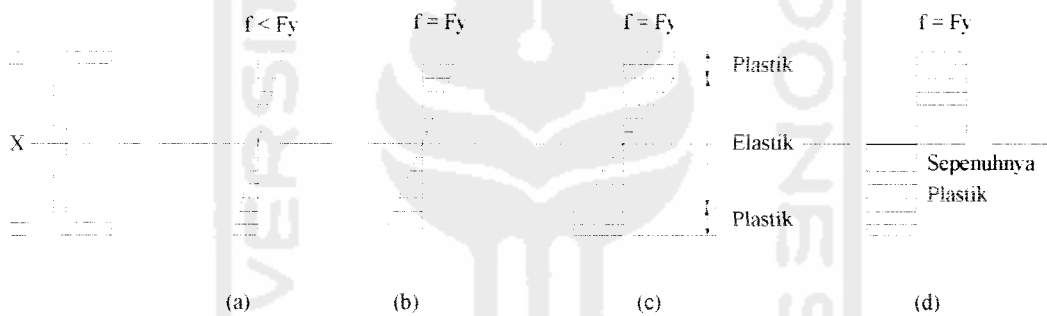


## BAB III

### LANDASAN TEORI

#### 3.1 Kekuatan Lentur Balok Profil I

Kekuatan lentur balok profil I ditentukan oleh tegangan yang terjadi pada serat terluar balok tersebut akibat pembebanan. Distribusi tegangan serat terluar pada berbagai tahap pembebanan dapat dilihat dalam **Gambar 3.1** berikut;



**Gambar 3.1** Distribusi tegangan pada berbagai tahap pembebanan

Pada beban layanan (**Gambar 3.1a**) penampang bersifat elastis. Kondisi elastis akan terjadi sampai tegangan pada serat terluar mencapai tegangan leleh  $F_y$  (**Gambar 3.1b**). Peningkatan beban akan menyebabkan sebagian serat penampang bersifat plastis (**Gambar 3.1c**) hingga seluruh serat penampang bersifat plastis (**Gambar 3.1d**).

Bila tegangan leleh tercapai pada serat terluar penampang (**Gambar 3.1b**), kekuatan momen nominal  $M_n$  disebut sebagai momen leleh  $M_y$  dan dihitung dengan **Persamaan 3.1.1**.

$$M_n = M_y = S_x \cdot F_y \dots\dots\dots 3.1.1$$

dengan  $S_x$  = modulus penampang sumbu x dan  $F_y$  = tegangan leleh baja.

Bila kondisi pada **Gambar 3.1d** tercapai, kekuatan momen nominal disebut sebagai momen plastis  $M_p$  dan dihitung dengan **Persamaan 3.1.2** berikut:

$$M_n = M_p = F_y \int_A Y \cdot dA = F_y \cdot Z_x \dots\dots\dots 3.1.2$$

dengan  $F_y$  = tegangan leleh baja dan  $Z_x$  = modulus penampang plastis sumbu x.

Kekuatan momen nominal maksimum suatu balok adalah berupa momen plastis  $M_p$  dan akan tercapai apabila tidak terjadi tekuk lokal dan tekuk puntir lateral pada penampang lintang balok tersebut.

### 3.2 Tekuk Lokal pada Balok Profil I

Tekuk lokal pada balok profil I terdiri dari tekuk lokal elemen pelat sayap dan badan balok. Sebelum membahas masalah tekuk lokal elemen pelat, dibutuhkan persamaan differensial lentur pelat seperti halnya persamaan differensial lentur balok. Pembahasan yang lebih terinci mengenai penurunan persamaan tersebut dapat dilihat pada buku **Struktur Baja, Desain dan Perilaku** karya **Charles G. Salmon dan Johnson E. Johnson Bagian II**. Tegangan unit tekuk elastik pelat dapat dinyatakan sebagai  $F_{cr}$ , dan dihitung menggunakan **Persamaan 3.2.1** berikut:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \dots\dots\dots 3.2.1$$

dengan k adalah;

$$k = \left[ \frac{1}{m} \frac{a}{b} + m \frac{b}{a} \right]^2 \dots\dots\dots 3.2.2$$

Koefisien tekuk  $k$  merupakan fungsi dari jenis tegangan (dalam kasus ini tekanan merata pada dua tepi yang berlawanan), kondisi tumpuan tepi (dalam kasus ini adalah tumpuan sederhana pada keempat tepi), dan rasio  $a/b$  yang muncul secara langsung dalam persamaan tersebut.

Untuk mencegah tekuk lokal pada balok profil I sehingga mampu mencapai tegangan leleh, maka diperlukan syarat sebagai berikut;

$$F_{cr} \geq F_y \dots\dots\dots 3.2.3$$

Jika **Persamaan 3.2.1** disubstitusikan ke dalam **Persamaan 3.2.3** maka diperoleh;

$$\frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \geq F_y \dots\dots\dots 3.2.4$$

**Persamaan 3.2.4** dapat ditulis kembali menjadi **Persamaan 3.2.5** berikut:

$$\frac{b}{t} \geq \frac{\sqrt{k\pi^2 E}}{\sqrt{F_y \cdot 12(1-\mu^2)}} \dots\dots\dots 3.2.5$$

Rasio lebar  $b$  terhadap tebal  $t$  dalam **Persamaan 3.2.5** disebut juga sebagai rasio kelangsingan elemen  $\lambda$ . Rasio kelangsingan elemen  $\lambda$  untuk pelat sayap dihitung dengan **Persamaan 3.2.6** berikut;

$$\lambda = \lambda_s = \frac{b_f}{2t_f} \dots\dots\dots 3.2.6$$

dengan  $b_f$  = lebar sayap (mm) dan  $t_f$  = tebal badan (mm), sedangkan untuk pelat badan dihitung dengan **Persamaan 3.2.7** berikut;

$$\lambda = \lambda_b = \frac{h_c}{t_w} \dots\dots\dots 3.2.7$$

dengan  $h_c$  = tinggi profil (mm) dan  $t_w$  = tebal badan (mm).

Semakin besar rasio kelangsingan elemen  $\lambda$ , maka semakin mudah balok tersebut tertekuk dan kuat lenturnya juga semakin rendah.

Batas rasio kelangsingan elemen  $\lambda$  yang diberikan oleh AISC-LRFD agar balok mampu mencapai tegangan leleh tanpa tekuk lokal adalah rasio kelangsingan elemen  $\lambda_r$  dan dapat diekspresikan sebagai **Persamaan 3.2.8** berikut;

$$\lambda \leq \lambda_r \dots\dots\dots 3.2.8$$

Rasio kelangsingan elemen  $\lambda_r$  untuk pelat sayap dihitung dengan **Persamaan 3.2.9** berikut;

$$\lambda_r = \lambda_{rs} = \frac{370}{\sqrt{(F_y - F_r)}} \dots\dots\dots 3.2.9$$

dengan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa) dan  $F_r$  adalah tegangan sisa baja (70 Mpa), sedangkan untuk pelat badan dihitung dengan **Persamaan 3.2.10** berikut;

$$\lambda_r = \lambda_{rb} = \frac{2550}{\sqrt{F_y}} \dots\dots\dots 3.2.10$$

Batas rasio kelangsingan elemen  $\lambda$  yang diberikan oleh AISC-LRFD agar balok mampu mencapai tegangan plastik tanpa tekuk lokal adalah rasio kelangsingan elemen  $\lambda_p$  dan dapat diekspresikan sebagai **Persamaan 3.2.11** berikut;

$$\lambda \leq \lambda_p \dots\dots\dots 3.2.11$$

Rasio kelangsingan elemen  $\lambda_p$  untuk pelat sayap dihitung dengan **Persamaan 3.2.12** berikut;

$$\lambda_p = \lambda_{ps} = \frac{170}{\sqrt{F_y}} \dots\dots\dots 3.2.12$$

sedangkan untuk pelat badan dihitung dengan **Persamaan 3.2.13**.

$$\lambda_p = \lambda_{pb} = \frac{1680}{\sqrt{F_y}} \dots\dots\dots 3.2.13$$

Berdasarkan rasio kelangsingan elemen, AISC-LRFD membedakan penampang menjadi tiga yang akan diuraikan sebagai berikut.

A. Penampang kompak

Penampang kompak adalah penampang dengan rasio kelangsingan elemen sayap maupun badan balok memenuhi **Persamaan 3.2.14** berikut;

$$\lambda \leq \lambda_p \dots\dots\dots 3.2.14$$

B. Penampang tidak kompak

Penampang tidak kompak adalah penampang dengan rasio kelangsingan elemen sayap maupun badan balok memenuhi **Persamaan 3.2.15** berikut;

$$\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r \dots\dots\dots 3.2.15$$

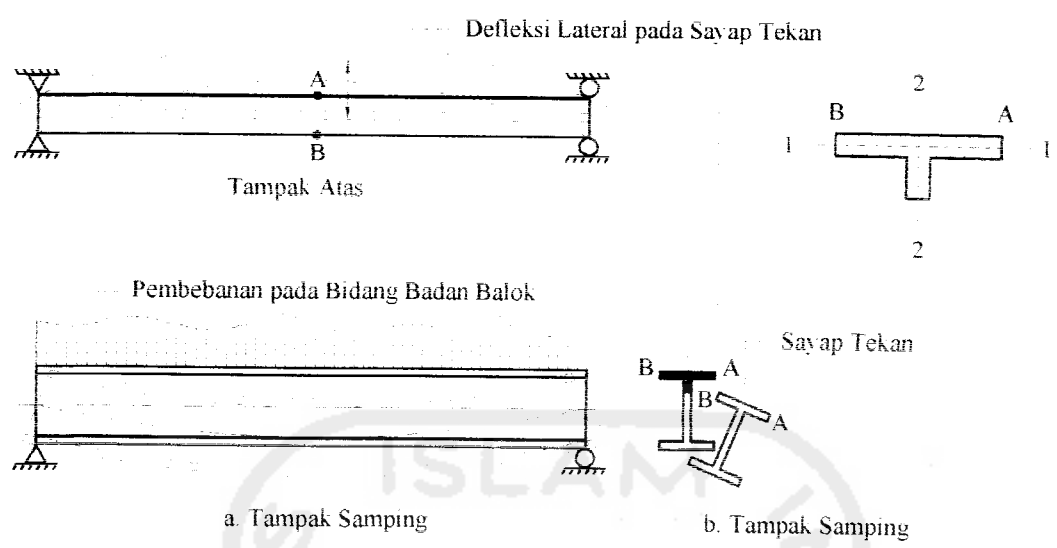
C. Penampang langsing

Penampang langsing adalah penampang dengan rasio kelangsingan elemen sayap maupun badan balok memenuhi **Persamaan 3.2.16** berikut;

$$\lambda_r \leq \lambda \dots\dots\dots 3.2.16$$

### 3.3 Tekuk Puntir Lateral pada Balok Baja profil I

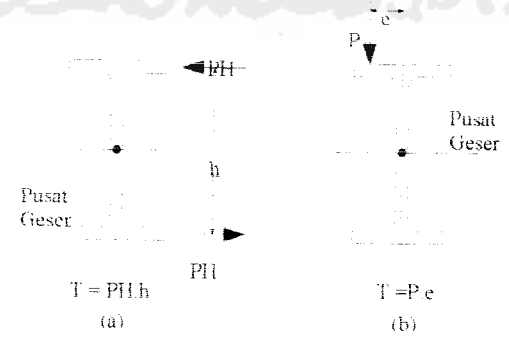
Pembebanan pada bidang badan balok profil I yang tidak berpenumpu lateral (**Gambar 3.3.1a**) biasanya menyebabkan sayap tekan mengalami tekuk pada arah lemahnya yaitu sumbu 1-1 (**Gambar 3.3.1b**), tetapi karena badan balok memberikan tumpuan menerus yang cukup (sehingga tidak terjadi tekuk lokal), maka tekuk sedemikian rupa dapat dicegah.



**Gambar 3.3.1** Balok yang berpenumpu lateral pada ujung-ujungnya saja

Pada beban yang lebih tinggi, sayap tekan tersebut cenderung mengalami tekuk oleh lentur pada sumbu 2-2 (**Gambar 3.3.1b**). Tekuk sayap tekan secara tiba-tiba pada sumbu kuat dalam arah lateral ini disebut sebagai tekuk puntir lateral.

Untuk memahami tekuk puntir lateral pada balok profil I, terlebih dahulu kita pelajari masalah tekuk puntir biasa. Penerapan beban pada balok profil I yang tidak melalui pusat geser akan menyebabkan balok tersebut terpuntir (lihat **Gambar 3.3.2**).



**Gambar 3.3.2** Pembebanan pada balok yang menyebabkan puntir

Puntir dapat dikategorikan menjadi 2, yaitu puntir murni atau (puntir Saint Venant) dan puntir lengkungan (*Warping Torsion*).

### 1. Puntir Murni

Puntir murni mengasumsikan bahwa suatu bidang penampang lintang sebelum dikenai puntiran akan tetap berupa bidang dan hanya rotasi elemen yang terjadi selama puntiran berlangsung. Persamaan momen puntir murni  $M_s$  adalah sebagai berikut :

$$M_s = \frac{d\phi}{dz} G \int_A r^2 dA = G \cdot J \frac{d\phi}{dz} \dots\dots\dots 3.3.1$$

dengan  $G$  adalah modulus elastisitas geser ( $8,1 \times 10^4$  Mpa), dan konstanta puntiran  $J$  dihitung dengan **Persamaan 3.3.2** berikut;

$$J = \int_A r^2 dA \dots\dots\dots 3.3.2$$

Konstanta puntiran  $J$  untuk penampang yang terdiri dari persegi-persegi panjang tipis, disederhanakan menjadi jumlah komponen individual penampang dan dihitung dengan **Persamaan 3.3.3** berikut,

$$J = \sum \frac{1}{3} b \cdot t^3 \dots\dots\dots 3.3.3$$

dengan  $b$  adalah lebar pelat dan  $t$  adalah tebal pelat.

### 2. Puntir Lengkungan (*Warping Torsion*)

Puntir lengkungan adalah efek keluar bidang yang terjadi pada saat sayap balok mengalami perpindahan lateral selama puntiran. Persamaan momen puntir lengkungan  $M_w$  adalah sebagai berikut :

$$M_w = V_r h = -EI_r \left( \frac{h^2}{2} \right) \frac{d^3\phi}{dz^3} = -EC_w \frac{d^3\phi}{dz^3} \dots\dots\dots 3.3.4$$

Konstanta torsi pelengkungan lateral  $C_w$  dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.5** berikut;

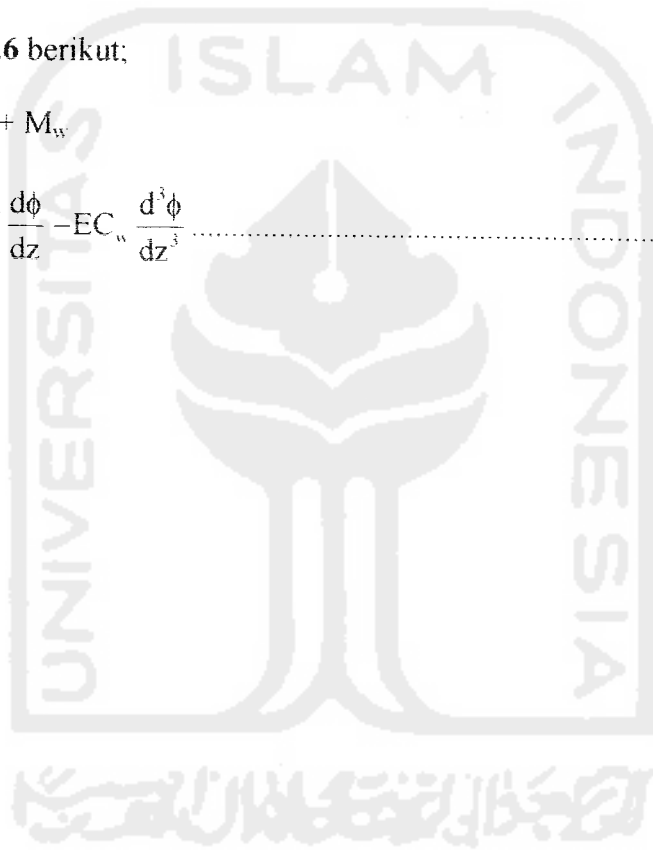
$$C_w = I_f h^2 / 2 \dots\dots\dots 3.3.5$$

dengan  $I_f$  = momen inersia sayap terhadap sumbu y dan  $h$  = lengan momen.

Momen puntir total  $M_z$  balok baja profil I adalah penjumlahan dari momen puntir murni  $M_s$  dengan momen puntir lengkungan lateral  $M_w$  dan ditulis sebagai

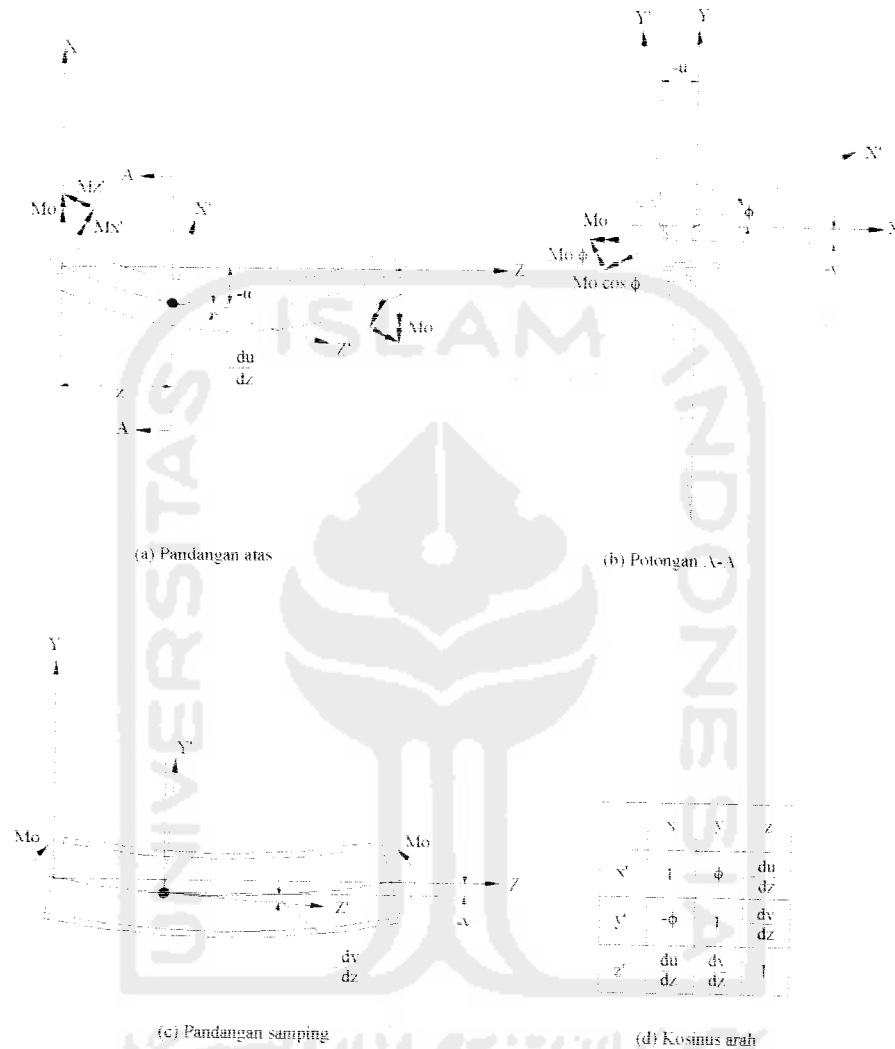
**Persamaan 3.3.6** berikut;

$$\begin{aligned} M_z &= M_s + M_w \\ &= GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3\phi}{dz^3} \dots\dots\dots 3.3.6 \end{aligned}$$





Selanjutnya untuk memahami tekuk puntir lateral, tinjaulah suatu balok profil I dalam posisi tertekuk dalam **Gambar 3.3.3** berikut;



**Gambar 3.3.3** Balok profil I dalam posisi sedikit tertekuk

Momen  $M_0$  yang bekerja pada bidang  $yz$  akan meningkatkan komponen momen  $M_{x'}$ ,  $M_{y'}$ , dan  $M_{z'}$  masing-masing menurut sumbu  $x'$ ,  $y'$ , dan  $z'$  (**Gambar 3.3.3**). Ini berarti akan terdapat lengkungan lentur baik pada bidang  $x'z'$  maupun  $y'z'$  serta lengkungan puntir menurut sumbu  $z'$ . Dengan asumsi deformasi kecil dan

kosinus arah antara sumbu-sumbu  $y'$ - dan  $y$ -, serta  $z'$ - dan  $z$  adalah 1 maka lentur pada bidang  $y'z'$  dapat ditulis sebagai **Persamaan 3.3.7** berikut;

$$EI_{y'} \frac{d^2 v}{dz^2} = M_{y'} = M_0 \dots\dots\dots 3.3.7$$

dengan  $v$  adalah perpindahan garis netral pada arah  $y$  (**Gambar 3.3.3b**)

Sedangkan lentur pada bidang  $x'z'$  dapat ditulis sebagai **Persamaan 3.3.8** berikut;

$$EI_{y'} \frac{d^2 u}{dz^2} = M_{y'} = M_0 \phi \dots\dots\dots 3.3.8$$

dengan  $u$  adalah perpindahan garis netral pada arah  $x$  (**Gambar 3.3.3c**)

Persamaan differensial untuk puntir balok profil I telah dibahas sebelumnya (**Persamaan 3.3.6**) dan ditulis kembali sebagai **Persamaan 3.3.9** berikut;

$$M_z' = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \dots\dots\dots 3.3.9$$

Komponen momen puntir  $M_z$  ketika balok sedikit tertekuk adalah sebanding dengan putaran sudut balok dalam bidang  $xz$  (**Gambar 3.3.3**) dan ditulis sebagai **Persamaan 3.3.10** berikut;

$$M_z' = -\frac{du}{dz} M_0 \dots\dots\dots 3.3.10$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan 3.3.10** ke dalam **Persamaan 3.3.9**, maka diperoleh **Persamaan 3.3.11** berikut;

$$-\frac{du}{dz} M_0 = GJ \frac{d\phi}{dz} - EC_w \frac{d^3 \phi}{dz^3} \dots\dots\dots 3.3.11$$

Dengan mengasumsikan bahwa sifat-sifat  $I_{x'}$  dan  $I_{y'}$  adalah sama dengan  $I_x$  dan  $I_y$  serta  $I_x$  adalah besar bila dibandingkan dengan  $I_y$  maka **Persamaan 3.3.6** tidak

terkait dengan **Persamaan 3.3.7** dan **Persamaan 3.3.11**. Sehingga displasemen  $v$  dalam bidang lentur tidak mempengaruhi fungsi puntir  $\phi$ .

Bila **Persamaan 3.3.11** didiferensialkan terhadap  $z$ , maka akan diperoleh **Persamaan 3.3.12** sebagai berikut:

$$-\frac{d^2 u}{dz^2} \cdot M_0 = GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} \dots\dots\dots 3.3.12$$

Dari **Persamaan 3.3.12** diatas dapat ditulis kembali menjadi **Persamaan 3.3.13** berikut:

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{M_0 \phi}{EI_y} \dots\dots\dots 3.3.13$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan 3.3.13** ke dalam **Persamaan 3.3.12**, maka diperoleh **Persamaan 3.3.14** berikut:

$$EC_w \frac{d^4 \phi}{dz^4} - GJ \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \frac{M_0^2}{EI_y} \phi = 0 \dots\dots\dots 3.3.14$$

Untuk mendapatkan suatu penyelesaian maka **Persamaan 3.3.14** kita bagi dengan  $EC_w$  sehingga menjadi **Persamaan 3.3.15** berikut:

$$\frac{d^4 \phi}{dz^4} - 2\alpha \frac{d^2 \phi}{dz^2} - \beta \phi = 0 \dots\dots\dots 3.3.15$$

Dengan  $2\alpha$  dan  $\beta$  dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.16** dan **3.3.17** berikut:

$$2\alpha = \frac{GJ}{EC_w} \dots\dots\dots 3.3.16$$

$$\beta = \frac{M_0^2}{E^2 C_w I_y} \dots\dots\dots 3.3.17$$

Misalkan :

$$\phi = Ae^{mz} \dots\dots\dots 3.3.18$$

$$\frac{d^2\phi}{dz^2} = Am^2e^{mz} \dots\dots\dots 3.3.19$$

$$\frac{d^4\phi}{dz^4} = Am^4e^{mz} \dots\dots\dots 3.3.20$$

Dengan mensubstitusikan **Persamaan 3.3.18** s/d **3.3.20** ke dalam **Persamaan 3.3.15**, maka diperoleh **Persamaan 3.3.21** berikut;

$$Ae^{mz}(m^4 - 2\alpha m^2 - \beta) = 0 \dots\dots\dots 3.3.21$$

Karena  $e^{mz}$  tidak dapat sama dengan nol dan A dapat sama dengan nol hanya bila tekuk belum terjadi, ekspresi yang ada dalam kurung pada **Persamaan 3.3.21** harus sama dengan nol, yaitu;

$$m^4 - 2\alpha m^2 - \beta = 0 \dots\dots\dots 3.3.22$$

Penyelesaian **Persamaan 3.3.22** adalah sebagai berikut;

$$m^2 = \alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \dots\dots\dots 3.3.23$$

atau dapat ditulis kembali menjadi **Persamaan 3.3.24** berikut;

$$m = \pm \sqrt{\alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2}} \dots\dots\dots 3.3.24$$

Konstanta m dalam **Persamaan 3.3.24** di atas terdiri dari akar- akar bilangan real dan kompleks, karena;

$$\sqrt{\beta + \alpha^2} > \alpha \dots\dots\dots 3.3.25$$

Misalkan;

$$n^2 = \alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2} \text{ (kedua akar real)} \dots\dots\dots 3.3.26$$

$$q^2 = -\alpha \pm \sqrt{\beta + \alpha^2} \text{ (bagian real dari akar-akar kompleks)} \dots\dots\dots 3.3.27$$

Dengan menggunakan keempat nilai untuk  $m$ , ekspresi untuk  $\phi$  dari

**Persamaan 3.3.18 s/d 3.3.20** menjadi:

$$\phi = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 e^{iqz} + A_4 e^{-iqz} \dots\dots\dots 3.3.28$$

Fungsi-fungsi eksponensial dalam **Persamaan 3.3.28** di atas dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi sirkular berikut;

$$e^{iqz} = \cos qz + i \sin qz \dots\dots\dots 3.3.29$$

$$e^{-iqz} = \cos qz - i \sin qz \dots\dots\dots 3.3.30$$

Dengan menggunakan **Persamaan 3.3.29** dan **3.3.30** serta dengan mendefinisikan konstanta-konstanta baru  $A_3$  dan  $A_4$  yang masing-masing sama dengan  $(A_3 + A_4)$  dan  $(A_3 - A_4)$ , maka **Persamaan 3.3.28** menjadi;

$$\phi = A_1 e^{nz} + A_2 e^{-nz} + A_3 \cos qz + A_4 \sin qz \dots\dots\dots 3.3.31$$

Konstanta  $A_1$  dan  $A_4$  ditentukan oleh kondisi ujung. Untuk kasus tumpuan sederhana puntir, yakni ujung-ujung balok mungkin tidak terpilin tetapi bebas melengkung secara lateral (*warping*), kondisi batasnya adalah;

$$\phi = 0, \quad \frac{d^2\phi}{dz^2} = 0 \quad \text{pada} \quad z = 0 \quad \text{dan} \quad z = L \dots\dots\dots 3.3.32$$

Untuk  $\phi = 0$  pada  $z = 0$ , **Persamaan 3.3.31** memberikan;

$$0 = A_1 + A_2 + A_3 \dots\dots\dots 3.3.33$$

Sedangkan untuk  $d^2\phi/dz^2 = 0$  pada  $z = 0$  adalah;

$$0 = A_1 n^2 + A_2 n^2 - A_3 q^2 \dots\dots\dots 3.3.34$$

Dengan mengalikan **Persamaan 3.3.33** dengan  $n^2$ , kemudian mengurangnya dengan **Persamaan 3.3.34**, maka diperoleh **Persamaan 3.3.35** berikut:

$$0 = A_3(q^2 + n^2), \quad A_3 = 0 \dots\dots\dots 3.3.35$$

Jika **Persamaan 3.3.35** disubstitusikan ke dalam **Persamaan 3.3.33**, maka akan diperoleh;

$$A_1 = -A_2 \dots\dots\dots 3.3.36$$

Sehingga **Persamaan 3.3.31** menjadi:

$$\phi = A_1(e^{nz} - e^{-nz}) + A_4 \sin qz \dots\dots\dots 3.3.37$$

**Persamaan 3.3.37** dapat ditulis kembali menjadi **Persamaan 3.3.38** berikut:

$$\phi = 2A_1 \sinh nz + A_4 \sin qz \dots\dots\dots 3.3.38$$

Karena pada  $z = L$ ,  $\phi = 0$ , **Persamaan 3.3.38** memberikan:

$$0 = 2A_1 \sinh nL + A_4 \sin qL \dots\dots\dots 3.3.39$$

Sedangkan pada  $z = L$ ,  $\phi = 0$ , **Persamaan 3.3.38** memberikan:

$$0 = 2A_1 n^2 \sinh nL - A_4 q^2 \sin qL \dots\dots\dots 3.3.40$$

Dengan mengalikan **Persamaan 3.3.39** dengan  $q^2$  dan menambakkannya ke dalam **Persamaan 3.3.40**, maka diperoleh;

$$2A_1(n^2 + q^2)\sinh nL = 0 \dots\dots\dots 3.3.41$$

Karena  $(n^2 + q^2)$  tidak dapat sama dengan nol, dan  $\sinh nL$  dapat sama dengan nol hanya bila  $n = 0$ , maka  $A_1$  harus sama dengan nol;

$$A_1 = -A_2 = 0 \dots\dots\dots 3.3.42$$

Sehingga **Persamaan 3.3.38** menjadi **Persamaan 3.4.43**.

$$\phi = A_4 \sin qL = 0 \dots\dots\dots 3.3.43$$

Bila terjadi tekuk puntir lateral,  $A_4$  tidak sama dengan nol, sehingga :

$$\sin qL = 0 \dots\dots\dots 3.3.44$$

$$qL = N\pi \dots\dots\dots 3.3.45$$

dengan  $N$  adalah bilangan bulat sembarang.

Kondisi tekuk elastis didefinisikan sebagai:

$$q = \frac{N\pi}{L} \dots\dots\dots 3.3.46$$

Untuk pola tekuk dasar,  $N = 1$ .

Nilai  $M_0$  yang memenuhi **Persamaan 3.3.46** disebut sebagai momen kritis, yaitu pada;

$$q = \sqrt{-\alpha + \sqrt{\beta + \alpha^2}} = \frac{\pi}{L} \dots\dots\dots 3.3.47$$

Jika konstanta  $\alpha$  dan  $\beta$  (dari **Persamaan 3.3.16** dan **3.3.17**) disubstitusikan ke dalam **Persamaan 3.3.47**, kemudian kedua ruas dikuadratkan, maka diperoleh **Persamaan 3.3.48** berikut;

$$-\frac{GJ}{2EC_w} + \sqrt{\frac{M_0^2}{E^2C_wI_y} + \left[\frac{GJ}{2EC_w}\right]^2} = \frac{\pi^2}{L^2} \dots\dots\dots 3.3.48$$

Penyelesaian untuk  $M_0 = M_{cr}$  memberikan;

$$M_{cr}^2 = E^2C_wI_y \left[ \left( \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{GJ}{2EC_w} \right)^2 - \left( \frac{GJ}{2EC_w} \right)^2 \right] \dots\dots\dots 3.3.49$$

**Persamaan 3.3.49** dapat ditulis kembali sebagai **Persamaan 3.3.50**.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 C_w I_y + EI_y GJ} \dots\dots\dots 3.3.50$$

**Persamaan 3.3.50** merupakan kekuatan tekuk puntir lateral elastis untuk balok profil I yang terkena momen seragam pada bidang badan balok dengan panjang tak berpenopang lateral L.

Untuk balok profil I yang terkena variasi momen, **Persamaan 3.3.50** di atas dikalikan dengan suatu faktor gradien momen  $C_b$  yang dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.51** berikut;

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{(2,5 M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C)} \leq 2,3 \dots\dots\dots 3.3.51$$

dengan  $M_{max}$  = momen maksimum pada bentang yang ditinjau,  $M_A$  = momen pada  $\frac{1}{4}$  bentang,  $M_B$  = momen pada tengah bentang, dan  $M_C$  = momen pada  $\frac{3}{4}$  bentang.

Sehingga kekuatan tekuk puntir lateral elastis untuk balok dengan variasi momen dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.52** berikut;

$$M_{cr} = C_b \cdot \frac{\pi}{L} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 C_w I_y + EI_y GJ} \dots\dots\dots 3.3.52$$

### 3.4 Desain Balok Baja Profil I yang Mengalami Lenturan Sumbu Kuat berdasarkan AISC-LRFD

Persyaratan kekuatan untuk balok secara umum dinyatakan sebagai berikut;

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \dots\dots\dots 3.4.1$$

dengan  $\phi$  = faktor reduksi kekuatan lentur (0,9),  $M_n$  = kekuatan momen nominal (kNm), dan  $M_u$  = momen beban layan terfaktor (kNm).



### 3.4.1 Kuat Momen Nominal Lentur Balok Profil I dengan Pengaruh Tekuk Lokal

Kuat momen nominal lentur balok profil I dengan pengaruh tekuk lokal ditentukan oleh rasio kelangsingan elemen balok tersebut. Komponen struktur berdasarkan rasio kelangsingan elemen dikategorikan menjadi tiga, yaitu komponen struktur dengan penampang kompak, tidak kompak dan langsing yang akan diuraikan sebagai berikut..

#### A. Penampang kompak

Kuat momen nominal  $M_n$  untuk penampang kompak (memenuhi **Persamaan 3.2.59**) yang secara lateral stabil adalah sebagai berikut:

$$M_n = M_p \\ = Z_x \cdot F_y \dots\dots\dots 3.4.1.1$$

dengan  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm),  $Z_x$  = modulus penampang plastis sumbu X ( $\text{mm}^3$ ), dan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa). Karena balok profil I terdiri dari elemen pelat sayap dan badan balok, maka kuat momen nominal  $M_n$  dalam **Persamaan 3.4.1.1** dapat dibagi menjadi dua yaitu ;

1. Kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat sayap kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.2** berikut:

$$M_n = M_{nsk} = M_p \\ = Z_x \cdot F_y \dots\dots\dots 3.4.1.2$$

dengan  $M_{nsk}$  = kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat sayap kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm),  $Z_x$  = modulus penampang plastis sumbu X ( $\text{mm}^3$ ), dan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa).

2. Kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat badan kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.3** berikut;

$$M_n = M_{nbk} = M_p \\ = Z_x \cdot F_y \dots\dots\dots 3.4.1.3$$

dengan  $M_{nbk}$  = kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat badan kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm),  $Z_x$  = modulus penampang plastis sumbu X ( $\text{mm}^3$ ), dan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa).

B. Penampang tidak kompak

Kuat momen nominal  $M_n$  untuk penampang tidak kompak (memenuhi **Persamaan 3.2.15**) yang secara lateral stabil adalah sebagai berikut;

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left[ \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \dots\dots\dots 3.4.1.4$$

dengan  $M_n$  = kuat momen nominal (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.2** atau **3.4.1.3**,  $\lambda$  = rasio kelangsingan elemen,  $\lambda_p$  = rasio kelangsingan elemen untuk mencapai tegangan plastis, dan  $\lambda_r$  = rasio kelangsingan elemen untuk mencapai tegangan leleh. Konstanta  $M_r$  dalam **Persamaan 3.4.1.4** di atas adalah kekuatan momen yang dipengaruhi oleh tegangan sisa, dan dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5** berikut;

$$M_r = S_x \cdot (F_y - F_r) \dots\dots\dots 3.4.1.5$$

dengan  $S_x$  = modulus penampang sumbu x ( $\text{mm}^3$ ),  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa) dan  $F_r$  = tegangan sisa baja (70 Mpa). Karena balok profil I terdiri

dari elemen pelat sayap dan badan balok, maka kuat momen nominal  $M_n$  dalam **Persamaan 3.4.1.4** dapat dibagi menjadi dua yaitu :

1. Kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat sayap tidak kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.6** berikut;

$$M_n = M_{nstk} \\ = M_p - (M_p - M_r) \left[ \frac{\lambda_s - \lambda_{ps}}{\lambda_{rs} - \lambda_{ps}} \right] \dots\dots\dots 3.4.1.6$$

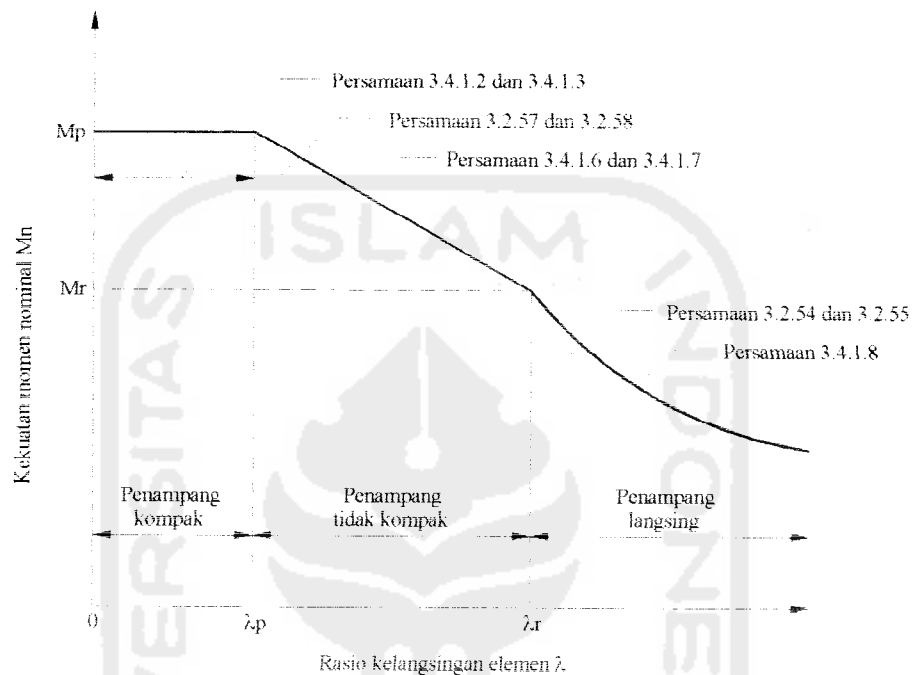
dengan  $M_{nstk}$  = kuat momen nominal untuk pelat sayap tidak kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.2**,  $M_r$  = kuat momen yang dipengaruhi tegangan sisa (kNm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5**, serta  $\lambda_s$ ,  $\lambda_{ps}$ ,  $\lambda_{rs}$  masing-masing secara berurutan dihitung menggunakan **Persamaan 3.2.6, 3.2.12 dan 3.2.9**.

2. Kuat momen nominal untuk pelat badan tidak kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.7** berikut;

$$M_n = M_{nbtk} \\ = M_p - (M_p - M_r) \left[ \frac{\lambda_b - \lambda_{pb}}{\lambda_{rb} - \lambda_{pb}} \right] \dots\dots\dots 3.4.1.7$$

dengan  $M_{nbtk}$  = kuat momen nominal untuk pelat badan tidak kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.3**,  $M_r$  = kuat momen yang dipengaruhi tegangan sisa (kNm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5**, serta  $\lambda_b$ ,  $\lambda_{pb}$ ,  $\lambda_{rb}$

Kuat momen nominal lentur balok profil I dengan pengaruh tekuk lokal yang telah dibahas dalam **Bab 3.4.1** di atas dapat diwakili oleh **Gambar 3.4.1** berikut;



**Gambar 3.4.1** Kekuatan momen nominal  $M_n$  berdasarkan tekuk lokal

### 3.4.2 Kuat Momen Nominal Lentur balok profil I dengan Pengaruh Tekuk Puntir Lateral

Kuat momen nominal lentur balok profil I dengan pengaruh tekuk puntir lateral ditentukan oleh jarak tumpuan lateral balok tersebut. Komponen struktur berdasarkan jarak tumpuan lateral dikategorikan menjadi tiga, yaitu komponen struktur bentang pendek, bentang menengah dan bentang panjang yang akan diuraikan sebagai berikut.

#### A. Bentang pendek

Komponen struktur bentang pendek adalah komponen struktur yang memenuhi **Persamaan 3.4.2.1**.

Jarak tumpuan lateral  $L_b \leq L_p$  ..... 3.4.2.1

Batas jarak tumpuan lateral  $L_p$  diperoleh dari hasil hitungan kekuatan momen plastis  $M_p$  yang disamakan dengan kekuatan momen tekuk puntir lateral elastis  $M_{cr}$  dan dinyatakan sebagai berikut;

$$L_p = 1,76 \cdot r_y \sqrt{(E/F_y)} \dots\dots\dots 3.4.2.2$$

dengan  $L_p$  = jarak tumpuan lateral untuk mencapai tegangan plastis (mm),  $r_y$  = jari-jari inersia untuk sumbu y (mm),  $E$  = modulus elastisitas baja ( $2,1 \times 10^5$  Mpa) dan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa). Kuat momen nominal  $M_n$  untuk komponen struktur bentang pendek adalah sebagai berikut;

$$\begin{aligned} M_n &= M_{npk} \\ &= M_p \\ &= Z_x \cdot F_y \dots\dots\dots 3.4.2.3 \end{aligned}$$

dengan  $M_{npk}$  = kuat momen nominal untuk komponen struktur bentang pendek (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm),  $Z_x$  = modulus penampang plastis sumbu X ( $\text{mm}^3$ ) dan  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa).

#### B. Bentang menengah

Komponen struktur bentang menengah adalah komponen struktur yang memenuhi persamaan berikut;

Jarak tumpuan lateral  $L_p \leq L_b \leq L_r$  ..... 3.4.2.4

dengan  $L_p$  = jarak tumpuan lateral untuk mencapai tegangan plastis (mm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.2.2**,  $L_b$  = jarak topangan lateral (mm) dan  $L_r$  = jarak tumpuan lateral untuk mencapai tegangan leleh (mm),

diperoleh dari hasil hitungan kekuatan momen  $M_r$  yang disamakan dengan kekuatan momen tekuk puntir lateral elastis  $M_{cr}$  dan dinyatakan sebagai berikut:

$$L_r = \frac{r_y \cdot X_1}{(F_y - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}} \dots\dots\dots 3.4.2.5$$

dengan  $r_y$  = jari-jari inersia untuk sumbu y (mm),  $F_y$  = tegangan leleh baja (Mpa),  $F_r$  = tegangan sisa baja (70 Mpa), konstanta  $X_1$  dihitung dengan persamaan berikut;

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} \dots\dots\dots 3.4.2.6$$

dengan  $E$  = modulus elastisitas baja ( $2,1 \times 10^5$  Mpa),  $G$  = modulus elastisitas geser ( $8,1 \times 10^4$  Mpa),  $J$  = konstanta puntir ( $\text{mm}^4$ ) dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.3**,  $A$  = luas penampang ( $\text{mm}^2$ ), dan  $S_x$  = modulus penampang sumbu x ( $\text{mm}^3$ ).

Sedangkan  $X_2$  dihitung dengan persamaan berikut;

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left( \frac{S_x}{GJ} \right)^2 \dots\dots\dots 3.4.2.7$$

dengan  $C_w$  = konstanta torsi pelengkungan lateral ( $\text{mm}^6$ ) dihitung dengan **Persamaan 3.3.5**,  $I_y$  = momen inersia sumbu y ( $\text{mm}^4$ ),  $S_x$  = modulus penampang sumbu x ( $\text{mm}^3$ ),  $G$  = modulus elastisitas geser ( $8,1 \times 10^4$  Mpa) dan  $J$  = konstanta puntir ( $\text{mm}^4$ ) dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.3**.

Kuat momen nominal  $M_n$  untuk komponen struktur bentang menengah dihitung dengan **Persamaan 3.4.2.8**.

$$\begin{aligned}
 M_n &= M_{nm} \\
 &= C_b \left[ M_p - (M_p - M_r) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \dots\dots\dots 3.4.2.8
 \end{aligned}$$

dengan  $M_{nm}$  = kuat momen nominal untuk komponen struktur bentang menengah (kNm),  $C_b$  = faktor gradien momen dihitung dengan **Persamaan 3.3.51**,  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.2.3**,  $M_r$  = kuat momen yang dipengaruhi tegangan sisa (kNm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5**,  $L_b$  = jarak topangan lateral (mm),  $L_p$  = jarak topangan lateral untuk mencapai momen plastis (mm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.2.2**, dan  $L_r$  = jarak topangan lateral untuk mencapai momen leleh (mm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.2.5**.

C. Bentang panjang

Komponen struktur bentang panjang adalah komponen struktur yang memenuhi persamaan berikut;

$$\text{Jarak tumpuan lateral } L_r \leq L_b \dots\dots\dots 3.4.2.9$$

dengan  $L_r$  = jarak topangan lateral untuk mencapai momen leleh (mm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.2.5** dan  $L_b$  = jarak topangan lateral (mm).

Kuat momen nominal  $M_n$  untuk komponen struktur bentang panjang adalah sebagai berikut;

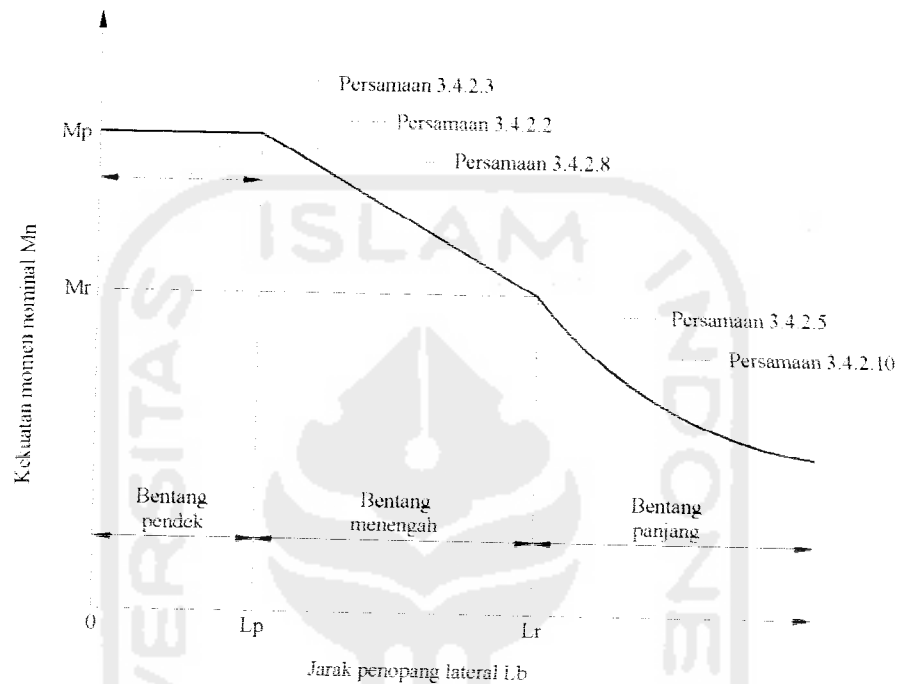
$$\begin{aligned}
 M_n &= M_{npg} \\
 &= M_{cr} \leq M_p
 \end{aligned}$$

$$= \frac{\pi}{L_b} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 C_w I_y + E I_y G J} \leq M_p \dots\dots\dots 3.4.2.10$$

dengan  $M_{npe}$  = kuat momen nominal untuk komponen struktur bentang panjang (kNm),  $M_{cr}$  = kuat momen tekuk puntir lateral elastis (kNm),  $L_b$  = jarak tumpuan lateral (mm),  $E$  = modulus elastisitas baja ( $2,1 \times 10^5$  Mpa),  $C_w$  = konstanta torsi pelengkungan lateral ( $\text{mm}^6$ ) dihitung dengan **Persamaan 3.3.5**,  $I_y$  = momen inersia sumbu y ( $\text{mm}^4$ ),  $G$  = modulus elastisitas geser ( $8,1 \times 10^4$  Mpa),  $J$  = konstanta puntir ( $\text{mm}^4$ ) dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.3**, dan  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.2.3**.



Kuat momen nominal lentur balok profil I dengan pengaruh tekuk puntir lateral yang telah dibahas dalam **Bab 3.4.2** di atas dapat diwakili oleh **Gambar 3.4.2** berikut:

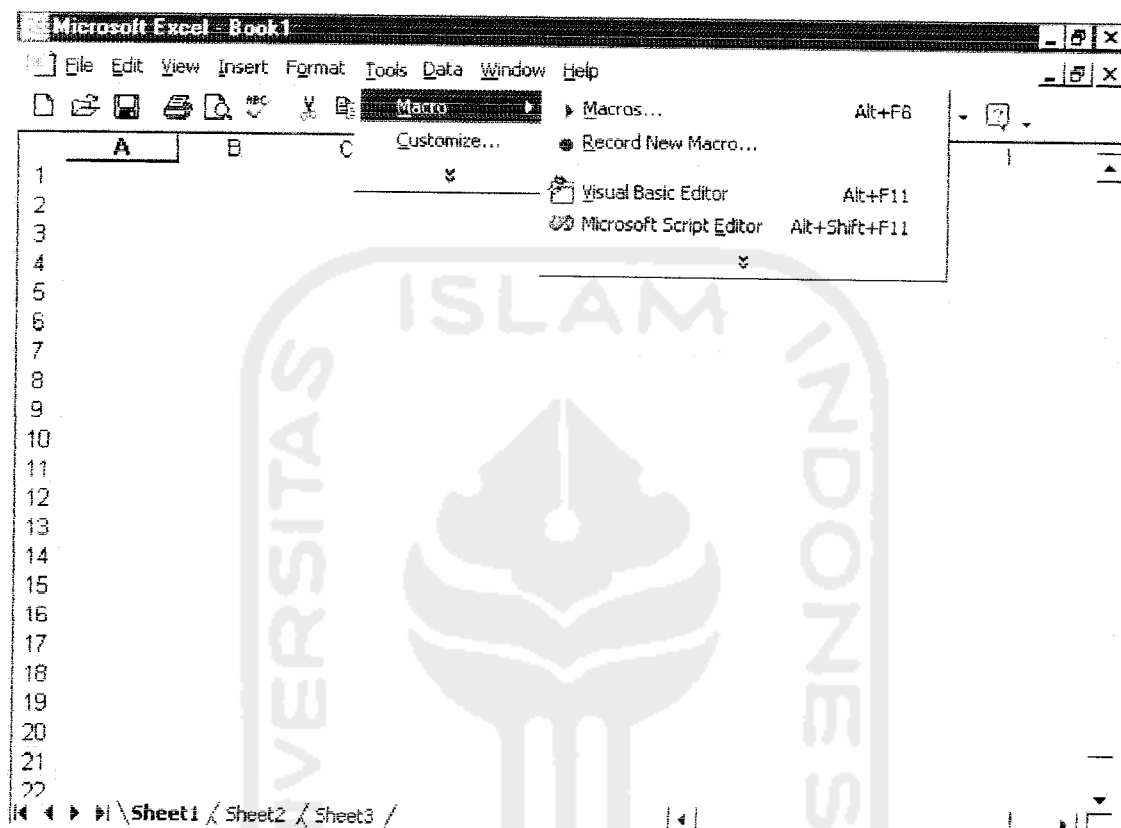


**Gambar 3.4.2** Kekuatan momen nominal  $M_n$  berdasarkan tekuk puntir lateral

### 3.5 Program Macro Excel

Microsoft Excel merupakan suatu program aplikasi yang dapat menganalisis data serta mempresentasikan data tersebut dalam bentuk grafik. Microsoft Excel menyediakan fasilitas *Macro recorder* untuk pembuatan perintah yang belum disediakan Excel. Sehingga dengan adanya fasilitas *Macro recorder*, kita dapat membuat suatu program analisis data yang lebih kompleks dalam bahasa Visual Basic.

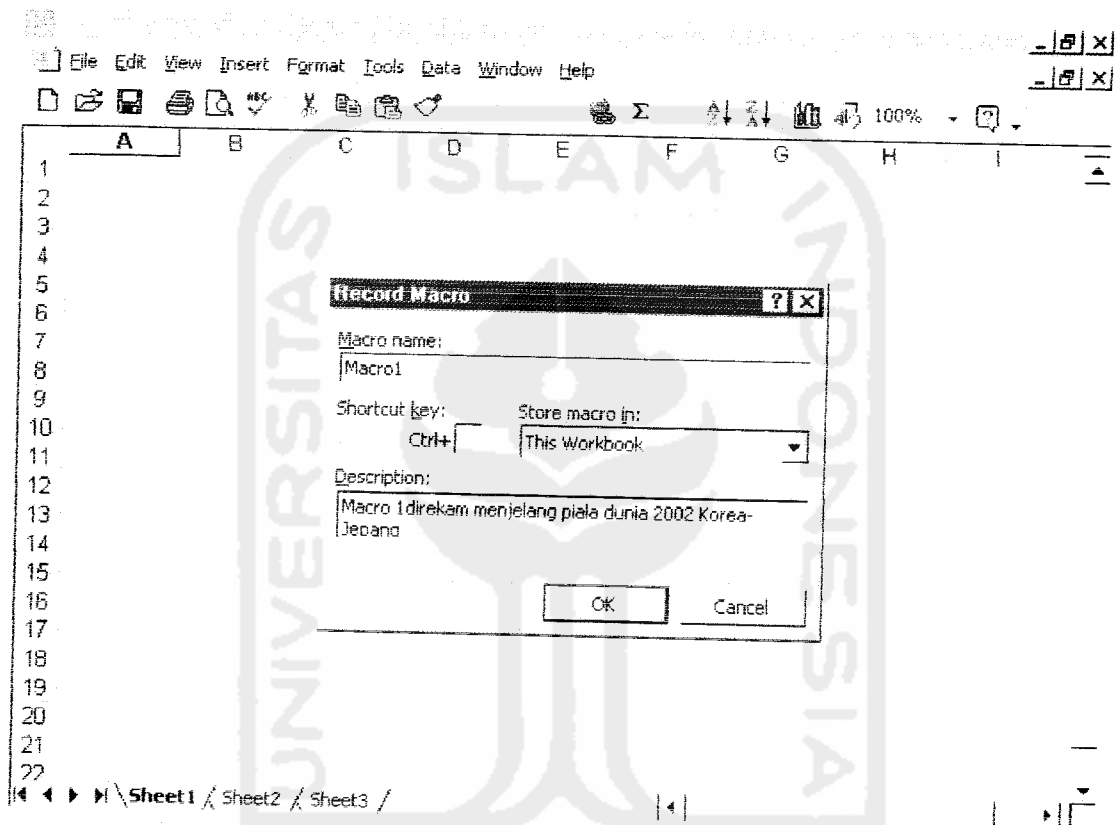
Fasilitas *Macro Recorder* terdapat dalam menu *Tools* pada lembar kerja Excel (lihat **Gambar 3.5.1** berikut);



**Gambar 3.5.1** Fasilitas *Macro Recorder*

### 3.5.1 Mengawali Proses Perekaman

Untuk mengawali proses perekaman, klik sub menu *Record New Macro* dalam menu Tools pada **Gambar 3.5.1** di atas. Tampilan program akan seperti **Gambar 3.5.2** berikut;

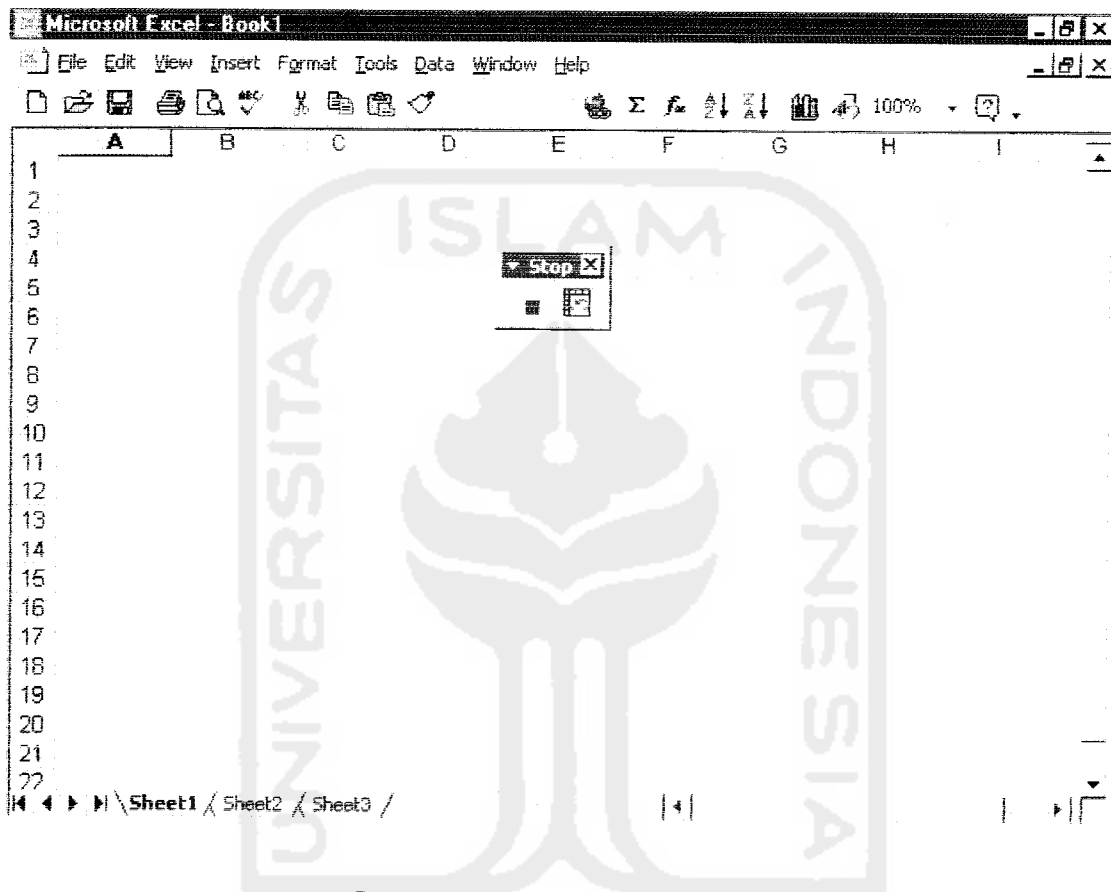


**Gambar 3.5.2** Boks kontrol *Record Macro*

Setelah pengisian dalam boks kontrol *Record Macro* selesai, maka proses perekaman dapat dimulai.

### 3.5.2 Mengakhiri Proses Perekaman

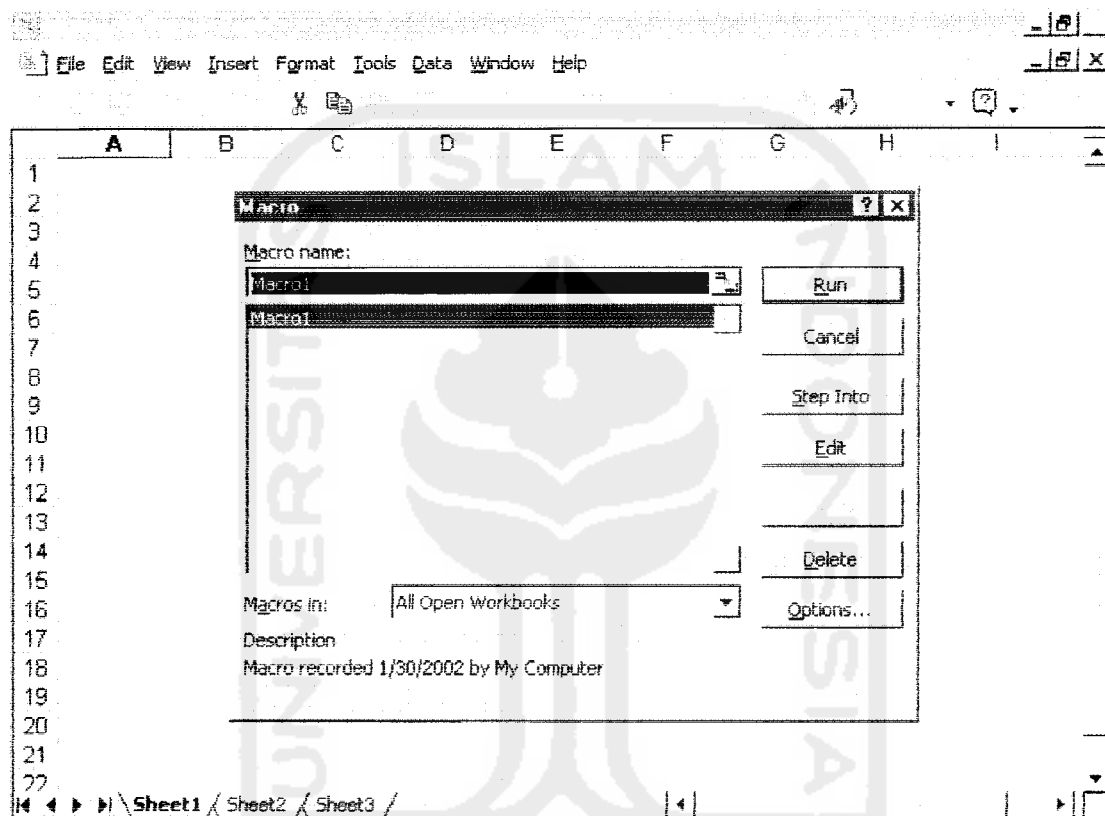
Untuk mengakhiri proses perekaman, klik tombol *Stop Recording* dalam boks kontrol *Stop* (lihat **Gambar 3.5.3** berikut):



**Gambar 3.5.3** Boks kontrol *Stop*

### 3.5.3 Menjalankan Perintah *Macro Recording*

Untuk menjalankan proses perekaman yang telah dibuat, klik sub menu *Macros* dalam menu *Macro* pada **Gambar 3.5.1** di atas. Tampilan program akan menjadi seperti **Gambar 3.5.4** berikut;



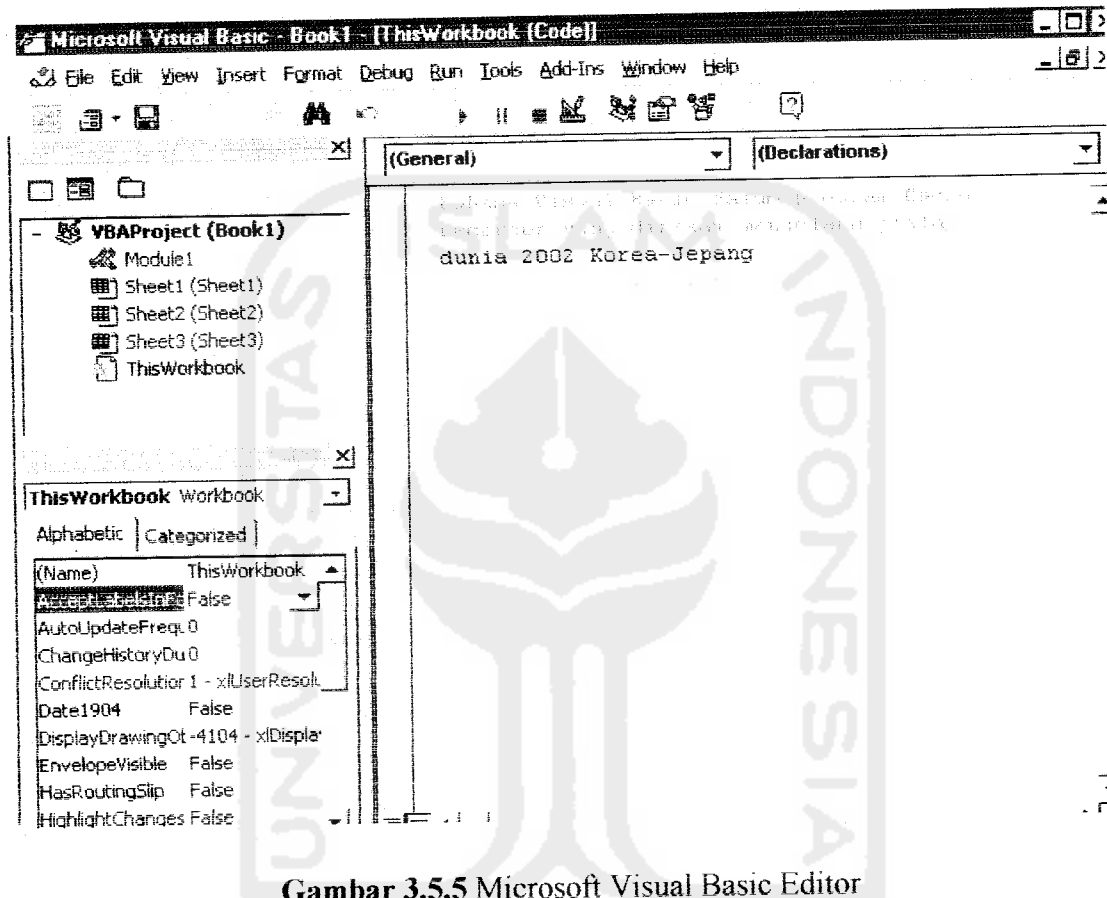
**Gambar 3.5.4** Boks kontrol *Macro*

Perekaman yang telah dibuat dapat dijalankan setelah pengisian boks kontrol *Macro* selesai, dengan mengklik tombol *Run* dalam boks kontrol *Macro* tersebut.

### 3.5.4 Menelusuri Bahasa *Visual Basic* yang digunakan dalam Program *Macro Recorder*

Untuk menelusuri bahasa *Visual Basic* yang digunakan dalam program *Macro Recorder*, klik sub menu *Visual Basic Editor* dalam menu *Macro* pada

**Gambar 3.5.1** di atas, kemudian klik tombol *View Code* pada boks kontrol *Project-VBA Project* yang berada di sebelah kiri layar. Tampilan program akan menjadi seperti **Gambar 3.5.5** berikut:



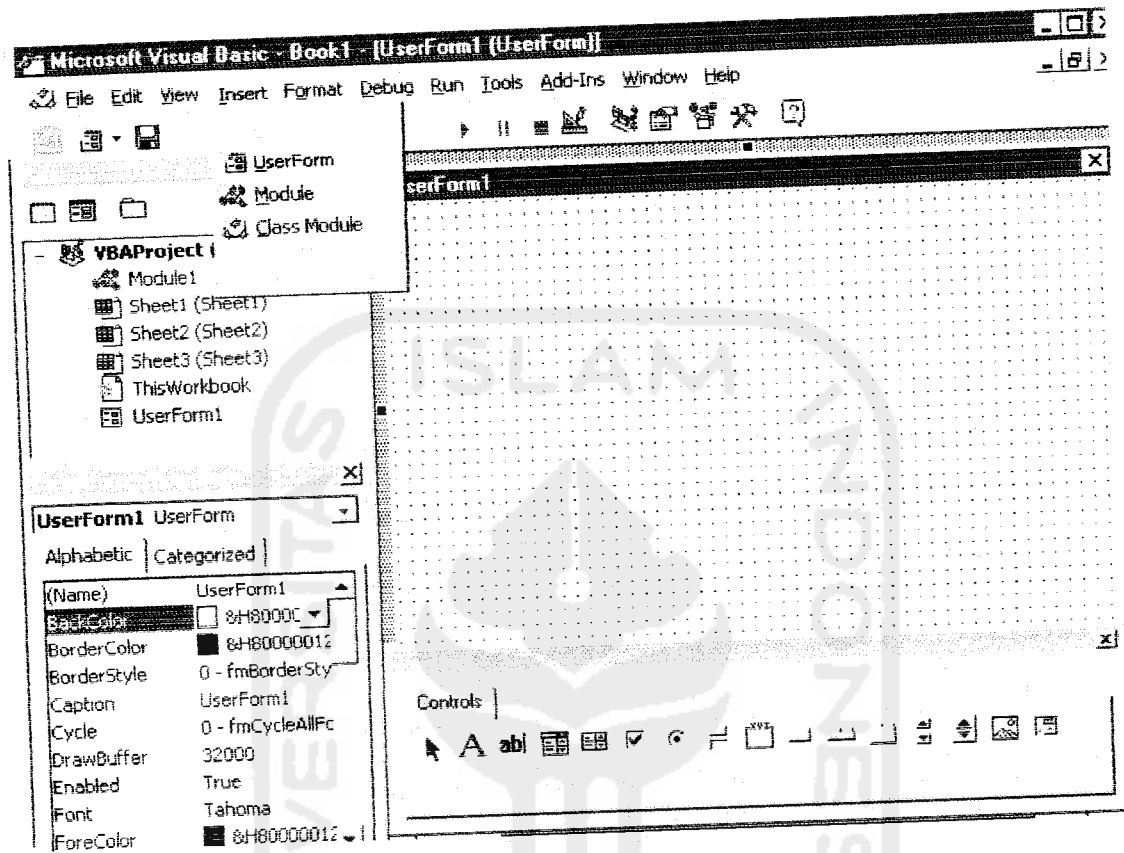
**Gambar 3.5.5** Microsoft Visual Basic Editor

Visual Basic Editor juga dapat digunakan untuk menulis pernyataan dalam bahasa Visual Basic secara manual, selain dengan fasilitas *Macro Recorder* tersebut.

### 3.5.5 Membuat Tampilan Program

Program yang telah dibuat dengan memanfaatkan fasilitas *Macro Excel* dapat ditampilkan secara menarik dan komunikatif. Untuk membuat tampilan program, klik sub menu *UserForm* dalam menu *Insert* pada **Gambar 3.5.5** di atas.

Tampilan program menjadi seperti **Gambar 3.5.6**.



**Gambar 3.5.6** Sub menu *UserForm*

Tampilan yang dibuat dengan sub menu *UserForm* selain dapat diisi dengan boks kontrol (lihat **Gambar 3.5.6** sebelah kanan bawah) juga dapat diisi gambar dari aplikasi lain, sehingga tampilan program menjadi semakin menarik.

dari elemen pelat sayap dan badan balok, maka kuat momen nominal  $M_n$  dalam **Persamaan 3.4.1.4** dapat dibagi menjadi dua yaitu :

1. Kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat sayap tidak kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.6** berikut;

$$M_n = M_{nstk} \\ = M_p - (M_p - M_r) \left[ \frac{\lambda_s - \lambda_{ps}}{\lambda_{rs} - \lambda_{ps}} \right] \dots\dots\dots 3.4.1.6$$

dengan  $M_{nstk}$  = kuat momen nominal untuk pelat sayap tidak kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.2**,  $M_r$  = kuat momen yang dipengaruhi tegangan sisa (kNm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5**, serta  $\lambda_s$ ,  $\lambda_{ps}$ ,  $\lambda_{rs}$  masing-masing secara berurutan dihitung menggunakan **Persamaan 3.2.6, 3.2.12 dan 3.2.9**.

2. Kuat momen nominal untuk pelat badan tidak kompak, dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.7** berikut;

$$M_n = M_{nbt} \\ = M_p - (M_p - M_r) \left[ \frac{\lambda_b - \lambda_{pb}}{\lambda_{rb} - \lambda_{pb}} \right] \dots\dots\dots 3.4.1.7$$

dengan  $M_{nbt}$  = kuat momen nominal untuk pelat badan tidak kompak (kNm),  $M_p$  = kuat momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.3**,  $M_r$  = kuat momen yang dipengaruhi tegangan sisa (kNm) dihitung dengan **Persamaan 3.4.1.5**, serta  $\lambda_b$ ,  $\lambda_{pb}$ ,  $\lambda_{rb}$



masing-masing secara berurutan dihitung menggunakan **Persamaan 3.2.7, 3.2.13 dan 3.2.10.**

### C. Penampang Langsing

Kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat sayap langsing (memenuhi **Persamaan 3.2.16**) yang secara lateral stabil adalah sebagai berikut;

$$\begin{aligned} M_n &= M_{nsl} \\ &= M_{cr} \leq M_p \\ &= \frac{\pi}{L_b} \sqrt{\left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 C_w I_y + E I_y G J} \leq M_p \dots\dots\dots 3.4.1.8 \end{aligned}$$

dengan  $M_{nsl}$  = kuat momen nominal untuk pelat sayap langsing (kNm),  $M_{cr}$  = kuat momen tekuk puntir lateral elastis (kNm),  $L_b$  = jarak tumpuan lateral (mm),  $E$  = modulus elastisitas baja ( $2,1 \times 10^5$  Mpa),  $C_w$  = konstanta torsi pelengkungan lateral ( $\text{mm}^6$ ) dihitung dengan **Persamaan 3.3.5**,  $I_y$  = momen inersia sumbu y ( $\text{mm}^4$ ),  $G$  = modulus elastisitas geser ( $8,1 \times 10^4$  Mpa),  $J$  = konstanta puntir ( $\text{mm}^4$ ) dihitung menggunakan **Persamaan 3.3.3**, dan  $M_p$  = kekuatan momen plastis (kNm) dihitung menggunakan **Persamaan 3.4.1.2.**

Sedangkan kuat momen nominal  $M_n$  untuk pelat badan langsing (memenuhi **Persamaan 3.2.16**) dihitung sesuai dengan ketentuan untuk gelagar.