

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Struktur Baja

##### 2.1.1 Material Baja

*Carbon Steel* adalah baja yang terdiri dari elemen – elemen yang persentase maksimum selain bajanya 70% Carbon, 65% Manganase, 60% Silicon, dan 60% Copper. Carbon dan Manganase adalah bahan pokok untuk meninggikan tegangan (*strength*) dari baja murni. (Ir. Oentoeng, 2013). Penambahan persentase Carbon akan mempertinggi *Yield Stress* tetapi akan mengurangi daktilitas (*ductility*). Pengurangan daktilitas akan menambah masalah pada pengelasan. Pengelesan akan ekonomi bila baja mengandung Carbon tidak lebih dari 0,30%. Material baja juga memiliki karakteristik sebagai berikut.

1. Modulus elastisitas baja struktur ( $E_s$ )  $= 2 \times 10^5$  MPa
2. Modulus geser  $= 80.000$  MPa
3. Batas tegangan leleh baja struktur untuk perencanaan ( $F_y$ ) dapat mengacu pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Baja Struktural

Macam Baja	Tegangan Batas ( $F_u$ )		Tegangan Leleh ( $F_y$ )		Peregangan Minimum
	Kg/cm <sup>2</sup>	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	Mpa	(%)
BJ 34	3400	340	2100	210	22
BJ 37	3700	370	2400	240	20
BJ 41	4100	410	2500	250	18
BJ 50	5000	500	2900	290	16
BJ 55	5500	550	4100	410	13

4. Tegangan putus untuk perencanaan ( $F_u$ ) tidak boleh melebihi nilai pada tabel diatas.

##### 2.1.2 Desain Kekuatan Berdasarkan Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBT)

Berdasarkan SNI 1729 : 2020. Berdasarkan SNI 1729 : 2020. Desain harus sedemikian rupa sehingga tidak ada kekuatan atau keadaan batas layan yang berlaku yang terlampaui apabila struktur mengalami semua kombinasi beban yang berlaku.

Desain yang sesuai dengan ketentuan untuk Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBT) memenuhi persyaratan SNI bila kekuatan desain pada setiap komponen struktur sama atau melebihi kekuatan perlu yang ditentukan berdasarkan kombinasi beban DFBT. Semua ketentuan pada SNI kecuali pada Pasal B3.2, harus digunakan.

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.1)$$

Keterangan :

$R_u$  : Kekuatan perlu menggunakan kombinasi beban DFBT

$R_n$  : Kekuatan nomina

$\phi$  : Faktor ketahanan

$\phi R_n$  : Kekuatan desain

### 2.1.3 Batang Tarik Struktur Baja

Batang tarik banyak dijumpai pada jembatan maupun struktur rangka atap, *tower*, serta sistem pengaku (*bracing*). Batang tarik merupakan elemen batang pada struktur yang menerima gaya tarik aksial murni. Gaya tarik ini dikatakan sentral jika garis gaya berimpit dengan garis berat penampang. (Arifi & Setyowulan, 2021). Pada SNI 1729 : 2020 perencanaan struktur baja yang mengalami gaya tarik diatur dalam Bab D Desain komponen struktur untuk tarik.

#### 2.1.3.1 Pembatasan Kelangsingan

Bagi komponen struktur yang dirancang berdasarkan tarik, berdasarkan SNI 1729 : 2020 sub D1, rasio kelangsingan  $L/r$  direkomendasikan tidak melebihi 300, dimana  $L$  adalah panjang batang yang mengalami tarik, dan  $r$  adalah jari – jari girasi minimum penampang. Namun syarat ini tidak berlaku untuk batang gantung yang mengalami tarik.

#### 2.1.3.2 Tahanan Nominal Tarik

Secara umum, ada tiga jenis kondisi keruntuhan yang mungkin terjadi pada batang tarik, yaitu.

1. Keruntuhan leleh, dimana keruntuhan batang tarik terjadi pada area yang jauh dari sambungan sehingga yang menentukan adalah luas penampang bruto (tanpa pengurangan luas akibat lubang baut).

2. Keruntuhan fraktur, dimana keruntuhan batang tarik terjadi pada area sambungan. Keruntuhan ini ditentukan oleh luas penampang neto akibat adanya pengurangan luas akibat lubang baut pada daerah sambungan.

3. Keruntuhan tarik desain,

Kekuatan tarik desain komponen struktur tarik menggunakan metode LRFD harus nilai terendah keadaan batas dari leleh dan keruntuhan tarik penampang bruto.

$$P_u \leq \phi \phi_t P_n \quad (2.2)$$

Keterangan :

$P_u$  : Gaya Tarik aksial terfaktor (N)

$P_n$  : Tahanan nominal penampang (N)

$\phi_t$  : Faktor tahanan tarik

Besarnya nilai  $\phi_t$  dan  $P_n$  ditentukan sebagai berikut.

1. Untuk leleh tarik pada penampang bruto :

$$P_n = F_y A_g \quad (2.3)$$

Keterangan :

$\phi_t$  : 0,90 (DFBT)

$A_g$  : Luas penampang bruto dari komponen struktur ( $\text{mm}^2$ )

$F_y$  : Tegangan leleh minimum yang disyaratkan (MPa)

3. Untuk keruntuhan tarik pada penampang neto.

$$P_n = F_u A_e \quad (2.4)$$

Keterangan :

$\phi_t$  : 0,75 (DFBT)

$A_e$  : Luas neto efektif ( $\text{mm}^2$ )

$F_u$  : Kekuatan tarik minimum yang disyaratkan (MPa)

### 2.1.3.3 Luas Neto

Keruntuhan fraktur pada batang tarik terjadi pada sambungan. Keruntuhan ini disebabkan oleh berkurangnya luas penampang yang mengalami tarik akibat adanya lubang baut. Lubang pada sambungan batang tarik karena adanya alat sambung berupa baut atau paku keling akan mengurangi luas penampang setelah dikurangi luas lubang baut disebut sebagai luas neto ( $A_g$ ) dari penampang yang mengalami gaya tarik. Luas penampang setelah dikurangi luas lubang baut disebut

sebagai luas neto ( $A_n$ ). Untuk komponen struktur tanpa lubang (contohnya sambungan las) maka  $A_n = A_g$ .

Perhitungan luas penampang neto dipengaruhi oleh konfigurasi lubang baut terhadap potongan melintang penampang. Terdapat dua konfigurasi lubang baut, yaitu.

1. Lubang baut segaris

$$A_n = A_g - n.d.t \quad (2.5)$$

Keterangan :

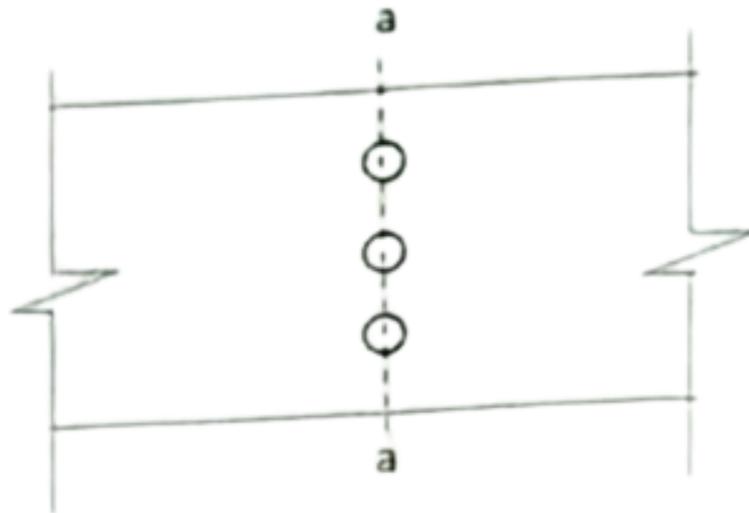
$A_n$  : Luas penampang neto ( $\text{mm}^2$ )

$A_g$  : Luas penampang bruto ( $\text{mm}^2$ )

$n$  : Jumlah baut segaris

$d$  : Diameter lubang baut (mm)

$t$  : Tebal penampang (mm)



Gambar 2.1 Lubang Baut Segaris

2. Baut Tidak Segaris (*Staggered*)

$$A_n = A_g - n.d.t + \sum \frac{s^2 t}{4g} \quad (2.6)$$

Keterangan :

$A_n$  : Luas penampang neto ( $\text{mm}^2$ )

$A_g$  : Luas penampang bruto ( $\text{mm}^2$ )

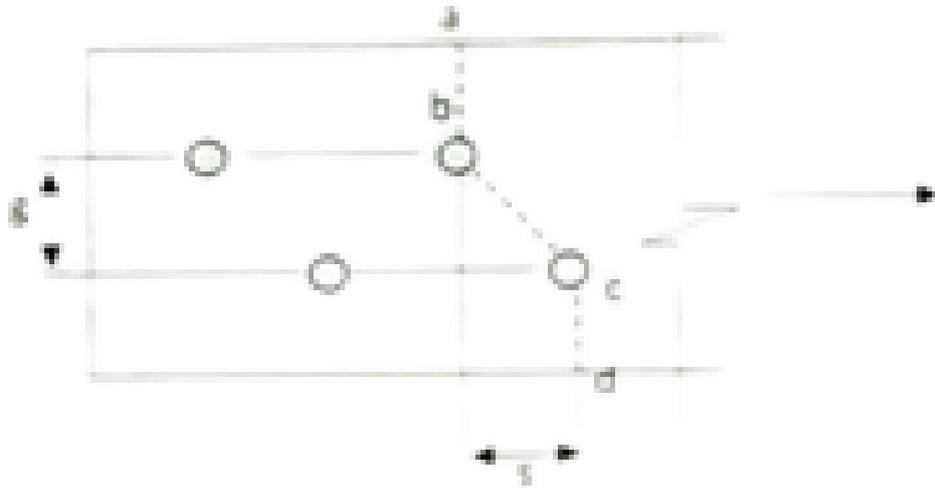
$n$  : Jumlah baut segaris

$d$  : Diameter lubang baut (mm)

$t$  : Tebal penampang (mm)

$s$  : Jarak antar baut dalam arah sejajar gaya (mm)

$g$  : Jarak antar baut dalam arah tegak lurus gaya (mm)



Gambar 2.2 Sambungan Baut Dengan Lubang Baut Tidak Segaris

#### 2.1.3.4 Luas Neto Efektif

Luas neto efektif dari komponen struktur tarik ditentukan sebagai berikut:

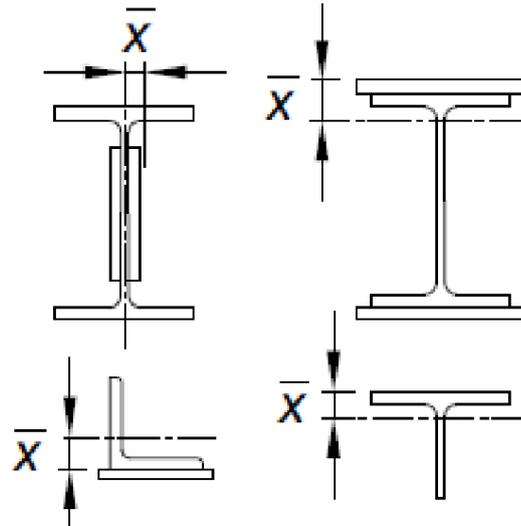
$$A_e = A_n U \quad (2.7)$$

Dengan  $U$  sebagai faktor *shear lag*, ditentukan berdasarkan Tabel D3.1 SNI 1729 : 2020 yang dijelaskan sebagai berikut.

1. Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik disalurkan secara langsung ke setiap dari elemen profil melintang dengan sambungan las (kecuali seperti dalam kasus 4,5,6), maka  $U = 1$
2. Semua komponen struktur tarik kecuali pelat dan profil struktur berongga (PSR), dengan beban tarik disalurkan ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang melalui pengencangan atau las longitudinal dalam kombinasi dengan transversal maka

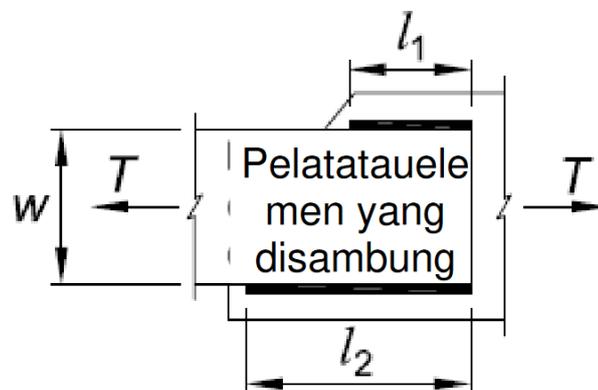
$$U = 1 - \frac{\bar{x}}{l} \quad (2.8)$$

Dengan  $\bar{x}$  adalah eksentrisitas sambungan atau jarak titik berat penampang ke sambungan (mm), dan  $l$  merupakan panjang sambungan (mm).

Gambar 2.3 Penentuan Nilai  $\bar{x}$ 

3. Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik hanya disalurkan melalui las transversal ke beberapa tetapi tidak semua dari elemen profil melintang, maka  $U = 1$ .
4. Pelat siku, kanal, T dan profil WF yang elemennya disambung dengan beban tarik disalurkan hanya melalui las longitudinal maka.

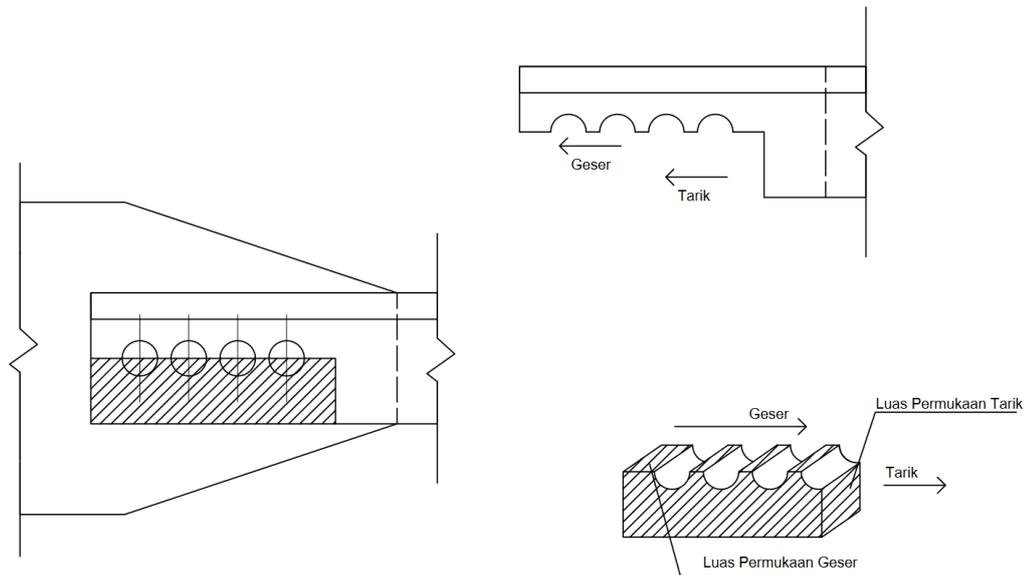
$$U = \frac{3l^2}{3l^2 + w^2} \quad (2.9)$$

Gambar 2.4 Penentuan Nilai  $w$  dan  $l$ 

### 2.1.3.5 Geser Blok (*Block Shear*)

Keruntuhan geser blok merupakan suatu keruntuhan yang mekanisme keruntuhannya merupakan kombinasi geser dan tarik dan melewati lubang – lubang baut pada komponen struktur tarik. Keruntuhan geser blok sering terjadi pada sambungan dengan baut terhadap pelat badan yang tipis pada komponen struktur tarik. Keruntuhan tersebut juga sering dijumpai pada sambungan pendek, yaitu

sambungan yang menggunakan dua baut atau kurang pada garis searah dengan bekerjanya gaya.



Gambar 2.5 Bidang Geser dan Bidang Tarik pada Keruntuhan Geser Blok

Sesuai dengan LRFD berdasarkan SNI 1729 : 2020 maka syarat kekuatan batasnya sama dengan persamaan (2.1). Keruntuhan geser blok merupakan penjumlahan antara tarik leleh (atau tarik fraktur) dengan geser fraktur (atau geser leleh), dengan tahanan nominal ditentukan oleh persamaan berikut.

$$R_n = 0,6 \cdot F_u \cdot A_{nv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \leq 0,6 \cdot F_y \cdot A_{gv} + U_{bs} \cdot F_u \cdot A_{nt} \quad (2.10)$$

Keterangan :

$R_u$  : Gaya tarik aksial terfaktor yang terjadi pada sambungan (N)

$\phi$  : Faktor ketahanan (0,75)

$R_n$  : Kekuatan nominal dari sambunagn (N)

$F_u$  : Kekuatan tarik minimum yang disyaratkan (MPa)

$F_y$  : Tegangan leleh minimum yang disyaratkan (MPa)

$A_{nv}$  : Luas neto elemen yang menahan gaya geser ( $\text{mm}^2$ )

$A_{nt}$  : Luas neto elemen yang menahan gaya geser ( $\text{mm}^2$ )

$A_{gv}$  : Luas bruto elemen yang menahan gaya geser ( $\text{mm}^2$ )

$U_{bs}$  : 1, bila tegangan tarik merata

0,5 bila tehangan tarik tidak merata

Geser blok adalah kegagalan disebabkan karena robeknya pelat pada suatu sambungan yang mengalami gaya tarik, dan bukan keadaan batas leleh (bukan

menyebabkan keruntuhan akibat lelehnya penampang baja). Namun leleh bruto pada bidang geser dapat terjadi Ketika menyobek bidang tarik dimulai jika  $0,6F_u \cdot A_{nv}$  melebihi  $0,6 F_y \cdot A_{gv}$ . Sehingga persamaan (2.10) membatasi  $0,6 F_u \cdot A_{nv}$  untuk tidak melebihi  $0,6 F_y \cdot A_{gv}$ . Persamaan (2.10) konsistensi dengan filosofi untuk batang tarik dimana luas bturo digunakan untuk keadaan batas leleh dan luas neto yang digunakan untuk keadaan batas fraktur.

#### **2.1.4 Batang Tekan Struktur Baja**

Batang tekan digunakan untuk menopang beban tekan sentral pada titik berat penampang pada komponen struktur. Batang tekan banyak digunakan pada struktur rangka batang dan kolom yang hanya menerima gaya aksial tekan. Namun, eksentrisitas yang disebabkan oleh ketidaklurusan batang, pembebanan yang tidak tepat atau kekangan pada tumpuan dapat menyebabkan momen pada batang. Jika momen tersebut kecil, maka prosedur desain batang tekan dapat diaplikasikan. Perencanaan batang tekan berdasar Bab E SNI 1729 : 2020. (Arifi & Setyowulan, 2021).

##### **2.1.4.1 Panjang Efektif**

Panjang efektif dari komponen struktur tekan ( $L_c$ ) digunakan untuk menghitung kelangsingan batang tekan ( $L_c/r$ ). Nilai dan  $L_c$  ditentukan oleh nilai faktor panjang efektif,  $K$ .

Keterangan :

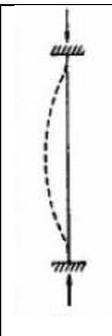
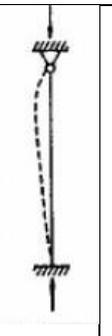
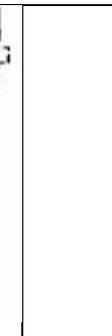
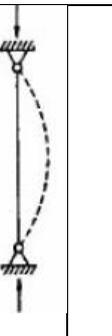
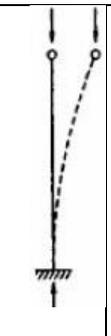
$L_c$  :  $KL$  : panjang efektif batang tekan (mm)

$L$  : Panjang tanpa diberi pengaku lateral dari komponen struktur (mm)

$r$  : Radius girasi (mm)

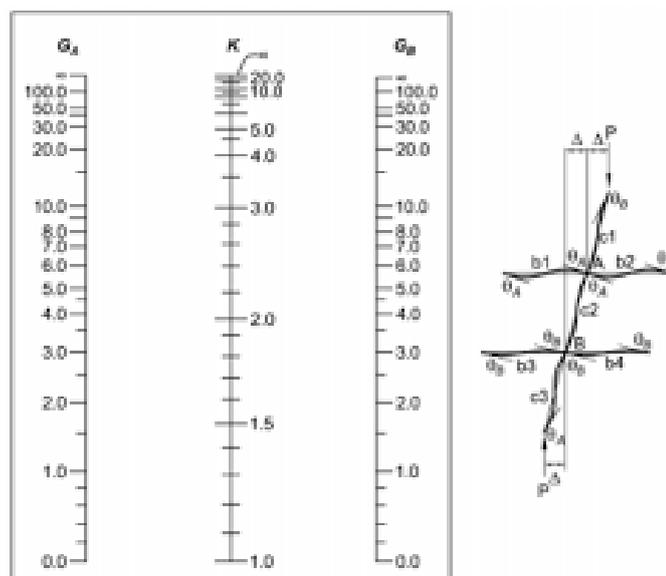
Berdasarkan SNI 1729 : 2020 , untuk komponen struktur yang dirancang berdasarkan tekan, rasio kelangsingan efektif  $KL/r$ , sebaiknya tidak melebihi 200. Nilai faktor panjang efektif atau juga dikenal dengan faktor panjang tekuk,  $K$ , dipengaruhi oleh jenis tumpuan dan panjang batang elemen struktur yang mengalami gaya aksial tekan yang ditunjukkan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Faktor Panjang Efektif atau Faktor Panjang Tekuk (K)

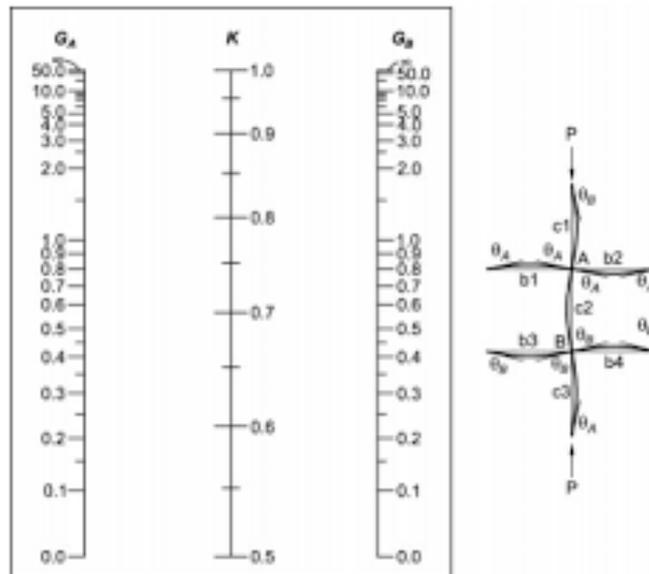
Approximate Values of Effective Length Faktor, K						
Balok tekuk kolom digambarkan dengan garis putus-putus						
K teoritis	0,50	0,70	1,00	1,00	2,00	2,00
K desain	0,65	0,80	1,20	1,00	2,10	2,00
Jenis Tumpuan	 Jepit			 Rol		
	 Sendi			 Ujung bebas		

Untuk menentukan faktor panjang tekuk ( $K$ ) pada suatu struktur portal digunakan nomogram pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 dengan nilai  $GA$  dan  $GB$  ditentukan dengan rumus berikut:

$$G = \frac{\sum \left( \frac{EcIc}{Lc} \right)}{\sum \left( Eg \frac{I_g}{L_g} \right)} = \frac{\sum \left( \frac{E \cdot I}{L} \right) c}{\sum \left( \frac{E \cdot I}{L} \right) g} \quad (2.11)$$



Gambar 2.6 Nomoram Penentu K pada Komponen Struktur Bergoyang



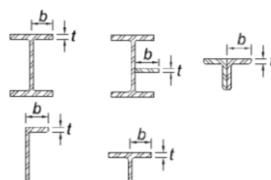
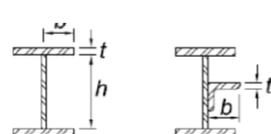
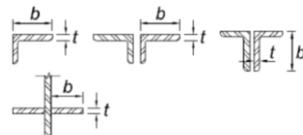
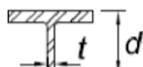
Gambar 2.7 Nomogram Penentu K pada Komponen Struktur Tak Bergoyang

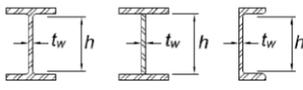
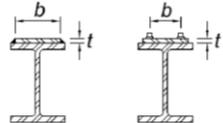
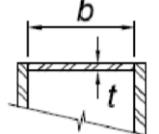
#### 2.1.4.2 Tekuk Lokal dan Tekuk Global pada Batang Tekan

Batang tekan yang mengalami tekan dapat mengalami dua jenis tekukan, yaitu tekuk lokal dan global. Tekuk global terjadi ada elemen penampang seperti sayap atau badan profil akibat gaya tekan yang bekerja, sedangkan tekuk lokal terjadi pada batang secara memanjang. Jika elemen penampang cenderung langsing dengan panjang kolom yang pendek, maka batang tekan akan mengalami tekuk lokal. Namun, jika elemen penampang relatif tebal dengan panjang yang relatif panjang, maka batang tekan akan mengalami tekuk global. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan dan panjang elemen penampang berpengaruh pada jenis tekukan yang terjadi pada batang tekan.

Elemen struktur yang mengalami tekuk lokal dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu elemen nonlangsing dan elemen langsing. Jenis elemen tersebut ditentukan oleh perbandingan antara lebar dan tebal penampangnya ( $b/t$ ). Untuk profil elemen yang tidak langsing nilai rasio  $b/t$  harus kurang dari  $\lambda r$ . Jika rasio kelangsingan tersebut melebihi  $\lambda r$ , maka penampang disebut sebagai penampang dengan elemen langsing.

Tabel 2.3 Rasio Tebal Terhadap Lebar Elemen Tekan Komposit Struktur yang Menahan Tekan Aksial (Tabel B4. 1a SNI 1729 : 2020)

No	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batasan Rasio Lebar terhadap Tebal $\lambda$ (nonlangsing/langsing)	Contoh
1	Sayap, Profil I gilas panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I gilas panas, kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap kanal dan sayap T	$b/t$	$0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
2	Sayap profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun	$b/t$	$0,64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ $k_c = 4\sqrt{h/tw}$ $0,35 \leq k_c \leq 0,76$	
3	Kaki siku tunggal, kaki siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tidak diperkaku lainnya	$b/t$	$0,45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
4	Badan T	$d/t$	$0,75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

No	Deskripsi Elemen	Rasio Lebar terhadap Tebal	Batasan Rasio Lebar terhadap Tebal $\lambda_r$ (nonlangsing/langsing)	Contoh
5	Badan profil I simetris ganda dan penampang profil I tersusun dan kanal	$h/t_w$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
6	Dinding PSR persegi panjang	$b/t$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
7	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara baris – baris pengencang atau las	$b/t$	$1,40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
8	Semua elemen diperkaku lainnya	$D/t$	$1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
9	PSR bulat	$D/t$	$0,11 \frac{E}{F_y}$	
Kasus 1 sampai 4 untuk elemen tidak diperkaku Kasus 5 sampai 9 untuk elemen diperkaku				

Berdasarkan Tabel 2.3. Langkah selanjutnya adalah menentukan jenis tekuk global yang dapat terjadi pada batang tekan. Jika tekuk lokal sangat dipengaruhi oleh rasio tebal – lebar penampang, maka jenis tekuk global ditentukan oleh rasio kelangsingan batang, dengan panjang efektif K.L. Ada tiga jenis tekuk global yang mungkin terjadi pada komponen struktur yang mengalami gaya aksial tekan, yaitu tekuk lentur, tekuk torsi, dan tekuk torsi lentur.

### 2.1.4.3 Kekuatan Tekan Nominal

Kekuatan tekan desain,  $\phi_c P_n$ , ditentukan oleh Persamaan **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** . Kekuatan tekan nominal,  $P_n$  suatu batang harus diambil dari nilai terendah yang diperoleh berdasarkan pada keadaan batas dari tekuk lentur, tekuk torsi, dan tekuk torsi lentur.

$$P_u \leq \phi_c P_n \quad (2.12)$$

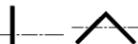
Keterangan :

$P_u$  : Gaya tekan aksial terfaktor (N)

$\phi_c$  : 0,90

Sebelum melakukan perencanaan batang tekan, perlu dipilih kriteria subbab E pada SNI 1729 : 2020 yang akan digunakan yaitu E3 sampai E7. Tabel 2.4 menyajikan tabel pemilihan untuk penerapan profil bab E1.1 SNI 1729:2020.

Tabel 2.4 Tabel Untuk Pemilihan Bab E (Tabel E1.1 SNI 1729 : 2020)

Penampang Melintang	Tanpa Elemen Langsing		Dengan Elemen Langsing	
	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas
	E3 E4	FB TB	E7	LB FB TB
	E3 E4	FV FTB	E7	LB FB FTB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3	FB	E7	LB FB
	E3 E4	FB FTB	E7	LB FB FTB
	E5	FB FTB	E6 E7	LB FB FTB
	E5		E5	
	E3	FB	N/A	N/A

Penampang Melintang	Tanpa Elemen Langsing		Dengan Elemen Langsing	
	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas	Penampang pada Bab E	Keadaan Batas
Penampang tidak simetris selain siku tunggal	E4	FTB	E7	LB FTB
FB = tekuk lentur, TB = tekuk torsi, FTB tekuk torsi lentur, LB = tekuk lokal, N/A = tidak dapat diterapkan				

#### 2.1.4.4 Tekuk Lentur Tanpa Elemen Langsing (E3)

Pasal E3 SNI 1729 : 2020 digunakan dalam perencanaan batang tekan klasifikasi nonlansing ( $\lambda \leq \lambda_r$ , berdasarkan Tabel 2.4) yang mengalami tekuk lentur. Besarnya kuat tekan nominal,  $P_n$  pada persamaan (2.10), harus ditentukan sebagai berikut.

$$P_n \leq F_{cr} \cdot A_g \quad (2.13)$$

Nilai tegangan kritis ( $F_{cr}$ ) pada persamaan di atas ditentukan dengan Batasan sebagai berikut.

$$1. \text{ Jika } \frac{Lc}{r} \leq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ (atau } \frac{F_y}{F_e} \leq 2,25), \text{ maka } F_{cr} = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e}\right] \cdot F_y \text{ (Mpa)} \quad (2.14)$$

$$2. \text{ Jika } \frac{Lc}{r} \geq 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ (atau } \frac{F_y}{F_e} \geq 2,25), \text{ maka } F_{cr} = 0,877 F_e \text{ (Mpa)} \quad (2.15)$$

#### 2.1.4.5 Tekuk Torsi dan Tekuk Torsi – Lateral Siku Tunggal dan Tanpa Elemen Langsing (E4)

Kekuatan tekan nominal,  $P_n$  harus ditentukan berdasarkan pada keadaan batas dari tekuk torsi dan tekuk torsi – lentur dengan persamaan(2.13) . Dengan Tegangan kritis ( $F_{cr}$ ) sebagai berikut.

1. Untuk profil struktur simetris ganda yang mengalami torsi pada pusat geser.
2. Untuk profil simetris ganda yang mengalami torsi pada pusat geser dimana adalah sumbu simetris.

$$F_e = \left(\frac{F_{ey} + F_{ez}}{2H}\right) \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{ey}F_{ez}H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}}\right] \quad (2.16)$$

Bila penampang merupakan komponen struktur simetris tunggal dengan sumbu x sebagai sumbu simetris (misal : kanal)  $F_{ty}$  digantikan  $F_{ex}$ .

1. Untuk komponen struktur asimetris yang mengalami torsi terhadap pusat geser,  $F_e$  merupakan akar terendah dari persamaan pangkat tiga berikut:

$$(F_e - F_{ex})(F_e - F_{ey})(F_e - F_{ez}) - F_e^2(F_e - F_{ey})\left(\frac{x_0}{r_0}\right)^2 - F_e^2(F_e - F_{ex})\left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 = 0 \quad (2.17)$$

Keterangan :

$C_w$ : Konstanta pilin ( $\text{mm}^6$ )

$$F_{ex}: \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cx}}{r_x}\right)^2}$$

$$F_{ey}: \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_{cy}}{r_y}\right)^2}$$

$$F_{ez} : \left( \frac{\pi^2 E C_w}{L_{cz}^2} + GJ \right) + \frac{1}{A_g + \bar{r}_0^2}$$

$G$  : Modulus elastis geser baja (77.200 MPa)

$H$  : Konstanta lentur  $\left(1 - \left(\frac{x_0^2 + y_0^2}{\bar{r}_0^2}\right)\right)$

$I_x, I_y$  : Momen inersia terhadap sumbu x dan y ( $\text{mm}^4$ )

$J$  : Konstanta torsi ( $\text{mm}^4$ )

$K_x$  : Faktor panjang efektif untuk tekuk lentur terhadap sumbu x

$K_y$  : Faktor panjang efektif untuk tekuk lentur terhadap sumbu y

$K_z$  : Faktor panjang efektif untuk tekuk lentur terhadap sumbu z

$L_{cx}$  :  $K_x L_x$  : panjang efektif komponen tekuk terhadap sumbu x (mm)

$L_{cy}$  :  $K_y L_y$  : panjang efektif komponen tekuk terhadap sumbu y (mm)

$L_{cz}$  :  $K_z L_z$  : panjang efektif komponen tekuk terhadap sumbu z (mm)

$\bar{r}_0$  : Radius girasi polar dari pusat geser in (mm)

$$\bar{r}_0^2 : x_0^2 + y_0^2 + \frac{I_x + I_y}{A_g}$$

$A_g$  : Luas bruto penampang dari komponen struktur ( $\text{mm}^2$ )

$r_x$  : Radius girasi di sumbu x (mm)

$r_y$  : Radius girasi di sumbu y (mm)

$x_0, y_0$  : Koordinat pusat geser yang dinyatakan dengan titik berat (mm)

Untuk profil I simetris ganda  $C_w = I_y h_0^2/4$ , dengan  $h_0$  = jarak antar titik berat sayap =  $h - t_f$ . untuk profil T dan siku ganda abaikan  $C_w$  dalam menghitung  $F_{ez}$  dan diambil  $x_0 = 0$ .

#### 2.1.4.6 Siku Tunggal (E5)

Siku tunggal sering digunakan dalam struktur rangka ruang seperti tandon air atau Menara pemancar radio. SNI 1729 : 2020 pasal E5 menjelaskan rumus untuk

komponen struktur tekan siku tunggal. Saat menghitung kuat tekan nominal,  $P_n$  dari batang siku tunggal harus ditentukan dari nilai terendah antara pasal E3 untuk tekuk lentur, Pasal E7 untuk komponen tekan dengan elemen langsing, atau Pasal E4 untuk tekuk torsi – lentur. Tekuk torsi – lentur tidak perlu diperhitungkan bila  $b/t \leq 0,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ .

Jika komponen struktur siku tunggal dievaluasi sebagai komponen struktur tekan yang diberi beban aksial, efek eksentrisitas pada komponen dapat diabaikan dengan menggunakan salah satu rasio kelangsingan efektif yang diatur oleh pasal E5(a) atau E5(b) SNI 1729 : 2020.

1. Komponen struktur dibebani di ujung – ujung dalam tekan melalui satu kaki yang sama.
2. Komponen – komponen struktur yang disamping dengan las atau dengan sambungan minimum dua baut, dan.
3. Tidak ada beban transversal diantara kedua ujung batang
4.  $L_c/r \leq 200$
5. Untuk siku tidak sama kaki, rasio panjang kaki terhadap lebar kaki pendek < 1,7.

Komponen struktur siku tunggal yang tidak memenuhi persyaratan di atas harus dievaluasi untuk kombinasi beban aksial dan lentur dengan menggunakan ketentuan bab H.

1. Untuk siku yang merupakan komponen struktur individu atau struktur badan dari rangka batang bidang dengan komponen struktur batan yang berdekatan disambung pada sisi yang sama dari pelat buhul.
  - a. Untuk siku sama kaki atau siku tidak sama kaki yang disambung melalui kaki yang panjang.

$$\text{Bila } \frac{L}{r_a} \leq 80 \text{ maka } \frac{L_c}{r} = 72 + 0,75 \frac{L}{r_a} \quad (2.18)$$

$$\text{Bila } \frac{L}{r_a} > 80 \text{ maka } \frac{L_c}{r} = 32 + 1,25 \frac{L}{r_a} \quad (2.19)$$

- b. Untuk siku tidak sama kaki yang disambung melalui kaki yang pendek.

$$\text{Bila } \frac{L}{r_a} \leq 80 \text{ maka } \frac{L_c}{r} = 72 + 0,75 \frac{L}{r_a} + 4 \left[ \left( \frac{b_t}{b_s} \right)^2 - 1 \right] \geq 0,95 \frac{L}{r_z} \quad (2.20)$$

$$\text{Bila } \frac{L}{r_a} > 80 \text{ maka } \frac{L_c}{r} = 32 + 1,25 \frac{L}{r_a} + 4 \left[ \left( \frac{b_t}{b_s} \right)^2 - 1 \right] \geq 0,95 \frac{L}{r_z} \quad (2.21)$$

2. Untuk siku yang merupakan komponen struktur badan boks atau rangka ruang dengan komponen struktur yang berdekatan dipasang pada sisi yang sama dengan pelat buhul.

a. Untuk siku sama kaki atau siku tidak sama kaki yang disambung melalui kaki yang lebih panjang.

b. Bila  $\frac{L}{r_a} \leq 75$  maka,  $\frac{L_c}{r} = 60 + 0,8 \frac{L}{r_a}$  (2.22)

c. Bila  $\frac{L}{r_a} > 75$  maka,  $\frac{L_c}{r} = 45 + \frac{L}{r_a}$  (2.23)

d. Untuk siku tidak sama kaki yang disambung melalui kaki yang pendek.

e. Bila  $\frac{L}{r_a} \leq 75$ , maka  $\frac{L_c}{r} = 60 + 0,8 \frac{L}{r_a} + 6 \left[ \left( \frac{b_t}{b_s} \right)^2 - 1 \right] \geq 0,82 \frac{L}{r_z}$  (2.24)

f. Bila  $\frac{L}{r_a} > 80$ , maka  $\frac{L_c}{r} = 45 + \frac{L}{r_a} + 6 \left[ \left( \frac{b_t}{b_s} \right)^2 - 1 \right] \geq 0,82 \frac{L}{r_z}$  (2.25)

Keterangan :

L : Panjang dari komponen struktur antara titik - titik kerja pada sumbu rangka sumbu batang (mm)

$b_t$  : Panjang dari kaki terpanjang dari siku (mm)

$b_s$  : Panjang dari kaki terpendek dari siku (mm)

$r_a$  : Radius girasi dari sumbu geometris paralel dengan kaki yang disambung (mm)

$r_z$  : Radius girasi di sumbu utama minor (mm)

#### 2.1.4.7 Komponen Struktur Tersusun (E6)

Komponen struktur yang mengalami tekan dapat terdiri dari suatu atau beberapa batang. Ketika menggunakan dua atau lebih batang untuk membentuk sebuah komponen struktur tekan, hal ini diatur dalam pasal E6 SNI 1729 : 2020. Pasal E6 berlaku untuk komponen struktur tersusun yang mengalami gaya aksial tekan yang disambung dengan las atau baut pratarik. Pada komponen struktur tekan tersusun, angka kelangsingan  $L/r$  akan berubah menjadi  $(L/r)_m$  yang nilainya ditentukan sebagai berikut.

1. Untuk konektor menengah/perantara yang dibaut secara kencang penuh.

$$\left( \frac{L_c}{r} \right)_m = \sqrt{\left( \frac{L_c}{r} \right)_0^2 + \left( \frac{a}{r_i} \right)^2} \quad (2.26)$$

2. Untuk konektor yang dilas atau disambung dengan baut pratarik.

$$\text{Bila } \frac{a}{r_i} \leq 40, \text{ maka } \left(\frac{L_c}{r}\right)_m = \left(\frac{L_c}{r}\right)_0 \quad (2.27)$$

$$\text{Bila } \frac{a}{r_i} \geq 40, \text{ maka } \left(\frac{L_c}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{L_c}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{K_i a}{r_i}\right)^2} \quad (2.28)$$

Keterangan :

$\left(\frac{L_c}{r}\right)_m$  : Rasio kelangsingan termodifikasi dari komponen struktur tersusun.

$\left(\frac{L_c}{r}\right)_0$  : Rasio kelangsingan dari komponen struktur tersusun yang bekerja sebagai suatu keseruan pada arah tekuk yang diperhitungkan.

$K_i$  : 0,50 untuk siku ganda  
0,75 untuk kanal ganda  
0,86 untuk kasus lainnya.

$a$  : Jarak antar konektor (mm)

$r_i$  : Radius girasi minimum komponen individual (mm)

Terdapat persyaratan dimensial untuk komponen struktur tersusun yaitu.

1. Rasio kelangsingan setiap elemen  $(a/r_i) \leq 0,75 (L_c / r)$ , dengan  $L_c/r$  adalah kelangsingan komponen struktur teka tersusun.
2. Pada ujung komponen struktur tekan tersusun yang ditopang oleh pelat dasar, untuk memastikan semua komponen terhubung secara kuat, bisa dilakukan dengan las yang panjangnya  $\geq$  lebar maksimum komponen, atau dengan baut yang jarak spasi longitudinalnya  $\leq 4d$  untuk jarak 1,5 kali lebar maksimum komponen struktur.

Jika komponen struktur tekan tersusun terdiri dari pelat luar spasi maksimum pengencang  $\leq$  tebal pelat luar tertipis  $\times 0,75 \sqrt{E/F_y}$ , atau 300 mm (12in).

Jika pengencang berselang – seling, spasi maksimum pengencang  $\leq$  tebal pelat luar tertipis  $\times 1,12 \sqrt{E/F_y}$ , atau 460 mm (18in).

3. Sisi – sisi terbuka pada komponen struktur tekan tersusun dari pelat atau profil harus menggunakan pelat penutup menerus berlubang dengan lubang – lubang akses. Lebar lubang akses haru memenuhi.
  - a. Rasio b/t harus sesuai dengan Tabel B4.1 SNI 1729 : 2020
  - b. Rasio panjang dalam arah tegangan terhadap lebar lubang  $\leq 2$

- c. Jarak bersih lubang – lubang pada arah tegangan  $\geq$  jarak transversal antar garis pengencang atau las terdekat.
- d. Tepi terluar lubang – lubang harus memiliki radius minimum 39 mm (1,5 in).

### 2.1.5 Sambungan Baut Struktur Baja

Berdasarkan SNI 1729 : 2020, suatu baut yang memikul gaya terfaktor harus memenuhi syarat berikut.

$$R_u \leq \phi \cdot R_n \quad (2.29)$$

Keterangan :

$R_u$  : Gaya terfaktor yang terjadi pada baut (N)

$\phi$  : Faktor ketahanan baut (berbeda untuk setiap kasus)

$R_n$  : Kekuatan nomina baut (N)

Menurut SNI 1729 : 2020 , terdapat beberapa jenis kekuatan nominal baut, tergantung pada jenis gaya yang bekerja (geser dan tarik) dan tipe sambungan yang digunakan (tipe tumpu dan slip kritis).

#### 1. Kekuatan Geser Baut

Kekuatan nominal satu baut yang memikul gaya geser memenuhi persamaan.

$$R_n = F_{nv} \cdot A_b \quad (2.30)$$

Keterangan :

$R_n$  : Kekuatan nominal baut (N)

$F_{nb}$  : Tegangan geser nominal baut (Mpa)

Diambil dari Tabel J3.2 SNI 1729 : 2020

$A_b$  : Luas bruto penampang baut ( $\text{mm}^2$ )

$\phi$  : Faktor ketahanan baut, besarnya 0,75

#### 2. Kekuatan Tarik Baut

Baut yang memikul gaya tarik kekuatan nominalnya dihitung menurut.

$$R_n = F_{nt} \cdot A_b \quad (2.31)$$

Keterangan :

$R_n$  : Kekuatan nominal baut (N)

$F_{nt}$  : Tegangan tarik nominal baut (Mpa)

Diambil dari Tabel J3.2 SNI 1729 : 2020

$A_b$  : Luas bruto penampang baut ( $\text{mm}^2$ )

$\phi$  : Faktor ketahanan baut, besarnya 0,75

### 3. Kekuatan Tumpu dan Sobek Lubang Baut

Tahanan tumpu nominal tergantung pada kondisi yang terlemah dari baut atau komponen pelat yang disambung. Kekuatan sambungan

- a. Untuk baut sambungan dengan lubang standar, ukuran berlebih dan slot pendek, tidak tergantung dari arah beban, atau lubang slot panjang dengan slot paralel terhadap arah gaya tumpu.

#### **Tumpu**

Apabila deformasi di lubang baut pada beban layan adalah tinjauan desain.

$$R_n = 2,4 d t F_u \quad (2.32)$$

Apabila deformasi di lubang baut pada beban layan adalah bukan tinjauan desain.

$$R_n = 3,0 d t F_u \quad (2.33)$$

#### **Sobek**

Apabila deformasi di lubang baut pada beban layan adalah tinjauan desain.

$$R_n = 1,2 l_c t F_u \quad (2.34)$$

Apabila deformasi di lubang baut pada beban layan adalah bukan tinjauan desain.

$$R_n = 1,5 l_c t F_u \quad (2.35)$$

- b. Untuk baut pada sambungan dengan lubang slot panjang dan slot tersebut tegak lurus terhadap arah gaya.

#### **Tumpu**

$$R_n = 2,0 d t F_u \quad (2.36)$$

Keterangan :

$\mu$  : Koefisien slip rata – rata untuk permukaan kelas A atau B, yang sesuai.

0,30 untuk permukaan kelas A.

0,50 untuk permukaan kelas B.

$D_u$  : 1,13

$T_b$  : Gaya tarik minimum alat penyambung dari Tabel J3.

$h_f$  : Faktor pengisi.

1,00 (satu pengisi antara bagian – bagian yang disambung).

0,85 (dua atau lebih pengisi bagian – bagian yang disambung).

$n_s$  : Jumlah bidang slip diperlukan untuk mengizinkan sambungan dengan slip.

$\phi$  : Faktor ketahanan baut, besarnya diatur sebagai berikut.

1,00 (lubang ukuran standar dan lubang slot pendek yang tegak lurus arah beban).

0,85 (lubang ukuran berlebih dan lubang slot – pendek yang paralel terhadap arah beban).

0,7 (slot panjang).

### Sobek

$$R_n = 1,0 l_c t F_u \quad (2.37)$$

Keterangan :

$F_u$  : Kekuatan tarik minimum material yang disambung (MPa)

$d$  : Diameter baut nominal (mm)

$l_c$  : Jarak bersih antar baut atau tepi sambungan dalam arah gaya (mm)

$t$  : Tebal material yang disambung (mm)

$\phi$  : Faktor ketahanan baut, (besarnya 0,75)

### 2.1.6 Sambungan Las Struktur Baja

Kekuatan desain las,  $fR_n$  merupakan nilai terendah dari kekuatan material dasar yang ditentukan menurut keadaan batas dan keruntuhan tarik dan keruntuhan geser dan kekuatan logam las yang ditentukan menurut batas dari keruntuhan berikut ini.

Untuk logam dasar.

$$R_n = F_{nBM} A_{BM} \quad (2.38)$$

Untuk logam las.

$$R_n = F_{nw} A_{we} \quad (2.39)$$

Keterangan :

$F_{nBM}$  : Tegangan nominal dari logam dasar (MPa).

$F_{nw}$  : Tegangan nominal dari logam las (MPa).

$A_{BM}$  : Luas penampang logam dasar (mm<sup>2</sup>).

$A_{we}$  : Luas efektif las (mm<sup>2</sup>).

Kekuatan rencana las kemudian dapat dihitung dengan rumus.

$$R_u = fR_n \quad (2.40)$$

Nilai  $f$ ,  $F_{nBM}$ , dan  $F_{nw}$ , serta Batasan di atas diberikan pada Tabel J2.5 SNI 1729:2020.

## 2.1.7 Elemen Lentur (Balok)

### 2.1.7.1 Konsep Perencanaan

Konsep perencanaan dari elemen lentur mengacu pada LRFD, Dimana

$$M_u = f_b M_n \quad (2.41)$$

Di mana  $M_u$  adalah gaya dalam ultima (momen) yang berasal dari analisis akibat beban luar dengan beban teraktor, sedangkan  $f_b M_n$  merupakan kekuatan lentur desain (kapasitas penampang). Berdasarkan SNI 1729 : 2020, kekuatan lentur desain ( $f_b M_n$ ) dan kekuatan lentur izin ( $M_n / \Omega_b$ ) dihitung menggunakan koefisien  $f_b = 0,90$  dan  $\Omega_b = 1,67$ .

### 2.1.7.2 Tahapan Pembebanan

Penambahan beban pada penampang balok akan menyebabkan variasi tegangan yang dapat menyebabkan kondisi balok menjadi inelastis di mana terjadi leleh. Kondisi inelastis pada balok akan terjadi ketika beban lebih besar dari batas daya dukung balok. Pada akhirnya, ketika momen tambahan tidak dapat ditahan oleh penampang balok, maka seluruh penampang akan mengalami kondisi plastis, yang akan mengakibatkan rotasi besar. Ketika beban ditambah meskipun sedikit. Besaran momen plastis pada taha ini diberi nama  $M_p$  dan dapat dihitung menggunakan rumus dibawah ini.  $Z$  merupakan modulus plastis.

$$M_p = F_y \int_A y \cdot dA = F_y Z \quad (2.42)$$

### 2.1.7.3 Tegangan Lentur

Tegangan lentur adalah tegangan yang diakibatkan oleh momen lentur. Pada konsisi elastis, tegangan lentur pada sembarang titik di ketinggian  $y$  terhadap garis netral dihitung menggunakan rumus tegangan lentur pada rumus (2.43). Untuk nilai tegangan lentur maksimum terletak di serat terluar, dengan nilia  $y = t$  sehingga besarnya dapat ditentukan menggunakan rumus(2.44).

$$f_b = \frac{M \cdot y}{I_x} \quad (2.43)$$

$$f_{maks} = \frac{M \cdot c}{I_x} = \frac{M \cdot c}{I_x / c} = \frac{M \cdot c}{S_x} \quad (2.44)$$

Keterangan :

M : Momen lentur pada penampang

y : Jarak dari garis netral ke serat yang ditinjau secara tegak lurus

c : Jarak dari garis netral terhadap serat terluar penampang tegak lurus.

#### 2.1.7.4 Tekuk Lokal (*Local Buckling*) dan Tekuk Lateral (*Lateral Buckling*)

Berdasarkan SNI 1729 : 2020, ada tiga parameter Batasan yang harus dilakukan analisis sehingga dapat diketahui terjadi / tidaknya tekuk torsi lateral (*lateral-torsional buckling*) tersebut. Ketiga Batasan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Jika  $L_b \leq L_p$  maka tidak terjadi tekuk lateral.
2. Jika  $L_r \geq L_b > L_p$  dan  $L_b > L_r$  maka akan terjadi tekuk lateral, yang akan berpengaruh pada perhitungan momen nominal penampangnya seperti yang tertera pada bab F SNI 1729 : 2020.

Faktor modifikasi dari tekuk torsi-lateral dengan nilai momen tidak seragam Ketika kedua sisi dikekang  $C_b$  adalah sebagai berikut.

$$C_b = \frac{12,5 M_{maks}}{2,5 M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2.45)$$

Keterangan :

$C_b$  : 1,0 untuk kasus momen – momen ujung yang sama besar dan berlawanan arah (momen seragam)

$M_a$  : Momen  $\frac{1}{4}$  bentang pada bagian yang tidak dikekang (N.mm)

$M_b$  : Momen  $\frac{1}{2}$  bentang pada bagian yang tidak dikekang (N.mm)

$M_c$  : Momen  $\frac{3}{4}$  bentang pada bagian yang tidak dikekang (N.mm)

#### 2.1.7.5 Perencanaan Kuat Geser

Evaluasi kuat geser pada pelat badan berdasarkan ketentuan yang ada di bab G SNI 1729 : 2020. Secara umum, kuat geer rencana berdasarkan LRFD (DFBT) harus memenuhi persamaan dibawah ini.

$$V_u \leq f_v V_n \quad (2.46)$$

Keterangan :

$V_u$  : Gaya geser batas atau gaya geser terfaktir maksimum dari kombinasi.

$f_v$  : Faktor ketahanan geser (0,9) (Kecuali komponen badan terstruktur profil – I gilas panas sebesar 1,0)

$V_n$ : Kuat geser nominal balok.

## 2.1.8 Elemen Balok Komposit

### 2.1.8.1 Lebar Efektif Balok Komposit

Berdasarkan SNI 1729 : 2020. Lebar efektif slab beton harus diambil dari jumlah lebar efektif untuk setiap sisi sumbu balok, masing – masing tidak melebihi.

1.  $\frac{1}{8}$  bentang balok, as ke as tumpuan
2.  $\frac{1}{2}$  jarak ke sumbu balok yang berdekatan, atau.
3. Jarak ke tepi slab

### 2.1.8.2 Balok Komposit Memikul Lentur dengan Angkur Baja Stad Berkepala

Kuat lentur positif desain  $\phi_b M_n$ , harus ditentukan untuk keadaan batas leleh sebagai berikut. ( $\phi_b = 0,90$ ).

1. Untuk  $\frac{h}{tw} \leq 3,76 \sqrt{E/f_y}$  (2.47)

$M_n$  harus ditentukan dari distribusi tegangan plastis pada penampang komposit untuk keadaan batas leleh (momen plastis).

2. Untuk  $\frac{h}{tw} \geq 3,76 \sqrt{E/f_y}$  (2.48)

$M_n$  harus ditentukan dari superposisi tegangan elastis, dengan memperhitungkan efek penopangan, untuk keadaan batas leleh (momen leleh)

Kekuatan lentur negatif tersedia harus ditentukan untuk penampang baja saja, sesuai dengan persyaratan pada poin 2.8. Dengan syarat batasan yang berikut dipenuhi.

1. Balok baja adalah penampang kompak dan terbreis secara memadai sesuai dengan poin 2.8
2. Angkur baja stad berkepala atau angkur kanal baja menyambungkan slab ke balok baja pada daerah momen negatif.
3. Tulangan slab yang paralel pada balok baja, disalurkan di lebar efektif slab.

### 2.1.8.3 Transfer Beban Antara Balok Baja dan Slab Beton

Semua geser horizontal pada antarmuka balok baja dan slab beton harus dialirkan melalui baja stad berkepala, kecuali untuk balok terbungkus beton. Dalam

kondisi aksi komposit dengan beton yang mengalami tekan lentur. Dalam kondisi aksi komposit dengan beton yang mengalami tekan lentur, gaya geser nominal ( $V'$ ) antara kedua elemen tersebut harus dihitung sebagai nilai terendah dari beberapa kondisi batas, termasuk batas kehancuran beton, leleh tarik penampang baja, atau kekuatan geser angkur baja, dengan memperhatikan titik dengan momen positif maksimum dan titik momen nol.

1. Kehancuran beton

$$V' = C = 0,85 f_c' A_c \quad (2.49)$$

2. Leleh tarik penampang baja

$$V' = T = F_y A_s \quad (2.50)$$

3. Kekuatan geser baja stad berkepala atau angkur kanal baja

$$V' = \sum Q_n \quad (2.51)$$

Dimana.

$A_c$  : Luas slab beton di dalam lebar efektif.  $\text{in}^2$ . ( $\text{mm}^2$ )

$A_s$  : Luas penampang melintang baja.  $\text{in}^2$ . ( $\text{mm}^2$ )

$\sum Q_n$  : Jumlah kekuatan geser nominal baja stad berkepala antara titik nol dengan momen positif maksimum dan titik dengan momen nol (N).

#### **Transfer Beban untuk Kekuatan Lentur Negatif**

Pada balok komposit yang memiliki baa tulangan longitudinal di daerah momen negatif, perlu memperhatikan kinerjanya secara komposit dengan balok baja. Geser horizontal total antara titik dengan momen negatif maksimum dan titik dengan nol harus dihitung sebagai nilai terendah, sesuai dengan beberapa kondisi batas tersebut.

1. Untuk keadaan batas leleh tarik tulangan slab

$$V' = F_{syr} A_{sr} \quad (2.52)$$

2. Untuk keadaan batas kekuatan geser angkur baja stad berkepala menggunakan persamaan (2.59).

#### **2.1.8.4 Komponen Struktur Komposit Terisi Beton untuk Kekuatan Lentur**

Kekuatan lentur tersedia komponen struktur komponen terisi beton harus ditentukan sebagai berikut. Untuk penampang kompak

$$\phi M_n = \phi M_p \quad (2.53)$$

Dimana.

$M_p$  : Momen sambungan dengan distribusi tegangan plastis di penampang komposit, kip-in. (N-mm).

$\phi$  : 0,90 (DFBT)

Untuk penampang nonkompak

$$\phi M_n = \phi M_p - (M_p - M_y) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r \lambda_p} \right) \quad (2.54)$$

Dimana

$\lambda$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_r$  adalah rasio kelangsingan yang ditentukan dari tabel II.1b SNI 1729 : 2020

$M_y$  : Momen leleh sehubungan dengan leleh sayap tarik dan leleh pertama sayap tekan, kip – in (N-mm).

Untuk penampang langsing  $M_n$ , harus ditentukan sebagai momen leleh pertama. Tegangan sayap tekan harus dibatasi sampai tegangan tekuk local,  $F_{cr}$ , yang ditentukan dengan menggunakan persamaan I2 – 10 atau persamaan I2 – 11 pada SNI 1729 : 2020. Distribusi tegangan beton harus elastis linier dengan tegangan tekan maksimum yang dibatasi sampai  $0,70 f_c'$ .

#### 2.1.8.5 Kekuatan Angkur Baja Stad Berkepala

Kekuatan geser nominal satu angkur baja stad berkepala yang ditanam pada slab beton solid atau pada slab komposit dengan dek harus ditentukan sebagai berikut.

$$Q_n = 0,5 A_{sa} \sqrt{f_c' E_c} \leq R_g R_p A_{sa} F_u \quad (2.55)$$

Dimana.

$A_{sa}$  : Luas penampang angkur baja stad berkepala, in<sup>2</sup>. (mm<sup>2</sup>)

$E_c$  : Modulus elastisitas beton,  $w_c^{1,5} \sqrt{f_c'}$  ksi ( $0,043 w_c^{1,5} \sqrt{f_c'}$ )

$F_u$  : Kekuatan tarik minimum terspesifikasi angkur baja stad berkepala

$R_g$  : 1,0 untuk.

- Satu angkur baja stad berkepala yang dilas pada suatu rusuk dek baja dengan dek yang diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja.
- Sejumlah angkur baja stad berkepala di suatu baris secara langsung terhadap profil baja.
- Sejumlah angkur baja stad berkepala yang dilas pada suatu baris melewati dek baja dengan dek diorientasikan paralel terhadap profil

baja dan rasio dari lebar rusuk rata – rata terhadap kedalaman rusuk  $\geq 1,5$ .

$R_g$  : 0,85 untuk

- a. Dua angkur baja stad berkepala yang dilas pada suatu rusuk dek baja dengan dek diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja.
- b. Satu angkur baja stad berkepala yang dilas melewati dek baja dengan dek diorientasikan paralel terhadap profil baja dan rasio dari lebar rusuk rata – rata terhadap kedalaman rusuk  $< 1,5$ .

$R_g$  : 0,7 untuk tiga atau lebih angkur baja stad berkepala yang dilas pada suatu rusuk dek baja dengan dek yang diorientasikan tegak lurus terhadap profil baja.

$R_g$  : 0,75 untuk.

- a. Angkur baja stad berkepala yang dilas secara langsung pada profil baja
- b. Angkur baja stad berkepala yang dilas pada slab komposit dengan dek yang diorientasikan tegak lurus terhadap balok dan  $e_{\text{mid-ht}} \geq 2\text{in. (50 mm)}$ .
- c. Angkur baja stad berkepala yang dilas melewati dek baja, atau lembaran baja yang digunakan sebagai material pengisi grider, dan ditanam pada suatu slab komposit dengan dek tersebut diorientasikan paralel terhadap balok tersebut.

$R_g$  : 0,6 untuk angkur baja stad berkepala yang dilas pada suatu slab komposit dengan dek diorientasikan tegak lurus terhadap balok dan  $e_{\text{mid-ht}} \geq 2\text{in. (50 mm)}$ .

$e_{\text{mid-ht}}$ : Jarak dari tepi kaki angkur baja stad berkepala terhadap badan dek baja, diukur di tengah tinggi rusuk dek, dan pada arah tumpuan beban dari angkur baja stad berkepala (dengan kata lain, pada arah dari momen maksimum untuk suatu balok yang ditumpu sederhana), in. (mm).

#### 2.1.8.6 Jumlah Angkur Baja yang Diperlukan

Jumlah angkur yang diperlukan antara penampang dengan momen lentur maksimum, positif atau negatif, dan penampang dengan momen nol terdekat harus

sama dengan geser horizontal dibagi dengan kekuatan geser nominal satu angkur baja.

$$n = \frac{V_n}{Q_n} \quad (2.56)$$

### 2.1.8.7 Persyaratan Pendetailan

Angkur baja pada balok komposit harus memenuhi persyaratan berikut ini.

1. Angkur baja yang diperlukan pada masing – masing sisi titik dengan momen lentur maksimum, positif atau negatif, harus didistribusikan secara merata antara titik tersebut dan titik dengan momen nol terdekat, kecuali diisyaratkan lain pada dokumen kontrak.
2. Angkur baja harus memiliki selimut beton lateral paling sedikit 1 in. (25 mm) dalam arah tegak lurus terhadap gaya geser, kecuali untuk angkur yang dipasang pada rusuk dari dek baja gelombang.
3. Jarak minimum dari pusat angkur baja ke tepi bebas pada arah gaya geser harus 8 in. (200mm) jika beton normal yang digunakan dan 10 in. (250 mm) jika beton ringan yang digunakan. Ketentuan Bab 17 Aci 318, diperbolehkan untuk digunakan sebagai pengganti dari nilai – nilai ini.
4. Spasi as ke as minimum angkur baja stad berkepala harus empat diameter pada arah manapun. Untuk balok komposit yang tidak mengandung angkur yang terletak di dek baja bergelombang yang diorientasikan tegak lurus terhadap bentang balok, batas spasi minimum tambahan sebesar enam diameter sepanjang sumbu longitudinal balok harus berlaku.
5. Spasi as ke as maksimum angkur baja tidak boleh melebihi enam kali slab total atau 36 in. (900 mm).

### 2.1.9 Elemen Balok Kolom

#### 2.1.9.1 Kombinasi Lentur dan Aksial

1. Komponen Struktur Simetris Ganda dan Tunggal yang Memikul Lentur dan Tekan (H1)

Terdapat batasan yang harus diperhatikan, yaitu sebagai berikut.

$$\text{Jika } \frac{P_r}{P_c} \geq 0,2, \text{ maka } \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (2.57)$$

$$\text{Jika } \frac{P_r}{P_c} < 0,2, \text{ maka } \frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (2.58)$$

Keterangan :

$P_t$  : Kuat aksial perlu elemen struktur dengan menggunakan kombinasi beban DFBT. (N).

$P_c$  : Kuat rencana elemen struktur dalam kondisi tarik atau tekan (N).

$M_t$ : Kuat lentur perlu elemen dengan menggunakan kombinasi beban DFBT (N.mm).

$M_c$ : Kuat lentur yang tersedia (N.mm).

$x$  : Simbol untuk momen lentur pada sumbu kuat penampang.

$y$  : Simbol untuk momen lentur pada sumbu kuat penampang.

## 2. Komponen Struktur Simteris Ganda dan Tunggal yang Memikul Lentur dan Tarik

Batasan yang harus diperhatikan sama dengan komponen struktur yang memikul lentur dan tekan, yaitu pada persamaan (2.57) dan (2.58).

### 2.1.9.2 Faktor Pembesaran Momen

Berdasarkan SNI 1729 : 2020, prosedur pendekatan untuk analisis efek orde kedua pada struktur dilakukan dengan memperbesar kekuatan perlu. Prosedur perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (2.59)$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{lt} \quad (2.60)$$

Keterangan :

$B_1$  : Pengali untuk menghitung efek  $P-\delta$  disetiap komponen struktur yang memikul tekan dan lentur. 1,0 untuk komponen yang tidak mengalami tekan.

$B_2$  : Pengali untuk menghitung efek  $P-\Delta$  pada setiap tingkat struktur dan setiap arah translasi lateral tingkat.

$M_{lt}$ : Momen orde pertama dengan menggunakan kombinasi bebaan DFBT

$M_r$ : Kekuatan lentur order ke dua dengan menggunakan kombinasi beban DFBT.

$P_{lt}$  : Gaya aksial orde pertama dengan menggunakan kombinasi beban DFBT.

$P_{nt}$ : Gaya aksial orde pertama dengan menggunakan kombinasi beban DFBT.

$P_r$  : Kekuatan aksial perlu order ke dua dengan menggunakan kombinasi beban DFBT.

Nilai koefisien  $B_1$  dan  $B_2$  ditentukan sebagai berikut.

1. Pengali  $B_1$  untuk efek P -  $\Delta$

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{e1}} \geq 1 \quad (2.61)$$

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 EI^*}{(L_{c1})^2} \quad (2.62)$$

Dimana  $\alpha = 1$  (DFBT).  $P_r$  dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan  $P_r = P_{nt} + P_{lb}$ , sedangkan  $C_m$  adalah faktor momen seragam yang ekuivalen. Penentunya adalah sebagai berikut.

- a. Balok kolom yang tidak memikul beban transversal antara tumpuan dan bidang lentur.

$$C_m = 0,6 - 0,4 (M_1 / M_2) \quad (2.63)$$

$M_1 / M_2$  bernilai positif jika komponen struktur melentur pada kurvatur terbalik, dan negatif jika melentur dengan kurva tunggal.

$M_1$  dan  $M_2$  adalah momen terkecil dan terbesar yang dihitung dari analisis orde pertama, pada ujung bagian komponen struktur tidak dikekang pada bidang lentur.

- b. Balok kolom yang memikul beban transversal antara tumpuan, maka untuk semua kasus nilai  $C_m = 1$ .

Dimana.

EI : Rigiditas lentur yang diperlukan dalam analisis.

E : 29.000 ksi (200.000 MPa)

I : Momen inersia bidang lentur ( $\text{mm}^4$ )

$L_{c1}$ : Panjang efektif bidang lentur, dengan ujung komponen struktur (mm).

2. Pengali  $B_2$  untuk efek P -  $\Delta$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \alpha \frac{P_{story}}{P_{e story}}} \geq 1 \quad (2.64)$$

Keterangan :

$P_{story}$  : Beban vertikal total yang dipikul oleh tingkat tersebut

$P_{e story}$ : Kekakuan tekuk kritis elastis untuk tingkat tersebut.

$$R_m \frac{HL}{\Delta H} \quad (2.65)$$

$$R_m = 1 - 0,15 ( P_{mf} / P_{story} ) \quad (2.66)$$

Keterangan :

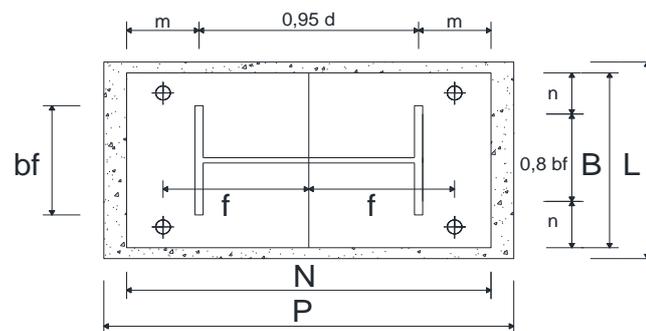
$P_{mf}$  : Beban vertikal total yang dipikul kolom – kolom tingkat tersebut sebagai bagian rangka momen. (N).

$\Delta H$  : *drift* antar tingkat orde pertama dalam arah translasi yang sedang ditinjau akibat gaya lateral. (mm).

L : Tinggi tingkat (mm).

### 2.1.10 Pelat Dasar (*Base Plate*) Kolom Baja

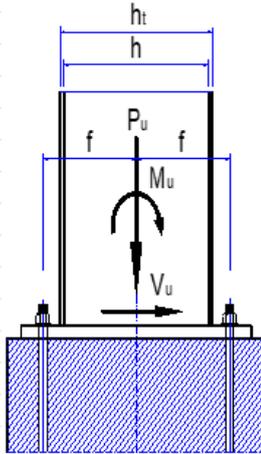
Dalam perencanaan struktur baja, terdapat bagian yang menghubungkan kolom struktur dengan pondasi yang sering disebut sebagai “pelat landasan” atau “*base plate*”. Fungsi dari *base plate* dan angkur ini adalah untuk mentransfer gaya geser, gaya aksial, dan momen lentur dari struktur ke pondasi. (Wicaksono, 2023).



Gambar 2.8 Pelat Landasan (*Base Plate*)

Perencanaan struktur *base plate* dapat dibagi menjadi beberapa tipe. Pertama, terdapat *base plate* tanpa beban momen lentur, yang berfungsi sebagai tumpuan sendi dalam bentuk idealis. Kemudian, terdapat juga *base plate* dengan beban momen lentur yang memerlukan desain angkur yang mampu menahan gaya *uplift* dan geser yang terjadi.

Pada kasus ini *base plate* harus mampu memikul gaya momen lentur yang terjadi karena direncanakan *base plate* yang digunakan merupakan kategori jepit. Angkur harus mampu menahan gaya *uplift* serta gaya geser yang terjadi. Dalam kasus ini ada dua variable yang dihitung yaitu panjang Y dan gaya Tarik pada angkur, Tu.



Gambar 2.9 Beban yang Bekerja Pada Base Plate

### 2.1.10.1 Perhitungan Eksentrisitas

$$e = \frac{M_u}{P_u} \quad (2.67)$$

Dimana.

$e$  : Jarak eksentrisitas (mm)

$M_u$  : Momen yang terjadi (N.mm)

$P_u$  : Gaya tekan yang terjadi (N)

### 2.1.10.2 Tegangan Tumpu Nominal pada Beton

$$f_c = 0.85 \times f_c' \times \phi_c \times \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (2.68)$$

Dimana.

$\phi_c$  : Faktor reduksi (0,65)

$f_c'$  : Kuat tekan beton

$f_{pmaks}$  : Tegangan maksimum tumpu beton

$A_1$  : Luas *base plate*

$A_2$  : Luas maksimum *base plate* yang menahan beban beban konsentrik

### 2.1.10.3 Ukuran Pelat Dasar

$$m = \frac{N - 0,95.d}{2} \quad (2.69)$$

$$n = \frac{(B - 0,8 . bf)}{2} \quad (2.70)$$

Dimana.

$B$  : Lebar Base Plate

$N$  : Panjang Base Plate

bf : Lebar sayap kolom

f : jarak angkur ke sumbu base plate dan sumbu kolom

#### 2.1.10.4 Perhitungan Tebal *Base Plate*

Perencanaan tebal base plate dilakukan seperti perencanaan komponen struktur lentur, dengan persyaratan sebagai berikut.

$$M_{pl} \leq \phi b \cdot M_n \quad (2.71)$$

$$M_n \leq M_p \quad (2.72)$$

Dimana.

$M_{pl}$  : Momen lentur terfaktor yang terjadi pada *base plate*, Nmm

$M_n$  : Momen nominal *base plate*, Nmm

$M_p$  : Momen lentur plastis dari *base plate*, Nmm

Besarnya momen lentur terfaktor dapat dihitung dengan persamaan.

$$M_{pl} = \frac{1}{2} f_p \cdot L^2 \quad (2.73)$$

Dimana.

$f_p$  : Tegangan tumpu yang timbul pada permukaan beton (MPa)

c : Diambil dari nilai terbesar antara m,n, dan n'

n' : Panjang kantilever *base plate* dari muka beton kolom flens atau web berdasarkan teori garis leleh.

Untuk kondisi leleh, tebal minimum pelat landasannya adalah.

$$tp \leq \sqrt{\frac{4 \cdot M_{pl}}{\phi \cdot f_y}} \quad (2.74)$$

Momen nominal *base plate* dengan persamaan.

$$M_n = \frac{tp^2}{4} \cdot f_y \quad (2.75)$$

Dimana.

tp : Tebal pelat (mm)

#### 2.1.10.5 Panjang Angkur Minimum

Panjang angkur yang ditanama minimum yang diperlukan (L) yaitu.

$$L = \frac{f_y}{4 \cdot d \cdot \sqrt{f_c'}} \quad (2.76)$$

## 2.2 Struktur Beton

### 2.2.1 Kolom Beton

Kolom merupakan elemen struktur utama yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur. Pada prakteknya, sangat jarang menemukan elemen kolom memikul murni gaya tekan. Umumnya kolom selalu memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen.

#### 2.2.1.1 Perilaku Tekan Pada Kolom Beton

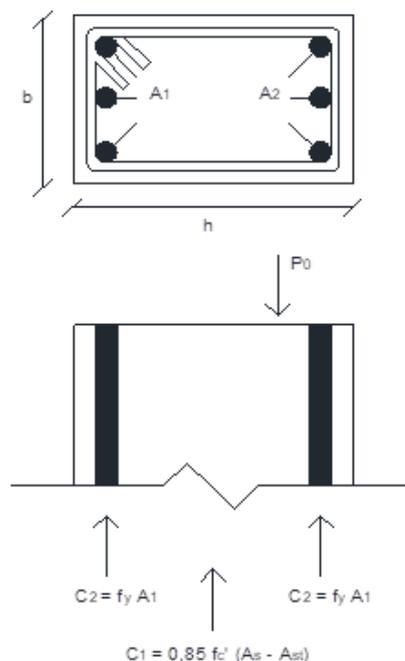
Komponen kolom dengan tekan murni salah satu contohnya adalah fenomena yang umumnya terjadi pada kolom pendek (pedestal) yang menerima beban tekan sentris (centrically loaded short column), seperti yang terlihat pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** Berdasarkan pasal 22.4.2.2 SNI 2847 : 2019 secara umum kuat dari kolom yang dibebai secara sentris  $P_0$ , dapat ditulis sebagai berikut.

$$P_0 = 0,85 f_c' (A_g - A_{st}) + A_{st} F_y \quad (2.77)$$

Keterangan

$A_g$ : Luasan Kolom

$A_{st}$ : Luasan tulangan longitudinal (memanjang) kolom



Gambar 2.10 Centrically Loaded Short Column.

Pada penampang , luasan penampang dinyatakan  $A_g = bh$  dan  $A_{st} = (A_1 + A_2)$ . Sedangkan faktor 0,85 merupakan perbandingan antara kuat tekan kolom dengan kuat tekan tes silinder. Sehingga persamaan (2.77) dapat ditulis menjadi.

$$P_0 = A_g [0,85 f_c' (1 - \rho_g) + \rho_g f_y] \quad (2.78)$$

Keterangan:

$$\rho_g : A_{st} / A_g$$

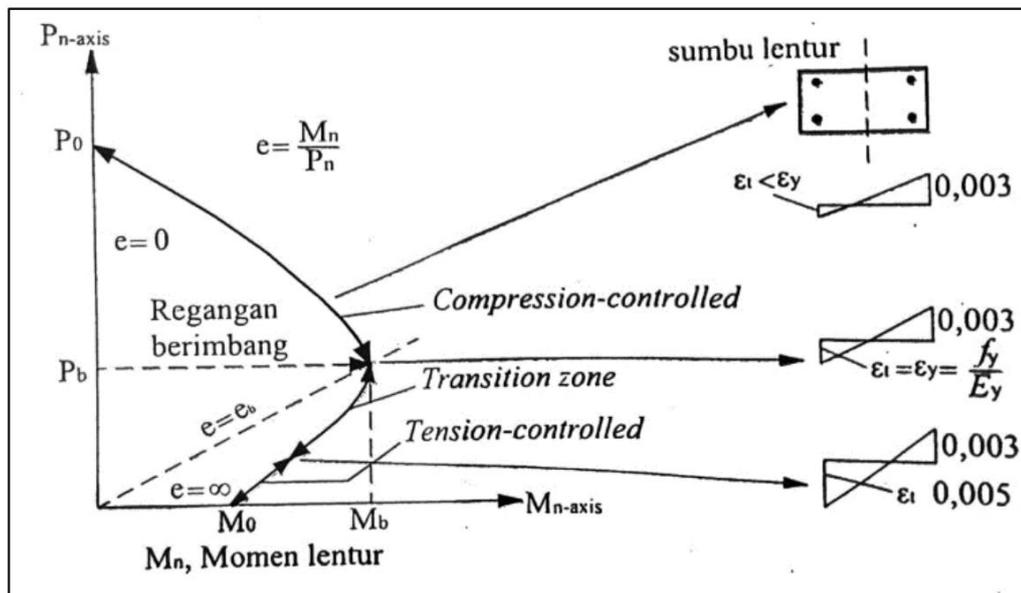
Bila persamaan  $\rho_g$  disubstitusikan kedalam persamaan (2.78) maka menjadi

$$P_0 = A_g [0,85 f_c' + \rho_g (f_y - 0,85 f_c')] \quad (2.79)$$

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 Tabel 22.4.2.1, kuat nominal yang digunakan dalam desain tidak boleh melebihi  $0,8 P_0$ .

### 2.2.1.2 Diagram Interaksi Kolom

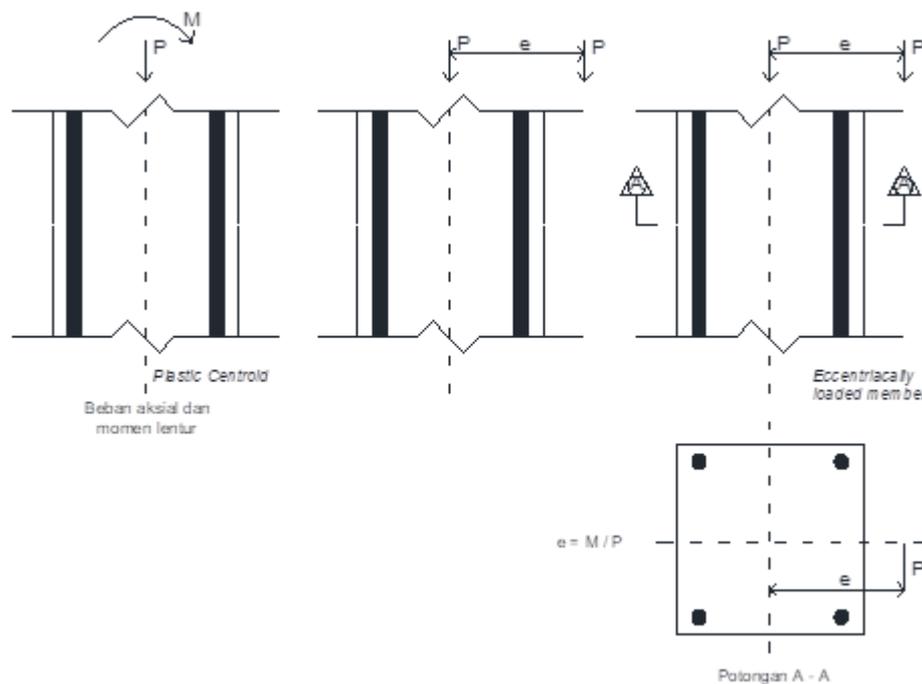
Kolom menerima kombinasi beban berupa aksial tekan ( $P$ ) dan momen ( $M$ ). Dari interaksi dua parameter tersebut, terdapat sejumlah kombinasi kekuatan yang tak terhitung jumlahnya. Interaksi dari aksial ( $P$ ) dan momen ( $M$ ) diwujudkan dalam sebuah kurva yang dikenal dengan diagrama  $P - M$ , seperti yang terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Diagram Interaksi  $P - M$  Elemen Kolom

Diagram interaksi  $P$  &  $M$  menggambarkan dua kondisi utama, yaitu kompresi dan tarik, yang didasarkan pada rasio  $P$  (tekan aksial) dan  $M$  (Momen). Pada kondisi kompresi, penampang kolom mencapai regangan maksimum tekan  $\epsilon_c = 0,003$ , sebelum tulangan baja meleleh  $\epsilon_y = f_s / E_s$ . Sedangkan pada kondisi tarik, tulangan

kolom mencapai regangan leleh  $\epsilon_y$  dan material mencapai regangan tekannya ( $\epsilon_c$ ). Diantara kedua kondisi ini terdapat kondisi regangan berimbang atau batas kendali tekan yang memisahkan zona kompresi terkendali dan tarik terkendali. Dalam kondisi terkendali tarik, lapisan ekstre tulangan mencapai regangan  $\epsilon_t \geq 0,005$  dengan faktor reduksi bervariasi linier antara 0,75 – 0,9 untuk kolom bulat dan 0,65 – 0,9 untuk kolom persegi. Konsep eksentrisitas ( $e$ ) dalam diagram  $P - M$  menggambarkan pengaruh gaya tekan dan momen pada kolom akibat beban eksentris, penting dalam analisis dan desain struktur beton bertulang.



Gambar 2.12 Kolom yang Dibebani Beban Eksentris

### 2.2.1.3 Kondisi Regangan Berimbang

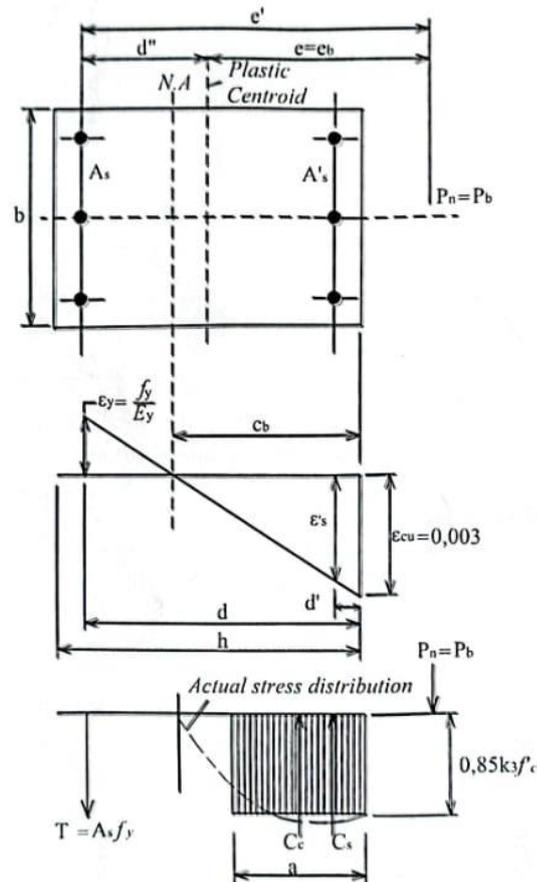
Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*) atau *compression control limit* merupakan pembatas antara *compression – controlled* dan *transition zone* pada diagram interaksi kolom. Kondisi ini seras ekstrim tekan beton dan seras tarik tulangan baja terluar sama – sama mencapai keadaan batasnya yaitu  $\epsilon_c = 0,003$  dan  $\epsilon_y = f_s / E_s$ . pada penampang persegi seperti Gambar 2.13, kondisi regangan berimbang ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\frac{C_b}{d} = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003} \quad (2.80)$$

$$C_b = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003} d = \left( \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} \right) \quad (2.81)$$

Gaya gaya yang terjadi dalam kondisi ini memiliki persamaan.

$$P_b = C_c + C_s - T \quad (2.82)$$



Gambar 2.13 Kondisi Regangan Berimbang untuk Penampang Persegi

Pada kuat tekan beton pada elemen kolom saat dibebani aksial tekan murni adalah  $k_3 f'_c$ , yang dimana  $k_3 = 0,85$  dan kuat beton dinyatakan sebagai  $0,85 f'_c$  merujuk teori blok tegangan *Whitney* pada teori balok. Perbedaan yang terdapat pada perhitungan blok tegangan tersebut. Memiliki pengaruh yang kecil dalam perhitungan kolom yang berada dibawah titik keseimbangan (*balanced point*). Sehingga dalam kondisi regangan berimbang ini, nilai  $k_3$  akan dibulatkan menjadi 1,0. Sehingga persamaan  $C_c$  dapat dinyatakan menjadi.

$$C_c = k_3 (0,85 f'_c ab) = 1,0 (0,85 f'_c ab) = 1,0 (0,85 f'_c \beta_1 c_b b) \quad (2.83)$$

Gaya tarik dapat dinyatakan dengan.

$$T = A_s f_y \quad (2.84)$$

Sedangkan gaya tekan dari tulangan pada kondisi regangan berimbang.

$$C_s = A_s' (f_y - 0,85 f_c') \quad (2.85)$$

Sehingga persamaan (2.82) menjadi

$$P_b = 0,85 f_c' \beta_1 c_b b + A_s' (f_y - 0,85 f_c') - A_s f_y \quad (2.86)$$

Eksentrisitas  $e_b$  diukur dari pusat plastis (*plastic centroid*) seperti pada Gambar 2.10. Untuk penampang yang simetris, *plastic centroid* terletak pada tengah dari tinggi penampang. Dengan diperolehnya nilai  $P_b$  pada persamaan(2.86) maka persamaan momen yang terdapat pada Gambar 2.13 adalah.

$$M_b = P_b e_b = C_c \left( d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'') + Td'' \quad (2.87)$$

#### 2.2.1.4 Desain Kekuatan Wilayah I, II, III

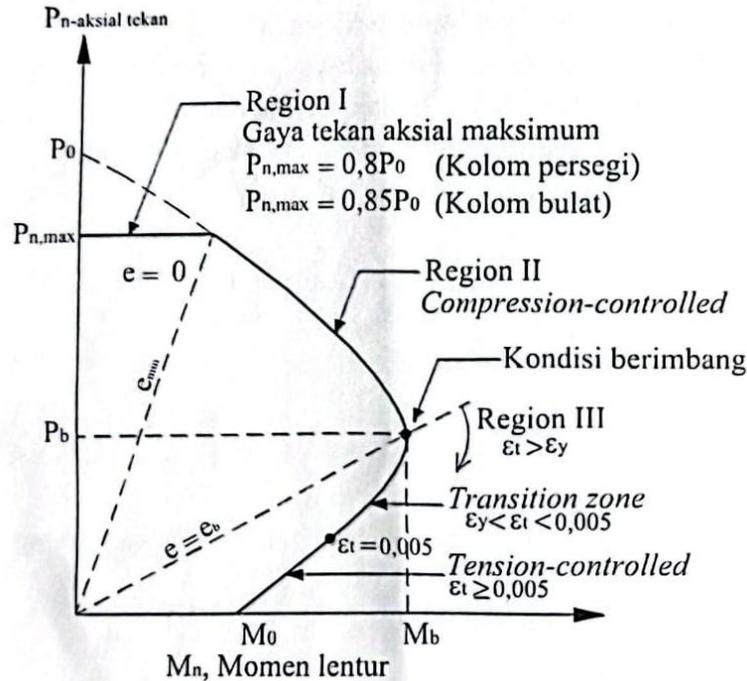
##### Desain pada wilayah I

Pada wilayah I, elemen struktur memiliki momen lentur yang sangat kecil atau bahkan bisa diabaikan dan yang lebih menentukan adalah gaya aksial tekan. Aksial tekan yang terjadi  $P_{n(max)} = 0,85 P_0$  untuk kolom bulat. Desain pada wilayah I ini memang diijinkan oleh ACI (*American Concrete Institute*) namun tidak disarankan. Karena pada kondisi ini, gaya aksial tekan mendekati gaya tekan murni (momen sangat kecil) dengan kapasitas deformasi yang rendah. Sehingga dikhawatirkan terjadi keruntuhan tanpa peringatan (getas).

Untuk elemen struktur tak bergoyang (*non – sway*) yang dimana rasio kelangsingan sangat rendah (kelangsingan diabaikan), elemen tersebut diperhitungkan dengan gaya aksial tekan dan pengaruh momen diabaikan. Bila mana momen tetap diperhitungkan namun eksentrisitas yang terjadi kurang dari  $e_{min}$ , gaya aksial maksimum tetap menjadi parameter yang menentukan. Untuk elemen struktur tak bergoyang yang dimana kelangsingan diperhitungkan, perhitungan momen harus dilakukan karena merupakan bagian dari persyaratan pembesaran momen. Namun bila hasil eksentrisitas yang dihasilkan tetap lebih kecil dari  $e_{min}$  maka perhitungan tetap digolongkan pada wilayah I.

Sedangkan untuk struktur bergoyang (*sway*), kondisi pada wilayah I sangat jarang terjadi. Sehingga bisa dikatakan bahwa struktur bergoyang tidak tergolong wilayah I. Hal ini dikarenakan pada struktur bergoyang, momen yang terjadi relatif lebih besar dikarenakan beban lateral yang diterima oleh struktur sehingga pada diagram tidak mengarah pada wilayah I yang murni aksial tekan.

Semua penampang yang tergolong wilayah I tergolong *compression controlled*, sehingga faktor reduksi kekuatan yang digunakan adalah  $\phi = 0,75$  untuk kolom bulat (sengkang spiral).



Gambar 2.14 Kategori Desain untuk Elemen Kombinasi Tekan dan Lentur

### Desain pada wilayah II

Pada wilayah II, elemen struktur tetap dalam kategori *compression – controlled*. Pada kondisi ini elemen struktur memikul momen relatif lebih besar namun tetap didominasi oleh aksial tekan. Perbedaan dari wilayah I adalah  $P < P_{n(max)}$ . Dikarenakan masih tergolong dalam kategori *compression controlled*. Faktor reduksi dari elemen struktur adalah  $\phi = 0,65$  untuk kolom persegi dan  $\phi = 0,75$  untuk kolom bulat.

### Desain pada wilayah III

Pada wilayah III terdapat dua kondisi yaitu *transition zone* dan *tension controlled*. Disaat regangan terjadi  $f_y / E_s < \epsilon_t < 0,005$ , maka elemen struktur tergolong *transition zone*. Sedangkan bila  $\epsilon_t \geq 0,005$  maka tergolong *tension – controlled* dengan faktor reduksi  $\phi = 0,9$ .

Pada kondisi *transition zone* faktor reduksi kekuatan yang digunakan adalah.

$$\phi = 0,75 + 0,15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})} \leq 0,9 \quad (2.88)$$

Kolom persegi (senggang persegi)

$$\phi = 0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{(0,005 - \varepsilon_{ty})} \leq 0,9 \quad (2.89)$$

Persamaan (2.88) dan (2.89) bisa diwujudkan dalam  $c/d_t$  sehingga menjadi

a. Kolom bulat (senggang spiral).

$$\phi = 0,75 + 0,15 \left[ \frac{1}{c/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0,9 \quad (2.90)$$

b. Kolom persegi (senggang persegi).

$$\phi = 0,65 + 0,25 \left[ \frac{1}{c/d_t} - \frac{5}{3} \right] \leq 0,9 \quad (2.91)$$

### 2.2.1.5 Kombinasi Aksial Tekan dan Biaksial Momen

Secara umum, metode Analisa yang digunakan hampir sama dengan metode yang digunakan pada kolom dengan momen atau sumbu (*one axis only*). Metode ini melibatkan proses “*trial and error*” untuk memperoleh posisi garis netral dalam kondisi tekan dengan eksentrisitas tertentu.

Salah satu metode yang digunakan adalah Metode *load contour* melibatkan potongan permukaan dari grafik *load contour*  $P_n - M_{nx} - M_{ny}$  dengan nilai  $P_n$  konstan, seperti yang terlihat pada . Persamaan *non-dimensional* untuk kondisi tersebut bisa dinyatakan dalam bentuk.

$$\left( \frac{M_{nx}}{M_{0x}} \right)^{\alpha_1} + \left( \frac{M_{ny}}{M_{0y}} \right)^{\alpha_2} = 1,0 \quad (2.92)$$

Keterangan

$$M_{nx} = P_n e_y$$

$$M_{ny} = P_n e_x$$

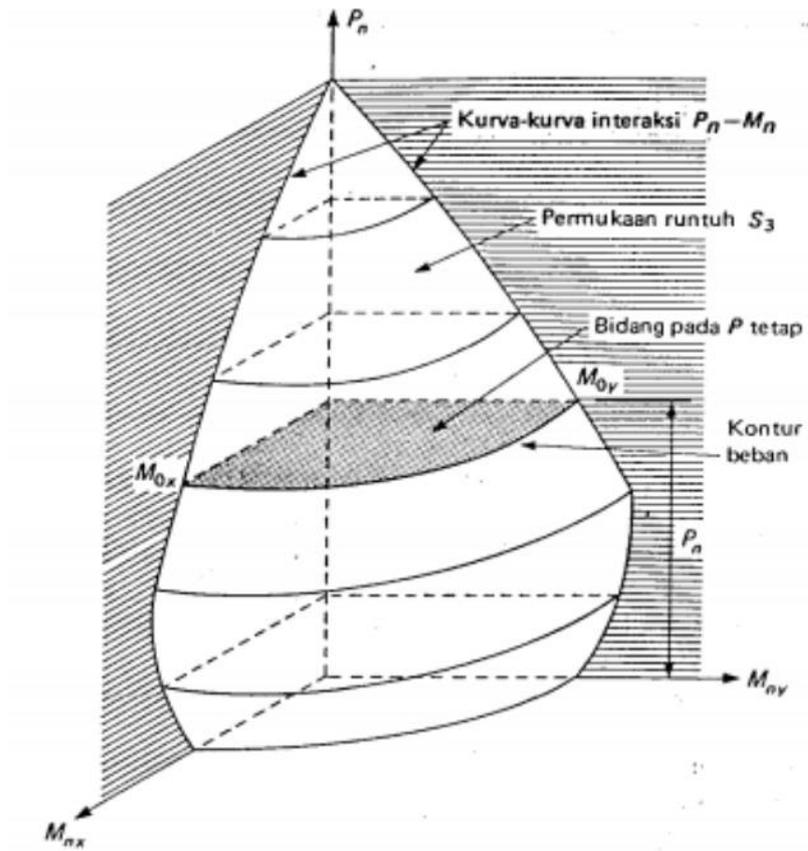
$$M_{0x} = M_{nx} \text{ dengan aksial } P_n \text{ disaat } M_{ny} = 0 \text{ atau } e_x = 0$$

$$M_{0y} = M_{ny} \text{ dengan aksial } P_n \text{ disaat } M_{nx} = 0 \text{ atau } e_y = 0$$

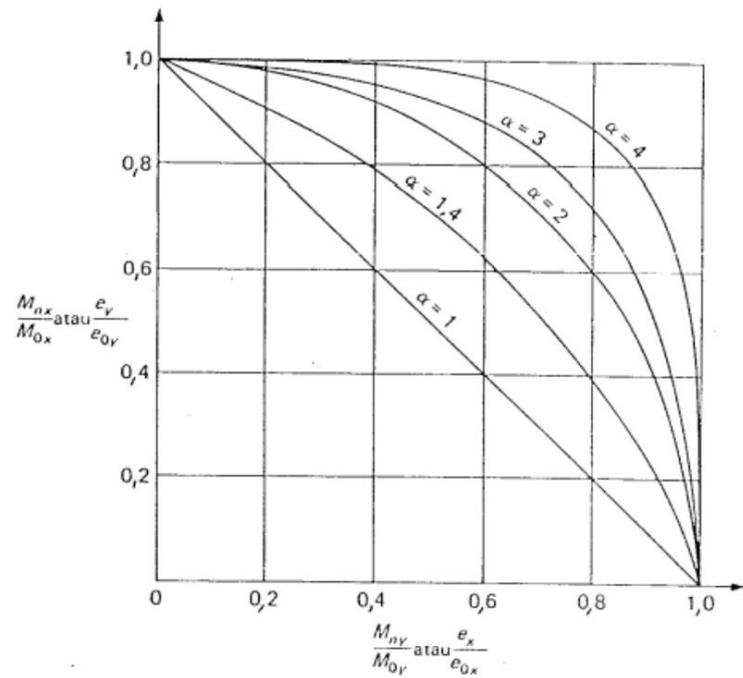
Parameter  $\alpha_1$  &  $\alpha_2$  adalah eksponen yang tergantung pada dimensi penampang kolom, jumlah tulangan kolom, kekuatan material beton, tegangan leleh tulangan dan ketebalan selimut beton. Dalam kondisi tertentu asumsi bahwa nilai  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$  menghasilkan grafik seperti pada Gambar 2.15 dan persamaan.

$$\left( \frac{M_{nx}}{M_{0x}} \right)^{\alpha} + \left( \frac{M_{ny}}{M_{0y}} \right)^{\alpha} = 1,0 \quad (2.93)$$

Meskipun nilai  $\alpha$  sudah disederhanakan, nilai  $\alpha$  tetap harus ditentukan. Sebuah penelitian menyebutkan, nilai  $\alpha$  bisa diambil sebesar 1,5 untuk penampang persegi.



Gambar 2.15 Grafik Load Contour  $P_n - M_{nx} - M_{ny}$



Gambar 2.16 Kurva Interaksi

### 2.2.1.6 Pengaruh Kelangsingan Kolom

Desain kolom pada dasarnya melibatkan pemilihan penampang dan penulangan yang tepat sehingga kolom kuat dalam memikul kombinasi beban terfaktor yang berupa aksial tekan dan momen (momen primer). Selain itu kolom juga harus mampu memikul momen yang diakibatkan lendutan karena faktor kelangsingan (momen sekunder). Kelangsingan kolom dinyatakan sebagai rasio kelangsingan.

$$\lambda = \frac{k \cdot l_u}{r} \quad (2.94)$$

Dimana.

$k$  : Faktor panjang efektif yang besarnya tergantung pada kekakuan – kekakuan rotasional dan lateral ujung – ujungnya.

$l_u$  : Panjang kolom yang tak terkekang

$r$  : Jari – jari girasi penampang.

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 6.2.5.1, besaran jari – jari adalah.

$$r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} \quad (2.95)$$

Atau

$r = 0,3 \times$  dimensi arah stabilitas yang ditinjau (kolom persegi)

Atau

$r = 0,3 \times D$  (kolom bulat)

Berdasarkan pengaruh kelangsingan dan pembesaran momen yang terjadi, kolom dikelompokkan menjadi dua yaitu kolom bergoyang dan kolom tak bergoyang. Adapun pembahasan lebih detailnya adalah sebagai berikut.

#### 1. Kolom bergoyang (*Sway*)

Untuk kolom bergoyang, pengaruh kelangsingan bisa diabaikan bila memenuhi persyaratan yang diatur dalam SNI 2847 : 2019 pasal 6.2.5 dengan persamaan berikut.

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 22$$

Metode pembesaran momen untuk kolom bergoyang diatur dalam SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.4.7 yaitu.

$$M_1 = M_{1ns} + \delta_s M_{1s} \quad (2.96)$$

$$M_2 = M_{2ns} + \delta_s M_{2s} \quad (2.97)$$

Dimana

$M_1$  : Momen ujung terkecil pada elemen struktur tekan

$M_2$  : Momen ujung terbesar pada elemen struktur tekan

$M_{1ns}$  : Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_1$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping tidak besar.

$M_{2ns}$  : Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_2$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping tidak besar.

$M_{1s}$  : Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_1$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping cukup besar.

$M_{2s}$  : Momen ujung terfaktor pada ujung dimana  $M_2$  bekerja, akibat beban yang mengakibatkan goyangan samping cukup besar.

$\delta_s$  : Faktor pembesaran momen untuk rangka bergoyang.

Besaran nilai  $\delta_s$  diatur pada pasal 6.6.4.6.2 SNI 2847 : 2019 yaitu,

$$\delta_s = \frac{1}{1-Q} \geq 1,0 \quad (2.98)$$

atau

$$\delta_s = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{0,75 \sum P_c}} \geq 1,0 \quad (2.99)$$

Atau berdasarkan analisa elastis orde kedua. Parameter yang terdapat pada Persamaan (2.98) dan (2.99) sebagai berikut.

Indeks stabilitas (Q) sesuai SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.4.4.1 yaitu.

$$\frac{\sum P_u \Delta_0}{V_{us} l_c} \quad (2.100)$$

Dimana

$\sum P_u$  : Beban vertikal total.

$V_{us}$  : Gaya geser lintai total pada tingkat yang ditinjau.

$l_c$  : Panjang komponen tekan, diukur dari pusat ke pusat joint.

$\Delta_0$  : Simpangan relatif antar tingkat orde pertama pada tingkat yang ditinjau akibat  $V_{us}$

Beban tekan kritis ( $P_c$ ) sesuai pasal 6.6.4.4.2 SNI 2847 : 2019 yaitu.

$$P_c = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{(kl_u)^2} \quad (2.101)$$

Nilai dari  $(EI)_{eff}$  ditentukan berdasarkan pasal 6.4.4.2 SNI 2847 : 2019.

Nilai  $(EI)_{eff}$  harus dihitung berdasarkan salah satu persamaan berikut.

$$(EI)_{eff} = \frac{0,4 E_c I_g}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.102)$$

$$(EI)_{eff} = \frac{0,2 E_c I_g + E_s I_{se}}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.103)$$

$$(EI)_{eff} = \frac{E_c I_g}{1 + \beta_{dns}} \quad (2.104)$$

Besaran  $\beta_{dns}$  harus diambil sebagai rasio beban tetap aksial maksimum terfaktor yang dikaitkan dengan kombinasi beban yang sama. I pada persamaan (2.104) harus dihitung berdasarkan tabel 6.6.3.1 pada SNI 2847 : 2019.

## 2. Kolom tak bergoyang (*Non – Sway*)

Untuk kolom tak bergoyang, pengaruh kelangsingan bisa diabaikan bila memenuhi persyaratan yang diatur dalam pasal 6.2.5 persamaan 6.2.5b pada SNI 2847 : 2019.

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 34 + 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad (2.105)$$

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 40 \quad (2.106)$$

Pada persamaan (2.105) ,  $M_1/M_2$  bernilai negatif bila lendutan yang terjadi pada kolom tergolong lendutan tunggal dan bernilai positif bila tergolong lendutan ganda.

Metode pembesaran momen untuk kolom tak bergoyang diatur SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.4.5 yaitu.

$$M_c = \delta M_2 \quad (2.107)$$

Dimana

$M_c$  : Momen terfaktor orde pertama  $M_2$  yang diperbesar untuk pengaruh kurvatur struktur.

$\delta$  : Faktor pembesaran momen untuk mencerminkan pengaruh kurvatur komponen struktur antara ujung – ujung komponen struktur tekan.

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.5.4. Nilai  $M_2$  pada persamaan (2.105) tidak boleh kurang dari  $M_{2min}$ .

$$M_{2min} = P_u (15 + 0,03h) \quad (2.108)$$

Nilai  $\delta$  dihitung berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.4.2 yaitu.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{0,75 P_c}} \geq 1,0 \quad (2.109)$$

Dimana

$P_u$  : Gaya aksial terfaktor, diambil sebagai positif untuk tekan dan negatif untuk tarik.

$P_c$  : Beban tekuk kritis, sesuai persamaan (2.101).

$C_m$ : Faktor yang menghubungkan diagram momen aktual ke diagram momen seragam ekuivalen.

Besaran nilai  $C_m$  ditentukan SNI 2847 : 2019 pasal 6.6.4.5.3. Adapun ketentuannya adalah sebagai berikut.

$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} \tag{2.110}$$

Pada persamaan (2.110) , bernilai  $M_1/M_2$  negatif bila lendutan yang terjadi pada kolom tergolong lendutan tunggal dan bernilai positif bila tergolong lendutan ganda.

Untuk kolom dengan beban transversal yang bekerja diantara tumpuannya.

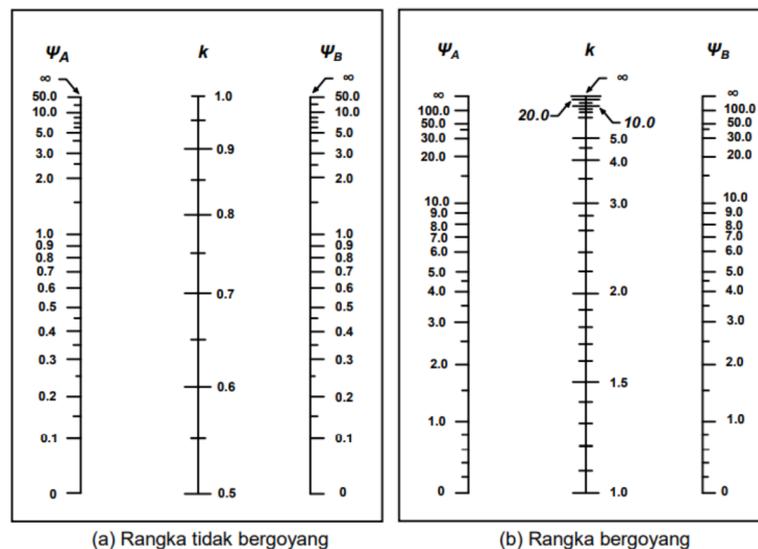
$$C_m = 1,0 \tag{2.111}$$

Bila  $M_{2min} > M_2$  maka nilai  $C_m = 1,0$

Setelah memperoleh nilai momen dari orde kedua, ada syarat yang perlu dipastikan yaitu pasal 6.2.6 SNI 2847 : 2019.

$$M_{u.orde2} = 1,4M_{u.orde1} \tag{2.112}$$

Sedangkan dalam menentukan besaran k, digunakan alat bantu desain primer yaitu *Jackson & Moreland Alignment Chart* yang terdapat dalam SNI 2847 : 2019 disajikan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Jackson & Moreland Alignment Chart.

### 2.2.1.7 Desain Geser pada Kolom

Berdasarkan SNI 2847 : 2019 pasal 25.5.6.1 persamaan  $V_c$  untuk elemen kolom adalah.

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.113)$$

Keterangan.

$N_u$ : Gaya aksial terfaktor

$A_g$ : Luasan penampang kolom

$\lambda$  : 1,0 (beton normal)

$d$  : 0,8h

Untuk nilai  $V_c$  yang lebih detail, maka mengacu pada SNI 2847 : 2019 pasal 22.5.6.1 tabel 22.5.6.1. Terdapat dua persamaan yang nilainya diambil nilai terkecil dari dua persamaan berikut.

$$V_c = \left[ 0,16\lambda \sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.114)$$

Persamaan (2.114) tidak perlu digunakan  $M_u - N_u \frac{(4h-d)}{8} \leq 0$

$$V_c = 0,29\lambda \sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29 N_u}{A_g}} \quad (2.115)$$

Keterangan.

$N_u$ : Gaya aksial terfaktor

$V_u$ : Gaya geser terfaktor

$M_u$ : Momen terfaktor

$\rho_w$  : Rasio  $A_s$  terhadap  $b_w d$

Nilai  $M_u$  dan  $V_u$  diambil secara serentak pada penampang. Dari dua persamaan tersebut, digunakan nilai terkecil untuk merepresentasikan gaya geser yang disumbangkan materia beton pada elemen kolom. Perhitungan dan konsep tulangan geser pada kolom sama seperti yang ada pada balok. Kebutuhan tulangan geser ditandai dengan.

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.116)$$

Nilai  $A_v$  yang diambil adalah nilai terbesar dari dua persamaan berikut ini.

$$A_{v,min} = 0,062 \sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.117)$$

Atau

$$A_{v,min} = \frac{(0,35 b_w s)}{f_{yt}} \quad (2.118)$$

Dengan diperoleh nilai  $A_{v,min}$ , maka  $V_{s min}$  dapat ditentukan dari nilai terbesar dari dua persamaan berikut ini.

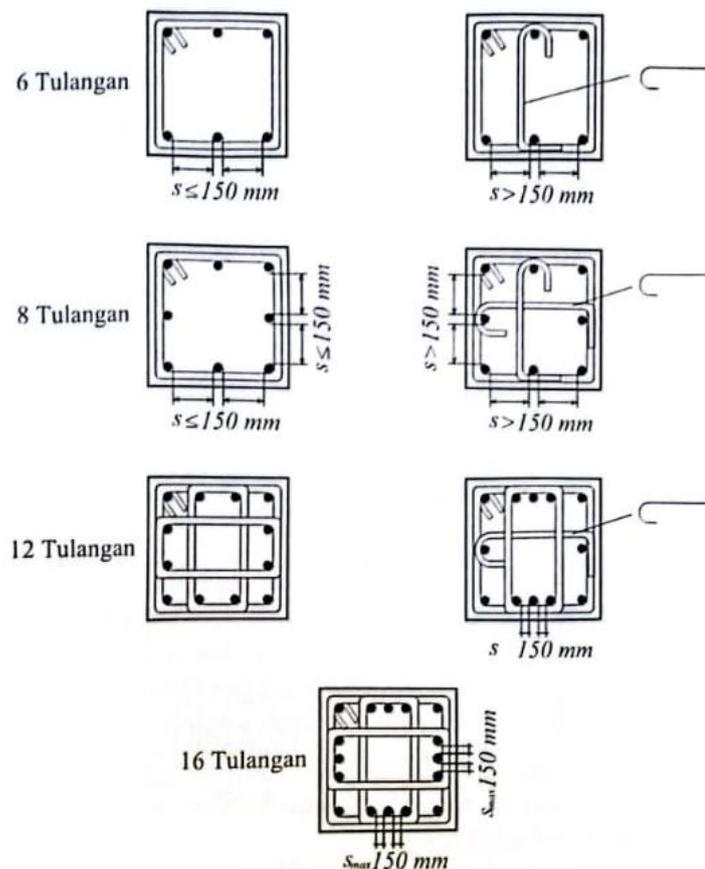
$$V_{s min} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{f_{yt} d}{s} \left[ \frac{(0,35 b_w s)}{f_{yt}} \right] = 0,35 b_w d \quad (2.119)$$

Atau

$$V_{s min} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{f_{yt} d}{s} \left[ 0,062 \sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \right] = 0,062 \sqrt{f_c'} b_w d \quad (2.120)$$

Aturan terkait tulangan sengkang pada kolom, baik diameter dan jarak antar sengkang, diatur dalam SNI 2847 : 2019. Secara umum, tulangan geser pada balok dikelompokkan menjadi tiga yaitu.

1. Sengkang ikat : SNI 2847 : 2019 pasal 25.7.2
2. Sengkang spiral : SNI 2847 : 2019 pasal 25.7.3
3. Sengkang pengekang : SNI 2847 : 2019 pasal 25.7.4



Gambar 2.18 Formasi Umum dari Tulangan Geser Kolom.

### 2.2.2 Pelat Beton

Pelat beton dibagi menjadi 2 kategori yakni pelat satu arah dan pelat dua arah dimana pelat dua arah memenuhi persamaan dibawah ini.

$$\frac{L}{W} \leq 2 \quad (2.121)$$

Dimana.

L : Panjang Pelat

W : Lebar Pelat

#### 2.2.2.1 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah

Pada SNI 2847 : 2019 pasal 8.3.1.2 menentukan ketebalan minimum pelat dua arah untuk mencegah terjadinya lendutan berlebih. Ketebalan pelat dua arah ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

Untuk  $0,2 < \alpha_{fm} < 2,0$

$$h = \frac{l_n \left( 0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)} \geq 125 \text{ mm} \quad (2.122)$$

Untuk  $\alpha_{fm} > 2,0$

$$h = \frac{l_n \left( 0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta} \geq 90 \text{ mm} \quad (2.123)$$

Untuk  $0,2 > \alpha_{fm}$

h : ketebalan minimum pelat tanpa balok (Tabel 8.3.1.1 SNI 2847 : 2019)

Keterangan

$l_n$  : Panjang bentang

$\beta$  : Rasio bentang bersih dalam arah panjang terhadap arah pendek dari pelat.

$\alpha_{fm}$  : Nilai rata – rata  $\alpha_f$  untuk semua balok pada tepi – tepi dari suatu plat.

$\alpha_f$  : Rasio kekakuan lentur penampang balok ( $E_{cb} I_b$ ) terhadap lentur pelat ( $E_{cs} I_s$ ), yang dibatasi secara lateral oleh garis – garis sumbu tengah dari pelat – pelat yang bersebelahan pada tiap sisi balok.

$$\alpha_f = \frac{E_{cb} I_b}{E_{cs} I_s}$$

$I_b$  : Momen inersia bruto dari penampang balok terhadap sumbu berat, penampang balok mencakup pula bagian pelat pada setiap sisi balok sebesar proyeksi balok yang berada di atas atau di bawah pelat, namun tidak lebih dari empat kali tebal pelat.

$I_s$  : Momen inersia brutto dari penampang pelat.

### 2.2.2.2 Tulangan Lentur

Pelat dua arah adalah pelat yang mengalami lendutan pada kedua arah bentangnya. Sehingga diperlukan tulangan lentur yang dipasang pada pelat harus dua arah (saling tegak lurus). Luasan minimum tulangan lentur ( $A_{smin}$ ) pada pelat dua arah diatur pada pasal 8.6.1 SNI 2847 : 2019.

Tabel 2.5  $A_{smin}$  untuk pelat dua arah non – prategang.

Jenis Tulangan	$F_y$ (MPa)	$A_{smin}$ (mm <sup>2</sup> )	
Batang Ulir	< 420	0,0020 $A_g$	
Batang ulir atau kawat las	> 420	Terbesar dari	$\frac{0,0018 \times 420}{F_y} A_g$
			0,0014 $A_g$

### 2.2.2.3 Tulangan Susut dan Suhu

Tulangan susut dan suhu pada pasal 8.6.1 menyatakan bahwa tulangan susut dan suhu harus sesuai dengan pasal 24.4.3.2 dimana desain tulangan susut pelat dua arah sama dengan desain tulangan susut pelat satu arah.

Tulangan susut dan suhu dipasang tegak lurus dengan tulangan lentur. Menurut pasal 7.6.4 SNI 2847 : 2019 tulangan ini dipasang guna mengantisipasi tegangan dan retak akibat pengaruh perubahan susut dan temperatur dari material beton. Luasan tulangan susut minimum diatur pada pasal 24.4.3.2 SNI 2847 : 2019 Nilai rasio tegangan yang tertera pada Tabel 2.6 yang memiliki kesamaan dengan

Tabel 2.5. Maka luasan minimum tulangan lentur dan susut adalah sama yang membedakan adalah penyajian yang dimana tabel untuk tulangan lentur dalam bentuk luasan dan tabel untuk tulangan susut adalah rasio.

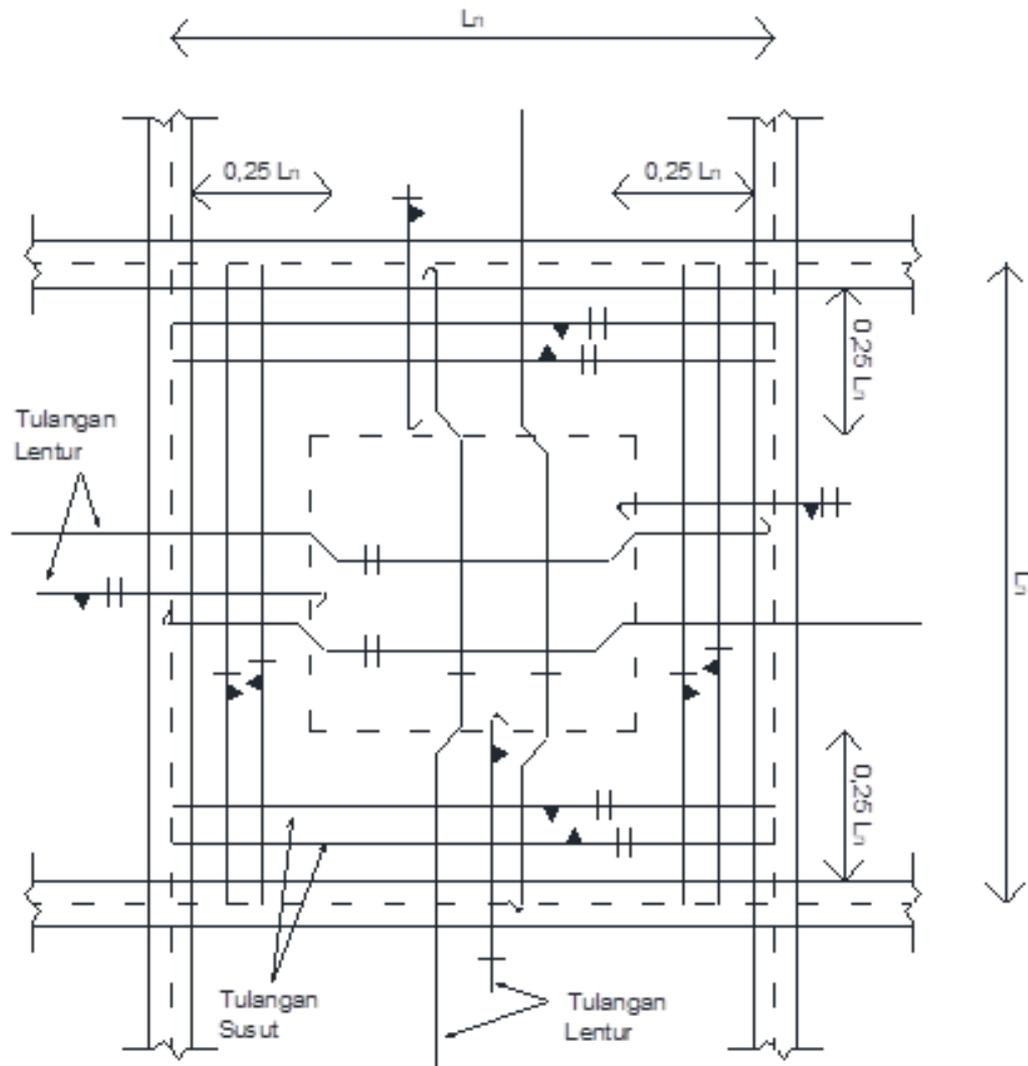
Tabel 2.6 Rasio ( $\rho_{min}$ ) tulangan susut dan suhu minimum

Jenis Tulangan	$F_y$ (MPa)	$\rho_{smin}$ (mm <sup>2</sup> )	
Batang Ulir	< 420	0,0020	
Batang ulir atau kawat las	> 420	Terbesar dari	$\frac{0,0018 \times 420}{F_y}$
			0,0014

### 2.2.2.4 Spasi Tulangan Lentur dan Tebal Selimut Beton Pelat Dua Arah

Spasi tulangan lentur pada pelat dua arah diatur pada pasal 8.7.2 SNI 2847 : 2019. Dalam hal ini spasi minimal tidak kurang dari nilai terbesar dari 25 mm,  $d_b$ . Sedangkan syarat spasi maksimal harus diambil yang terkecil dari  $2h$ , dan 450 mm

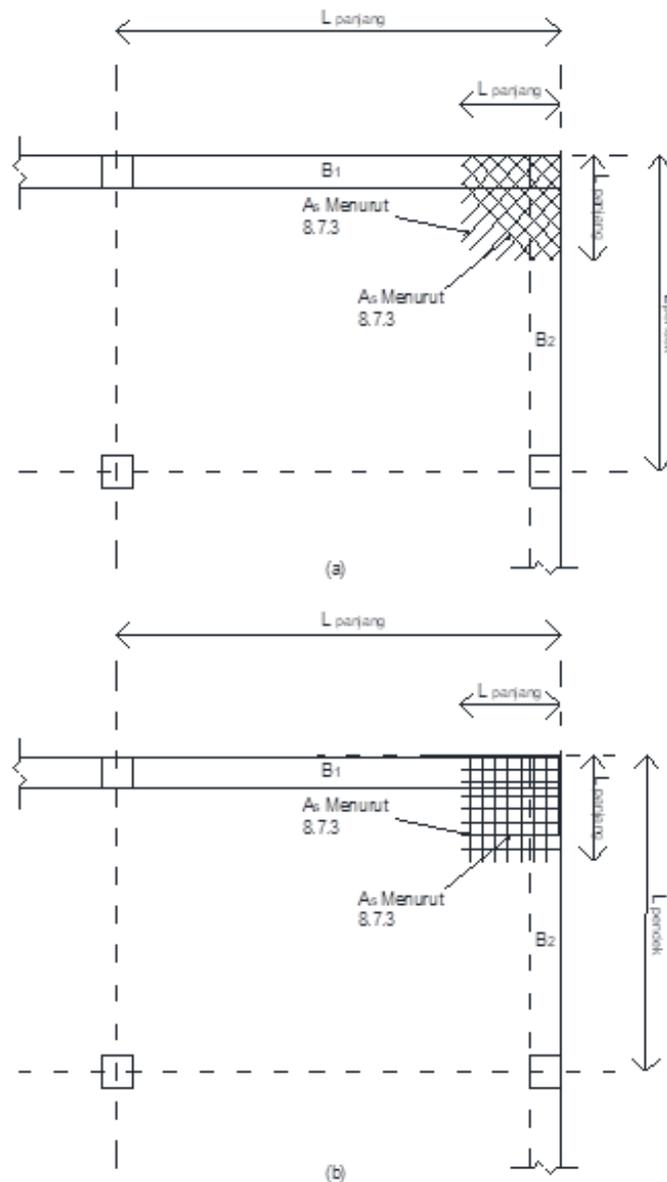
pada penampang kritis, dan yang terkecil dari  $3h$  dan  $450$  mm pada penampang lainnya. Untuk ketebalan selimut beton yang digunakan diatur pada Tabel 20.6.1.3.1 pada SNI 2847 : 2019 yang menyatakan bahwa tebal selimut pelat yang tidak terpapar cuaca atau tidak menyentuh tanah adalah  $20$  mm.



Gambar 2.19 Sistem Penulangan Pelat Dua Arah Tulangan Lentur dan Sudut

### 2.2.2.5 Tulangan Sudut

Tulangan sudut diatur pada pasal 8.7.3 didasari teori umum yang menyatakan bahwa ujung pelat yang tidak dikekang pada sudut pelat duarah, cenderung terangkat saat diberi beban. Jika pengangkatan ini ditahan oleh balok, maka momen lentur akan terjadi pada pelat. Sehingga dibutuhkan tulangan untuk menahan moen ini agar dapat mengendalikan retak. Berdasarkan pasal tersebut ditentukan jarak tulangan maksimum adalah dua kali tebal pelat ( $2h$ ).



Gambar 2.20 Dua Tipe Tulangan Pelat Sudut Dua Arah (a). Pilihan -1 dan (b). Pilihan -2

### 2.2.2.6 Analisis Geser pada Pelat Dua Arah

Selain lentur dan susut, analisis geser dari pelat dua arah harus ditinjau. Persyaratan geser dari pelat dua arah dan tidak melebihi kuat geser material beton dimana kuat geser material beton dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\phi V_c = \phi (0,17 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d_x) \quad (2.124)$$

Keterangan

$\phi$  : Faktor reduksi (0,75)

$f_c'$  : Kuat tekan beton (MPa)

$b_w$  : Lebar beton

$d_x$  : Tebal beton

Bila persyaratan diatas tidak memenuhi maka diperlukan tulangan geser pada pelat lantai.

### 2.3 Struktur Fondasi

Struktur fondasi adalah struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke dalam tanah sehingga bangunan bisa tetap berdiri dan stabil. (Lesmana, 2020).

#### 2.3.1 Data Tanah dan Koreksi Hasil Uji SPT

Data tanah umumnya didapatkan dari hasil penyelidikan tanah *boring logging* yang berisi informasi jenis tanah dan nilai SPT untuk mengetahui konsistensi dan parameter tanah seperti berat jenis, tanah kohesi, sudut geser dalam desain pondasi. Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap variasi N-SPT pada kedalaman tertentu untuk profil tanah serupa. Diantara beberapa faktor tersebut diantaranya efisiensi palu SPT, diameter lubang bor, metode pengambilan sampel, dan panjang batang. Efisiensi palu SPT dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E_r(\%) = \frac{\text{Energi aktual palu terhadap sampel}}{\text{Energi Teoritis}} \times 100\% \quad (2.125)$$

Dimana

$W$  = Berat dari palu  $\approx 0,623$  kN

$h$  = tinggi jatuh palu  $\approx 0,76$  m

Maka

$$Wh = (0,623)(0,76) = 0,474 \text{ kN-m}$$

Dilapangan besaran  $E_r$  dapat bervariasi dari 40 hingga 90%. Standar di lapangan. Menyatakan nilai N ke rasio energi rata – rata 60%. Maka digunakan nilai efisiensi umum yakni 60%.

Tabel 2.7 Variasi dari  $\eta_B$

Diameter (mm)	$\eta_B$
60 – 120	1
150	1,05
200	1,15

Tabel 2.8 Variasi  $\eta_S$ 

Variabel	$\eta_S$
Sampel standar	1,0
Dengan lapisan pasir padat dan tanah lempung	0,8
Dengan lapisan pasir lepas	0,9

Tabel 2.9 Variasi  $\eta_R$ 

Panjang Batang	$\eta_R$
>10	1,0
6 – 10	0,8
4 - 6	0,9
0 - 4	0,75

Dengan demikian dengan mengoreksi prosedur dilapangan dan berdasarkan pengamatan, menjadi dasar untuk menstandarisasi nomor penetrasi sebagai fungsi masukan pengontrol energi dan disipasi (hilangnya energi) disekitar sampel atau.

$$N_{60} = \frac{N \eta_H \eta_B \eta_S \eta_R}{60} \quad (2.126)$$

Dimana

$N_{60}$  = Standar nomor penetrasi yang terkoreksi

$N$  = Nomor penetrasi yang belum dikoreksi

$\eta_H = E_r =$  Efisiensi palu (%)

$\eta_B =$  Faktor diameter lubang bor

$\eta_S =$  Faktor variasi sampel

$\eta_R =$  Faktor panjang batang

### 2.3.2 Klasifikasi Tanah

Tanah dapat diklasifikasi berdasarkan sifat lekatnya, dan ukuran butirnya. Berdasarkan sifat lekatnya. Sifat – sifat tanah sebagai berikut.

1. Tanah kohesif adalah tanah yang mempunyai sifat – lekatan antara butir – butirnya seperti tanah lempung.
2. Tanah Non – Kohesif adalah tanah yang tidak mengandung lempung pasir. Ukuran tanah berdasarkan ukuran butir digolongkan menjadi. (Hardiyatmo, 2014)

G : Kerikil (*Gravel*)

S : Pasir (*Sand*)

M : Lanau (*Silt*, huruf M singkatan dari *MO* dari Bahasa skandinavia)

C : Lempung (*Clay*)

### 2.3.3 Berat Jenis dan Konsistensi

Tabel 2.10 Berat Jenis dan Konsistensi Tanah

<i>Cohesionless Soil</i>					
N	0 – 10	11 – 30	31 – 50	>50	
<i>Density (kN/m<sup>3</sup>)</i>	12 – 16	14 – 18	16 – 20	18 – 23	
<i>State</i>	<i>Loose</i>	<i>Medium</i>	<i>Dense</i>	<i>Very Dense</i>	
<i>Cohesive Soil</i>					
N	<4	4 -5	6 – 15	6 – 25	>25
<i>Density (kN/m<sup>3</sup>)</i>	14 – 18	16 – 18	16 – 18	16 – 20	>20
<i>Consistency</i>	<i>Very Soft</i>	<i>Soft</i>	<i>Medium</i>	<i>Stiff</i>	<i>Hard</i>

### 2.3.4 Nilai Kohesif ( $C_u$ ) Tanah Kohesif

Hubungan secara pendekatan  $C_u$  dengan N-SPT untuk tanah lempung (AASHTO, 1998)

Tabel 2.11 Nilai Pendekatan  $C_u$

Nilai Pendekatan $C_u$ (kPa)	Peneliti
$C_u = 12,5$ N	Sanglerat, 1972
$C_u = 7$ N	Reese et al. (1976)
$C_u = 4 - 6$ N	Stroud dan Butler (1975)
$C_u = 6$ N	Kulhawy dan Mayne (1990)

### 2.3.5 Tegangan Efektif

Menurut (Hardiyatmo, 2012) Tegangan efektif pada kedalaman  $z$  adalah.

$$\sigma_v' = z \gamma_{\text{sat}} - z \gamma_w \quad (2.127)$$

$z$  = Kedalaman tanah

$\gamma_{\text{sat}}$  = Berat jenis Tanah

$\gamma_w$  = Berat jenis air

### 2.3.6 Daya Dukung Fondasi

#### 2.3.6.1 Faktor Aman Tiang Bor

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka kapasitas ultimit tiang dibagi dengan faktor aman tertentu. Tomlinson (1977) menyarankan faktor aman untuk tiang bor sebagai berikut. Untuk tiang tanpa pembesaran dibagian bawahnya:

$$Q_{all} = Q_u / 2 \quad (2.128)$$

#### 2.3.7 Daya Dukung Tiang Tunggal

Secara umum kapasitas daya dukung ultimit neto tiang ( $Q_u$ ), adalah dari tahanan ujung bawah ultimit ( $Q_b$ ), dan tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ ) antara sisi tiang dan tanah di sekitarnya dikurangi dengan berta sendiri tiang ( $W_p$ ). Bila dinyatakan sebagai persamaan maka.

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (2.129)$$

Pada analisis kali ini digunakan metode O'Neil dan Reese (1989)

$$Q_b = A_b f_b \quad (2.130)$$

$$Q_s = A_s f_s \quad (2.131)$$

Dimana

$A_b$  = Luas penampang ujung tiang

$Q_b$  = Daya dukung ujung tiang

$A_s$  = Luas selimut tiang

$Q_s$  = Daya dukung selimut tiang

#### 2.3.7.1 Daya Dukung Tiang Bor Pada Tanah Granular

##### 1. Tahanan ujung ultimit

O'Neil dan Reese (1989) merekomendasikan tahanan ujung tiang bor pada penurunan 5% dari diameter dasar tiang pada pasir, sebagai berikut.

$$f_b = 0,60 \sigma_r N_{60} \quad (2.132)$$

Dimana.

$f_b$  : Tahanan ujung neto per satuan luas (kPa)

$N_{60}$  : Nilai N-SPT yang dikoreksi terhadap prosedur pengujian

$\sigma_r$  : tegangan refrensi 100 kPa

**Tahanan ujung ultimit.**

$$Q_b = A_b f_b \quad (2.133)$$

Dengan

$A_b$  : luas dasar tiang bor

Jika tiang bor dasarnya berdiameter lebih dari 120 cm, maka besarnya  $f_b$  dapat mengakibatkan penurunan lebih besar dari 25 mm (1in). Untuk memenuhi syarat penurunan ijin, O'Neill dan Reese (1989) menyarankan  $f_b$  direduksi menjadi  $f_{br}$  dengan.

$$f_{br} = 4,17 (d_r / d_b) f_b \text{ Bila } d_b \geq 1200 \text{ mm} \quad (2.134)$$

Dimana

$d_r$  : Lebar refrensi = 300 mm

$d_b$  : Lebar ujung tiang bor

## 2. Tahanan Gesek Ultimit

Tahanan gesek satuan tiang bor dalam pasir dinyatakan oleh.

$$f_s = \beta p_o' \quad (2.135)$$

Dimana

$p_o' = \sigma v'$  : Tekanan *overburden* di tengah – tengah lapisan tanah (kN/m<sup>2</sup>)

Dengan koefisien  $\beta$  juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang disarankan oleh Rees dan O'Neil (1989) yakni.

$$\beta = 1,5 - 0,135 \sqrt{\frac{z}{d_r}} \quad (2.136)$$

dengan  $0,25 \leq \beta \leq 1,25$

Dimana.

$z$  : Kedalaman di tengah – tengah lapisan tanah (ft)

$d_r$  : lebar refrensi 300 mm

Bila lebar refrensi  $d_r = 300$  mm disubstitusikan ke persamaan diatas maka.

$$\beta = 1,5 - 0,245 \sqrt{z} \quad (2.137)$$

dengan  $0,25 \leq \beta \leq 1,25$

Jika  $N_{60} \leq 15$ , maka  $\beta$  dalam persamaan diatas dikalikan dengan  $N_{60}/15$  atau

$$\beta = \frac{N_{60}}{15} (1,5 - 0,245 \sqrt{z}) \quad (2.138)$$

untuk  $N_{60} \leq 15$

Beberapa nilai  $\beta$  untuk tanah non kohesif yang disarankan oleh (Reese et al., 2006)

Untuk tanah pasir yang banyak mengandung kerikil atau kerikil.

$$\beta = 2 - 0,15 (z)^{0,75} \quad (2.139)$$

untuk  $0,25 \leq \beta \leq 1,8$

### 2.3.7.2 Daya Dukung Tiang Bor Pada Tanah Lempung

#### 1. Tahanan Ujung Ultimit

Tahanan ujung Ultimit :

$$Q_b = A_b f_b \quad (2.140)$$

Dimana  $A_b$  adalah luas tiang bor

Reese dan O'Neil (1989) menyarankan tahanan ujung tiang bor di dalam lempung.

$$f_b = C_u N_c \leq 4000 \text{ kPa} \quad (2.141)$$

$$N_c' = 6 \left(1 + 0,2 \frac{L}{d_b}\right) \leq 9 \quad (2.142)$$

Dimana.

$N_c'$  : Faktor kapasitas daya dukung

$C_u$  : Kohesi tak terdrainase (*undrained*) (kPa)

$L$  : Kedalaman tiang bor (m)

$d_b$  : diameter ujung bawah tiang bor (m)

#### 2. Tahanan Gesek

Tahanan gesek dihitung dengan persamaan.

$$f_s = \alpha C_u \quad (2.143)$$

Dimana.

$\alpha$  : Faktor adhesi

$C_u$  : kohesi tak terdrainase (kN/m<sup>2</sup>)

Dari hasil uji beban pada tiang bor, O'Neil dan Rees (1989) menyarankan

$$\alpha = 0,55 \text{ untuk } \frac{C_u}{P_r} \leq 1,5 \quad (2.144)$$

$$\alpha = 0,55 - 0,1 \left(\frac{C_u}{P_r} - 1,5\right) \text{ untuk } 1,5 \leq \frac{C_u}{P_r} \leq 2,5 \quad (2.145)$$

Dimana

$P_r$  : Tekanan Atmosfer atau tekanan refrensi = 100kPa

### 2.3.8 Pondasi Sebagai Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang diperoleh dari total daya dukung tiang tunggal dikalikan jumlah tiang dan dikalikan dengan suatu *group reduction factor* yang dihitung oleh metode yang sudah baku (SNI 8460 : 2017)

Maka dapat diformulasikan

$Q$  kelompok tiang = Jumlah Tiang  $\times$   $Q_{all}$

Maka dapat disimpulkan untuk mendapatkan jumlah minimal tiang adalah

Jumlah tiang =  $Q$  kelompok tiang /  $Q_{all}$

### 2.3.8.1 Jarak Antar Tiang

Untuk fondasi tiang jarak antara as ke as tiang tidak boleh kurang dari keliling tiang atau untuk tiang berbentuk lingkaran tidak boleh kurang dari 2,5 kali diameter tiang (SNI 8460 : 2017)

### 2.3.8.2 Efisiensi Kelompok Tiang

Keamanan tiang sebagai kelompok tiang ditentukan oleh SF yang dicapai dalam kondisi pembebanan layan dan gempa. Kapasitas ultimit pondasi kelompok tiang dipengaruhi oleh jumlah tiang, kapasitas ultimit tiang tunggal, dan nilai efisien grup tiang.

$$Q_{ug} = n \times Q_{us} \times h \quad (2.146)$$

Nilai efisiensi ini ditentukan dengan menggunakan metode keruntuhan blok atau metode *converse – Labarre*. Dari kedua metode tersebut digunakan nilai efisiensi terkecil untuk menghitung kapasitas ultimit kelompok tiang. Berdasarkan (Hardiyatmo, 2015) terdapat metode yang digunakan dalam perhitungan efisien kelompok tiang yaitu Efisiensi dengan Metode *Converse – Labarre*. Perhitung efisiensi dengan metode ini menggunakan rumus berikut.

$$h = 1 - \left[ \frac{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta ; \theta (deg) = \tan^{-1} \frac{D}{d} \quad (2.147)$$

$$h = 1 - \left[ \frac{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \tan^{-1} \frac{D}{d} \quad (2.148)$$

dimana:

$n_1$  : Jumlah kolom

$n_2$  : Jumlah baris

$D$  : Diameter  $d$  jarak antar tiang

### 2.3.8.3 Distribusi Beban Pada Tiang

Jika momen yang bekerja dua arah, yaitu sumbu -x dan -y maka persamaan untuk menghitung tekanan aksial pada masing – masing tiang adalah sebagai berikut.

$$Q_i = \frac{V}{n} \pm \frac{M_x \cdot y}{\Sigma y^2} \pm \frac{M_y \cdot x}{\Sigma x^2} \quad (2.149)$$

Dengan

$Q_i$  : Beban aksial pada tiang ke –  $i$

$n$  : Jumlah tiang

$x,y$  : berturut -turut jarak tiang terhadap sumbu  $x$  dan  $y$

$V$  : Jumlah beban vertikal yang bekerja pada pusat kelompok tiang

$M_y$  : Momen terhadap sumbu  $Y$

$M_x$  : Momen terhadap sumbu  $X$

## 2.4 Analisis Dinamik

Secara sederhana, dinamik merujuk pada perubahan yang terjadi dalam struktur akibat adanya gaya atau tekanan yang bekerja pada struktur tersebut. Gaya dinamik bisa bervariasi dalam besaran, arah, atau titik aplikasinya seiring berjalannya waktu. Respons struktur terhadap beban dinamik juga bersifat dinamik, yang dapat menyebabkan lendutan dan tegangan pada struktur juga berubah seiring waktu. (Budio, 2013).

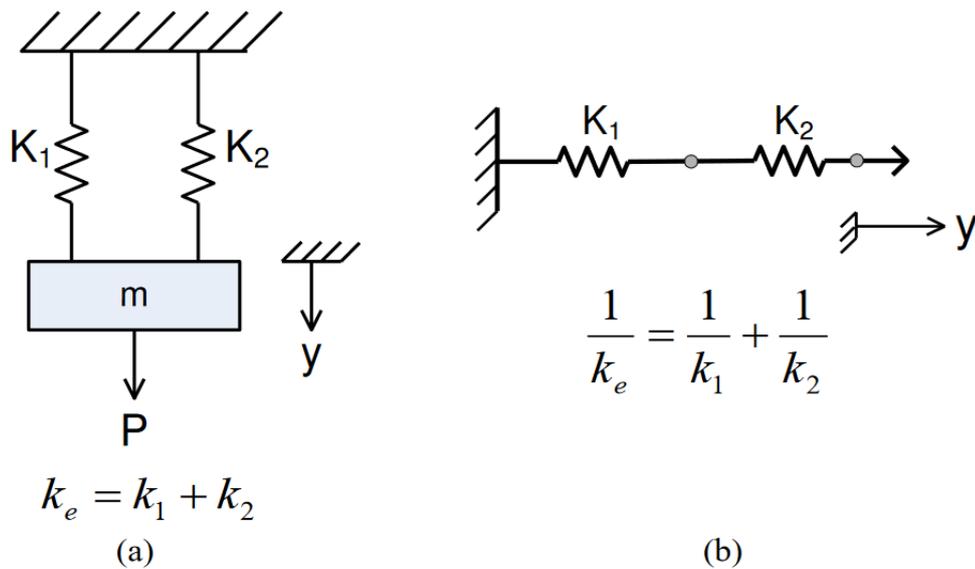
### 2.4.1 Sistem Berderajat Kebebasan Tunggal

Komponen – komponen yang merupakan pemodelan himpunan parameter dari sebuah struktur adalah sesuatu yang menghubungkan gaya dengan perpindahan ( $u$ ), kecepatan ( $\dot{u}$ ), dan percepatan ( $\ddot{u}$ ). Komponen sistem dinamik diantaranya massa ( $m$ ), kekakuan ( $k$ ), dan redaman ( $c$ ).

1. Massa ( $m$ ) menyatakan massa dan sifat inersia dari struktur.
2. Kekakuan atau pegas ( $k$ ) menyatakan gaya balik elastik dari kapasitas energi potensial dari struktur.

$$k = \frac{F}{x} \quad (2.150)$$

Dimana  $k$  adalah kekakuan (N/m),  $F$  adalah gaya (N), dan  $x$  adalah deformasi (m). Jika suatu pegas terpasang secara paralel atau seri, maka diperlukan penentuan konstanta pegas ekivalen dari system tersebut.



Gambar 2.21 Kombinasi Pegas (a) Pegas Pararel dan (b) Pegas Seri

Redaman (c) adalah mekanisme disipasi energi oleh struktur yang menyebabkan menurunnya amplitudo getaran. dengan persamaan

$$f_D = c\dot{u} \quad (2.151)$$

dimana  $f_D$  adalah gaya redaman (N/m)  $c$  adalah koefisien redaman (N.s/m) dan  $\dot{u}$  kecepatan (m/s).

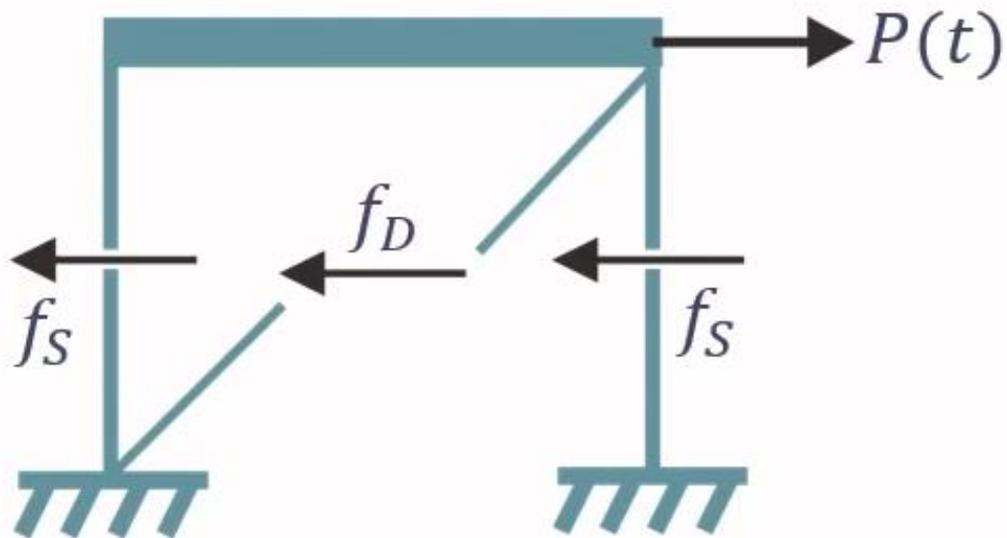
Persamaan gerakan dari beberapa model parameter akan diturunkan dengan menggunakan hukum Newton dan metode gaya D'Alembert. Hal ini akan berlaku sebagai *review* atau pelajaran sebelumnya pada dinamika dan juga memperkenalkan prosedur yang digunakan dalam menentukan model matematis dari system SDOF. (Suryanita, 2015)

Aplikasi dari Hukum Newton II untuk menentukan gerak pada sebuah sistem, yaitu mempelajari perpindahan atau kecepatan massa  $m$  pada saat  $t$  untuk kondisi awal pada saat  $t = 0$  hubungan antara perpindahan dan waktu diberikan oleh Hukum Newton kedua untuk gerak yang ditulis.

$$\sum F = m a \quad (2.152)$$

Dimana  $F$  adalah resultan gaya yang bekerja pada partikel massa  $m$  dan  $a$  adalah resultan percepatan, berikut adalah contoh pengaplikasiannya.

Terdapat model struktur sebagai berikut.



Gambar 2.22 Contoh Gambar Struktur Dinamik

Dimana  $a$  adalah percepatan yang merupakan kecepatan dibagi waktu. sesuai tanda diatas maka.

Kecepatan adalah

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} \quad (2.153)$$

Percepatan adalah

$$\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2} \quad (2.154)$$

Dengan mensubsitusikan reaksi yang terjadi pada Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan. yaitu resultan gaya  $P(t) - f_S - f_D$  ke Persamaan (2.152) maka.

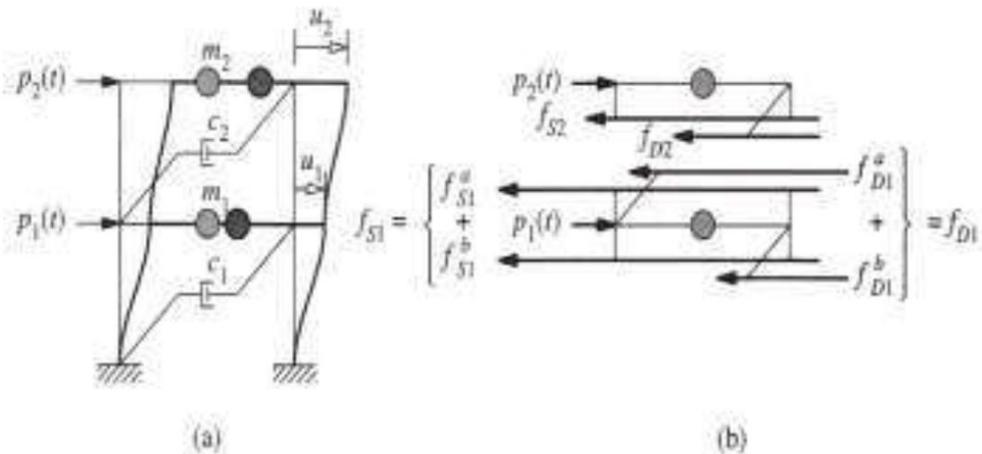
$$P(t) - f_S - f_D = m \ddot{u} \quad (2.155)$$

Dengan  $f_S$  adalah kekakuan dan  $f_D$  adalah redaman maka

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad (2.156)$$

#### 2.4.2 Sistem Berderajat Kebebasan Banyak (MDOF)

Dalam sistem MDOF sederhana, persamaan gerak dapat direpresentasikan pada struktur portal tingkat dua dengan gaya luar  $p_1(t)$  dan  $p_2(t)$  seperti gambar dibawah.



Gambar 2.23 Struktur Portal Tingkat dua (b) Gaya yang Bekerja Pada Kedua Massa

Dalam idealisasi tersebut, balok dan lantai dianggap kaku, dan massa yang terdistribusi pada seluruh gedung diidealisasikan terpusat pada bidang lantai. Asumsi ini umumnya cocok untuk bangunan bertingkat. Pada gambar diatas bagian (a) portal tingkat dua dengan massa terpusat pada setiap lantai memiliki dua derajat kebebasan (DOF). Perpindahan lateral  $u_1$  dan  $u_2$  pada kedua lantai dalam arah  $x$ . Gaya – gaya yang bekerja pada setiap massa lantai  $m_j$  terlihat pada gambar diatas bagian (b), termasuk gaya luar  $p_j(t)$ , gaya elastic  $f_{sj}$  dan gaya redaman  $f_{Dj}$ . Gaya elastis dan redaman berlawanan arah karena keduanya merupakan gaya dalam yang menahan gerakan.(Suryanita, 2015). Berdasarkan buku dinamika struktur (Suryanita, 2015). Persamaan gerak dari hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa adalah

$$m\ddot{u} + f_D + f_s = p(t) \quad (2.157)$$

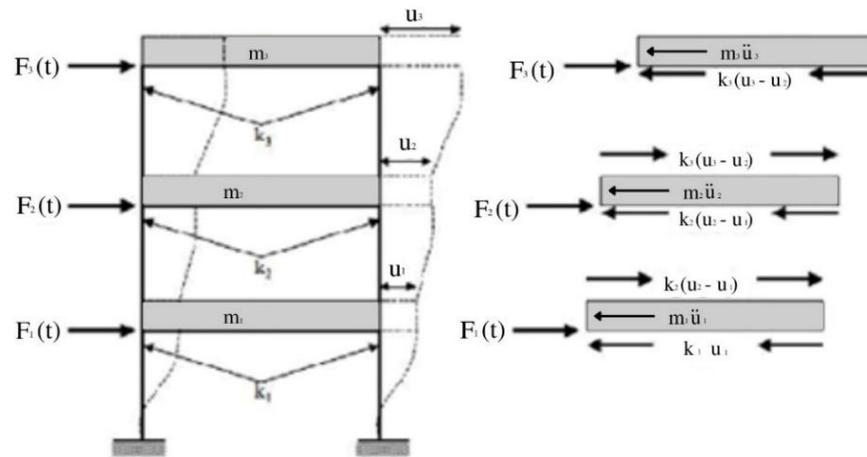
Atau sama dengan Persamaan (2.156).

### 2.4.3 Bangunan Geser

Bangunan geser adalah suatu struktur yang tidak memiliki rotasi penampang pada elevasi lantainya sehingga akan berdefleksi seperti balok kantilever. Pada bangunan geser diasumsikan.(Pasaribu & Simanjuntak, 2012).

1. Massa struktur pada elevasi lantai. Akibatnya jumlah derajat kebebasan struktur sama dengan jumlah lantainya. Bangunan geser tiga lantai pada gambar dibawah akan mempunyai tiga derajat kebebasan yaitu tiga perpindahan horizontal pada setiap lantai.

- Balok sangat kaku dibandingkan kolom. Artinya titik pertemuan balok dan kolom kaku dan tidak dapat berotasi.
- Deformasi struktur tidak tergantung gaya aksial yang bekerja pada kolom. Artinya balok yang kaku akan tetap horizontal selama gerakan berlangsung.



Gambar 2.24 Bangunan Geser Dimodelkan Sebagai Bentang Tunggal

(Sumber : Budio, 2013)

Bangunan geser seperti yang dijelaskan diatas dapat terdiri dari beberapa bentang, pembahasan dengan satu bentang hanya untuk memudahkan saja. Sebenarnya bangunan geser dapat dimodelkan sebagai kolom tunggal seperti pada gambar dibawah ini dimana massa terpusat pada elevasi lantai. (Pasaribu & Simanjuntak, 2012).

$$K = \frac{12EI}{L^3} \quad (2.158)$$

Untuk kolom dengan satu ujung lainnya.

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad (2.159)$$

Dengan E adalah modulus elastisitas, I adalah momen inersia, dan L adalah tinggi bangunan. Jadi ketiga model bangunan geser yang dinyatakan oleh Gambar 2.24, Gambar 2.25, dan Gambar 2.26 adalah sama. Persamaan gerak dari bangunan geser tiga lantai dapat diambil dengan meninjau diagram *free body* ketiga gambar diatas dan menghasilkan.

$$m_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 - k_2 (u_2 - u_1) = F_1(t) \quad (2.160)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + k_2 (u_2 - u_1) - k_3 (u_3 - u_2) = F_2(t) \quad (2.161)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + k_3 (u_3 - u_2) = F_3(t) \quad (2.162)$$

Dalam bentuk matrik ditulis sebagai

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = [F] \quad (2.163)$$

Dengan  $[M]$  dan  $[K]$  masing – masing adalah matrik massa dan matrik kekakuan yang dinyatakan oleh.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (2.164)$$

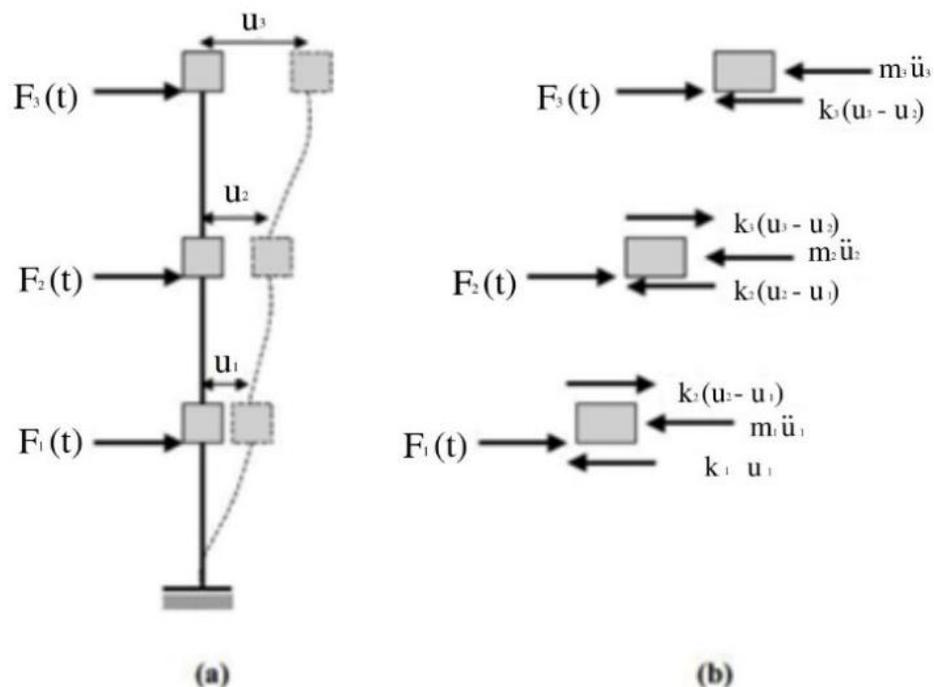
Dengan  $u$ ,  $\ddot{u}$ , dan  $F$  masing – masing adalah vector perpindahan, percepatan dan gaya yang diberikan oleh.

$$\{u\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2.165)$$

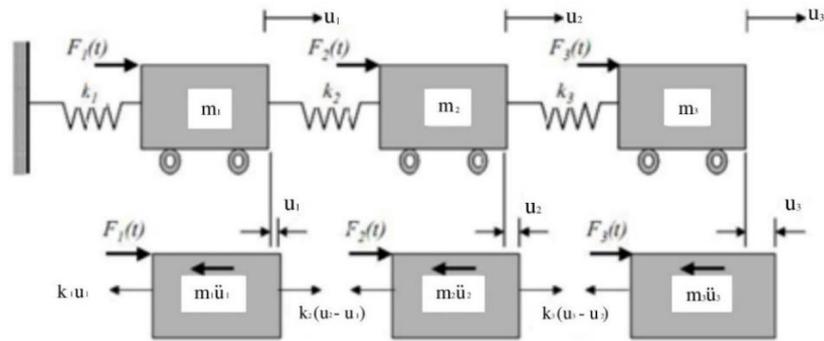
$$\{\ddot{u}\} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{bmatrix} \quad (2.166)$$

$$\{F\} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} \quad (2.167)$$

Matrik massa dalam persamaan diatas untuk bangunan geser akan berupa matrik diagonal.



Gambar 2.25 Bangunan Geser Dimodelkan Sebagai Kolom Tunggal



Gambar 2.26 Bangunan Geser Dimodelkan Sebagai Pegal Multimassa

## 2.5 Pembebanan

### 2.5.1 Beban Kombinasi Beban Terfaktor Yang Digunakan Dalam Metode Desain Kekuatan Berdasarkan SNI 1727 : 2020

Berdasarkan SNI 1727 : 2020. Dalam merancang struktur, komponen, dan fondasi perlu dirancang dengan sedemikian rupa sehingga memiliki kekuatan desain yang setara atau bahkan lebih kuat daripada efek – efek yang terjadi akibat kombinasi beban terfaktor berikut.

$$1,4 D \quad (2.168)$$

$$1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R) \quad (2.169)$$

$$1,2 D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W) \quad (2.170)$$

$$1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5(L_r \text{ atau } R) \quad (2.171)$$

$$0,9 D + 1,0 W \quad (2.172)$$

$$0,9 D + 1,0 E \quad (2.173)$$

Kombinasi pembebanan dengan pengaruh beban seismik dalam Pasal 4.2.2.3 pada SNI 1726 : 2019 sebagai berikut.

$$1,2D + 1,0 E_v + 1,0 E_h + 1,0 L \quad (2.174)$$

$$0,9 D + 1,0 E_v + 1,0 E_h \quad (2.175)$$

Berdasarkan Pasal 7.4.2.1 pada SNI 1726 : 2019 pengaruh beban seismik horizontal harus ditentukan dengan persamaan berikut

$$E_h = \rho Q_e \quad (2.176)$$

Keterangan:

$E_h$ : Pengaruh beban seismik horizontal

$\rho$  : Faktor redudansi (Pasal 7.3.4.2 SNI 1726 : 2019)

$Q_e$ : Pengaruh gaya seismik horizontal (Pasal 7.5.4)

Pengaruh beban seismik vertikal berdasarkan pasal 7.4.2.2 Pengaruh beban seismik vertikal harus ditentukan dengan.

$$E_v = 0.2 S_{ds} D \quad (2.177)$$

Keterangan:

$E_v$  = Pengaruh beban seismik vertikal.

$S_{ds}$  = Percepatan respons spektral desain pada periode pendek.

$D$  = Pengaruh beban mati.

### 2.5.2 Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati pada gedung merupakan berat sendiri dari bahan – bahan bangunan penting dan dari beberapa komponen gedung yang harus ditinjau berdasarkan pembebanan yang direncanakan pada gedung berdasarkan SNI 1727 : 2020.

### 2.5.3 Beban Mati Tambahan (*Super DeadLoad*)

Beban mati tambahan adalah beban mati yang ditambahkan pada struktur bangunan untuk memperhitungkan berat dari elemen – elemen non structural seperti material penutup atap, keramik dan lain lain. Beban mati tambahan yang digunakan mengacu kepada PPIUG, 1983.

### 2.5.4 Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah jenis beban yang dihasilkan dari aktivitas manusia, peralatan, atau benda – benda yang bergerak lainnya yang mempengaruhi struktur bangunan atau fasilitas. Pada penelitian kali ini direncanakan gedung sebagai Gedung Prototype perkantoran sehingga berdasarkan SNI 1727 : 2020.

### 2.5.5 Beban Angin

Beban angin adalah semua beban yang timbul pada bangunan atau bagian – bagian bangunan akibat perbedaan tekanan udara. Beban angin ini dihitung dengan mempertimbangkan tekanan positif dan tekanan negatif (atau isapan udara) yang bekerja secara tegak lurus terhadap bidang yang sedang dianalisis. Besaran tekanan positif dan negatif ini diukur dalam satuan  $\text{kg/m}^2$ .

Menurut Tabel 26.6-1 hal. 109 SNI 1727 : 2020, penentuan beban angin tipe SPBAU (Sistem Penahan Beban Angin Utama) Melibatkan beberapa langkah yaitu.

1. Menentukan kategori risiko bangunan gedung atau struktur lain.

2. Menentukan kecepatan angin dasar,  $V$  (m/s), untuk kategori resiko yang sesuai.

3. Menentukan parameter beban angin :

a. Faktor arah angin ( $K_d$ )

b. Kategori eksposur

c. Faktor topografi ( $K_{zt}$ )

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (2.178)$$

d. Faktor elevasi permukaan tanah ( $K_e$ )

e. Tekanan kecepatan

f. Faktor pengaruh hembusan angin ( $G$ )

g. Klasifikasi ketertutupan

h. Koefisien tekanan internal ( $GC_{pi}$ )

4. Menentukan koefisien eksposur tekanan velositas ( $K_z$  atau  $K_h$ ).

Koefisien eksposur tekanan kecepatan ( $K_z$ ) dapat ditentukan dengan persamaan berikut dengan  $z$  adalah ketinggian.

Untuk  $15 \text{ ft } (4,6 \text{ m}) \leq z < z_g$

$$K_z = 2,01 (z/z_g)^{2/a} \quad (2.179)$$

Untuk  $z < 15 \text{ ft } (4,6 \text{ m})$  maka

$$K_z = 2,01 (15/z_g)^{2/a} \quad (2.180)$$

5. Menentukan tekanan velositas ( $q$ ).

Tekanan kecepatan ( $q_z$ ) yang dievaluasi pada ketinggian  $z$  diatas tanah harus dihitung dengan persamaan berikut.

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \quad (2.181)$$

6. Menentukan koefisien tekanan eksternal, ( $C_p$ ) atau ( $C_n$ ).

7. Hitung tekanan angin ( $p$ ), pada setiap permukaan gedung.

Tekanan angin desain untuk bangunan gedung tertutup, kaku tertutup Sebagian dan fleksibel. Untuk SPGAU bangunan gedung pada semua ketinggian dalam ( $N/m^2$ ) ditentukan oleh persamaan berikut.

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (2.182)$$

Tabel 2.12 Faktor Arah Angin ( $K_d$ )

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin ( $K_d$ )
Bangunan Gedung	
- Sistem penahan beban angin utama	0,85
- Komponen dan klading bangunan gedung	0,85
Atap Lengkung	0,85
Cerong Asap, Tangki, dan Struktur yang	
- Sama segi empat	0,90
- Segi enam	0,95
- Segi delapan	1,0 <sup>a</sup>
- Bundar	1,0 <sup>a</sup>
Dinding pejal berdiri beba dan papan reklame Pejal berdiri bebas dan papan reklame terikat	0,85
Papan reklame terbuka dan kerangka isi	0,85
Rangka batang Menara	
Segi tiga, segi empat, persegi	0,85
panjang dan penampang lainnya	0,95

### 2.5.6 Beban Gempa

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG) SKBI-1.3.53.1987. Beban gempa adalah semua beban statik ekivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menriukan pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisis dinamik.

Ketika gempa terjadi, sebuah bangunan akan terguncang oleh getaran yang tidak teratur dari tanah di bawahnya. Jika bangunan itu sangat kaku dan memiliki waktu getaran alami yang mendekati satu detik, maka gaya inersia yang dihasilkan oleh gempa akan bekerja pada titik pusat massa.

$$F = m \times A_g \quad (2.183)$$

Dalam penyusunan tugas akhir ini beban gempa pada gedung *prototype* dianalisis menggunakan anlisis ragam spektrum respons dengan parameter sebagai berikut.

1. Kategori Resiko Bangunan

Kategori resiko bangunan terdapat dalam Tabel 2.13 kategori resiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa dalam SNI 1726:2019 sebagai berikut.

Tabel 2.13 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan NonGedung

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, anantara lain. Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan Fasilitas sementara Gudang penyimpanan Rumah jada dna struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk. Perumahan Rumah toko dan rumah kantor Pasar Gedung Perkantoran Gedung apartemen / rumah susun Pusat perbelanjaan / mall Bangunan industry Fasilitas manufaktur Pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk. Bioskop Gedung Prototypeertemuan Stadion Fasilitas Kesehatan yang tidak memiliki unit bedan dan unit gawat darurat Fasilitas penitipan anak Penjara Bangunan untuk orang jompo Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/ atau gangguan massal terhadap kehiudpan masyarakat sehari – hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk. Pusat pembangkit listrik biasa Fasilitas penanganan air	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
<p>Fasilitas penanganan limbah</p> <p>Pusat telekomunikasi</p> <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan, atau dibatasi untuk tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi.</p> <p>Bangunan – bangunan monumental</p> <p>Gedung sekolah dan fasilitas Pendidikan</p> <p>Rumah ibadah</p> <p>Rumah sakit dan fasilitas Kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedan dan unit gawat darurat</p> <p>Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat</p> <p>Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya.</p> <p>Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat</p> <p>Pusat pembangkit energi dan fasilitas public lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat</p> <p>Struktur tambahan (termasuk Menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau perlatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat</p> <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

## 2. Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan gempa terdapat dalam tabel faktor keutamaan gempa berdasarkan Tabel 2.14 kategori risiko bangunan disertai dengan faktor keutamaan gempa yang tertera pada SNI 1726:2019.

Tabel 2.14 Kategori Risiko Bangunan Disertai Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, $I_e$
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

### 3. Menentukan Klasifikasi Situs

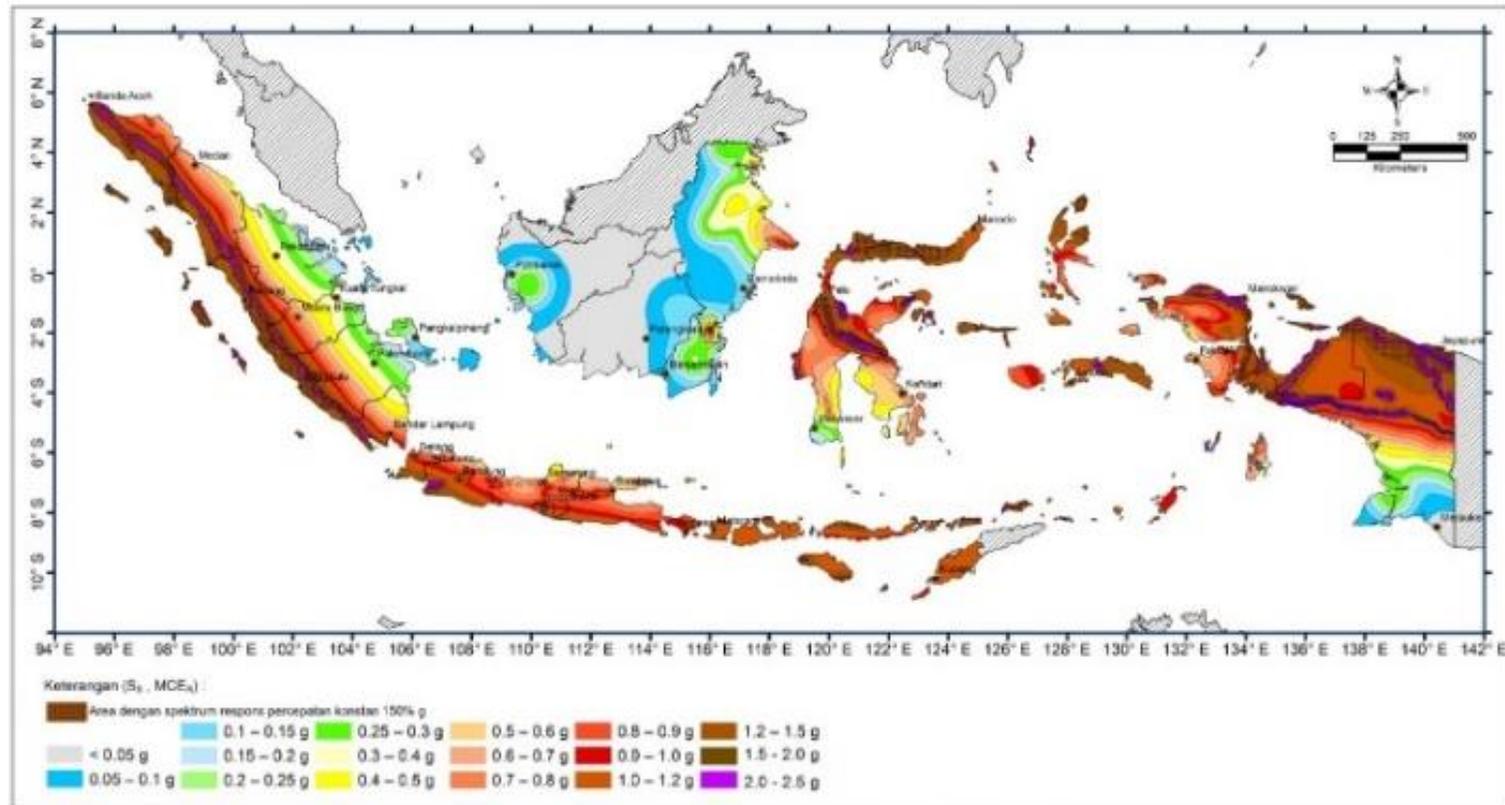
Penentuan klasifikasi situs berguna untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor – faktor amplifikasi pada bangunan. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Berdasarkan SNI 1726:2019 berikut tabel klasifikasi situs.

Tabel 2.15 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 –	>50	$\geq 100$
SD (tanah sedang)	175 – 350	15 - 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengadung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Indeks plastisitas <math>PI &gt; 20</math></li> <li>- Kadar air, <math>w \geq 40 \%</math></li> <li>- Kuat geser niralir <math>\bar{S}_u &lt; 25</math> kPa</li> </ul>		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah</li> <li>- Lempung sangat organic dan / atau gambut (ketebala <math>H &gt; 3</math> m)</li> <li>- Lempung berplastis sangat tinggi (ketebalan <math>H &gt; 7,5</math> dengan indeks plastisitas <math>PI &gt; 75</math>)</li> <li>- Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan <math>H &gt; 35</math> m dengan <math>\bar{S}_u &lt; 50</math> kPa.</li> </ul>		

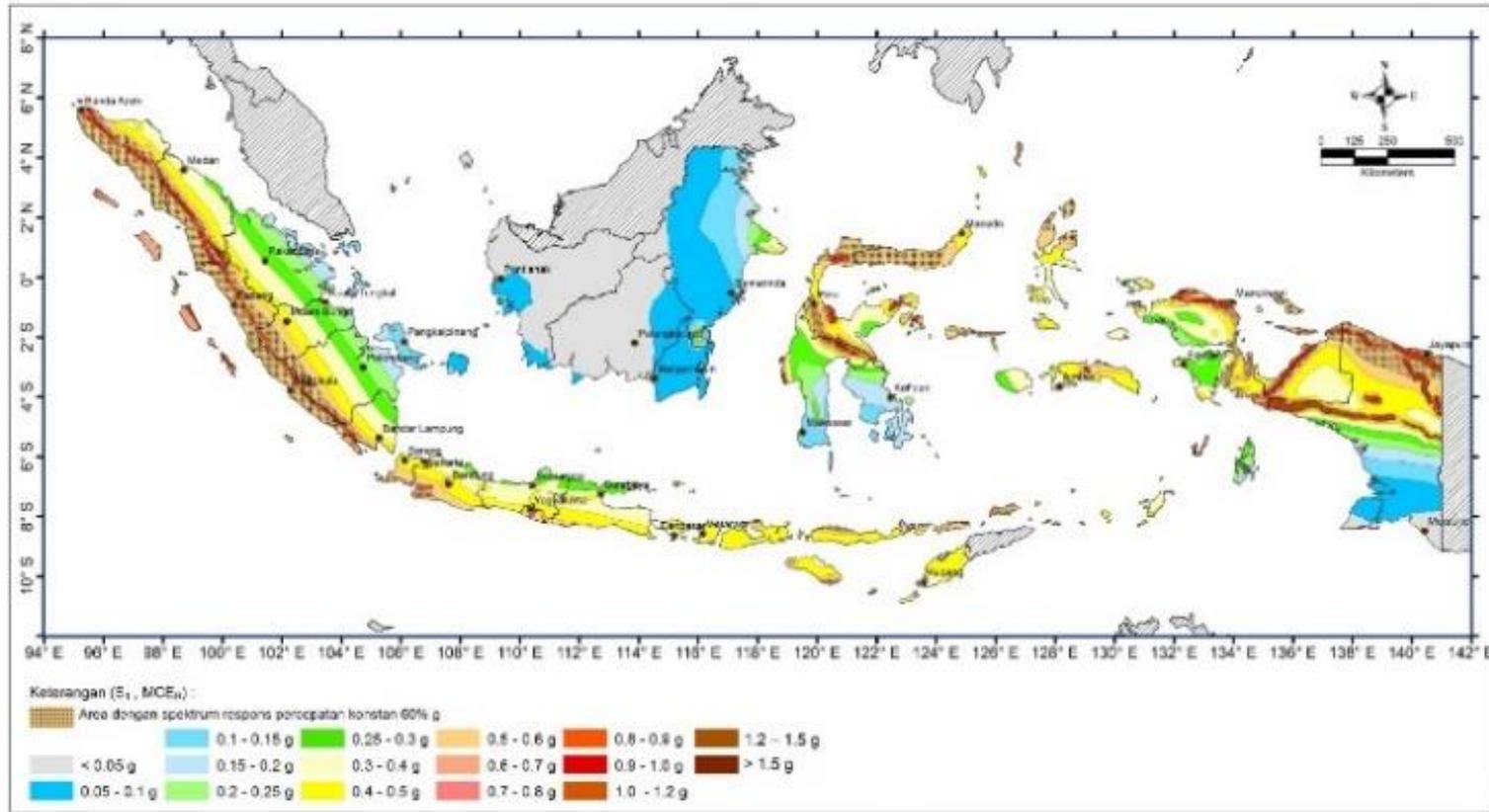
#### 4. Parameter Percepatan Terpetakan ( $S_s$ dan $S_1$ )

Parameter percepatan batuan dasar pada periode pendek ( $S_s$ ) dan percepatan batuan dasar pada periode 1 detik ( $S_1$ ) harus ditetapkan masing – masing dari respons spectral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik dengan kemungkinan 2% terlampaui dalam 50 tahun ( $MCE_R$ , 2% dalam 50 tahun).



Gambar 2.27 Parameter Gerak, Tanah  $S_s$ , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko \_ Tertarget ( $MCE_R$ ) Wilayah Indonesia Untuk Spektrum Respons 0,2 – Detik (Redaman Kritis 5%)

SNI 1726:2019



Gambar 2.28 Parameter Gerak Tanah,  $S_1$ , Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko Tertarget ( $MCE_R$ ) Wilayah Indonesia untuk Spektrum Respons 0,2 – detik (Redaman Kritis 5%)

### 5. Faktor Implifikasi Getaran

Diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode pendek 0,2 detik ( $F_a$ ) dan diperiode 1 detik ( $F_v$ ) dalam penentuan respons spectral percepatan gempa  $MCE_R$ .

Tabel 2.16 Koefisien Situs  $F_a$

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget ( $MCE_R$ ) Terpetakan pada Periode Pendek $T = 0,2$ detik $S_s$					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs – spesifik, lihat pasal 0 SNI 1726 : 2019					

Tabel 2.17 Koefisien Situs  $F_y$

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget ( $MCE_R$ ) Terpetakan pada Periode 1 Detik, $S_I$					
	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I = 0,5$	$S_I \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs – spesifik, lihat pasal 0 SNI 1726 : 2019					

### 6. Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko ( $MCE_R$ )

Parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek ( $S_{MS}$ ) dan periode 1 detik ( $S_{MI}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.184)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.185)$$

Keterangan :

$S_s$  = Parameter respons spectral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan perioda pendek.

$S_1$  = Parameter respons spectral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan perioda 1 detik.

#### 7. Parameter Desain Spektral ( $S_{D1}$ dan $S_{DS}$ )

Parameter percepatan spectral desain untuk perioda pendek ( $S_{DS}$ ) dan perioda 1 detik ( $S_{D1}$ ), harus ditentukan dengan persamaan berikut.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.186)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.187)$$

Untuk periode yang lebih kecil  $T_0$ , nilai  $S_a$  menggunakan persamaan berikut.

$$S_a = S_{DS} \left( 0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.188)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.189)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.190)$$

#### 8. Kategori Desain Seismik

Berdasarkan nilai  $S_{DS}$ ,  $S_{D1}$  dan kategori risiko gedung akan didapatkan dua kategori desain seismik. Nilai yang diambil adalah yang paling besar dari kedua  $K_{DS}$  tersebut. Nilai tersebut didapatkan dari nilai dalam Tabel 2.18 dan Tabel 2.19.

Tabel 2.18 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek

Nilai $S_{DS}$	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Tabel 2.19 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 Detik

Nilai $S_{DI}$	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DI} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{DI} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{DI} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{DI}$	D	D

### 9. Koefisien Respons Seismik

Berdasarkan Tabel 9 dalam SNI 1729 : 2019 pada bagian C yaitu Sistem rangka pemikul momen memiliki faktor – faktor  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$

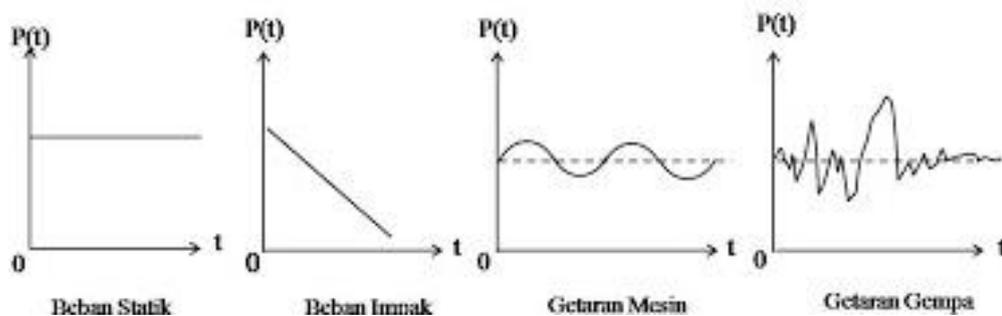
Tabel 2.20 Faktor – Faktor Sistem Rangka Pemikul Momen

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, $R^a$	Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega^b$	Faktor Pembesaran Defleksi $C_d^c$	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, $h_n$ (m) <sup>d</sup>				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
<b>C.Sistem Rangka Pemikul Momen</b>								
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	$5 \frac{1}{2}$	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	$5 \frac{1}{2}$	TB	TB	48	30	TI
Rangka baja pemikul momen menengah	$4 \frac{1}{2}$	3	4	TB	TB	$10^k$	$TI^k$	$TI^k$

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, $R^a$	Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega^b$	Faktor Pembesaran Defleksi $C_d^c$	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, $h_n$ (m) <sup>d</sup>				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
Rangka baja pemikul momen biasa	$3 \frac{1}{2}$	3	3	TB	TB	TI'	TI'	TI'
Catatan. TB = Tidak Dibatasi TI = Tidak Diizinkan								

### 2.5.7 Beban Harmonik Sinusoidal

Beban dinamis dapat menyebabkan terjadinya osilasi sehingga deformasi puncak dari struktur tidak terjadi bersamaan dengan terjadinya beban yang maksimum. Pengaruh beban statis dan dinamis pada struktur dapat digambarkan pada Diagram beban (P) – waktu (t) seperti berikut.



Gambar 2.29 Diagram Beban (P) – Waktu (t)

Beban harmonik adalah beban dalam bentuk getaran atau gerak sebuah benda dimana grafik posisi partikel sebagai fungsi waktu berupa sinus (dapat dinyatakan dalam bentuk sinus atau kosinus). Gerak semacam ini disebut gerak osilasi atau gerak harmonik. (Vomania et al., 2016). Persamaan gerak harmonik sederhana dengan sistem pegasnya dan dianggap tidak ada gesekan apapun lalu diterapkan hukum Newton tentang gerak yang tertulis pada persamaan (2.152) maka. (Ishaq, 2015).

$$\sum F = m a \quad (2.191)$$

$$-k x = m a \quad (2.192)$$

$$-k x = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.193)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{m}{k} x = 0 \quad (2.194)$$

Persamaan diatas adalah persamaan diferensial yang harus dipecahkan untuk mencari solusinya. Dari banyak solusi yang memenuhi salah satunya adalah.

$$x = A \cos \omega t \quad (2.195)$$

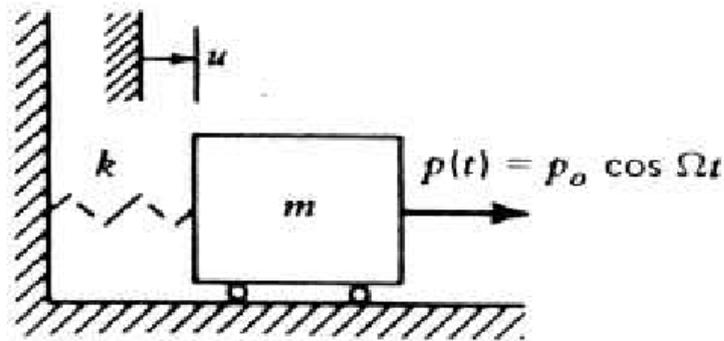
$$x = A \sin \omega t \quad (2.196)$$

Gerakan hasil merupakan gerakan harmonik sederhana dengan amplitude  $u_0$  periode alami dari sistem tak teredam (*undamped natural period*) yaitu.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \text{ (s)} \quad (2.197)$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (2.198)$$

Berdasarkan gambar dibawah, menunjukan sistem tidak teredam, yang diasumsikan sebagai sistem linear, amplitude  $p_0$  dan frekuensi gerakan  $\omega$ , persamaan gerakan adalah.



Gambar 2.30 Gerak Harmonik Dari Sistem SDOF Tidak Teredam

$$m\ddot{u} + ku = p_0 \cos \omega t \quad (2.199)$$

Nilai dari gaya luar (*response steady – state*) berbentuk :

$$u_p = U \cos \omega t \quad (2.200)$$

Untuk menentukan aplitudo,  $U$  Persamaan (2.199) disubtitusikan ke dalam persamaan (2.200)

$$u_0 = \frac{p_0}{k - m \omega^2} \quad (2.201)$$

Terlihat bahwa  $k - m\omega^2 \neq 0$ , maka defleksi statis

$$u_0 = \frac{p_0}{k} \quad (2.202)$$

Kombinasi dari Persamaan (2.201) dan (2.202) akan menghasilkan persamaan fungsi respons frekuensi.

$$u_0 = \frac{u_0}{1 - \frac{m}{k}\omega^2} \quad (2.203)$$

$$\text{Dimana } \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega^2}$$

$$H(\omega) = \frac{1}{1-r^2}, \quad r \neq 1 \quad (2.204)$$

$$\text{Dimana } r = \frac{\omega}{\omega^2}$$

$$H(\omega) = \frac{U}{U_0} \quad (2.205)$$

Fungsi respon frekuensi adalah fungsi yang memberikan penambahan atau pembesaran pada gerakan *steady – state* dalam bentuk nilai absolut dari fungsi respons frekuensi. Faktor pembesaran respons *steady – state* dirumuskan.

$$D_s = |H(\omega)| \quad (2.206)$$

Dari gabungan Persamaan (2.200) dan (2.204) memberikan persamaan respons *steady – state* sebagai berikut.

$$u_p = \left( \frac{U_0}{1-r^2} \right) \cos \omega t, \quad r \neq 1 \quad (2.207)$$

Jika  $r < 1$ , maka responsnya sefase/terdapat di dalam fase gerakan karena  $(1-r^2)$  bernilai positif. Jika  $r > 1$  maka responsnya  $180^\circ$  diluar fase/tidak sefase dengan gerakan, sehingga  $u_p$  dapat ditulis.

$$u_p = \left( \frac{U_0}{1-r^2} \right) (-\cos \omega t) \quad (2.208)$$

Persamaan respons total terdiri dari solusi komplementer ( $u_c$ ) yang memenuhi persamaan homogen dan solusi particular ( $u_p$ ) yang memenuhi persamaan diferensial non homogen.

$$u = \left( \frac{U_0}{1-r^2} \right) \cos \omega t + A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t \quad (2.209)$$

## 2.6 Teori Model Struktur

Model struktur harus direncanakan berdasarkan *similitude requirements* yang memberikan hubungan antara model dengan *prototype*-nya. (Suhendro, 2000).

### 2.6.1 Homoginitas Dimensi

Setiap fenomena fisik alam dapat dinyatakan dalam kualitatif dalam *fundamental measures* atau dimensi yaitu.

1. *Force* (gaya), F
2. *Length* (panjang), L
3. *Time* (waktu), T
4. *Temperature* (suhu), t
5. *Electric charge*, E.

Pada bidang mekanika, dimensi yang sering terpakai adalah F dan L saja untuk problem statik, dan F, L dan T untuk problem dinamik.

### 2.6.2 Buckingham's Pi Theorm

Persamaan yang homogen yang melibatkan besaran fisik tertentu dapat disederhanakan menjadi satu persamaan yang setara melalui penggunaan set lengkap produk tak berdimensi.

Secara umum, teori tersebut menyatakan bahwa persamaan.

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (2.210)$$

Dapat diekspresikan secara ekivalen dalam bentuk.

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0 \quad (2.211)$$

$\pi_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) = produk – produk tak berdimensi dari variable fisik :  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Banyaknya produk tak berdimensi ( $m$ ) Tradalah sama dengan banyaknya variable fisik ( $n$ ) dikurangi dengan banyaknya dimensi yang terlibat dalam masalah tersebut ( $r$ ).

### 2.6.3 True Model

*True model* adalah jenis model struktur yang paling akurat dan mendekati keadaan aslinya secara sempurna. Model ini dibuat dengan mempertimbangkan semua variabel dan faktor yang mempengaruhi sistem yang akan dimodelkan. *True model* dapat memberikan hasil yang paling akurat dan dapat dipercaya. Namun, pembuatan *true model* sering kali memerlukan sumber daya yang besar dan kompleksitas yang tinggi. Model ini juga sering disebut *complete similarity*.

$$\Pi_1 = f_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (2.212)$$

Bila persamaan diatas ditulis untuk *prototype* dan untuk modelnya maka dapat diperoleh hubungan.

$$\frac{\Pi_{1p}}{\Pi_{1m}} = \frac{F_p(\Pi_{2p}, \Pi_{3p}, \dots, \Pi_{np})}{F_m(\Pi_{2m}, \Pi_{3m}, \dots, \Pi_{nm})} \quad (2.213)$$

Dengan

$$\Pi_{1p} : \Pi_1 \text{ pada } \textit{prototype}$$

$\Pi_{1m}$  :  $\Pi_1$  pada model, dst.

*Complete similarity* dimaksudkan bahwa.

Sehingga

$$\Pi_{2p} = \Pi_{2m}$$

$$\Pi_{3p} = \Pi_{3m}$$

· ·

· ·

· ·

$$\Pi_{np} = \Pi_{nm}$$

$$F_p = F_m,$$

$$\Pi_{ip} = \Pi_{im}$$

(2.214)

(2.215)

(2.216)

Persamaan (2.214) dan (2.215) merupakan dasar dari pembuatan model. Korelasi antara model dan *prototype* – nya yang dinyatakan pada persamaan (2.214) disebut kondisi – kondisi perancangan dan operasi (*the design and operating condition*). persamaan (2.215) disebut *the predicting equation*.

#### 2.6.4 Adequate Model

*Adequate model* adalah model struktur yang secara dimensi dan proporsi mirip dengan *true model*, namun dibuat dengan menggunakan skala yang lebih kecil atau lebih besar dari *true model*. *Adequate model* dapat digunakan untuk menguji keandalan dan kekuatan struktur sebelum dibuat dalam skala penuh.

Pada model ini, hanya *the first order similarity* yang dipenuhi oleh model. Sedangkan *the second order similarity* tidak dipenuhi. Namun karena pengaruh *the second terms* relative sangat kecil, maka hasil eksperimen-nya cukup akurat.

#### 2.6.5 Distorted Model

Pada model ini, satu atau lebih variabel yang termasuk *the first order*, persyaratan *similitude*-nya tidak dipenuhi. Model jenis ini tidak disarankan untuk dipakai karena hasil – hasilnya kurang akurat.

#### 2.6.6 Persoalan Statik pada Struktur yang Sering Dijumpai

Pada persoalan statik yang sering dijumpai dalam praktik struktur, variabel yang terlibat dapat diidentifikasi dan dicata dalam tabel berikut beserta dimensi yang sesuai. Karena itu, dalam masalah statik, dimensi yang terlibat hanya *Length*

(L), dan *Force* (F). Dengan menganalisis dimensi yang terlibat, hasilnya dapat digunakan sebagai panduan umum untuk merancang suatu model.

Tabel 2.21 Persoalan Statik Pada Stuktur Statik

Variabel yang terlibat		Dimensi	F	L
l	Panjang	L	0	1
Q	Beban terpusat	F	1	0
$\omega$	<u>Beban terbagi rata</u> <u>persatuan panjang</u>	F.L <sup>-1</sup>	1	-1
q	<u>Beban terbagi rata per</u> <u>satuan luas</u>	F.L <sup>-2</sup>	1	-2
E	Modulus elastic	F.L <sup>-2</sup>	1	-2
$\nu$	Poison's ratio	-	-	-
$\varepsilon$	Regangan	-	-	-
$\delta$	Lendutan	L	0	1
$\sigma$	Tegangan	F.L <sup>-2</sup>	1	-2
$\rho$	<i>Density</i>	F.L <sup>-3</sup>	1	-3
M	Momen Lentur	F.L	1	1

Pada kondisi ini  $m = n - r = 11 - 2 = 9$  dipilih variabel *independent* l dan E.

Sehingga diperoleh variabel tak berdimensi berikut.

$$\Pi_1 = F (\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9) \quad (2.217)$$

Dimana :

$$\Pi_1 = \frac{Q}{El^2} \text{ dengan } \frac{Q_p}{Q_m} = S_Q = S_E \cdot S_l^2 \quad (2.218)$$

$$\Pi_2 = \frac{\omega_p}{\omega_m} \text{ dengan } S_\omega = S_E \cdot S_l \quad (2.219)$$

$$\Pi_3 = \frac{q_p}{q_m} \text{ dengan } S_q = S_E \quad (2.220)$$

$$\Pi_4 = \frac{\rho \cdot l}{E} \text{ dengan } S_\rho = \frac{S_E}{S_l} \quad (2.221)$$

$$\Pi_5 = \nu \text{ dengan } \frac{\nu_p}{\nu_m} = S_\nu = 1 \quad (2.222)$$

$$\Pi_6 = \frac{\delta}{l} \text{ dengan } \frac{\delta_p}{\delta_m} = S_\delta = S_l \quad (2.223)$$

$$\Pi_7 = \varepsilon \text{ dengan } \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_m} = S_\varepsilon = S_l \quad (2.224)$$

$$\Pi_8 = \frac{\sigma}{E} \quad \text{dengan} \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_m} = S_\sigma = S_E \quad (2.225)$$

$$\Pi_9 = \frac{M}{El^3} \quad \text{dengan} \quad \frac{M_p}{M_m} = S_M = S_E \cdot S_1^3 \quad (2.226)$$

Dengan.

$$S_1 = \frac{l_p}{l_m} \quad (2.227)$$

$$S_E = \frac{E_p}{E_m} \quad (2.228)$$

### 2.6.7 Persyaratan Similaritas

Para peneliti dan ahli model struktur telah mengembangkan berbagai persyaratan untuk kesamaan yang berbeda kondisi model. Hasil dari pengembangan tersebut disajikan secara singkat pada uraian berikut ini.

Tabel 2.22 Persyaratan Similaritas Untuk Model Elastik – Statik

Besaran	Dimensi	Faktor Skala
Material		
Tegangan	$FL^{-2}$	$S_E$
Modulus elastisitas	$FL^{-2}$	$S_E$
Poisson's ratio	---	1
Rapat massa	$FL^{-2}$	$S_E/S_1$
Regangan	---	1
Geometri		
Dimensi	L	$S_1$
<i>Displacement</i>	L	$S_1$
<i>Angular displacemnet</i>	---	1
Luasan	$L^2$	$S_1^2$
Momen Inersia	$L^4$	$S_1^4$
Pembebanan		
Beban terpusat Q	F	$S_E S_1^2$
Beban garis w	$FL^{-1}$	$S_E S_1$
Tekanan atau beban terbagi merata q	$FL^{-2}$	$S_E$
Momen M atau torsi T	FL	$S_E S_1^3$
Gaya lintang V	F	$S_E S_1^2$