungan dalam arah lateral dari balok sebelum beton mulai mengeras. Arah dari gelombang dek baja biasanya diletakkan tegak lurus balok penopangnya.

Persyaratan dek baja gelombang dan penghubung gesernya untuk digunakan dalam komponen struktur komposit diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.4.5.1. Dalam pasal ini disyaratkan:

1. tinggi maksimum dek baja,  $h_r \leq 75 \text{ mm}$
2. lebar rata-rata minimum dari gelombang dek,  $w_r > 50 \text{ mm}$ , lebar ini tidak boleh lebih besar dari lebar bersih minimum pada tepi atas dek baja
3. tebal pelat minimum diukur dari tepi atas dek baja = 50 mm
4. diameter maksimum stud yang dipakai = 20 mm, dan dilas langsung pada flens balok baja
5. tinggi minimum stud diukur dari sisi dek baja paling atas = 40 mm



Gambar 12.6 Penampang Melintang Dek Baja Gelombang

Jika gelombang pada dek baja dipasang tegak lurus terhadap balok penopangnya, maka kuat nominal penghubung geser jenis paku harus direduksi dengan suatu faktor,  $r_s$ , yang besarnya ditetapkan sebagai berikut:

$$r_s = \frac{0,85 \left( \frac{w_r}{h_r} \right) \left[ \left( \frac{H_s}{h_r} \right) - 1,0 \right]}{\sqrt{N_r}} \leq 1,0 \quad 12.29$$

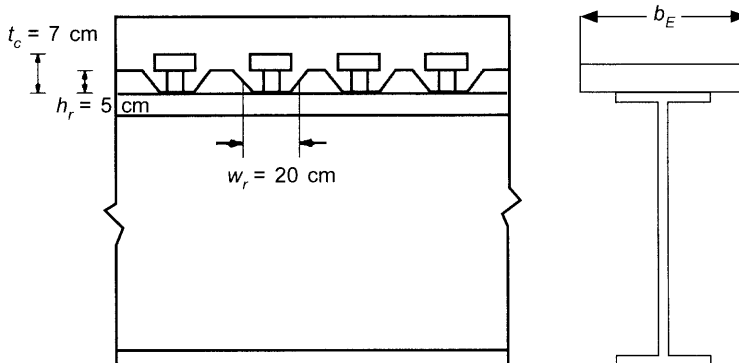
Dengan:

- $r_s$  adalah faktor reduksi
- $N_r$  adalah jumlah penghubung geser jenis paku pada setiap gelombang pada potongan melintang balok baja
- $H_s$  adalah tinggi penghubung geser jenis paku  $\leq (h_r + 75 \text{ mm})$
- $h_r$  adalah tinggi nominal gelombang dek baja
- $w_r$  adalah lebar efektif gelombang dek baja

Jarak antar penghubung geser tersebut dalam arah longitudinal tidak boleh lebih dari 900 mm.

### ■ CONTOH 12.11:

Konstruksi balok lantai yang digunakan bersama dengan dek baja gelombang (compodeck) dan beton membentuk suatu struktur komposit. Gelombang dari compodeck diletakkan tegak lurus balok. Panjang bentang balok adalah 10 m dan jarak antar balok 3 m (as-as). Tebal total pelat beton adalah 12 cm. Mutu baja BJ 37,  $f'_c = 20$  MPa. Berat pelat beton dan deck adalah  $240 \text{ kg/m}^2$ , beban hidup  $250 \text{ kg/m}^2$ , beban partisi  $50 \text{ kg/m}^2$ . Tidak ada perancah selama konstruksi dan beban hidup konstruksi adalah  $100 \text{ kg/m}^2$ . Desainlah balok tersebut hitung pula kebutuhan penghubung geser yang diperlukan. Data compodeck adalah sebagai berikut:



### JAWAB:

#### a. Desain balok baja

$$\begin{aligned} \text{Beban mati: Pelat beton + metal deck} &= 240(3) = 720 \text{ kg/m} \\ \text{Partisi} &= 50(3) = 150 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$\text{Beban hidup: } 250(3) = 750 \text{ kg/m}$$

$$q_u = 1,2q_D + 1,6q_L = 1,2(720 + 150) + 1,6(750) = 2244 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} \times 2244 \times 10^2 = 28050 \text{ kg.m} = 28050 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

Asumsikan  $a = 50 \text{ mm}$  dan  $d = 400$

$$\begin{aligned} A_{s \text{ perlu}} &= \frac{M_u}{\phi \cdot f_y \left( d/2 + t - a/2 \right)} = \frac{28050 \cdot 10^4}{0,85(240)(200 + 120 - 25)} \\ &= 4661 \text{ mm}^2 = 46,61 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Dicoba menggunakan profil WF 400.200.8.13 ( $A_s = 84,12 \text{ cm}^2$ )

Sebelum beton mengeras balok baja memikul:

$$\text{Beban hidup pada saat konstruksi} = 3 \times 100 = 300 \text{ kg/m}$$

$$\text{Beban mati} = 3(240 + 66) = 918 \text{ kg/m}$$

$$q_u = 1,2(918) + 1,6(300) = 1581,6 \text{ kg/m}$$

$$M_u = q_u \cdot L^2 = (1581,6)(10)^2 = 19770 \text{ kg.m} = 19770 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

Karena WF 400.200.8.13 termasuk penampang kompak, maka

$$M_n = M_p = Z_x \cdot f_y = 1285,95 \cdot 103 \times 240 = 308628000 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 0,9(308628000) = 277765200 \text{ Nmm} > M_u$$

OK

## b. Menghitung kuat lentur balok komposit

Setelah pelat beton mengeras, maka beban terfaktor yang harus dipikul oleh balok komposit adalah:

$$q_u = 1,2(3 \times (240 + 50 + 66)) + 1,6(3 \times 250) = 2481,6 \text{ kg/m}$$

$$M_u = \frac{1}{8} \cdot q_u \cdot L^2 = \frac{1}{8} (2481,6)(10)^2 = 31020 \text{ kg.m} = 31020 \cdot 10^4 \text{ Nmm}$$

Lebar efektif pelat beton diambil dari nilai terkecil antara:

$$b_E = \frac{1}{4} L = \frac{1}{4} (10) = 2,5 \text{ m}$$

$$b_E = b_o = 3 \text{ m}$$

Sehingga lebar efektif diambil sebesar 2,5 m.

Misalkan sumbu netral plastis jatuh di pelat beton, maka tinggi blok tegangan tekan pada balok beton adalah:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \times f'_c \times b_E} = \frac{8412 \times 240}{0,85 \times 20 \times 2500} = 47,5 \text{ mm} < t_c = 70 \text{ mm}$$

Karena  $a < t_c$ , berarti sumbu netral plastis jatuh pada pelat beton, dan sesuai dengan asumsi semula.

Kuat lentur nominal balok komposit:

$$M_n = A_s \cdot f_y (d/2 + t - a/2) = 8412(240)(200 + 120 - (47,5/2)) = 598093200 \text{ Nmm}$$

$$\phi_b M_n = 0,85(598093200) = 508379220 \text{ Nmm} > M_u$$

OK

Selanjutnya balok harus diperiksa pula terhadap geser:

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot q_u \cdot L = \frac{1}{2} (2481,6)(10) = 12408 \text{ kg} = 124080 \text{ N}$$

$$\phi V_n = \phi 0,6 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w = 0,9(0,6)(240)(342)(8) = 354585,6 \text{ N} > V_u$$

OK

$$\frac{h}{t_w} = \frac{400 - 2(13 + 16)}{8} = 42,75 < \frac{1100}{\sqrt{f_y}} = 71$$

OK

## c. Menghitung kebutuhan penghubung geser

Karena kuat lentur balok komposit cukup besar dibandingkan momen lentur yang timbul akibat beban, maka akan lebih menguntungkan jika digunakan aksi komposit parsial. Terlebih dahulu dihitung jumlah penghubung geser yang diperlukan untuk menimbulkan aksi komposit penuh.

Untuk aksi komposit penuh,  $C = V_h = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b_E = A_s \cdot f_y = 2018880 \text{ N}$

Gunakan stud  $\frac{3}{4}" - 10 \text{ cm}$  ( $A_{sc} = 285 \text{ mm}^2$ ) satu buah tiap penampang.

Faktor reduksi kekuatan stud,  $r_s$  ( $N_r = 1$ ,  $H_s = 10 \text{ cm}$ )

$$r_s = \frac{0,85 \left( \frac{W_r}{b_r} \right) \left[ \frac{H_s}{b_r} - 1,0 \right]}{\sqrt{N_r}} < 1,0$$

$$= \frac{0,85 \left( \frac{200}{50} \right) \left[ \frac{100}{50} - 1,0 \right]}{1} = 3,4 > 1,0$$

ambil  $r_s = 1,0$ . Untuk  $f'_c = 20 \text{ MPa}$ , modulus elastisitas beton adalah:

$$E_c = 0,041 \cdot w^{1,5} \sqrt{f'_c} = 0,041(2400)^{1,5} \sqrt{20} = 21550 \text{ MPa}$$

Kuat geser satu buah stud:

$$Q_n = 0,5 \cdot A_{sc} \sqrt{f'_c \times E_c} = 0,5(285) \sqrt{20 \times 21550} = 93550 \text{ N}$$

$$A_s \cdot f_u = 285(400) = 114000 \text{ N} > 93550 \text{ N}$$

OK

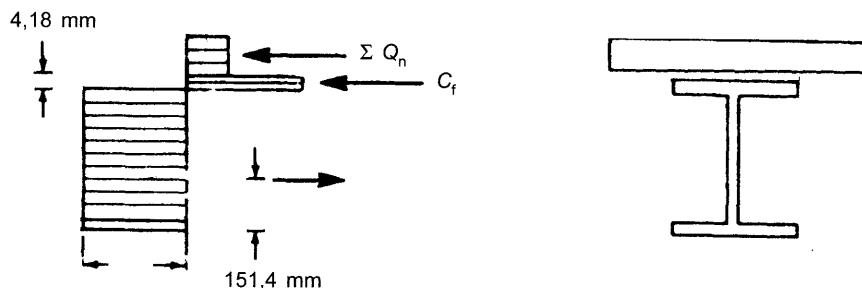
Jumlah stud yang diperlukan:

$$N = \frac{V_h}{Q_n} = \frac{2018880}{93550} = 21,58 \approx 22 \text{ stud} \quad (\text{untuk } \frac{1}{2} \text{ bentang})$$

Sehingga untuk keseluruhan bentang dibutuhkan 44 buah stud agar terjadi aksi komposit penuh. Jika tiap 2 gelombang dipasang 1 buah stud, maka jarak antar stud adalah  $2(200) = 400 \text{ mm}$ , sehingga jumlah stud yang dipakai adalah sebanyak  $(10000/400) + 1 = 26 \text{ stud}$ , atau 13 buah tiap  $\frac{1}{2}$  bentang.

$$\Sigma Q_n = 13(93550) = 1216150 \text{ N}$$

karena  $A_s \cdot f_y = 8412(240) = 2018880 \text{ N} > \Sigma Q_n$ , maka ada bagian dari profil baja yang berada dalam tekan.



Keseimbangan gaya yang terjadi:

$$\begin{aligned} & \Sigma Q_n + C_f \\ = & T_{\max} - C_f \\ & 1216150 + C_f = 2018880 - C_f \\ & 2 \times C_f = 802730 \\ & C_f = 401365 \text{ N} \end{aligned}$$

Letak sumbu netral plastis dihitung dari sebelah atas flens tekan adalah:

$$\frac{C_f}{b_f \times f_y} = \frac{401365}{200 \times 240} = 8,36 \text{ mm} \quad (< t_f = 13 \text{ mm})$$

Maka dari hitungan tersebut dapat dikatakan bahwa sumbu netral plastis jatuh pada flens tekan.

Letak garis kerja  $T_s$  diukur dari tepi bawah flens baja dihitung sebagai berikut:

	Luas, $A(\text{cm}^2)$	Lengan, $y(\text{cm})$	$A \times y (\text{cm}^3)$
Profil WF	84,12	20	1682,4
flens	- 16,72	39,582	- 661,81
	67,4		1020,59

$$\bar{y} = \frac{1020,59}{67,4} = 15,14 \text{ cm}$$

Besarnya  $a$  dihitung dari persamaan:

$$a = \frac{\Sigma Q_n}{0,85 \times f'_c \times b_E} = \frac{1216150}{0,85 \times 20 \times 2500} = 28,61 \text{ mm}$$

Tentukan momen internal terhadap garis kerja  $T_s$ :

$$\begin{aligned} \Sigma Q_n : M_{n1} &= \Sigma Q_n (d - 151,4 + t_s - a/2) \\ &= 1216150 (400 - 151,4 + 120 - 28,61/2) \\ &= 430875864,3 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_f : M_{n2} &= C_f (d - 151,4 - 4,18) \\ &= 401365 (400 - 151,4 - 4,18) \\ &= 96423927,6 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 52729979,19 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} \phi_b \cdot M_n &= 0,85 (52729979,19) \\ &= 448204823,1 \text{ Nmm} = 44,82 \text{ ton.m} > M_u (= 31,02 \text{ ton.m}) \end{aligned}$$

Jadi dapat dipasang 26 buah stud  $\frac{3}{4}$ " - 10 cm dengan jarak 400 mm (tiap 2 gelombang dek baja)

**d. Kontrol lendutan**

Sebelum beton mengeras

$$q_D = 3(240 + 66) = 918 \text{ kg/m} = 9,18 \text{ N/mm}$$

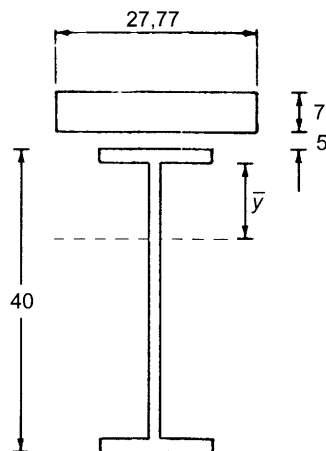
$$\Delta_1 = \frac{5 \times 9,18 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 23700 \cdot 10^4} = 25,22 \text{ mm}$$

lendutan akibat beban hidup selama konstruksi

$$q_L = 3 \times 100 = 300 \text{ kg/m} = 3 \text{ N/mm}$$

$$\Delta_2 = \frac{5 \times 3 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 23700 \cdot 10^4} = 8,24 \text{ mm}$$

setelah beton mengeras aksi komposit mulai bekerja, momen inersia penampang komposit,  $I_{tr}$  dihitung sebagai berikut:



$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{21550} = 9,28 \approx 9$$

$$\frac{b_E}{n} = \frac{2500}{9} = 277,7 \text{ mm}$$



Komponen	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$A \times y$	$I_o$	$d$	$I_o + A \cdot d^2$
Pelat Beton	194,39	3,5	680,365	793,76	8,61	15204,3
WF 300	84,12	32	2691,84	23700	19,89	56978,8
	278,51		3372,205			72183,1

$$\bar{y} = \frac{3372,205}{278,51} = 12,11 \text{ cm}$$

Karena struktur dianggap sebagai balok komposit parsial, maka momen inersia harus direduksi sebagai berikut:

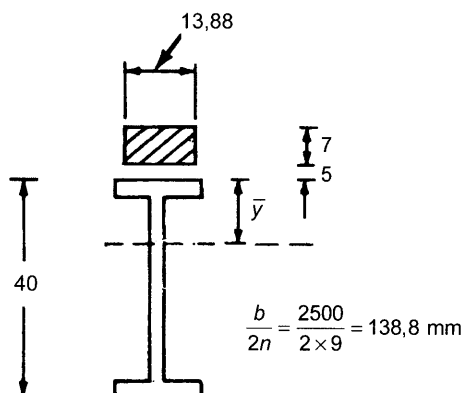
$$\begin{aligned}
 I_{\text{eff}} &= I_s + (I_{\text{ts}} - I_s) \sqrt{\Sigma Q_n / C_f} \\
 &= 23700 + (72183,1 - 23700) \sqrt{1216150 / 2018880} \\
 &= 61327,7 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

lendutan akibat beban hidup:

$$q = 3(250) = 750 \text{ kg/m} = 7,5 \text{ N/mm}$$

$$\Delta_3 = \frac{5 \times 7,5 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 61327,7 \cdot 10^4} = 7,96 \text{ mm}$$

lendutan jangka panjang akibat beban mati berupa partisi dihitung sebagai berikut:



Komponen	$A \text{ (cm}^2\text{)}$	$y \text{ (cm)}$	$A \times y$	$I_o$	$d$	$I_o + A \cdot d^2$
Pelat Beton	97,16	3,5	340,06	396,73	13,22	17377,2
WF 300	84,12	32	2691,84	23700	15,28	43340,2
	181,28		3031,9			60717,4

$$\bar{y} = \frac{3031,9}{181,28} = 16,72 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{eff}}' &= I_s + (I_{\text{tr}}' - I_s) \sqrt{\Sigma Q_n / C_f} \\
 &= 23700 + (60717,4 - 23700) \sqrt{1216150 / 2018880}
 \end{aligned}$$

$$= 52429,2 \text{ cm}^4$$

$$\Delta_5 = \frac{5 \times 1,5 \times 10000^4}{384 \times 200000 \times 52429,2 \cdot 10^4} = 1,86 \text{ mm}$$

Lendutan total yang terjadi:

$$\Delta_1 + \Delta_3 + \Delta_5 = 25,22 + 7,96 + 1,86$$

$$= 35,04 \text{ mm} < 41,6 \text{ mm}$$

OK

## 12.10 KOLOM KOMPOSIT

Kolom komposit dapat dibentuk dari pipa baja yang diisi dengan beton polos atau dapat pula dari profil baja hasil gilas panas yang dibungkus dengan beton dan diberi tulangan baja serta sengkang, seperti halnya pada kolom beton biasa. Analisis dari kolom komposit hampir sama dengan analisis komponen struktur tekan, namun dengan nilai  $f_y$ ,  $E$  dan  $r$  yang telah dimodifikasi.

Persyaratan bagi suatu kolom komposit ditentukan dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.3.1. Batasan-batasan berikut harus dipenuhi oleh suatu kolom komposit:

1. Luas penampang profil baja minimal sebesar 4% dari luas total penampang melintang kolom komposit, jika kurang maka komponen struktur tekan ini akan beraksi sebagai kolom beton biasa
2. Untuk profil baja yang diselubungi beton, persyaratan berikut harus dipenuhi:
  - a. Tulangan longitudinal dan lateral harus digunakan, jarak antar pengikat lateral tidak boleh lebih besar dari  $2/3$  dimensi terkecil penampang kolom komposit. Luas penampang melintang dari tulangan longitudinal dan transversal minimum  $0,18 \text{ mm}^2$  per mm jarak antar tulangan longitudinal/transversal
  - b. Selimut beton harus diberikan minimal setebal 40 mm dari tepi terluar tulangan longitudinal dan transversal
  - c. Tulangan longitudinal harus dibuat menerus pada lantai tingkat kecuali tulangan longitudinal yang hanya berfungsi sebagai kekangan beton
3. Kuat tekan beton,  $f'_c$  berkisar antara 21 hingga 55 MPa untuk beton normal, dan minimal 28 MPa untuk beton ringan
4. Tegangan leleh profil baja dan tulangan longitudinal tidak boleh melebihi 380 MPa.
5. Untuk mencegah tekuk lokal pada pipa baja atau penampang baja berongga, maka ketebalan dinding minimal disyaratkan sebagai berikut:
  - a. Untuk penampang persegi dengan sisi  $b$ , maka  $t \geq b \sqrt{f_y/E}$
  - b. Untuk penampang lingkaran dengan diameter  $D$ , maka  $t \geq D \sqrt{f_y/8E}$

Tata cara perhitungan kuat rencana kolom komposit diatur dalam SNI 03-1729-2002 pasal 12.3.2. Dalam pasal ini dinyatakan bahwa kuat rencana kolom komposit adalah:

$$N_u = \phi_c \cdot N_n \quad 12.30$$

Dengan:

$$\phi_c = 0,85$$

$$N_n = A_s \cdot f_{cr} = \frac{f_{m1}}{\omega} \quad 12.31$$

Nilai dari  $\omega$  ditentukan sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \lambda_c < 0,25 \quad \text{maka } \omega = 1 \quad 12.32.a$$

$$\text{Untuk } 0,25 < \lambda_c < 1,2 \quad \text{maka } \omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \cdot \lambda_c} \quad 12.32.b$$

$$\text{Untuk } \lambda_c \geq 1,2 \quad \text{maka } \omega = 1,25 \cdot \lambda_c^2 \quad 12.32.c$$

Dengan:

$$\lambda_c = \frac{k_c \cdot L}{r_m \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_{my}}{E_m}} \quad 12.33$$

$$f_{my} = f_y + c_1 f_{yr} \cdot \left( \frac{A_r}{A_i} \right) + c_2 f'_c \cdot \left( \frac{A_c}{A_i} \right) \quad 12.34$$

$$E_m = E + c_3 E_c \cdot \left( \frac{A_c}{A_i} \right) \quad 12.35$$

$$E_c = 0,041 \cdot w^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad 12.36$$

#### KETERANGAN:

- $A_c$  adalah luas penampang beton, mm<sup>2</sup>
- $A_r$  adalah luas penampang tulangan longitudinal, mm<sup>2</sup>
- $A_s$  adalah luas penampang profil baja, mm<sup>2</sup>
- $E$  adalah modulus elastisitas baja, MPa
- $E_c$  adalah modulus elastisitas beton, MPa
- $E_m$  adalah modulus elastisitas kolom komposit, MPa
- $f_{cr}$  adalah tegangan tekan kritis, MPa
- $f_{ym}$  adalah tegangan leleh kolom komposit, MPa
- $f_y$  adalah tegangan leleh profil baja, MPa
- $f'_c$  adalah kuat tekan karakteristik beton, MPa
- $k_c$  adalah faktor panjang efektif kolom
- $L$  adalah panjang komponen struktur, mm
- $r_m$  adalah jari-jari girasi kolom komposit
- $w$  adalah berat jenis beton, kg/m<sup>3</sup>
- $\lambda_c$  adalah parameter kelangsingan
- $\phi_c$  adalah faktor reduksi beban aksial tekan
- $\omega$  adalah faktor tekuk

Koefisien  $c_1$ ,  $c_2$ , dan  $c_3$  ditentukan sebagai berikut:

a. Untuk pipa baja yang diisi beton:

$$c_1 = 1,0 \quad c_2 = 0,85 \quad c_3 = 0,4$$

b. Untuk profil baja yang dibungkus beton:

$$c_1 = 0,7 \quad c_2 = 0,6 \quad c_3 = 0,2$$

Jari-jari girasi kolom komposit diambil lebih besar daripada jari-jari girasi profil baja dan kolom beton. Pendekatan yang konservatif adalah dengan menggunakan jari-jari girasi yang terbesar antara profil baja dan kolom beton, yang dapat diambil sebesar 0,3 kali dimensi dalam bidang tekuk.

$$r_m = r > 0,3 \cdot b \quad 12.37$$

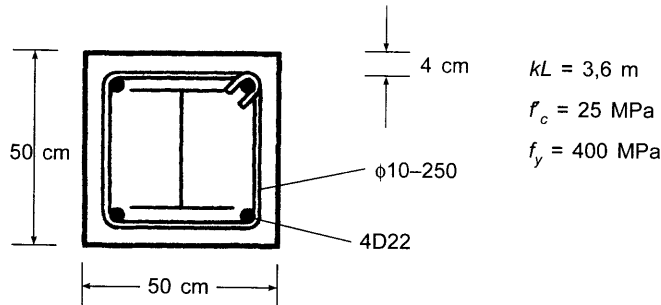
Dengan

- $r$  adalah jari-jari girasi profil baja dalam bidang tekuk
- $b$  adalah dimensi terluar kolom beton dalam bidang tekuk

Kuat rencana maksimum yang dipikul oleh beton harus diambil sebesar  $1,7 \cdot \phi_c \cdot f'_c \cdot A_B$ , dengan  $\phi_c = 0,60$  dan  $A_B$  adalah luas daerah pembebanan.

### ■ CONTOH 12.12:

Hitunglah nilai kuat tekan rencana dari kolom komposit berikut:



### JAWAB:

Luas beton,  $A_c = 500 \times 500 = 250000 \text{ mm}^2$

Luas profil,  $A_s = 11980 \text{ mm}^2$

Periksa terhadap syarat luas minimum profil baja:

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{11980}{250000} \times 100\% = 4,79\% > 4\%$$

OK

Periksa syarat jarak sengkang/pengikat lateral:

$$\text{Jarak sengkang} = 250 \text{ mm} < \frac{2}{3} \times 500 = 333,3 \text{ mm}$$

OK

Periksa syarat luas tulangan longitudinal:

$$\begin{aligned} \text{Jarak antar tulangan longitudinal} &= 500 - 2(40) - 2(10) - 22 \\ &= 378 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Luas tulangan longitudinal} = \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2$$

$$= 380,13 \text{ mm}^2 > 0,18(378) = 68,04 \text{ mm}^2$$

OK

Periksa syarat tulangan lateral:

$$\text{Luas tulangan sengkang} = \frac{1}{4} \times \pi \times 10^2$$

$$= 78,54 \text{ mm}^2 > 0,18(250) = 45 \text{ mm}^2$$

OK

Hitung tegangan leleh modifikasi:

$$\text{Luas total tulangan longitudinal, } A_r = 4(380,13) = 1520,52 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas netto beton, } A_c = 250000 - 11980 - 1520,22 = 236499,78 \text{ mm}^2$$

Untuk profil baja yang diberi selubung beton, maka:

$$c_1 = 0,7 \quad c_2 = 0,6 \quad c_3 = 0,2$$

$$f_{my} = f_y + c_1 f_{yr} \left( \frac{A_r}{A_s} \right) + c_2 f'_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right)$$

$$= 240 + 0,7(400) \left( \frac{1520,52}{11980} \right) + 0,6(25) \left( \frac{236499,78}{11980} \right)$$

$$= 571,66 \text{ MPa}$$

Hitung modulus elastisitas modifikasi:

$$\begin{aligned} E_m &= E + c_3 \cdot E_c \cdot \left( \frac{A_c}{A_j} \right) \\ &= 200000 + 0,2(24100) \left( \frac{236499,78}{11980} \right) \\ &= 295152,66 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Jari-jari girasi kolom komposit diambil dari nilai terbesar antara:

$$\left. \begin{array}{l} \text{a. } 0,3b = 0,3(500) = 150 \text{ mm} \\ \text{b. } r_y = 75,1 \text{ mm} \end{array} \right\} r_m = 150 \text{ mm}$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung kuat tekan kolom komposit:

$$\lambda_c = \frac{k_c \cdot L}{r_m \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_{my}}{E_m}} = \frac{3600}{150 \times \pi} \sqrt{\frac{571,66}{295152,66}} = 0,336$$

karena  $0,25 < \lambda_c < 1,2$ , maka

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - 0,67(0,336)} = 1,04$$

$$f_{cr} = \frac{f_{my}}{\omega} = \frac{571,66}{1,04} = 549,67 \text{ MPa}$$

$$N_n = A_s \cdot f_{cr} = 11980(549,67) = 6585046,6 \text{ N}$$

$$\phi N_n = 0,85(6585046,6) = 5597289,61 = 559,73 \text{ ton}$$

Kuat tekan aksial rencana dari profil WF 300.300.10.15 adalah:

$$\phi N_{ns} = 0,85(11980)(240) = 2443920 \text{ N}$$

Beban tekan aksial rencana yang dipikul oleh beton:

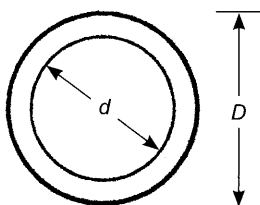
$$\phi N_{nc} = \phi N_n - \phi N_{ns} = 5597289,61 - 2443920 = 3153369,61 \text{ N}$$

$$1,7 \cdot \phi f'_c \cdot A_b = 1,7(0,6)(25)(250000) = 6375000 > \phi N_{nc}$$

OK

### ■ CONTOH 12.13:

Periksalah apakah kolom pipa komposit berikut ini cukup untuk menahan gaya aksial tekan  $P_D = 20 \text{ ton}$  dan  $P_L = 45 \text{ ton}$ . Mutu baja yang digunakan adalah BJ 37.



Data lain:

$$f'_c = 25 \text{ MPa}$$

$$D = 190,7 \text{ mm}$$

$$t = 7 \text{ mm}$$

$$d = D - 2t = 190,7 - 2(7) = 176,7 \text{ mm}$$

**JAWAB:**

Hitung gaya tekan aksial perlu,  $P_u$ :

$$P_u = 1,2P_D + 1,6P_L = 1,2(20) + 1,6(45) = 96 \text{ ton}$$

Periksa ketebalan minimum pipa

$$t_{\min} = D \sqrt{\frac{f_y}{8E}} = 190,7 \sqrt{\frac{240}{8 \times 200000}} = 2,33 \text{ mm} < 7 \text{ mm} \quad \underline{\underline{\text{OK}}}$$

Periksa luas penampang minimum profil baja terhadap luas total penampang komposit:

$$A_s = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) = \frac{1}{4} \pi (190,7^2 - 176,7^2) = 4039,77 \text{ mm}^2$$

$$A_c = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi (176,7)^2 = 24522,4 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_s}{A_s + A_c} = \frac{4039,77}{4039,77 + 24522,4} = 0,141 > 0,04 \quad \underline{\underline{\text{OK}}}$$

Hitung nilai tegangan leleh modifikasi ( $f_{my}$ ), modulus elastisitas modifikasi ( $E_m$ ) dan jari-jari girasi ( $r_m$ ):

$$f_{my} = f_y + c_1 f_{yr} \left( \frac{A_r}{A_s} \right) + c_2 f'_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right)$$

$$= 240 + 0 + 0,85(25) \left( \frac{24522,4}{4039,77} \right)$$

$$= 368,99 \text{ MPa}$$

$$E_c = 0,041 \cdot w^{1,5} \sqrt{f'_c} = 0,041(2400)^{1,5} \sqrt{25} = 24100 \text{ MPa}$$

$$E_m = E + c_3 \cdot E_c \left( \frac{A_c}{A_s} \right)$$

$$= 200000 + 0,4(24100) \left( \frac{24522,4}{4039,77} \right)$$

$$= 258517 \text{ MPa}$$

$$r_m = r_{\text{pipa}} = 65 \text{ mm}$$

$$\text{tapi tidak kurang dari } 0,3D = 0,3(190,7) = 57,21 \text{ mm} \quad \underline{\underline{\text{OK}}}$$

$$\lambda_c = \frac{k \cdot L}{r_m \cdot \pi} \sqrt{\frac{f_{my}}{E_m}} = \frac{4000}{65 \times \pi} \sqrt{\frac{368,99}{258517}} = 0,74$$

karena  $0,25 < \lambda_c < 1,2$ , maka

$$\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c} = \frac{1,43}{1,6 - 0,67(0,74)} = 1,295$$

$$f_{cr} = \frac{f_{my}}{\omega} = \frac{368,99}{1,295} = 284,93 \text{ MPa}$$

$$N_n = A_s f_{cr} = 4039,77(284,93) = 1151051,66 \text{ N}$$

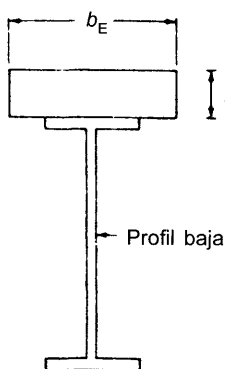
$$\phi N_n = 0,85(1151051,66) = 978393,91 \text{ N} = 97,84 \text{ ton} > P_u (= 96 \text{ ton})$$

## SOAL-SOAL LATIHAN

## P.12.1 – P.12.3

Hitunglah/tentukan lokasi sumbu netral penampang (diukur dari sisi atas pelat beton) dan momen inersia,  $I_{tr}$ , untuk masing-masing penampang berikut ini:

Soal	Profil	$f_y$ (MPa)	Tebal pelat, $t_s$ (cm)	Lebar efektif, $b_E$ (cm)	$f'_c$ (MPa)	$n$
P.12.1	WF 500.200.10.16	250	10	225	20	9
P.12.2	WF 600.200.11.17	410	12	250	22,5	9
P.12.3	WF 350.350.12.19	240	12	180	20	8



Gambar P.12.1 – P.12.3

## P.12.4 – P.12.6

Dari soal P.12.1 – P.12.3, hitunglah lokasi sumbu netral plastis diukur dari tepi atas pelat, tentukan pula besarnya kuat lentur nominal,  $M_n$ , dari penampang tersebut! Asumsikan penampang berperilaku komposit penuh.

## P.12.7 – P.12.9

Agar terjadi perilaku aksi komposit penuh dari penampang pada soal P.12.1 – P.12.3 hitunglah jumlah stud (penghubung geser) yang diperlukan, serta tentukan pula jarak antar stud tersebut! Asumsikan balok mempunyai panjang bentang sebesar  $4 \times b_E$ . Gunakan ukuran stud  $\frac{1}{2}'' \times 5$  cm, dengan  $f_u = 400$  MPa.

**P.12.10** Sebuah sistem balok komposit interior dari profil WF 350.175.7.11 memikul pelat beton setebal 10 cm. Jarak antar balok adalah sebesar 150 cm dan panjang bentang balok adalah 750 cm (7,5 m). Beban yang harus dipikul meliputi beban konstruksi  $90 \text{ kg/m}^2$ , beban partisi  $70 \text{ kg/m}^2$ , serta beban hidup  $400 \text{ kg/m}^2$ . Baja yang digunakan adalah BJ 37, serta asumsikan  $n = 9$ . Hitunglah lendutan yang terjadi berikut ini:

- Lendutan maksimum sebelum pelat beton mengeras
- Lendutan maksimum jangka pendek setelah terjadi perilaku komposit
- Lendutan maksimum jangka panjang setelah terjadi perilaku komposit

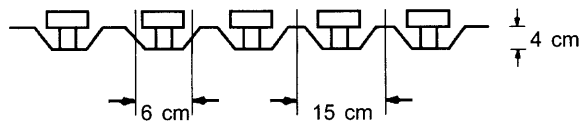
**P.12.11** Suatu sistem pelat lantai komposit terdiri dari balok baja sepanjang 12 m dengan jarak antar balok adalah 2,5 m, mutu baja BJ 37 dan mutu beton  $f'_c = 25$  MPa. Pelat tersebut

memikul beban konstruksi sebesar  $90 \text{ kg/m}^2$  dan beban hidup  $400 \text{ kg/m}^2$ . Desainlah profil WF yang mencukupi untuk memikul beban-beban tersebut!

**P.12.12** Desainlah profil baja berikut penghubung gesernya berdasarkan kondisi berikut ini:

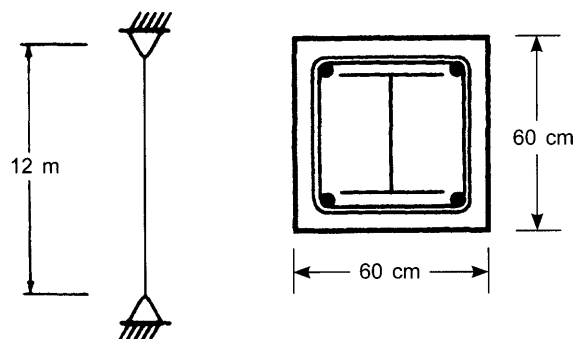
Jarak antar balok	= 1,5 m
Panjang balok	= 9 m
Tebal pelat total	= 12 cm
Beban konstruksi	= $90 \text{ kg/m}^2$
Beban hidup konstruksi	= $100 \text{ kg/m}^2$
Berat pelat & deck	= $250 \text{ kg/m}^2$
Beban partisi	= $90 \text{ kg/m}^2$
Beban plafon	= $25 \text{ kg/m}^2$
Beban hidup	= $300 \text{ kg/m}^2$
Mutu baja, $f_y$	= 240 MPa
Mutu beton, $f'_c$	= 27,5 MPa
Kuat tarik putus stud, $f_u$	= 400 MPa

Dalam sistem komposit ini digunakan dek baja gelombang dengan ukuran seperti ditunjukkan dalam Gambar P.12.12.



Gambar P.12.12

**P.12.13** Hitunglah kuat tekan rencana dari komponen struktur tekan komposit seperti pada Gambar P.12.13, dengan menggunakan mutu baja  $f_y = 240 \text{ MPa}$  dan mutu beton  $f'_c = 30 \text{ MPa}$ . Profil baja yang digunakan adalah WF 350.350.12.19, dengan tulangan longitudinal 4D25 dan tulangan sengkang  $\phi 10 - 250 \text{ mm}$ .



Gambar P.12.13



# 13

## Sambungan pada Konstruksi Bangunan Gedung

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Sesudah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

- Melakukan desain sambungan baut atau las atau kombinasi baut dan las pada suatu daerah sambungan dalam konstruksi bangunan gedung pada umumnya

Pokok-pokok Pembahasan Bab

- 1.1 Sambungan Balok Induk dengan Balok Anak
- 1.2 Sambungan Balok Kolom
- 1.3 Sambungan Balok Kolom Diperkaku
- 1.4 Sambungan Penahan Momen
- 1.5 Sambungan Balok Kolom dengan Pengaku

### 13.1 SAMBUNGAN BALOK INDUK DENGAN BALOK ANAK

#### ■ CONTOH 13.1:

Rencanakan sambungan antara balok induk (WF 600.200) dengan balok anak (WF 300.150 dan WF 400.200) dengan menggunakan baut A325  $\phi 19$  mm. Reaksi terfaktor balok WF 300 adalah sebesar 18 ton, sedangkan pada WF 400 adalah sebesar 32 ton. Mutu baja profil BJ37.

#### JAWAB:

Tahanan tumpu pada bagian web dari balok:

$$\begin{aligned}\phi R_n &= 0,75(2,4 f_u^p) \cdot d_b \cdot t_p \\ &= 0,75(2,4)(370)(19)(6,5) = 8,22 \text{ ton/baut} \quad (\text{WF 300}) \\ &= 0,75(2,4)(370)(19)(8) = 10,12 \text{ ton/baut} \quad (\text{WF 400})\end{aligned}$$

Tahanan geser baut dengan dua bidang geser:

$$\begin{aligned}\phi R_n &= 0,75(0,5 f_u^b) \cdot m \cdot A_b \\ &= 0,75(0,5)(825)(2)(283,64) = 17,55 \text{ ton/baut}\end{aligned}$$

Perhitungan jumlah baut:

$$\text{WF 300 } n = \frac{18}{8,22} = 2,2 \approx 3 \text{ buah baut}$$

$$\text{WF 400 } n = \frac{32}{10,12} = 3,2 \approx 4 \text{ buah baut}$$

Periksa geser blok pada WF 300:

$$\begin{aligned}
 A_{gv} &= 180(6,5) = 1170 \text{ mm}^2 \\
 A_{nv} &= (180 - 2,5(19 + 2))(6,5) = 828,75 \text{ mm}^2 \\
 A_{gt} &= 40(6,5) = 260 \text{ mm}^2 \\
 A_{nt} &= (40 - 0,5(19 + 2))(6,5) = 191,75 \text{ mm}^2 \\
 f_u \cdot A_{nt} &= 370(191,75) = 70947,5 \text{ N} \\
 0,6f_u \cdot A_{nv} &= 0,6(370)(828,75) = 183982,5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Karena  $f_u \cdot A_{nt} < 0,6f_u \cdot A_{nv}$  maka

$$\begin{aligned}
 T_n &= 0,6f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt} = 183982,5 + (240)(260) = 246382,5 \text{ N} \\
 &= 24,64 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75(24,64) = 18,48 \text{ ton} > P_{ul} = 18 \text{ ton}$$

OK

Periksa geser blok pada WF 400:

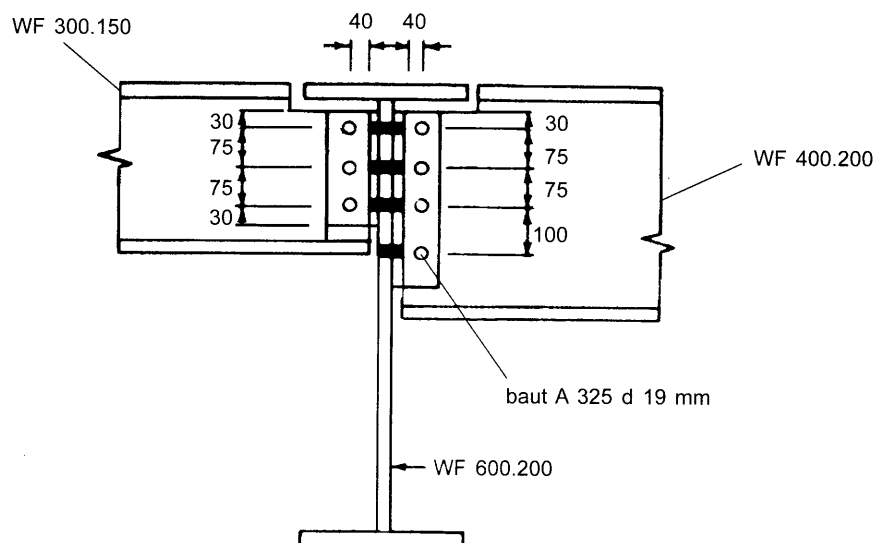
$$\begin{aligned}
 A_{gv} &= 280(8) = 2240 \text{ mm}^2 \\
 A_{nv} &= (280 - 3,5(19 + 2))(8) = 1652 \text{ mm}^2 \\
 A_{gt} &= 40(8) = 320 \text{ mm}^2 \\
 A_{nt} &= (40 - 0,5(19 + 2))(6,5) = 236 \text{ mm}^2 \\
 f_u \cdot A_{nt} &= 370(236) = 87320 \text{ N} \\
 0,6f_u \cdot A_{nv} &= 0,6(370)(1652) = 366744 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Karena  $f_u \cdot A_{nt} < 0,6f_u \cdot A_{nv}$  maka

$$T_n = 0,6f_u \cdot A_{nv} + f_y \cdot A_{gt} = 366744 + (240)(320) = 443544 \text{ N} = 44,35 \text{ ton}$$

$$\phi \cdot T_n = 0,75(44,35) = 33,26 \text{ ton} > P_{ul} = 32 \text{ ton}$$

OK



## 13.2 SAMBUNGAN BALOK-KOLOM

## ■ CONTOH 13.2:

Sebuah profil siku digunakan untuk menghubungkan balok WF 400.200 dengan bagian web dari kolom WF 250.250 (mutu baja BJ37 dan mutu baut A325). Reaksi dari balok adalah sebesar 75 kN yang terdiri dari 15 kN ( $D$ ) dan 60 kN ( $L$ ).

## JAWAB:

Karena reaksi balok tidak terlalu besar (kurang dari 200 kN) maka tidak perlu pengaku vertikal. Kapasitas yang diperlukan adalah

$$P_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(15) + 1,6(60) = 114 \text{ kN}$$

Untuk profil WF 400.200,  $k = 29 \text{ mm}$ , sehingga

$$P_n = \frac{P_u}{\phi} = f_y \cdot t_w (N + 2,5k)$$

Dengan  $\phi = 1$ ,  $f_y = 240 \text{ MPa}$ , dan  $t_w = 8 \text{ mm}$ , maka diperoleh  $N = -13,125 \text{ mm}$ . Karena disyaratkan bahwa  $N_{\min} = k$ , maka diambil  $N = 29 \text{ mm}$ .

Asumsikan  $k_{\text{siku}} = 25 \text{ mm}$ , sehingga momen pada penampang kritis adalah:

$$\begin{aligned} M_u &= P_u(N/2 + 20 - k_{\text{siku}}) \\ &= 114000(14,5 + 20 - 25) = 1083000 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Dicoba *seat angle* dengan panjang 15 cm, sehingga kapasitas momen nominal dari *seat angle* adalah:

$$\begin{aligned} M_n &= M_p = M_u / \phi = f_y \cdot \frac{b \times t^2}{4} \\ M_n &= \frac{M_u}{\phi} = \frac{1083000}{0,9} = 1203330 \text{ Nmm} = f_y \cdot \frac{b \times t^2}{4} \end{aligned}$$

Sehingga

$$t = \sqrt{\frac{4 \times M_u / \phi}{b \times f_y}} = \sqrt{\frac{4 \times 1203330}{150 \times 240}} = 11,56 \text{ mm}$$

Gunakan siku 120.120.12 ( $k = 25 \text{ mm}$ , sesuai asumsi awal)

Selanjutnya, kuat tekuk dukung dari balok juga harus diperiksa, dengan mengingat

$$N = 29 \text{ mm} \quad d = 400 \text{ mm} \quad t_f = 13 \text{ mm} \quad t_w = 8 \text{ mm} \quad f_{yw} = 240 \text{ MPa}$$

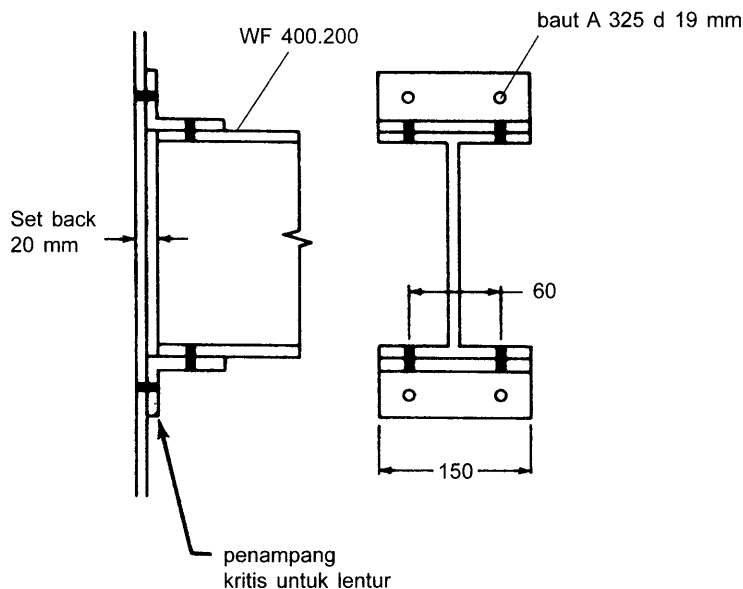
Serta  $N/d = 29/400 = 0,075 (< 0,2)$ , maka:

$$\begin{aligned} \phi P_n &= 0,75(0,39) \cdot t_w^2 \left[ 1 + 3 \frac{N}{d} \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \times f_{yw} \times t_f}{t_w}} \\ &= 182690 \text{ N} > P_u (= 114 \text{ kN}) \end{aligned} \quad \text{OK}$$

Asumsikan sambungan baut tipe tumpu dengan ulir di luar bidang geser, gunakan baut  $\phi 19 \text{ mm}$ ,  $f_u^b = 825 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} \phi R_n &= \phi 0,5 \cdot f_u^b \cdot m \cdot A_b \\ &= 0,75(0,5)(825)(1)(283,64) = 87716,7 \text{ N} = 87,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$n = \frac{114}{87,7} \approx 2 \text{ buah baut}$$



### 13.3 SAMBUNGAN BALOK-KOLOM DIPERKAKU

#### ■ CONTOH 13.3:

Desainlah sebuah sambungan balok kolom dengan menggunakan las, antara balok WF 500.200 dengan web dari kolom WF 250.250. Diketahui reaksi balok adalah sebesar 275 kN yang terdiri dari 75 kN (D) dan 200 kN (L). Mutu baja BJ37, sedangkan mutu las  $f_u = 480$  MPa.

#### JAWAB:

Properties dari WF 500.200 adalah:

$$d = 500 \text{ mm} \quad t_f = 16 \text{ mm} \quad t_w = 10 \text{ mm} \quad k = 36 \text{ mm}$$

Beban desain adalah sebesar:

$$P_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(75) + 1,6(200) = 410 \text{ kN}$$

Untuk mencegah leleh dari web, maka panjang tumpuan ditentukan oleh:

$$\phi P_n = \phi f_y t_w (N + 2,5k)$$

$$\text{atau } N = \frac{P_u}{\phi f_y t_w} - 2,5k = \frac{410000}{1 \times 240 \times 10} - 2,5(36) = 80,83 \text{ mm}$$

periksa terhadap kuat tekuk dukung balok

$$\phi P_n = 0,75(0,39) t_w^2 \left[ 1 + 3 \frac{N}{d} \frac{t_f}{t_w} \right] \sqrt{\frac{E \times f_y \times t_f}{t_w}}$$

dengan:

$$P_u = 410000 \text{ N} \text{ serta } d = 500 \text{ mm}, t_f = 16 \text{ mm}, t_w = 10 \text{ mm}, \text{ diperoleh}$$

$$N = 202,21 \text{ mm} \approx 205 \text{ mm}$$

Karena  $N/d = 205/500 = 0,41 > 0,2$  maka harus diperiksa terhadap persamaan:

$$\begin{aligned}\phi P_n &= 0,75(0,39) \cdot t_w^2 \left[ 1 + \left( 4 \frac{N}{d} - 0,2 \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{E \times f_y \times t_f}{t_w}} \\ &= 0,75(0,39)(10)^2 \left[ 1 + \left( 4 \cdot \frac{205}{500} - 0,2 \right) \left( \frac{10}{16} \right)^{1,5} \right] \sqrt{\frac{200000 \times 240 \times 16}{10}} \\ &= 438719,1 \text{ N} > P_u = 410000 \text{ N}\end{aligned}$$

OK

Untuk *seat plate* digunakan pelat dengan ketebalan 16 mm (sama dengan tebal flens balok). Ukuran las minimum untuk pelat tebal 16 mm adalah 6 mm, dalam contoh ini digunakan ukuran las 8 mm.

$$W_{\text{perlu}} = N + \text{set back} = 205 + 15 = 220 \text{ mm}$$

Ketebalan stiffener ( $t_s$ ) ditentukan sebagai berikut:

$$\text{a) } t_s \geq t_w = 10 \text{ mm}$$

$$\text{b) } t_s \geq \frac{W}{250/\sqrt{f_y}} = \frac{220}{250/\sqrt{240}} = 13,63 \text{ mm}$$

$$e_s = W - N/2 = 220 - (205/2) = 117,5 \text{ mm}$$

$$\text{c) } t_s \geq \frac{P_u(6e_s - 2W)}{\phi(1,8f_y)W^2} = \frac{410000 \times (6(117,5) - 2(220))}{0,75 \times (1,8 \times 240) \times 220^2} = 6,93 \text{ mm}$$

Tebal stiffener diambil sebesar 16 mm, sehingga ukuran las efektif maksimum dapat ditentukan sebagai berikut:

$$a_{\text{max eff}} = 0,707 \cdot \frac{f_u^p \times t_s}{f_u \text{ las}} = 0,707 \times \frac{370 \times 16}{480} = 8,72 \text{ mm (ambil } a = 8 \text{ mm)}$$

Panjang las yang diperlukan ( $L$ ), ditentukan dengan persamaan:

$$R = \frac{P_u}{2,4 \cdot L^2} \sqrt{16 \cdot e_s^2 + L^2}$$

Untuk desain LRFD, maka:

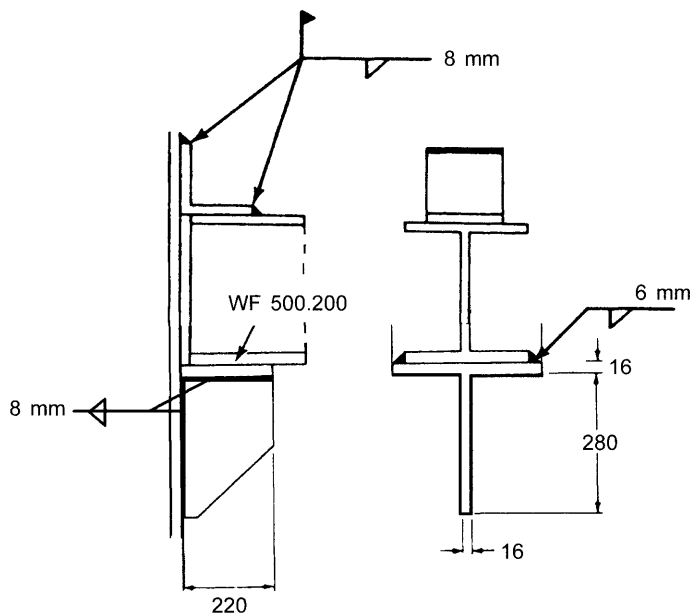
$$\begin{aligned}R &= \phi R_n = \phi(0,707a)(0,6f_u \text{ las}) \\ &= 0,75(0,707)(8)(0,60)(480) = 1221,7 \text{ N/mm}\end{aligned}$$

Sehingga panjang las sekarang dapat dihitung sebagai berikut:

$$1221,7 = \frac{410000}{2,4 \cdot L^2} \sqrt{16(117,5)^2 + L^2}$$

diperoleh  $L = 276,08 \text{ mm} \approx 280 \text{ mm}$

Jadi, digunakan las ukuran 8 mm dengan panjang  $L = 280 \text{ mm}$ .



### 13.4 SAMBUNGAN PENAHAN MOMEN

#### ■ CONTOH 13.4:

Desainlah sebuah sambungan balok kolom antara balok WF 300.150 dengan kolom WF 200.200. Gunakan mutu baja BJ37 dan baut A325  $\phi 19$  mm dengan ulir pada bidang geser. Diketahui momen ujung sebesar 15 kNm ( $D$ ) dan 30 kNm ( $L$ ). Gaya geser ujung yang bekerja sebesar 20 kN ( $D$ ) dan 50 kN ( $L$ ).

Properties penampang adalah:

$$\text{WF 300.150} \quad d = 300 \text{ mm} \quad t_f = 9 \text{ mm} \quad t_w = 6,5 \text{ mm}$$

$$\text{WF 200.200} \quad d = 200 \text{ mm} \quad t_f = 12 \text{ mm} \quad t_w = 8 \text{ mm}$$

#### JAWAB:

$$M_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(15) + 1,6(30) = 66 \text{ kNm}$$

$$P_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(20) + 1,6(50) = 104 \text{ kN}$$

Menghitung tahanan nominal baut:

Geser:

$$1 \text{ bidang geser: } \phi R_n = 0,75(0,4) f_u A_n = 0,75(0,4)(825)(283,64) = 70,2 \text{ kN}$$

$$2 \text{ bidang geser: } \phi R_n = 2(70,2) = 140,4 \text{ kN}$$

Tumpu:

$$\text{Web balok: } \phi R_n = 0,75(2,4) f_u A_{nt} = 0,75(2,4)(370)(19)(6,5) = 82,2 \text{ kN}$$

$$\text{Flens balok: } \phi R_n = 0,75(2,4) f_u A_{nt} = 0,75(2,4)(370)(19)(9) = 113,8 \text{ kN}$$

Tarik:

$$\phi R_n = 0,75(0,75 f_u^b) A_g = 0,75(0,75)(825)(283,64) = 131,6 \text{ kN}$$

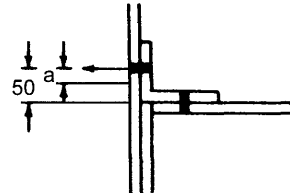
**Perhitungan siku penyambung atas dan bawah**

Dicoba dua buah baut pada masing-masing profil siku, sehingga:

$$d = \frac{M}{2T} = \frac{66 \times 10^3}{2 \times 131,6} = 250,76 \text{ mm} \approx 400 \text{ mm}$$

jarak baut terhadap flens atas balok =  $\frac{1}{2} (400 - 300) = 50 \text{ mm}$ . Gunakan profil siku 100.200.14, sehingga:

$$a = 50 - t_{\text{siku}} - r_{\text{siku}} = 50 - 14 - 15 = 21 \text{ mm}$$



dengan  $d = 400 \text{ mm}$ , maka gaya yang bekerja pada profil siku adalah:

$$T = \frac{M}{d} = \frac{66 \times 10^3}{400} = 165 \text{ kN}$$

Gaya ini menimbulkan momen pada profil siku sebesar:

$$M = 0,5 \cdot T \cdot a = 0,5(165000)(21) = 1732500 \text{ Nmm}$$

Kapasitas nominal penampang persegi adalah:

$$\phi M_n = 0,9 \left( \frac{b \cdot d^2}{4} \right) f_y$$

$$\text{sehingga diperoleh: } b = \frac{4 \times 1732500}{0,9 \times 240 \times 14^2} = 163,7 \text{ mm}$$

Gunakan siku 100.200.14 dengan panjang 200 mm pada flens kolom.

**Perhitungan sambungan pada flens balok**

$$\text{Gaya geser pada flens balok adalah } = \frac{66 \times 10^3}{300} = 220 \text{ kN}$$

Baut penyambung adalah baut dengan satu bidang geser, sehingga:

$$n = \frac{220}{70,2} = 3,13 \approx 4 \text{ buah baut}$$

**Perhitungan sambungan web balok dengan siku 100.200.14**

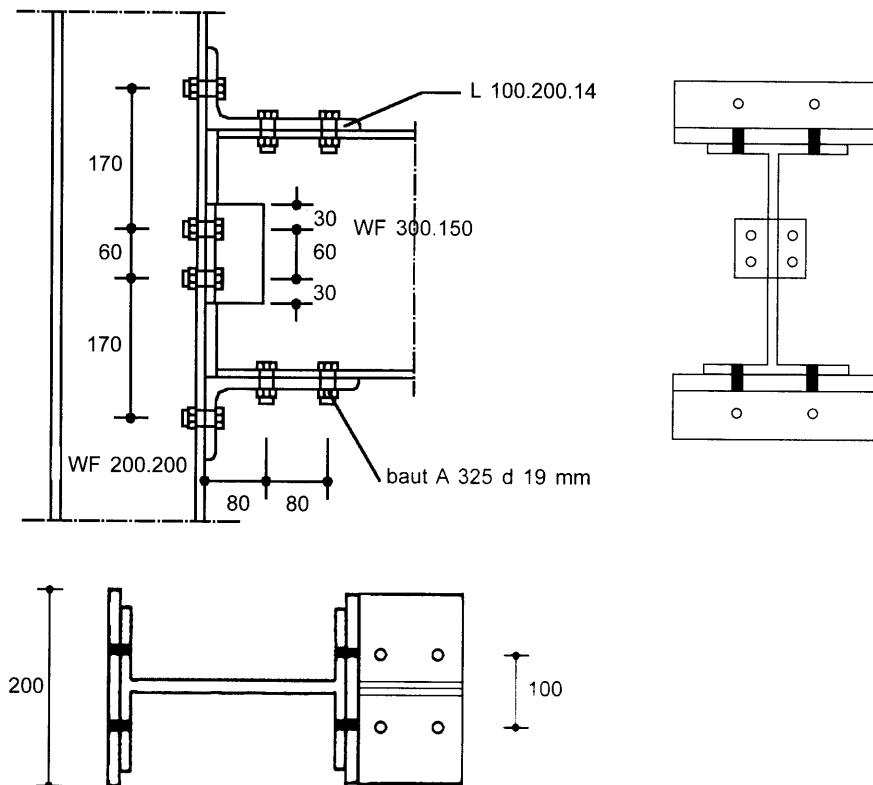
Tahanan dua bidang geser (140,4 kN) lebih besar daripada tahanan tumpu (82,2 kN) sehingga tahanan baut ditentukan oleh tahanan tumpu.

$$n = \frac{104}{82,2} \approx 2 \text{ buah baut}$$

**Sambungan web balok dengan flens kolom**

Baut yang menghubungkan balok dengan flens kolom adalah sambungan dengan satu bidang geser ( $\phi R_n = 70,2 \text{ kN}$ ), sehingga:

$$n = \frac{104}{70,2} \approx 2 \text{ buah baut}$$



### 13.5 SAMBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN PENGAKU

#### ■ CONTOH 13.5:

Desainlah sambungan balok kolom berikut antara balok WF 600.200 dengan kolom WF 350.350. Gunakan mutu baja B357,  $f_u$  las = 480 MPa, baut A325  $\phi 19$ . Diketahui beban-beban yang bekerja adalah:

beban	Geser (kN)	Momen (kNm)
D	90	110
L	30	60
W	160	220

Properties penampang:

WF 600.200  $d = 610$  mm  $t_f = 20$  mm  $t_f = 17$  mm  $t_w = 11$  mm

WF 350.350  $d = 350$  mm  $t_f = 35$  mm  $t_f = 19$  mm  $t_w = 12$  mm

#### JAWAB:

Perhitungan kombinasi pembebanan:

$$U = 1,2D + 1,6L = 150 \text{ kN} \quad \text{Geser}$$

$$= 220 \text{ kNm} \quad \text{Momen}$$

$$U = 1,2D + 0,5L + 1,3W = 250 \text{ kN} \quad \text{Geser)}$$

$$= 440 \text{ kNm} \quad \text{Momen)}$$



**a. Perhitungan pelat penyambung atas (flens tarik)**

$$T_u = 448 \cdot 10^3 / 600 = 746,66 \text{ kN}$$

$$\phi T_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_y = 0,9(240) \cdot A_g = 746,66 \cdot 103 \text{ N}$$

$$A_g = 3456 \text{ mm}^2 \quad \text{Gunakan pelat ukuran } 20 \times 175 \text{ (} A_g = 3500 \text{ mm}^2 \text{)}.$$

Las sambung gunakan las sudut ukuran 8 mm dengan kapasitas:

$$\begin{aligned} \phi R_n &= 0,75(0,707 \cdot a)(0,6 \cdot f_{u \text{ las}}) = 0,75(0,707)(8)(0,6)(480) \\ &= 1221,7 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

Panjang las yang diperlukan =  $746,66 \cdot 10^3 / 1221,7 = 612 \text{ mm}$ .

Gunakan las sepanjang 175 mm (pada ujung pelat) dan 220 mm (pada kedua sisi).

**b. Perhitungan pelat penyambung bawah (flens tekan):**

Gunakan pelat ukuran  $10 \times 350 = 3500 \text{ mm}^2$ , dengan las sudut ukuran 8 mm sepanjang 310 mm tiap sisi.

**c. Perhitungan pelat geser (shear plate)**

Baut penyambung digunakan baut A325  $\phi 19$  mm dengan satu bidang geser:

$$\phi R_n = 0,75(0,4 \cdot f_u^b) \cdot A_b = 0,75(0,4)(825)(283,64) = 70,2 \text{ kN}$$

$$n = \frac{253}{70,2} = 3,6 \approx 4 \text{ buah baut}$$

Panjang *shear plate* =  $3(75) + 2(30) = 285 \text{ mm}$

$$t = \frac{V_u}{0,9 \times (0,6 \cdot f_y) \times b} = \frac{253 \times 10^3}{0,9 \times 0,6 \times 240 \times 285} = 6,84 \text{ mm}$$

Gunakan *shear plate* dengan ukuran  $10 \times 285 \text{ mm}^2$ . Sebagai penyambung *shear plate* dengan flens kolom digunakan las sudut ukuran 6 mm dengan kapasitas:

$$\phi R_n = 0,75(0,707)(6)(0,6)(480) = 916,3 \text{ N/mm}$$

Panjang las sudut yang diperlukan =  $253 \cdot 10^3 / 916,3 = 276 \text{ mm} \approx 280 \text{ mm}$

**d. Stiffener flens kolom pada flens tarik balok**

$$\phi R_n = \phi \cdot 6,25 \cdot f_y \cdot t_f^2 = 0,9(6,25)(240)(192) = 487350 \text{ N} < T_u (746,66 \text{ kN})$$

perlu dipasang stiffener!

**e. Stiffener web kolom pada flens tekan balok**

$$\begin{aligned} \phi R_n &= \phi \cdot 0,39 \cdot t_w^2 \left[ 1 + 3 \frac{N \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1,5}}{d} \right] \sqrt{\frac{E \times f_{yw} \times t_f}{t_w}} \\ &= 0,75(0,39)(12)^2 \left[ 1 + 3 \frac{20 \left( \frac{12}{19} \right)^{1,5}}{350} \right] \sqrt{\frac{200000 \times 240 \times 19}{12}} \\ &= 398788,75 \text{ N} < T_u \quad \text{perlu stiffener!} \end{aligned}$$

$$t_w = \frac{\phi R_n}{f_y (N + 5k)} = \frac{1 \times 746,66 \times 10^3}{240(20 + 5(39))} = 14,47 \text{ mm} > 12 \text{ mm}$$

$$A_s = 3500 - 12(20 + 5(39)) = 920 \text{ mm}^2$$

Gunakan dua buah stiffener  $10 \times 100$  ( $A_s = 2000 \text{ mm}^2$ )

$$\frac{b}{t} = \frac{100}{10} = 10 < \frac{250}{\sqrt{f_y}} = 16,14$$

OK

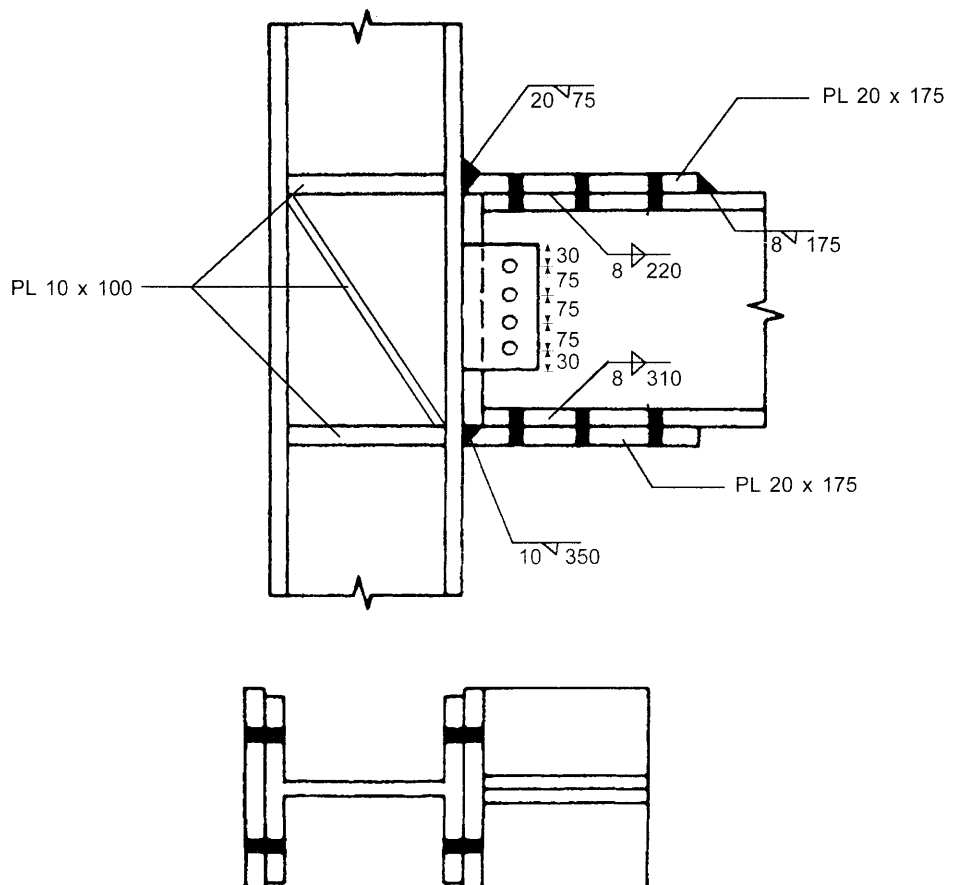
**f. Geser pada web kolom**

$$\begin{aligned}\phi V_n &= \phi \cdot 0,7 \cdot f_y \cdot d_c \cdot t_w \\ &= 0,9(0,7)(240)(350)(12) = 635040 \text{ N} < T_u\end{aligned}$$

perlu stiffener dengan  $A_s = \frac{1}{f_y \times \cos \theta} \left( \frac{M}{0,9 \cdot d_b} - V_u \right)$

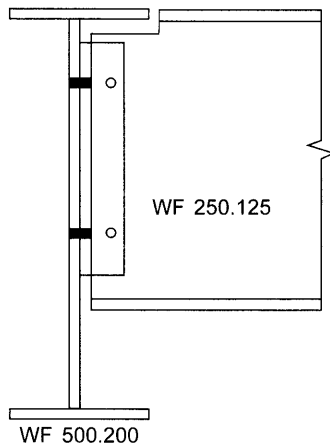
$$A_s = \frac{1}{240 \times 0,5038} \left( \frac{746,66 \times 10^3}{0,9} - 635040 \right) = 923,2 \text{ mm}^2$$

Gunakan dua buah stiffener  $10 \times 100 \text{ mm}^2$  ( $A_s = 2000 \text{ mm}^2$ )



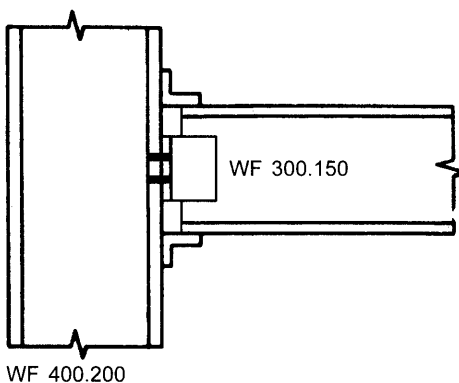
**SOAL-SOAL LATIHAN**

- P.13.1** Rencanakan sambungan antara balok induk WF 500.200 dengan balok anak WF 250.125 menggunakan baut A325  $\varnothing$  16 mm (dengan ulir di luar bidang geser). Reaksi terfaktor balok anak adalah 8 ton. Gunakan mutu baja dari BJ 37



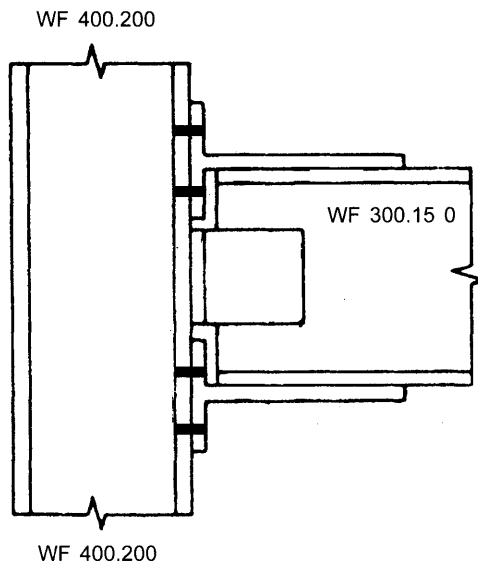
Gambar P.13.1

- P.13.2** Rencanakan kembali sambungan balok anak dengan balok induk pada soal P.13.1 tersebut, namun jika dikehendaki sambungan tanpa slip.
- P.13.3** Desainlah sambungan balok kolom antara balok WF 300.150 dengan kolom WF 400.200 (BJ 37) dengan menggunakan baut A325 berdiameter 19 mm (dengan ulir di luar bidang geser). Balok WF 300.150 memikul gaya lintang terfaktor sebesar 100 kN dan momen lentur terfaktor sebesar 30 kNm. Sebagai penghubung balok dan kolom digunakan profil siku.



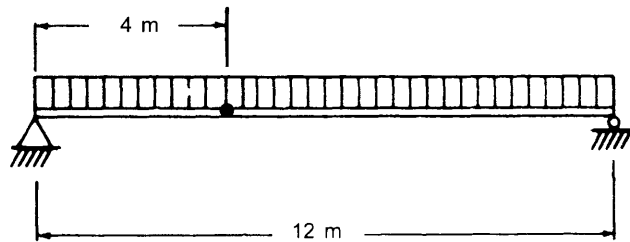
Gambar P.13.3

- P.13.4** Kerjakan kembali soal P.13.3, namun jika penghubung antara kolom dengan balok adalah menggunakan profil WF yang dipotong salah satu flens-nya, seperti pada Gambar P.13.4



Gambar P.13.4

- P.13.5** Suatu balok tertumpu sederhana, dari WF 500.200, dengan bentang 12 m, memikul beban merata yang terdiri dari beban mati 5 kN/m dan beban hidup 15 kN/m. Balok tersebut harus disambung pada jarak 4 m dari perletakan A dengan menggunakan alat sambung baut A325 berdiameter 22 mm. Rencanakan sambungan pada titik tersebut.



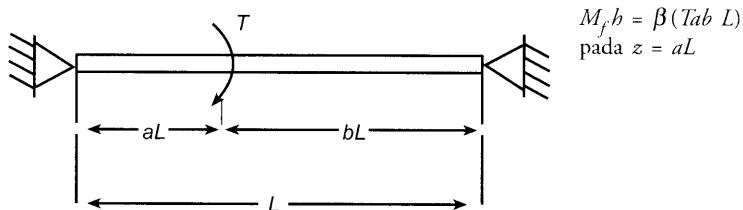
Gambar P.13.5

- P.13.6** Rencanakan kembali sambungan pada soal P.13.1 dengan menggunakan alat sambung las ( $f_{uw} = 490 \text{ MPa}$ )

# Lampiran

## Lampiran 1.A

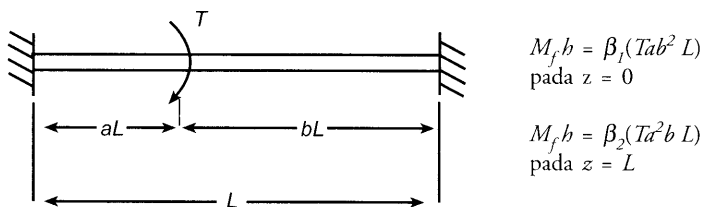
NILAI  $\beta$ , BEBAN TERPUSAT, TUMPUAN TORSI SEDERHANA  
(Salmon, C.G. & Johnson, J.E., "Steel Structures" 4th ed.)



$\lambda L$	Nilai $\beta$				
	$a = 0,5$	$a = 0,4$	$a = 0,3$	$a = 0,2$	$a = 0,1$
0,5	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
1,0	0,92	0,93	0,94	0,95	0,97
2,0	0,76	0,77	0,80	0,84	0,91
3,0	0,60	0,62	0,65	0,72	0,83
4,0	0,48	0,50	0,54	0,62	0,76
5,0	0,39	0,41	0,45	0,54	0,70
6,0	0,33	0,34	0,39	0,47	0,65
8,0	0,25	0,26	0,30	0,37	0,55
10,0	0,20	0,21	0,24	0,31	0,48

## Lampiran 1.B

NILAI  $\beta$ , BEBAN TERPUSAT, TUMPUAN TORSI TERJEPIT  
(Salmon, C.G. & Johnson, J.E., "Steel Structures" 4th ed.)

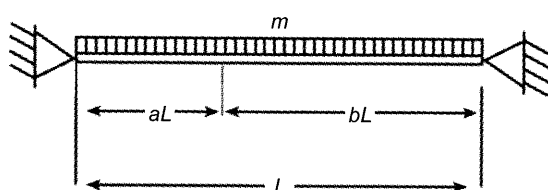


$\lambda L$	$a = 0,5$	$a = 0,4$		$a = 0,3$		$a = 0,2$	
	$\beta_1 = \beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
0,5	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99
1,0	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98
2,0	0,92	0,93	0,92	0,94	0,92	0,96	0,92
3,0	0,85	0,86	0,84	0,88	0,84	0,91	0,85
4,0	0,76	0,78	0,75	0,81	0,75	0,86	0,77
5,0	0,68	0,70	0,67	0,74	0,67	0,80	0,69
6,0	0,60	0,63	0,59	0,67	0,60	0,75	0,62
8,0	0,48	0,51	0,47	0,56	0,49	0,65	0,52
10,0	0,39	0,42	0,39	0,47	0,41	0,56	0,44

### Lampiran 1.C

#### NILAI $\beta$ , BEBAN MERATA, TUMPUAN TORSI SEDERHANA

(Salmon, C.G. & Johnson, J.E., "Steel Structures" 4th ed.)



$$M_f h = \frac{\beta(m a b L^2)}{2}$$

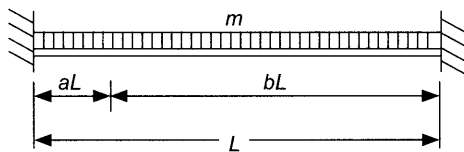
pada  $z = aL$

$\lambda L$	Nilai $\beta$				
	$a = 0,5$	$a = 0,4$	$a = 0,3$	$a = 0,2$	$a = 0,1$
0,5	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98
1,0	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92
2,0	0,70	0,71	0,71	0,72	0,74
3,0	0,51	0,51	0,52	0,54	0,57
4,0	0,37	0,37	0,38	0,41	0,44
5,0	0,27	0,27	0,29	0,31	0,34
6,0	0,20	0,20	0,22	0,24	0,28
8,0	0,12	0,12	0,13	0,16	0,19
10,0	0,08	0,08	0,09	0,11	0,14

## Lampiran 1.D

NILAI  $\beta$ , BEBAN MERATA, TUMPUAN TORSI TERJEPIT

(Salmon, C.G. &amp; Johnson, J.E., "Steel Structures" 4th ed.)



$$M_f h = \beta \left( \frac{m}{12} L^2 \right)$$

pada  $z = 0$  dan  $z = L$

$\lambda L$	0,5	1	2	3	4	5	6	8
$\beta$	0,99	0,98	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67	0,56

# Jawaban Soal-soal Latihan

## Bab 3

- P3.1 264,6 kN  
 P3.2  $\phi T_n = 412,05 \text{ kN} < T_u = 452 \text{ kN}$   
 P3.3  
 a.  $1500 \text{ mm}^2$   
 b.  $2000 \text{ mm}^2$   
 c.  $1616 \text{ mm}^2$   
 P3.4 186,7 kN  
 P3.5  $\phi T_n = 406,2 \text{ kN} < T_u = 880 \text{ kN}$   
 P3.6 168,75 kN  
 P3.7 540 kN  
 P3.8 434,1 kN  
 P3.9 264,9 kN  
 P3.10 592,9 kN

## Bab 4

- P4.1 2266,1 kN  
 P4.2 1919 kN  
 P4.3 2353 kN  
 P4.4 penampang kompak  
 P4.5 penampang kompak  
 P4.6 penampang kompak  
 P4.7 3477,38 kN  
 P4.8 2315,6 kN  
 P4.9 2871,35 kN  
 P4.10 642,21 kN  
 P4.11 WF 350.350.12.19

## Bab 5

- P5.1 a.  $1402768,58 \text{ mm}^3$ ;  $336,6 \text{ kNm}$   
 b.  $1226430,28 \text{ mm}^3$ ;  $294,3 \text{ kNm}$   
 P5.2  $1471730,3 \text{ mm}^3$ ;  $353,2 \text{ kNm}$   
 P5.3  $\phi_b M_n = 452,8 \text{ kNm} > M_u = 423 \text{ kNm}$   
 P5.4  $\phi_b M_n = 79,17 \text{ kNm} < M_u = 150,3 \text{ kNm}$   
 P5.5  $14,8 \text{ kN/m}$   
 P5.6 WF 500.200.10.16  
 P5.7  
 a. 804,6 kN  
 b. 551,1 kN  
 c. 230,85 kN  
 P5.8  $N = 115 \text{ mm}$ ;  
 $B = 230 \text{ mm}$ ;  
 $t = 30 \text{ mm}$   
 P5.9  $22,61^\circ$   
 P5.10 WF 600.200.11.17

## Bab 6

- P6.1 218,3 kN  
 P6.2 248,8 kN  
 P6.3  
 a. 6 baut  
 b. 9 baut  
 c. 5 baut  
 d. 7 baut  
 P6.4 6 buah baut  
 P6.5 519,4 kN  
 P6.6  
 a. 107,5 kN  
 b. 240,8 kN ( $r_o = 55,406 \text{ mm}$ )  
 P6.7  
 a. 159,73 kN  
 b. 194,2 kN ( $r_o = 55,406 \text{ mm}$ )  
 P6.8 6 buah baut  
 P6.9 sambungan A: 5 buah baut  
 sambungan B: 10 buah baut  
 (2 sisi @ 5 baut)  
 P6.10 sambungan A: 5 buah baut  
 sambungan B: 6 buah baut  
 (2 sisi @ 3 baut)

## Bab 7

- P7.1 259,2 kN  
 P7.2 2 buah las @ 200 mm  
 P7.3 201,46 kN  
 P7.4  $Lw1 = 40 \text{ mm}$   
 $Lw2 = 50 \text{ mm}$   
 P7.5 182,74 kN  
 P7.6 177,6 kN  
 P7.7 1015,19 N/mm  
 P7.8 1085,58 N/mm

## Bab 8

- P8.1  $\sigma_n = 134,72 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 27,41 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 37,21 \text{ MPa}$   
 P8.2  $\sigma_n = 85,83 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 18,34 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 22,97 \text{ MPa}$   
 P8.3  $\sigma_n = 40,15 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 6,51 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 4,03 \text{ MPa}$



- P.8.4  $\sigma_n = 134,24 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 34,70 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 49,68 \text{ MPa}$
- P.8.5  $\sigma_n = 85,99 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 25,38 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 35,45 \text{ MPa}$
- P.8.6  $\sigma_n = 40,14 \text{ MPa}$   
 $\tau_{web} = 8,00 \text{ MPa}$   
 $\tau_{flens} = 6,45 \text{ MPa}$
- P.8.7  $f_{un} = 209,19 \text{ MPa} < \phi_b f_y = 216 \text{ MPa}$
- P.8.8 WF 250.250.9.14;  
 $f_{un} = 211,25 \text{ MPa}$

**Bab 9**

- P.9.1 120,4 kN  
P.9.2 68,7 kN  
P.9.3 78,86 kN  
P.9.4 WF 250.250.9.14  
P.9.5 WF 300.150.6.5.9  
P.9.6 WF 600.200.11.17  
P.9.7 WF 800.300.14.26  
P.9.8  $\phi M_n = 148,52 \text{ kNm} < M_u = 210,6 \text{ kNm}$   
P.9.9 30,3 kN/m

**Bab 10**

- P.10.1 3752,5 kNm  
P.10.2 a. 2489,84 kNm  
b. 2489,84 kNm  
P.10.3  $\phi_b M_n = 14595,9 \text{ kNm} > M_u = 13912,5 \text{ kNm}$   
P.10.4 16201,21 kNm  
P.10.5 a. 503,5 kN  
b. 272,82 kN  
c. 236,98 kN  
P.10.6 panel ujung,  $V_u = 1841,95 \text{ kN}$   
panel ke-2 dan ke-3,  $V_u = 1872,97 \text{ kN}$   
panel tengah,  $V_u = 274,64 \text{ kN}$

- P.10.7 a. 552,87 kN  
b. 857 kN  
c. 276,48 kN  
P.10.8 ukuran pelat sayap/flens =  
50 mm  $\times$  395 mm

**Bab 11**

- P.11.1 Hasil persamaan interaksi = 0,9145  
P.11.2 Hasil persamaan interaksi = 1,2264  
P.11.3 Hasil persamaan interaksi = 0,8943  
P.11.4 Pelat badan kompak  
P.11.5 Pelat badan kompak  
P.11.6 Hasil persamaan interaksi = 0,985  
P.11.7 Hasil persamaan interaksi = 1,6286  
P.11.8 1195 kN  
P.11.9 Hasil persamaan interaksi = 0,6321  
P.11.10 WF 250.125.6.9

**Bab 12**

- P.12.1 14,407 cm; 120435,22 cm<sup>4</sup>  
P.12.2 16,34 cm; 205732,6 cm<sup>4</sup>  
P.12.3 15,206 cm; 101953,6 cm<sup>4</sup>  
P.12.4 74,64 mm; 892,7 kNm  
P.12.5 115,25 mm; 1996,83 kNm  
P.12.6 122,98 mm; 949,98 kNm  
P.12.7 70 buah;  $s = 125 \text{ mm}$   
P.12.8 122 buah;  $s = 80 \text{ mm}$   
P.12.9 180 buah;  $s = 80 \text{ mm}$   
P.12.10 a. 8,249 mm  
b. 10,008 mm  
c. 10,108 mm  
P.12.11 WF 450.200.9.14  
P.12.12 WF 300.150.6.5.9;  
stud ( $\frac{1}{2}'' \times 10 \text{ cm}$ ) = 46 buah;  
 $s = 40 \text{ cm}$   
P.12.13 6162,7 kN

# Daftar Pustaka

1. American Institute of Steel Construction, "Manual of Steel Construction, LRFD vol. 1", 2<sup>nd</sup> ed.
2. American Institute of Steel Construction, "Manual of Steel Construction, LRFD vol. 2", 2<sup>nd</sup> ed.
3. Badan Standarisasi Nasional, "Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, SNI 03-1729-2002", Bandung, 2000
4. Englekirk, R., "Steel Structures, Controlling Behavior Through Design", John Wiley & Sons Inc., Canada, 1996
5. Gaylord, E.H., Gaylord, C.N., & Stallmeyer, J.E., "Design of Steel Structures", McGraw Hill Inc., 1992
6. Johnston, B.G., Lin, F.J., Galambos, T.V., "Basic Steel Design", 2<sup>nd</sup> ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1980
7. Kuzmanovic, B.O., Willems, N., "Steel Design for Structural Engineers", Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1977
8. Mangkoesoebroto, S.P., "Diktat Kuliah Struktur Baja", Institut Teknologi Bandung
9. Mc Cormack, J.C., Nelson, J.K.Jr., "Structural Steel Design, LRFD Method", 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, New Jersey, 2003
10. Salmon, C.G., & Johnson, J.E., "Steel Structures, Design and Behavior" 4<sup>th</sup> ed., Harper Collins College Publishers, New York, 1996
11. Segui, W.T., "LRFD Steel Design", 2<sup>nd</sup> ed., Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, 1999
12. Smith, J.C., "Structural Steel Design, LRFD Approach", John Wiley & Sons Inc., Canada, 1996
13. Tamboli, A.R., "Steel Design Handbokk, LRFD Method", Mc Graw Hill Companies, 1996
14. Theodosius, G., Saleh, M., "Teori Soal dan Penyelesaian Konstruksi Baja I jilid 1', Delta Teknik Group, Jakarta, 2000

# Indeks

## A

AASHTO 280  
AISC 281  
Aksi medan tarik 208, 216  
Analisa elastik 115  
Analisa plastis 115  
Analogi Torsi Dengan Lentur 172  
Angka Poisson 22  
Arah Optimum Aksi Medan Tarik 217

## B

Baja 17  
Baja karbon 17  
Baja paduan 17  
Baja paduan rendah mutu tinggi 17  
Balok 81  
Balok-kolom 246  
Balok Komposit Pada Daerah Momen Negatif 304  
Batang tarik 29  
Baut 109  
Beban 3  
Beban Angin 4  
Beban Gempa 5  
Beban Hidup 4  
Beban Mati 3  
Beban Terpusat Pada Balok 94  
Besi 15

## C

Coalbrookdale Arch Bridge 15

## D

Daktilitas 21  
Dek Baja Gelombang 309  
Desain Balok Pelat Berdinding Penuh 233  
Desain Balok Terkekang Lateral 85  
Desain LRFD Balok I 186  
Desain LRFD Komponen Struktur Balok – Kolom 254  
Desain LRFD Struktur Baja 11

## E

Efek penguatan regangan 25

## F

Faktor beban 11  
Faktor Bias 7

Faktor tahanan 13  
Fungsi distribusi probabilitas 6  
Fungsi Kerapatan Probabilitas 6

## G

Geser eksentris 115  
Geser Pada Penampang Gilas 91

## H

Hukum Hooke 2

## I

Indeks keandalan 9  
Interaksi Geser Dan Lentur 221

## K

Kegagalan 8  
Kekuatan Kolom 51  
Kelangsingan Struktur Tarik 44  
Keruntuhan getas 26  
Keruntuhan leleh 28  
Keuletan material 21  
Koefisien Variasi 7  
Kolom Komposit 315  
Kombinasi Geser Dan Tarik 123  
Kombinasi pembebanan 11  
Kriteria leleh 22  
Kuat Geser Nominal 213  
Kuat Leleh Web 225  
Kuat Lentur Nominal 292  
Kuat Tekuk Dukung Web 225  
Kuat Tekuk Lateral Web 226  
Kuat Tekuk Lentur Web 226

## L

Las baji dan pasak 138  
Las sudut 138  
Las tumpul 138  
Lebar Efektif Balok Komposit 284  
Lendutan 306  
Lendutan Balok 88  
Lentur Dua Arah 200  
Lentur Sederhana Profil Simetris 81

## M

Mekanisme keruntuhan 84  
Metode ASD 5

- Metode FOSM 6  
 Metode LRFD 5  
 Metode Probabilitas Penuh 6  
 Modulus Geser 22  
 Modulus plastis 82  
 Momen leleh 82  
 Momen plastis 82
- N**  
 Nilai rerata 6
- P**  
 Panjang Tekuk 57  
 Pelat girder 206  
 penampang kompak 85  
 Penampang Tak Kompak 85  
 Pengaku Penahan Gaya Tumpu 224  
 Pengaku Vertikal 222  
 Pengelasan 137  
 Pengerjaan dingin 25  
 Penghubung geser 295  
 Perbesaran Momen Untuk Struktur Bergoyang 255  
 Perbesaran Momen Untuk Struktur Tak Bergoyang 255  
 Perencanaan 1  
 Perencanaan struktur 1  
 Perilaku Balok Terkekang Lateral 82  
 Persamaan Diferensial Untuk Kombinasi Gaya Aksial Dan Lentur 248  
 Persyaratan Balok Pelat Berdinding Penuh 208  
 Proof load 109  
 Proses Bessemer 16  
 Pusat Geser 159
- R**  
 Rangkak 306
- S**  
 Sambungan Balok Induk Dengan Balok Anak 322  
 Sambungan Balok Kolom Dengan Pengaku 329  
 Sambungan Balok Kolom Diperkaku 325  
 sambungan las 137  
 Sambungan lewatan 138  
 Sambungan Penahan Momen 327  
 Sambungan sebidang 138  
 Sambungan sisi 138  
 Sambungan sudut 138  
 Sambungan tegak 138  
 Sambungan Yang Mengalami Beban Tarik Aksial 127
- Sejarah Penggunaan Material Baja 15  
 Sendi plastis 84  
 Sifat mekanik material baja 18  
 Sifat Mekanis Baja Struktural 20  
 Sistem Pelaksanaan Komponen Struktur Komposit 288  
 SNI 03-1729-2003 1  
 Sobekan lamelar 27  
 Standar Deviasi 6  
 Strain aging 23  
 Struktur Komposit 280
- T**  
 Tahanan Geser Baut 110  
 Tahanan Geser Nominal Penampang Gilas 94  
 Tahanan nominal 31  
 Tahanan nominal baut 110  
 Tahanan Nominal Sambungan Las 141  
 Tahanan Tarik Baut 110  
 Tahanan Tekan Nominal 56  
 Tahanan Tumpu Baut 110  
 Tegangan Elastis Dalam Balok Komposit 282  
 Tegangan Geser Leleh 22  
 Tegangan multiaksial 22  
 Tegangan sisa 52  
 Tegangan Torsi 169  
 Tekuk lentur 66  
 Tekuk lentur torsi 67  
 Tekuk lentur torsi 178  
 Tekuk Lokal 61  
 Tekuk Lokal Web Pada Komponen Struktur Balok-Kolom 256  
 Tekuk torsi 66  
 Tekuk Torsi Inelastis 184  
 tekuk torsi lateral elastis 180  
 Teori Umum Lentur 99  
 Tipe Keruntuhan Tekuk Lokal Flens Tekan 211  
 Tipe Keruntuhan Tekuk Torsi Lateral 211  
 Torsi 156  
 Torsi murni 165  
 Torsi Murni Pada Penampang Homogen 156  
 Torsi terpinil 165  
 Transfer Gaya Pada Sambungan 46
- U**  
 Uji Charpy 21
- V**  
 Varian 6