

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Umum**

Perencanaan struktur gedung bertingkat harus direncanakan mampu meredam gaya lateral yang ditimbulkan akibat terjadinya gempa bumi, sehingga bangunan gedung tersebut dapat berfungsi dengan baik dan layak guna. Prinsipnya adalah bangunan tersebut ketika terjadi gempa bumi dengan skala tinggi tidak langsung runtuh dan hancur seketika, perilaku bangunan gedung direncanakan memiliki sifat elastis tanpa mengurangi kuat struktur itu sendiri, setidaknya dapat bertahan dan dapat mengurangi resiko terjadinya korban jiwa maupun kerugian materi/non materi. Kemampuan bangunan gedung mendistribusikan selisih energi beban gempa mampu dan ditahan oleh struktur yang bersangkutan dalam bentuk kemampuan deformasi yang elastis bisa disebut sebagai daktilitas struktur.

Daktilitas mengacu pada kemampuan sebuah bangunan untuk menyerap dan mendistribusikan energi gempa melalui deformasi elastis, tanpa kehilangan kekuatan strukturalnya. Struktur yang dirancang dengan daktilitas tinggi mampu bertahan meskipun mendekati titik keruntuhan.

Berdasarkan SNI 1726:2019, perencanaan diafragma bukan hanya dianjurkan tetapi diwajibkan dalam konteks desain struktur tahan gempa, terutama untuk bangunan yang berfungsi di wilayah rawan gempa. Hal ini untuk memastikan bahwa bangunan memiliki kemampuan yang memadai dalam mendistribusikan beban lateral dan menjaga stabilitas keseluruhan struktur, terutama saat terjadi gempa.

#### **2.2 Pembebanan**

Beban adalah gaya atau aksi lainnya akibat berat seluruh bahan bangunan, penghuni, dan barang-barang yang dimilikinya, efek lingkungan, perbedaan pergerakan dan gaya kekangan akibat perubahan dimensi. (SNI 1727:2020) ada beberapa jenis beban yang dipikul oleh struktur diantaranya:

##### **2.2.1 Beban Mati**

Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap,

finishing, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktur lainnya serta perlatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material. (SNI 1727:2020)

Perkiraan berat struktur harus relevan dan dapat diperoleh dari rumus dan tabel Yang terdapat didalam referensi buku dan Standar Nasional Indonesia (SNI) Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1** Berat Sendiri Bahan Bangunan dan Komponen Gedung

<b>Bahan Bangunan</b>	<b>Berat</b>
Baja	7850 kg/m <sup>3</sup>
Beton	2200 kg/m <sup>3</sup>
Beton Bertulang	2400 kg/m <sup>3</sup>
Kayu (Kelas I)	1000 kg/m <sup>3</sup>
Pasir (Kering udara)	1600 kg/m <sup>3</sup>
<b>Komponen Gedung</b>	<b>Berat</b>
Spesi dari semen, per cm tebal	21 kg/m <sup>3</sup>
Dinding bata merah 1/2 batu	250 kg/m <sup>3</sup>
<b>Komponen Gedung</b>	<b>Berat</b>
Atap genteng	50 kg/m <sup>3</sup>
Penutup lantai ubin per tebal	24 kg/m <sup>3</sup>

Sumber: SNI 1727 2020

### 2.2.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung dan beban lingkungan, seperti beban angin, hujan, gempa, banjir atau beban mati. (SNI 1727:2020)

Beban Hidup (*Live Load*) adalah beban gravitasi yang timbul akibat penggunaan suatu gedung selama masa layan gedung tersebut. Beban hidup yang digunakan dalam perancangan bangunan gedung dan struktur lain harus beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, akan tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang di tetapkan dalam SNI 1727:2020. Seperti pada Tabel 2.2 berikut ini.

**Tabel 2. 2** Beban Hidup pada Gedung Apartemen Atau Hotel

Hunian atau Penggunaan	Merata psf (kn/m <sup>2</sup> )	Terpusat (kN)
<b>Rumah Tinggal</b>		
Hunian (Satu Keluarga dan Dua Keluarga)		
Loteng yang tidak dapat didiami tanpa gudang	10 (0,48)	-
Loteng yang tidak dapat didiami dengan gudang	20 (0,96)	-
Loteng yang dapat didiami dan ruang tidur	30 (1,44)	-
Semua ruang kecuali tangga dan balkon	40 (1,92)	-
Semua hunian rumah tinggal lainnya		
Ruang pribadi dan koridornya	40 (1,92)	-
Ruang public	100 (4,79)	-
Koridor ruang publik	100 (4,79)	-

Sumber: SNI 1727 2020

### 2.2.3 Beban Gempa

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu sendiri. Dalam hal pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisis dinamik, maka yang diartikan dengan beban gempa disini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu sendiri.

Langkah-langkah analisa gaya gempa metode statik ekivalen adalah sebagai berikut:

- a. Mencari Kategori Resiko Gempa, Faktor Keutamaan Gempa dan Kelas Situs

**Tabel 2. 3** Kategori Resiko Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
Gedung dan nongedung yang memiliki resiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk antara lain:	I
- Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan	

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fasilitas sementara</li> <li>- Gudang penyimpanan</li> <li>- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya</li> </ul>	
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perumahan</li> <li>- Rumah toko dan rumah kantor</li> <li>- Pasar</li> <li>- Gedung perkantoran</li> <li>- Gedung apartemen/rumah susun</li> <li>- Bangunan industri</li> <li>- Fasilitas manufaktur</li> <li>- Pabrik</li> </ul>	II
<p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bioskop</li> <li>- Gedung pertemuan</li> <li>- Stadion</li> <li>- Fasilitas kesehatan yang memiliki unit bedah dan unit gawat darurat</li> <li>- Penjara</li> <li>- Bangunan untuk orang jompo</li> </ul>	
<p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p>	III
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pusat pembangkit listrik biasa</li> <li>- Fasilitas penanganan air</li> <li>- Fasilitas penanganan limbah</li> <li>- Pusat telekomunikasi</li> </ul>	
<p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau 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</p>	

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bangunan-bangunan monumental</li> <li>- Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan</li> <li>- Rumah ibadah</li> <li>- Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat</li> <li>- Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat</li> <li>- Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya</li> <li>- Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat</li> <li>- Pusat pembangkit listrik energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada keadaan darurat</li> <li>- Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat</li> </ul>	IV
Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	

Sumber: SNI 1726 2019

Setelah mengetahui kategori risiko gempa dilakukan penentuan faktor keutamaan gempa yang ditabelkan seperti pada Tabel 2.4 berikut:

**Tabel 2. 4** Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa, Ie
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726 2019

**Tabel 2. 5** 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 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	> 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3m tanah dengan Karakteristik berikut:

1. Indeks plastisitas,  $PI > 20$
2. Kadar air,  $w > 40\%$ , dan
3. Kuat Geser  $\bar{S}_u < 25$  kPa

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifikasi 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 likuifikasi, lempung sensitif, tanah tersementasi lemah</li> <li>- Lempung sanagat organik dan/atau gambut (ketebalan <math>H &gt; 3</math> m)</li> <li>- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan <math>H &gt; 7,5</math> m dengan ineks plastisitas <math>PI &gt; 75</math>)</li> </ul> Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa
--	---

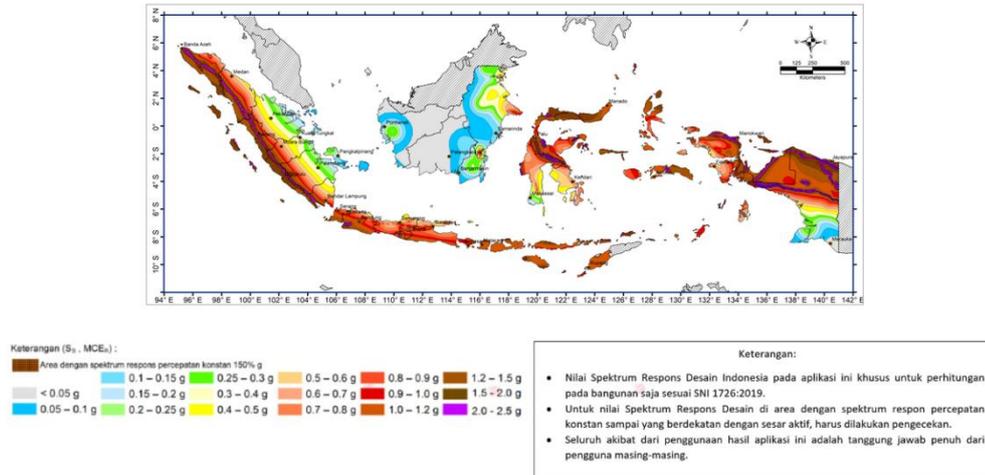
CATATAN: N/A = tidak dapat dipakai

Sumber: SNI 1726 2019

#### b. Parameter Respon Spektral MCE dari Peta Gempa

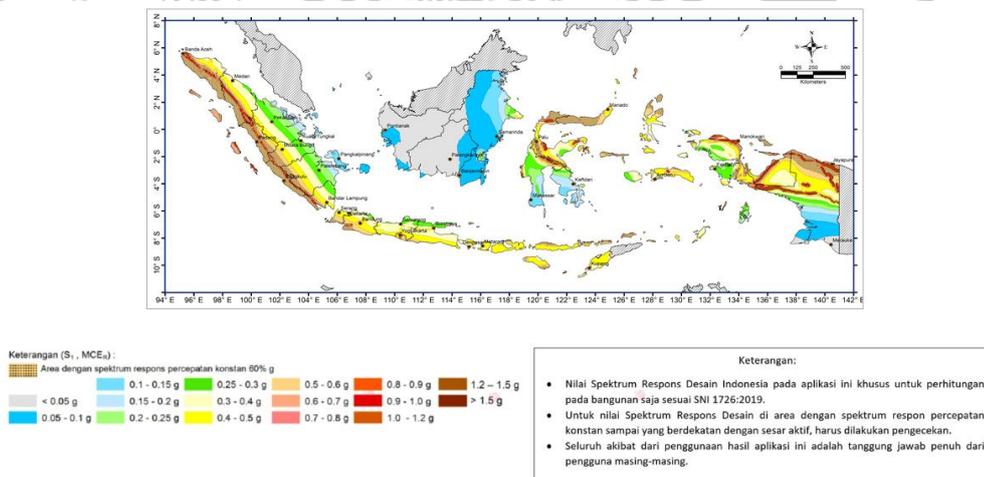
Setelah menentukan kelas situs dilakukan penentuan nilai parameter percepatan spektral desain.  $S_1$  untuk parameter respons percepatan spektral dari peta periode 1mdetik dan  $S_s$  untuk parameter repons percepata spectral dari peta periode pendek 0,2 detik. Nilai  $S_1$  dan  $S_s$  dapat dicari menggukan aplikasi yang dikeluarkan oleh pusat Litbang perumahan dan pemukiman (puskim). Peta gempa yang di

pertimbangkan memiliki dua variabel yaitu  $S_1$  dan  $S_2$  seperti pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2.



**Gambar 2. 1**  $S_s$  Gempa maksimum dipertimbang risiko tertarget (MCE<sub>R</sub>)

Sumber: SNI 1726 - 2019



**Gambar 2. 2**  $S_1$  Gempa maksimum dipertimbang risiko tertarget (MCE<sub>R</sub>)

Sumber: SNI 1726 - 2019

Setelah mendapatkan nilai dari  $S_1$  dan  $S_s$  maka tahap selanjutnya adalah menentukan nilai dari koefisien situs berdasarkan tabel berikut:

**Tabel 2. 6** Koefien situs ( $F_a$ )

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_s$					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,75$	$S_s \leq 1,0$	$S_s \leq 1,25$	$S_s \leq 1,50$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan pada periode pendek, T = 0,2 detik, S <sub>s</sub>					
	S <sub>s</sub> ≤ 0,25	S <sub>s</sub> ≤ 0,5	S <sub>s</sub> ≤ 0,75	S <sub>s</sub> ≤ 1,0	S <sub>s</sub> ≤ 1,25	S <sub>s</sub> ≤ 1,50
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	S <sub>s</sub> <sup>a</sup>					

Sumber: SNI 1726 2019

**Tabel 2. 7** Koefien situs (F<sub>v</sub>)

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan pada periode 1 detik, S <sub>1</sub>					
	S <sub>1</sub> ≤ 0,1	S <sub>1</sub> ≤ 0,2	S <sub>1</sub> ≤ 0,3	S <sub>1</sub> ≤ 0,4	S <sub>1</sub> ≤ 0,5	S <sub>1</sub> ≤ 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	S <sub>s</sub> <sup>a</sup>					

Sumber: SNI 1726 2019

Sehingga dapat ditentukan nilai dari parameter percepatan respons spektral MCE dengan rumus sebagai berikut: (Setiawan, 2016: 357)

- S<sub>1</sub> untuk parameter percepatan respons spektral MCE pada periode tinggi 1 detik

$$SM_1 = S_1 \times F_v \dots\dots\dots (2-1)$$

- S<sub>s</sub> untuk parameter percepatan respons spektral MCE pada periode pendek 0,2 detik

$$SM_s = S_s \times F_a \dots\dots\dots (2-2)$$

Nilai parameter percepatan respons spektral dicari untuk menentukan kategori desain seismik bangunan dan didapatkan dari rumus:

- S<sub>1</sub> untuk parameter percepatan respons spektral MCE pada periode tinggi 1 detik

$$SD_1 = 2/3 SM_1 \dots\dots\dots (2-3)$$

- $S_s$  untuk parameter percepatan respons spektral MCE pada periode pendek 0,2 detik

$$S_{DS} = 2/3 S_{Ms} \dots \dots \dots (2-4)$$

c. Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik tergantung dari nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$ . Berikut adalah Tabel 2.8 tentang kategori desain seismik:

**Tabel 2. 8** Kategori Desain Seismik Periode Pendek

Nilai $S_{DS}$	Kategori Resiko	
	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

Sumber: SNI 1726 2019

**Tabel 2. 9** Kategori Desain Seismik Periode 1 Detik

Nilai $S_{D1}$	Kategori Resiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726 2019

d. Spektrum Respons Desain

Pada SNI 1726 2019 percepatan spektral respons desain pada berbagai periode harus di tentukan dengan persamaan di bawah ini:

$$S_a = \frac{2}{3} S_{aM}$$

Dimana  $S_{aM}$  adalah percepatan spektral respons gempa  $MCE_R$  yang didapatkan dalam 0 atau 0. Percepatan spektral respons desain untuk berbagai periode tidak boleh diambil lebih kecil dari 80% nilai  $S_a$  yang ditentukan dalam 0,  $F_a$  dan  $F_v$  untuk kelas situs SA, SB, SC, SD, dan SE ditentukan dengan tabel 3.6 dan 3.7.

Untuk situs yang dikategorikan sebagai kelas situs SF, yang disyaratkan memerlukan analisis respons spesifikasi situs sesuai 0, percepatan spektral respons desain untuk setiap periode tidak boleh diambil lebih kecil dari 80% nilai  $S_a$  yang ditentukan untuk kelas situs SE yang mengacu pada 0.

Struktur juga harus desain untuk menahan pengaruh beban gempa berdasarkan anggapan tidak terjadi likuifaksi sesuai kelas tanah yang ditinjau.

e. Faktor Koefisien Modifikasi Respons, Kuat Lebih Sistem, Pembebasan Defleksi

Nilai-nilai dari koefisien respon ( $R$ ), kuat lebih sistem ( $\Omega_0$ ), pembesaran defleksi ( $C_d$ ) dan dapat ditentukan setelah mengetahui kategori desain seismik. Karena ada perencanaan ulang ini menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), maka nilai-nilai koefisien dapat dilihat pada Tabel 2.10.

**Tabel 2. 10** Faktor  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$  untuk sistem pemikul gaya seismik

Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respon, $R^a$	Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega_0^b$	Faktor Pembesaran Defleksi, $C_d^c$	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, $h_n$ (m) <sup>c</sup>				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D <sup>e</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
<b>D. Sistem Ganda Dengan Rangka Pemikul Khusus yang Mampu Menahan Paling Sedikit 25% gaya Gempa yang Ditetapkan</b>								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2,5	4	T B	T B	T B	T B	T B
2. Rangka baja dengan bresing konsentrasi khusus	7	2,5	5,5	T B	T B	T B	T B	T B
3. Dinding geser beton bertulang khusus	7	2,5	5,5	B	T B	T B	T B	T B
4. Dinding geser beton bertulang biasa	6	2,5	5	T B	T B	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2,5	4	T B	T B	T B	T B	T B
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentrasi khusus	6	2,5	5	T B	T B	T B	T B	T B
	7,5	2,5	6	T	T	T	T	T

Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respon, $R^a$	Faktor Kuat Lebih Sistem, $\Omega_0^b$	Faktor Pembesaran Defleksi, $C_d^c$	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, $h_n$ (m) <sup>c</sup>				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D <sup>e</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
7. Dinding geser plat baja dan beton komposit				B	B	B	B	B
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2,5	6	T B	T B	T B	T B	T B
9. Dinding geser baja dan beton bertulang biasa	6	2,5	5	T B	T B	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5,5	3	5	T B	T B	T B	T B	T B
11. Dinding geser batu bata bertulang menengah'	4	3	3,5	T B	T B	TI	TI	TI
12. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2,5	5	T B	T B	T B	T B	T B
13. Dinding geser palt baha khusus	8	2,5	6,5	T B	T B	T B	T B	T B

Sumber: SNI 1726 2019

Keterangan:

TB = Tidak Dibatasi

TI = Tidak Diijinkan

R = Faktor Modifikasi Respon

$C_d$  = Faktor Pembesaran Defleksi

$\Omega_0$  = Faktor Kuat Lebih Sistem

Dari tabel ini diketahui bahwa sistem rangka pemikul momen khusus mampu menahan gaya gempa paling sedikit 25%.

#### f. Periode fundamental pendekatan

Periode fundamental pendekatan ( $T_a$ ) menurut SNI 1726:2019 pasal 7.8.2.1 bahwa untuk struktur dinding geser batu bata atau beton diijinkan untuk ditentukan dari persamaan berikut ini: (Setiawan, 2016: 364)

$$T_a = C_t h_n^x \dots\dots\dots (2-5)$$

dimana :

$h_n$  = Ketinggian struktur (m)

$C_t$  dan  $\alpha$  = dapat dilihat di Tabel 2.11 berikut ini

**Tabel 2. 11** Nilai parameter periode pendekatan  $C_t$  dan  $\alpha$

Tipe Struktur	$C_t$	$\alpha$
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100% gaya seismik yang diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik:		
• Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
• Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksintris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber SNI :1726 2019

Agar suatu bangunan tidak terlalu fleksibel periode waktu getar dibatasi. SNI 1726 2019

Dimana  $C_u$  didapat dari tabel 17 pada SNI 1726 2019 seperti pada Tabel 2.12 berikut ini:

**Tabel 2. 12** Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, SD1	Koefisien $C_u$
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber: SNI 1726 2019

g. Koefisien Respons Seismik (Cs) dan Gaya Dasar Seismik (v)

- Koefisien Respons Seismik (Cs)

Untuk menentukan nilai Cs ditentukan dari rumus berikut: (Setiawan, 2016: 365)

$$Cs \text{ maksimum} = \frac{SD1}{T\left(\frac{R}{Ie}\right)} hn \dots\dots\dots (2-6)$$

$$Cs \text{ minimum} = 0,044 \times CD1 \times Ie \geq 0,01 \dots\dots\dots (2-7)$$

Nilai Cs hitung harus berada diantara Cs minimum dan Cs maksimum. Cs minimum < Cs hitung < Cs maksimum

Keterangan:

R = Faktor modifikasi respons

Ie = Faktor keutamaan gempa yang ditentukan

T = Periode fundamental pendekatan

- Gaya Dasar seismik

Setelah mendapatkan nilai Cs, gaya dasar seismik dapat dicari dengan persamaan berikut: (Setiawan, 2016: 365)

$$V = Cs \times w \dots\dots\dots (2-8)$$

Keterangan:

Ie = koefisien respons seismik

w = berat bobot bangunan (kN)

h. Distribusi Beban Gempa pada Struktur Bangunan

Gaya gempa lateral, Fx (kN) yang timbul disemua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut: (Setiawan, 2016: 365)

$$Fx = Cv_x \times V \dots\dots\dots (2-9)$$

Dimana:

$$Cv_x = \frac{W_x \times h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i \times h_i^k} \dots\dots\dots (2-10)$$

Keterangan:

Cvx = Faktor distribusi vertikal

V = Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur (kN)

$w_i$  dan  $w_x$  = Bagian dari berat seismik efektif total struktur ( $W$ ) yang ditempatkan dan dikenakan pada tingkat  $i$  atau  $x$

$K$  = Eksponen yang terkait dengan periode struktur, berikut:

- $K=1$ , untuk struktur yang mempunyai periode 0,5 detik atau kurang
- $K=2$ , untuk struktur yang mempunyai periode 2,5 detik atau lebih
- $K$  harus diinterpolasi linear apabila mempunyai periode diantara 0,5 dan 2,5 detik

#### i. Metode Respon Spektrum

Dalam analisa perhitungan struktur digunakan metode respon spektrum menggunakan SNI 1726 tahun 2019 pasal 7.9 dimana dijelaskan seperti berikut:

##### 1. Jumlah Ragam

Analisa harus dilakukan untuk menentukan ragam gelar alami untuk struktur analisa harus mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90% dari massa aktual dalam masing masing arah

##### 2. Parameter Respons

Nilai untuk setiap parameter desain yang berkaitan dengan gaya yang ditinjau, termasuk simpangan antar lantai tingkat, gaya dukung, dan gaya elemen struktur individu untuk setiap ragam respon harus dihitung menggunakan properti masing-masing ragam dan spektrum respon dibagi dengan kuantitas ( $R/I_e$ ). Nilai untuk perpindahan dan kuantitas simpangan antar lantai harus dikalikan dengan kuantitas ( $Cd/I_e$ )

##### 3. Parameter Respon Terkombinasi

Nilai untuk masing-masing parameter yang ditinjau, yang dihitung untuk berbagai ragam, harus dikombinasikan menggunakan metode akar kuadrat jumlah kuadrat (SRSS) atau metode kombinasi kuadrat lengkap (CQC), sesuai dengan SNI 1726. Metode CQC harus digunakan untuk setiap nilai ragam dimana ragam berjarak dekat mempunyai korelasi silang yang signifikan diantar respon translasi dan torsi.

##### 4. Skala Nilai Desain Untuk Respons Terkombinasi

Geser dasar ( $V$ ) harus dihitung dalam masing masing dua arah horizontal menggunakan metode fundamental struktur yang dihitung  $T$  dalam masing-

masing arah dan prosedur gaya lateral ekuivalen. Jika periode fundamental yang dihitung melebihi  $CuTa$ , maka  $CuTa$  harus digunakan sebagai pengganti dan  $T$  dalam arah itu, kombinasi respons untuk geser dasar ragam ( $Vt$ ) < 85% dari gaya geser dasar dihitung ( $V$ ), maka gaya harus dikalikan dengan 0,85 ( $V/Vt$ ).

#### 2.2.4 Kombinasi Pembebanan

Struktur serta komponen elemen struktur harus dirancang sedemikian rupa hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban terfaktor dengan kombinasi pembebanan sesuai SNI 1726 2019 sebagai berikut:

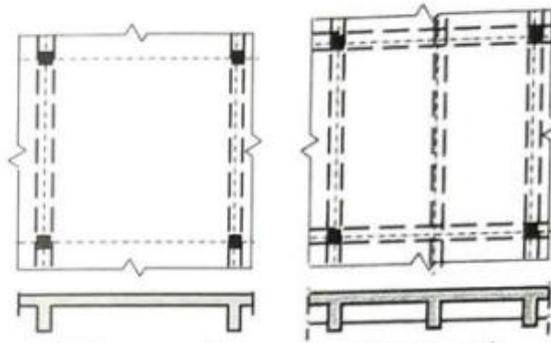
- a)  $1,4D$
- b)  $1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
- c)  $1,2D + 1,6L (Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
- d)  $1,2D + 1,0W + L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$
- e)  $1,2D + 1,0E + L$
- f)  $0,9D + 1,0W$

### 2.3 Pelat Beton Bertulang

Pelat adalah elemen horizontal utama yang menyalurkan beban hidup maupun beban mati ke rangka pendukung dari suatu sistem struktur. Elemen tersebut dapat berupa pelat di atas balok, pelat tanpa balok yang bertumpu langsung pada kolom atau pelat komposit. Elemen-elemen tersebut dapat dibuat sehingga bekerja dalam satu arah atau bekerja dalam dua arah yang saling tegak lurus.

#### 2.3.1 Pelat Satu Arah

Pelat akan dianggap satu arah jika sistem pelat hanya ditumpu di kedua sisinya, maka pelat tersebut akan melentur atau mengalami lendutan dalam arah tegak lurus dari sisi tumpuan. Beban akan didistribusikan oleh pelat dalam satu arah saja yaitu ke arah tumpuan atau apabila pelat tertumpu di keempat sisinya, dan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek lebih besar atau sama dengan 2, maka hampir 95% beban akan dilimpahkan dalam arah bentang pendek (Setiawan, 2016: 252). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



**Gambar 2. 3** Pelat satu arah

Sumber: Setiawan, 2016: 252

Berdasarkan SNI 2847:2019, terdapat beberapa batasan yang terkait dengan desain pelat satu arah, yang mencakup hal-hal berikut:

1. Desain dikerjakan dengan mempertimbangkan bahwa dimensinya diasumsikan setara dengan 1 meter.
2. Pada beton berat konvensional dengan kekuatan leleh  $f_y = 420$  Mpa, tebal pelat satu arah harus memenuhi persyaratan batas minimum yang dicantumkan dalam Tabel 2.13.

**Tabel 2. 13** Ketebalan pelat satu arah minimum

Kondisi Tumpuan	h minimum
Tumpuan Sederhana	1/20
Suatu Ujung menerus	1/24
Kedua ujung menerus	1/18
Kantilever	1/10

Sumber: SNI 2847-2019

Dalam situasi yang berbeda, ketebalan pelat minimum harus disesuaikan dengan persyaratan yang disebutkan di bawah ini:

- a) Apabila kuat leleh  $f_y$  melebihi 420 Mpa, maka persamaan yang terdapat dalam Tabel 2.15 harus dikalikan dengan faktor  $(0,4 \frac{f_y}{700})$ .

- b) Persamaan yang ada dalam Tabel 2.15 perlu dikalikan dengan nilai maksimum dari opsi berikut untuk pelat nonprategang yang menggunakan beton ringan, dengan rentang berat jenis wc antara 1440 hingga 1840 kg/m<sup>3</sup>:
- $1,65 - 0,0003wc$
  - 1,09
3. Pemeriksaan lendutan diperlukan ketika pelat mendukung struktur yang rentan terhadap kerusakan akibat lendutan yang signifikan. Untuk menetapkan batasan lendutan yang diperbolehkan, acuan yang digunakan adalah Tabel 2.14
4. Ketebalan selimut beton untuk struktur pelat harus setidaknya 20 milimeter, terutama untuk pelat yang tidak terpapar tanah atau cuaca.

**Tabel 2. 14** Lendutan izin maksimum

Jenis Komponen Struktur	Kondisi	Lendutan yang diperhitungkan	Batas Lendutan
Atap datar	Tidak memiliki atau tidak terintegrasi dengan komponen nonstruktural yang dapat menyebabkan kerusakan akibat lendutan besar	Lendutan akibat Lr dan R maksimum	1/180
Lantai	Menahan beban atau menyambung ke elemen non-struktural	Lendutan skitar akibat L	1/360
	ungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen non struktural; ini adalah jumlah lendutan jangka panjang yang disebabkan oleh penambahan beban hidup dan lendutan seketika yang disebabkan oleh beban tetap.	1/24
Atap atau lantai	Tidak akan rusak oleh penyimpangan atau lendutan yang besar		1/240

Sumber: SNI 2847-2019

5. Untuk pelat satu arah, diperlukan tulangan susut dan suhu yang ditempatkan tegak lurus terhadap tulangan lentur. Persyaratan ini diuraikan dalam Pasal 9.3.2 dari Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2019. Secara minimal, tulangan susut dan suhu harus memenuhi rasio luas tulangan terhadap luas penampang bruto beton, sebagaimana disebutkan dalam Tabel 2.15, namun tidak boleh kurang dari 0,0014

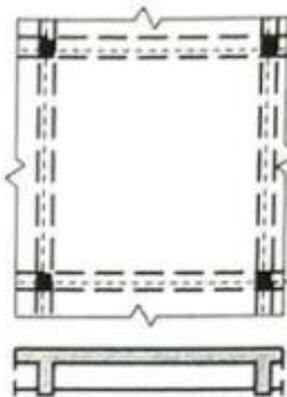
**Tabel 2. 15** Ketebalan pelat satu arah minimum

Tipe Tulangan	Fy (Mpa)	pmin
Batang ulir	<420	0, 002
		$0,0018 \times 420$
Batang ulir atau kawat las	$\geq 420$	$f_y$
		0,0014

Sumber: SNI 2847-2019

### 2.3.2 Pelat Dua Arah

Struktur pelat dianggap sebagai pelat dua arah jika pelat beton ditopang di keempat sisinya dan rasio antara bentang panjang terhadap bentang pendeknya kurang dari 2 (Setiawan, 2016: 252). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Pelat dua arah

Sumber: Setiawan, 2016: 252

Pelat dua arah merupakan kategori pelat yang mengalami lentur dalam dua arah bentangnya, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Sehingga tulangan lentur ditempatkan pada dua arah bentang tersebut yang berada dalam orientasi saling tegak lurus.

Agar lenturan tidak terjadi secara berlebihan, SNI 2847:2019 Pasal 8.3.1.2 menetapkan nilai minimum untuk ketebalan pelat dua arah. Karena perhitungan lenturan pada pelat dua arah merupakan tugas yang kompleks, dimensi ketebalan pelat dapat dihitung dengan memanfaatkan rumus empiris tertentu:

1. Jika  $0,2 < \alpha f m \leq 2,0$

$$\ln \frac{0,8 \left( \frac{f_y}{1400} \right)}{36+5 (\alpha f m - 0,2)} \dots\dots\dots (2.11)$$

Meskipun demikian, tidak diperkenankan lebih kecil dari 125 mm

2. Jika  $\alpha f m > 2,0$

$$\frac{\ln \left( 0,8 \left( \frac{f_y}{1400} \right) \right)}{36+9\beta} \dots\dots\dots (2.12)$$

Meskipun demikian, tidak diperkenankan lebih kecil dari 90 mm.

3. Jika  $\alpha f m \leq 2,0$

Ketebalan balok minimal menurut Tabel 2.4

Dimana:

$l_n$  = Jarak efektif antara dua titik penopang pada pelat dua arah, diukur dari satu permukaan ke permukaan lainnya tanpa mempertimbangkan balok, dan juga dari permukaan ke permukaan balok atau titik penopang lainnya dalam konteks yang beragam (mm).

$\beta$  = perbandingan bentang bersih pelat dua arah dalam arah Panjang dengan arah pendek.

$\alpha f m$  = nilai  $\alpha f$  rata-rata untuk setiap balok pada tepi pelat.

$\alpha f$  = perbandingan antara kekakuan lentur penampang balok ( $E_c I_b$ ) dengan kekakuan lentur.

$E_c I_b$  = dibatasi secara lateral oleh sumbu tengah panel-panel pelat yang berdekatan pada setiap sisi balok.

$$\alpha f = \frac{E_c I_b}{E_c I_s} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

$I_b$  = momen inersia keseluruhan penampang balok terhadap sumbu massa mencakup sebagian dari pelat di setiap sisi balok yang memiliki

dimensi sebanding dengan proyeksi balok di atas atau di bawah pelat, namun tidak melebihi empat kali ketebalan pelat.

$I_b$  = momen inersia total dari penampang pelat.

**Tabel 2. 16** Ketebalan pelat dua arah minimum

Fy, Mpa	Tanpa drop panel		Dengasn Drop Panel			
	Panel Eksterior		Panel Interior	Panel Eksterior		Panel Interior
	Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi		Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi	
280	1/33	1/36	1/36	1/36	1/40	1/40
420	1/30	1/33	1/33	1/33	1/36	1/36
520	1/28	1/31	1/31	1/31	1/34	1/34

Sumber: SNI 2847-2019

Tebal minimum pelat di bagian dalam tanpa balok, sebagaimana spesifikasikan dalam Tabel 2.16 sesuai dengan Pasal 8.2.4, harus setidaknya 125 mm (untuk pelat tanpa panel turun) atau 100 mm (untuk pelat dengan panel turun).

### 2.3.3 Analisa Tulangan Pelat

Kekuatan  $\phi M_n \geq M_u$  harus dipenuhi oleh tulangan pelat. Nilai  $M_n$  dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\phi M_n = \phi \left( A_s \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \right) \dots \dots \dots (2.14)$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \dots \dots \dots (2.15)$$

$$\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\rho_b = \frac{(0,85 f_c' \beta)}{f_y} - \frac{600}{600 + f_y} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$R_n = \frac{M_n}{b \cdot d^2} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$d = h - t_s - \phi_{\text{sengkang}} - \frac{1}{2} \phi_{\text{t.pokok}} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\rho = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot m \cdot R_n}{f_y}} \right) \dots \dots \dots (2.21)$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_c'} \dots \dots \dots (2.22)$$

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \dots \dots \dots (2.23)$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 f_c' b} \dots \dots \dots (2.24)$$

## 2.4 Balok Beton Bertulang

Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban tributary dari pelat lantai ke kolom penyangga vertikal. Pada umumnya elemen balok dicor secara monolit dengan pelat dan secara struktural ditulangi dibagian bawah atau dibagian atas bawah. Karena balok dicor secara monolit dengan pelat, maka elemen tersebut berbentuk penampang T untuk tumpuan dalam bentuk L untuk tumpuan tepi.

Fungsi utama balok adalah menyalurkan beban gravitasi dari pelat lantai ke kolom-kolom struktur yang kemudian diteruskan ke pondasi. Selain itu, balok juga berperan aktif dalam hal elemen penyusun penahan gempa karena menjaga kestabilan struktur dengan menguraikan gaya gempa melewati sendi plastis pada kedua ujungnya.

Terdapat gaya dalam yang sangat mempengaruhi dalam hal perilaku dan perencanaan penulangan balok, yakni momen lentur, gaya geser dan momen torsi. Berikut adalah penjelasannya:

- a. Momen lentur menyebabkan balok membutuhkan tulangan utama atau tulangan longitudinal (memanjang) yang berfungsi menahan momen lentur yang terjadi.
- b. Gaya Geser menyebabkan balok membutuhkan tulangan Sengkang atau tulangan transversal yang dipasang melingkari tulangan utama dengan jarak spasi tertentu sepanjang balok.
- c. Terdapat beberapa kondisi terjadinya momen pada sumbu poros memanjang balok yang menyebabkan momen terpuntir yang biasa disebut momen torsi. Akibatnya, balok membutuhkan tulangan torsi untuk meredam gaya punter tersebut.

Oleh karena itu, berdasarkan SNI 2847-2019, maka terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan dalam perencanaan balok beton bertulang yakni kuat lentur balok, kuat geser balok, dan kuat torsi balok. Penjelasan mengenai hal tersebut dapat dilihat pada subbab dibawah ini.

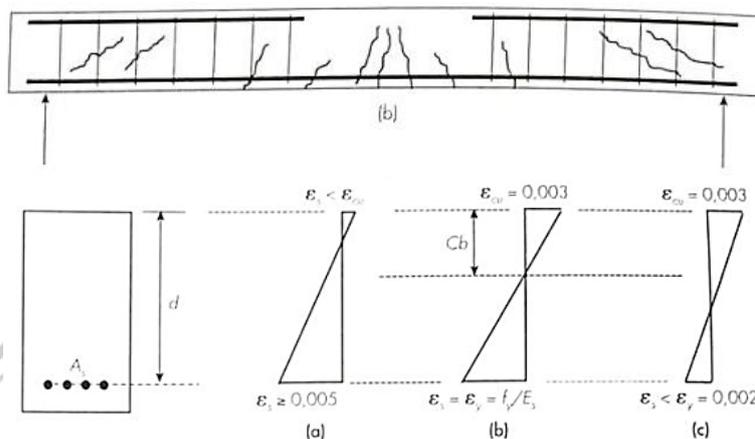
### 2.4.1 Kuat Lentur Balok

Balok adalah elemen struktur yang menerima beban vertikal tegak lurus dengan sumbu porosnya, baik beban terpusat maupun beban merata sehingga balok

menerima gaya, salah satunya adalah momen lentur. Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai kuat lentur balok yang tersaji pada subbab dibawah ini:

#### 2.4.1.1 Cara Kerja Kuat Lentur Balok

Cara kerja balok terhadap gaya lentur dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Keruntuhan balok ditinjau dari persentase tulangan baja

Sumber: Setiawan, 2019: 31

Pada Gambar 2.5, dapat dilihat balok menerima beban secara merata di sepanjang balok dengan tumpuan sederhana di kedua ujungnya. Pada kondisi tersebut, balok akan mengalami perlakuan lentur yang akan menimbulkan tegangan tarik dan tegangan tekan. Pada bagian atas balok mengalami tekan dan bagian bawah akan mengalami Tarik. Berikut adalah penjelasan mendetail mengenai Gambar 2.5 tersebut.

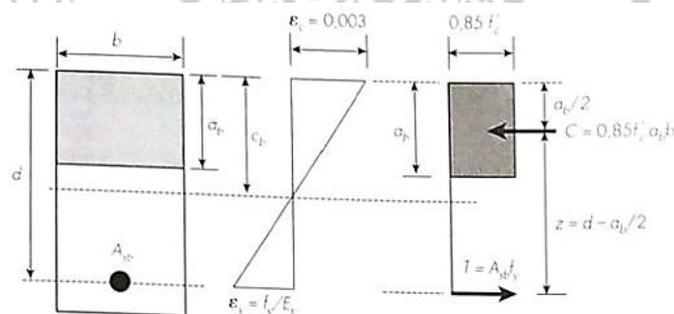
- Pada Gambar 2.5 (a) disaat balok menerima gaya beban yang relatif kecil, tegangan tarik dan tekan belum mencapai batas kekakuan maksimal dari beton dan tulangan, nilai distribusi tegangan dan regangan masih berupa garis linier, dengan kata lain balok masih berperilaku elastis. Arti elastis adalah disaat beban tersebut hilang, maka balok akan kembali ke posisi awal tanpa adanya retakan dan lendutan.
- Pada Gambar 2.5 (b), beban mengalami penambahan secara beraturan maka tegangan akan bertambah secara signifikan. Diawali dengan perubahan garis netral (c) diikuti dengan penambahan nilai tegangan regangan tarik dan tekan. Pada kondisi tersebut, tegangan tarik baja tulangan telah

mencapai batasan maksimum kuat lelehnya ( $f_y$ ). Distribusi tegangan berubah menjadi nonlinier. Tegangan tarik yang terdapat pada serat tarik beton telah mencapai batas maksimalnya sehingga terjadi crack dan lendutan permanen.

- c. Pada Gambar 2.5 (c), seiring terjadinya tegangan leleh pada serat tulangan baja, maka tulangan akan mengalami penambahan regangan diikuti deformasi pada balok, Kondisi retak akan semakin terlihat karena tulangan telah melewati kuat lelehnya dan mengalami istilah strain hardening. Balok dinyatakan mencapai batas maksimum runtuh apabila serat tekan sudah mencapai kekuatan maksimalnya yakni ( $\epsilon_{cu} = 0,003$ ).

#### 2.4.1.2 Kondisi Keseimbangan Regangan

Kondisi keseimbangan regangan adalah kondisi Ketika serat penampang balok terluar retak (*crash*) dan tulangan tarik baja telah mencapai kuat lelehnya (*yield*) sehingga kedua elemen tersebut mencapai regangan maksimalnya dan hancur secara bersamaan. Regangan maksimal beton adalah  $\epsilon_{cu} = 0,003$ , sedangkan regangan leleh tulangan tarik baja adalah  $\epsilon_s = f_y/E_s$ . Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2. 6** Regangan kondisi berimbang

Sumber: Setiawan, 2016: 36

Saat balok dalam keadaan seimbang, luasan tulangan diartikan sebagai tulangan berimbang dengan notasi simbol  $A_{sb}$  dan tinggi garis netral dengan notasi simbol  $c_b$ . Berikut adalah penjelasan mengenai perilaku getas dan daktil penampang balok berdasarkan Gambar 2.6 tersebut.

- a. Apabila tulangan actual  $A_s$  digunakan lebih banyak daripada tulangan berimbangnya  $A_{sb}$ , maka akan menimbulkan tinggi area blok tegangan

tekan  $a$  bertambah sehingga garis netral ( $c$ ) akan lebih tinggi garis netral saat kondisiimbang ( $cb$ ). Hal ini mengakibatkan regangan tulangan tarik aktual ( $\epsilon_s$ ) lebih kecil dibandingkan dengan regangan leleh ( $\epsilon_y$ ) pada saat serat beton tekan terluar mengalami retak ( $\epsilon_{cu} = 0,003$ ). Pada kondisi ini pola keruntuhan yang terjadi bersifat getas (brittle) tanpa adanya peringatan sehingga kondisi ini sangat berbahaya karena akan menyebabkan korban jiwa.

- b. Sebaliknya, apabila tulangan aktual  $A_s$  digunakan lebih sedikit daripada tulangan berimbang  $A_{sb}$ , maka akan menimbulkan tinggi area blok tegangan tekan  $a$  berkurang sehingga garis netral ( $c$ ) tidak akan lebih tinggi garis netral saat kondisiimbang ( $cb$ ). Akibatnya, regangan tulangan tarik aktual ( $\epsilon_s$ ) lebih besar dibandingkan dengan regangan leleh ( $\epsilon_y$ ) pada saat serat beton tekan terluar mengalami retak ( $\epsilon_{cu} = 0,003$ ). Kondisi ini akan mengakibatkan perilaku duktail (ductile) dengan deformasi yang terjadi cukup besar sebelum runtuh sehingga akan memberikan peringatan terlebih dahulu sebelum keruntuhan.

Berikut ini merupakan persamaan untuk menjelaskan kondisi yang telah dijelaskan diatas.

$$\rho = \frac{A_s}{b \times d} ; \rho = \text{rasio tulangan}$$

Korelasi hubungan regangan pada Gambar 2.6 dapat diketahui sebagai berikut.

$$\frac{Cb}{d} = \frac{\epsilon_{cu_s}}{\epsilon_{cu_s} + \epsilon_y} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E}} = \frac{600}{600 + f_y}$$

Gaya tekan ( $C_b$ ) saat kondisi seimbang adalah

$$C_b = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c_b$$

Gaya tarik ( $T_b$ ) saat kondisi seimbang adalah

$$T_b = A_{sb} \cdot f_y = \rho b \cdot b \cdot d \cdot f_y$$

Pada balok ini, berlaku persamaan nilai  $C_b = T_b$ , sehingga didapatkan rasio penulangan saat kondisi berimbang sebagai berikut.

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c_b = \rho b \cdot b \cdot d \cdot f_y$$

$$\rho_b = 0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1 \cdot f_y \left( \frac{600}{600 + f_y} \right)$$

### 2.4.1.3 Kontrol Tekan dan Kontrol Tarik Balok

Berdasarkan SNI 2847:2019, beton bertulang dapat dikategorikan menjadi *compression controlled* (kontrol tekan) dan *tension controlled* (kontrol tarik). Kondisi dipengaruhi oleh nilai regangan ( $\epsilon_t$ ) tulangan tarik saat adanya retakan pada penampang tekan beton ( $\epsilon_{cu} = 0,003$ ). Tulangan tarik dihitung berdasarkan jarak lapisan tulangan terdekat dengan penampang tarik beton bertulang balok ( $d_t$ ).

Saat tulangan 1 lapis, nilai tinggi efektif balok ( $d$ ) sama dengan nilai jarak lapisan tulangan tarik terdekat penampang tarik balok ( $d_t$ ). namun, apabila tulangan terdiri dari dua lapis, maka nilai  $d \neq d_t$ , hal ini dikarenakan  $d$  adalah jarak titik berat tulangan tarik terdapat serat tekan terluar balok, sedangkan  $d_t$  adalah jarak lapisan terluar tulangan tarik terhadap serat tekan beton.

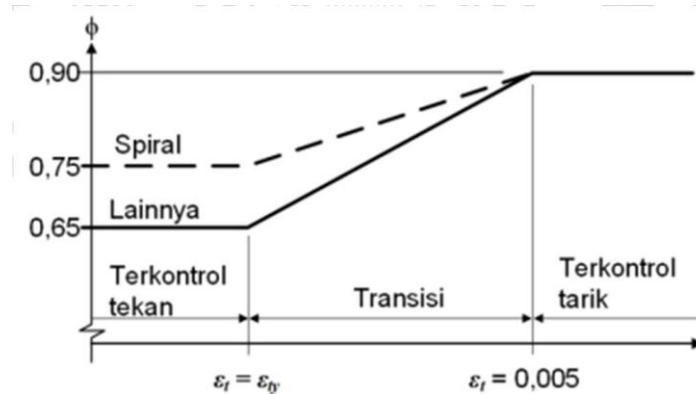
Perilaku keruntuhan sangat berpengaruh dalam pengelompokan penampang beton. Perilaku daktil cenderung memiliki penampang beton bertulang yang tergolong *tension controlled*, sedangkan perilaku getas cenderung memiliki penampang beton bertulang yang tergolong *compression controlled*.

Akibat adanya perbedaan perilaku tersebut, maka akan berpengaruh juga pada nilai reduksi (*safety factor*) dalam mendesain penampang. Berdasarkan SNI 2847- 2019 Pasal 21.2.2, faktor reduksi dan grafik variasi reduksi dapat dilihat pada Tabel 2.17 dan Gambar 2.7.

**Tabel 2. 17** Faktor reduksi ( $\phi$ ) untuk gaya aksial, momen, atau kombinasi gaya aksial dan momen

Regangan tarik netto ( $\epsilon_t$ )		$\phi$			
		Jenis tulangan transversal			
Klasifikasi		Spiral sesuai 25.7.3	Tulangan lainnya		
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0,75	a	0,65	d
$\epsilon_{ty} < \epsilon_t < 0,005$	Transisi	$0,75 + 0,15 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	b	$0,65 + 0,25 \frac{(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	f
$\epsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,90	c	0,90	g

Sumber: SNI 2847- 2019



**Gambar 2. 7** Grafik variasi nilai faktor reduksi.

Sumber: SNI 2847-2019: 473

Seperti pada Tabel 2.17 tersebut, untuk penampang balok yang tidak menggunakan sengkang spiral, saat kondisi tension controlled (terkontrol tarik) maka nilai faktor reduksinya adalah 0,9. Apabila kondisi *compression controlled* (terkontrol tekan) maka faktor reduksinya adalah 0,65. Adapun nilai  $\epsilon_t$  dan  $\epsilon_{ty}$  dapat diketahui melalui persamaan berikut.

$$\epsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \times 0,003$$

$$\epsilon_{ty} = \frac{f_y}{E}$$

Persamaan  $\epsilon_t$  bisa diganti dengan persamaan lainnya, yakni  $c/d_t$  sehingga dapat menjadi batasan nilai balok dalam hal pengecekan perilaku *tension controlled*. Berikut ini adalah persamaannya *tension controlled*.

$$d_t = \frac{\epsilon_{cu_s}}{\epsilon_{cu_s} + \epsilon_y} = \frac{0,003}{0,003 + 0,005} = 0,375$$

Oleh karena itu, apabila nilai  $c/d_t \leq 0,375$ , maka dapat diketahui bahwa balok tergolong perilaku *tension controlled*. Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa.

- Apabila perilaku balok tergolong *compression controlled*, maka perilaku yang terjadi adalah getas (*brittle*) dan harus didesain ulang.
- Apabila perilaku balok tergolong *transition controlled*, maka perilaku yang terjadi masih bisa disebut daktail (*ductile*) namun cenderung boros.

- c. Apabila perilaku balok tergolong *tension controlled*, maka perilaku yang terjadi adalah duktail (*ductile*), sehingga kondisi ini sangat ideal.

#### 2.4.1.4 Perencanaan Kuat Lentur Balok Sesuai Dengan SNI 2847-2019

Pada umumnya, ketentuan umum perencanaan balok telah diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 9. Berikut adalah syarat dan ketentuan perencanaan kuat lentur balok sesuai dengan SNI 2847-2019.

##### 1. Ketentuan umum

Ketentuan umum terdapat pada Pasal 9.2. Pada poin ini hanya menjelaskan mengenai ketentuan material balok beton bertulang sebagai berikut.

- Properties desain beton dipilih sesuai Pasal 19
- Properties desain baja tulangan dipilih sesuai Pasal 20
- Penamaan tulangan disesuaikan dengan Pasal 20.7

##### 2. Batasan Desain

Ketentuan Batasan Desain yang terdapat pada SNI 2847-2019 Pasal 9.3 memiliki beberapa poin untuk perencanaan lentur balok. Berikut adalah poin tersebut.

##### a. Tinggi Balok Minimum

Tinggi balok minimum diatur pada SNI 2847-2019 Pasal 9.3.1 Tabel 9.3.1.1 sebagai berikut

**Tabel 2. 18** Ketentuan Tinggi Minimum Balok

Kondisi Perletakan	Tinggi (H) Minimum
Perletakan sederhana	1/16
Menerus satu sisi	1/18,5
Menerus dua sisi	1/21
Menerus dua sisi	1/8

Sumber: SNI 2847-2019

Adapun pada balok yang memiliki mutu baja tulangan dengan  $f_y \geq 420$  MPa, maka persamaan di Tabel 2.18 perlu dikalikan dengan faktor pengali yakni  $(0,4+f_y/700)$ .

##### b. Batasan lendutan

Batas lendutan izin maksimum saat kondisi layan diatur dalam SNI 2847-2019 Pasal 24.2 Tabel 24.2.2

c. Batas regangan tulangan tarik pada balok

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.3.3.1, pada kondisi balok non prategang dengan nilai  $P_u < 0,10f_c'Ag$ , maka nilai regangan yang terjadi sekurang-sekurangnya  $\epsilon_t = 0,004$ . Hal ini berarti, pada perencanaan lentur balok diijinkan pada kondisi transisi dan terkontrol tarik. Namun yang perlu diperhatikan adalah meskipun boleh pada kondisi transisi, nilai regangan harus melebihi  $\epsilon_t \geq 0,004$

d. Kekuatan Perlu (Mu)

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.4, kekuatan perlu momen terfaktor (Mu) dijelaskan pada pasal 9.4.2.1 yang menyatakan bahwa nilai Mu dapat dihitung pada muka tumpuan.

e. Kekuatan Rencana (Mn)

Kekuatan rencana dijelaskan pada SNI 2847-2019 Pasal 9.5.2. Pada pasal tersebut, kekuatan rencana (Mn) dibedakan menjadi 2 kondisi, yakni.

- $P_u < 0,10f_c'Ag$ , maka perhitungan nilai momen rencana (Mn) harus disesuaikan dengan pasal 22.3.
- $P_u > 0,10f_c'Ag$ , maka perhitungan nilai momen rencana (Mn) harus disesuaikan dengan pasal 22.4.

Pada umumnya, balok pada gedung tergolong  $P_u < 0,10f_c'Ag$ , sehingga lebih dominan mengacu pada pasal 22.3. Perlu diperhatikan dalam merencanakan balok tipe ini yakni nilai  $\beta_1$ . Menurut SNI 2847-2019 Tabel 22.2.2.4.3 dengan ketentuan sebagai berikut.

- $17 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 28 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85$
- Jika  $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left( \frac{f_c' - 28}{7} \right)$
- Jika  $f_c' > 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,65$

f. Batasan Tulangan Lentur

Berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.6.1.2, luasan tulangan lentur dapat diketahui besaran nilainya melalui persamaan berikut.

$$A_{s_{min}} = \frac{0,25 \cdot \sqrt{f_c'}}{f_y} \cdot b \cdot d$$

atau,

$$A_{s_{min}} = 1,4 f_y . b . d$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa nilai rasio tulangan minimum ( $\rho$ ) diketahui melalui persamaan berikut.

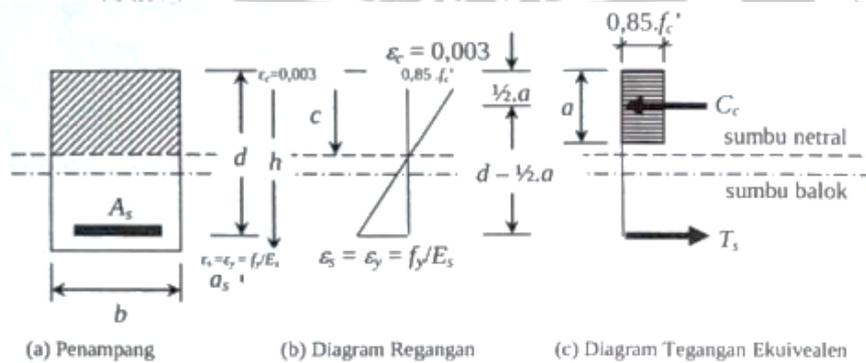
$$\rho_{min} = \frac{0,25 . \sqrt{f'c'}}{f_y}$$

atau,

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$$

### 2.4.1.5 Balok Tulangan Tunggal

Balok tulangan tunggal adalah balok yang hanya memiliki tulangan tarik sebagai tulangan penguatnya. Parameter yang digunakan dalam proses desain dapat dilihat pada Gambar 2.8. Perhitungan kuat nominalnya menggunakan konsep *whitney*, tujuannya adalah untuk mempermudah dalam menentukan momen nominal ( $M_n$ ) sehingga kuat memilku momen ultimit ( $M_u$ ) akibat adanya beban luar yang bekerja.



**Gambar 2. 8** Distribusi regangan dan tegangan balok tulangan tunggal

Sumber: Henricus, 2020: 16

Berikut ini adalah persamaan momen nominalnya.

$$M_n = T \left( d - \frac{a}{2} \right) = C \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.25)$$

Gaya tekan (C) pada penampang tekan dapat diketahui dengan persamaan berikut

$$C_b = 0,85 . f'c' . b . \beta_1 . c \dots\dots\dots (2.26)$$

Dengan nilai  $\beta_1$  ditentukan oleh nilai  $f'c'$  menggunakan parameter berikut.

- Jika  $17 \text{ MPa} \leq f'c' \leq 28 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85$

- Jika  $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85 - 0,05(f_c' - \frac{28}{7})$
- Jika  $f_c' > 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,65$

Gaya Tarik (T) tulangan baja dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$T = A_s \cdot f_y = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_y \dots\dots\dots (2.27)$$

Nilai  $C = T$ , sehingga

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_y$$

Dimana nilai  $a = \beta_1 \times c$  disubstitusikan menjadi

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_y$$

Sehingga nilai blok tegangan ( $a$ ) dapat diketahui melalui persamaan berikut

$$a = \frac{\rho \cdot d \cdot f_y}{0,85 f_c' \cdot b} \dots\dots\dots (2.28)$$

Maka nilai momen nominalnya ( $M_n$ ) menjadi

$$M_n = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_y \left( d - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho \cdot d \cdot f_y}{0,85 f_c' \cdot b} \right) \right) = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left( 1 - \frac{1}{2} \rho m \right) \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana nilai  $m$  adalah

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_c'} \dots\dots\dots (2.30)$$

Persamaan parameter *coefficient of resistance* ( $R_n$ ) sebagai berikut

$$R_n = M_n b d^2 = \rho \cdot f_y \left( 1 - \frac{1}{2} \rho m \right) \dots\dots\dots (2.31)$$

Dan rasio tulangan dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\rho = \frac{1}{m} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right) \dots\dots\dots (2.32)$$

$$\rho = \frac{0,85 f_c'}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85 f_c'}} \right) \dots\dots\dots (2.33)$$

#### 2.4.1.6 Perencanaan Balok Tulangan Tunggal

Desain perencanaan balok tulangan tunggal mengacu pada SNI 2847-2019

Pasal 22.2. berikut ini adalah detail dari prosedur tersebut.

1. Menghitung nilai momen nominal ( $M_n$ )

Nilai momen nominal ( $M_n$ ) dapat dihitung dengan cara membagi momen ultimit ( $M_u$ ) dengan faktor reduksi ( $\phi$ ). Dalam hal ini balok diasumsikan terkontrol tarik sehingga nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) = 0,9.

2. Menghitung rasio tulangan minimum ( $\rho_{min}$ )

Perhitungan berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.6.1.2 dan parameter ini dijadikan sebagai batas bawah rasio tulangan yang dibutuhkan

$$\rho_{min} = \frac{0,25\sqrt{f_c'}}{f_y}$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$$

3. Menghitung nilai Rn

Nilai Rn dan m dapat diketahui dengan persamaan berikut

$$Rn = \frac{Mn}{bd^2}$$

$$m = \frac{f_y}{0,85 f_c'}$$

4. Menghitung rasio tulangan ( $\rho$ ) balok

Perlu diperhatikan dalam menghitung rasio tulangan yang digunakan adalah nilai hasil perhitungan harus lebih besar dari nilai  $\rho_{min}$ . Berikut adalah persamaannya.

$$\rho = \frac{0,85 f_c'}{f_y} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2Rn}{0,85 \cdot f_c'}} \right)$$

5. Menghitung nilai kebutuhan luasan tulangan ( $A_s$ )

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d$$

6. Menghitung nilai luasan aktual

$$n = \frac{A_{steoritis}}{A_{aktual}}$$

Pada tahap ini perlu dipastikan apakah tulangan dipasang satu lapis atau lebih dengan cara menghitung spasi tulangan, berikut adalah rumusnya.

$$S_{min} = \frac{b - (2ts) - (2\phi s) - (nD_l)}{(n - 1)} > 40 \text{ mm}$$

Jika memenuhi, maka perhitungan  $A_s$  aktual dapat dilanjutkan.

7. Menghitung nilai blok tegangan ( $a$ ) berdasarkan nilai  $A_s$  aktual.

$$a = \frac{A_{aktual} \cdot f_y}{0,85 f_c' b}$$

8. Menhitung nilai  $c$  (tinggi garis netral yang baru).

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Dimana nilai  $\beta_1$  ditentukan berdasarkan nilai mutu beton ( $f_c$ ) yang digunakan. Berikut ini adalah ketentuan menentukan nilai  $\beta_1$ .

- Jika  $17 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 28 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85$
- Jika  $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85 - 0,005 \left( \frac{f_c' - 28}{7} \right)$
- Jika  $f_c' > 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,65$

9. Cek kategori penampang balok.

$$\frac{c}{dt}$$

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, penampang balok harus di cek terlebih dahulu apakah masuk kategori penampang terkontrol tekan, transisi, dan tarik. Berikut ini adalah cara cek kategori penampang.

- Jika  $\frac{c}{dt} \leq 0,375$ , maka balok termasuk control tarik
- Jika  $0,375 < \frac{c}{dt} < 0,600$ , maka balok termasuk transisi
- Jika  $\frac{c}{dt} > 0,600$ , maka balok termasuk control tekan

Hasil dari pengecekan ini nantinya akan mempengaruhi nilai faktor reduksi ( $\phi$ ) dalam memeriksa kapasitas penampang.

10. Menghitung dan memeriksa kapasitas penampang

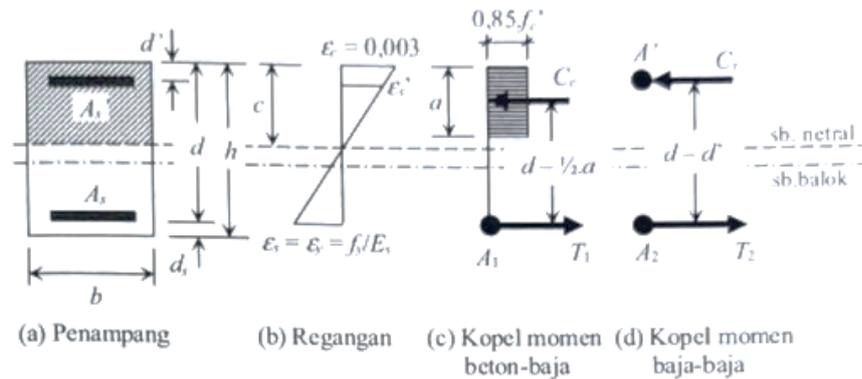
$$M_n = A_s \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \text{ dan } \phi \times M_n \geq M_u$$

#### 2.4.1.7 Balok Tulangan Rangkap

Balok tulangan rangkap adalah balok yang memiliki tulangan utama tarik ( $A_s$ ) dan tulangan utama tekan ( $A_s'$ ), biasanya balok jenis ini dikenal dengan double reinforced. Oleh karena kuat tekan beton sangat tinggi, maka tentunya tulangan utama tekan ( $A_s'$ ) jumlahnya tidak sebanyak tulangan tarik ( $A_s$ ). Umumnya luas tulangan digunakan sebanyak  $\frac{1}{4} A_s$  untuk struktur normal dan  $\frac{1}{2} A_s$  untuk struktur tahan gempa.

Secara konsep, prosedur Analisa balok tulangan rangkap ini hampir sama dengan balok tulangan tunggal, namun terdapat perbedaan yang mendasar yakni

adanya sumbangan kekuatan tekan dari tulangan tekan yang dinotasikan sebagai  $C_s$  (*compression of steel*) dan kuat tekan beton yang pada awalnya dinotasikan  $C$  menjadi  $C_c$  (*compression of concrete*). Mengenai tulangan rangkap balok beserta distribusi gaya tegangan-regangan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2. 9** Distribusi regangan dan tegangan balok tulangan rangkap

Sumber: Henricus, 2020: 43

- Kondisi 1

Pada kondisi ini tulangan tekan pada balok belum diperhitungkan. Proses Analisa perhitungan hampir sama seperti balok tulangan tunggal, hanya saja terdapat perbedaan pada nilai tulangan tarik. Gaya tarik dirubah notasinya menjadi  $T_1$  pada kondisi-1. Hal ini dikarenakan terdapatnya 2 pembagian gaya tarik tulangan tarik, yakni  $T_1$  (kondisi-1) dan  $T_2$  (kondisi-2). Sehingga persamaanya adalah  $T = T_1 + T_2$ .

Berikut ini adalah penjelasan rumusrumus pada kondisi-1. Gaya tarik tulangan tarik dengan luas tulangan ( $A_{s1}$ )

$$T_1 = A_{s1} \cdot f_y$$

Gaya tekan beton ( $C_c$ )

$$C_c = 0,85 f_c' \cdot b \cdot a$$

Dimana nilai  $T_1 = C_c$

$$M_{n1} = T_1 \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_{n1} = A_{s1} \cdot f_y \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

dan tulangan tarik ( $A_s$ ) dapat ditulis

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}$$

- Kondisi-2

Pada kondisi-2, parameter gaya tekan ( $C_s$ ) akibat adanya tulangan tekan ( $A_s'$ ) dan gaya tarik ( $T_1$ ) akibat tulangan tarik ( $A_{s1}$ ). Letak gaya  $C_s$  sejajar  $d'$  dari serat tekan penampang terluar beton sehingga selisih antara gaya tekan ( $C_s$ ) dan gaya tarik ( $T_1$ ) adalah panjang lengan momen ( $d - d'$ ).

Berikut ini adalah penjelasan rumus-rumus pada kondisi-2.

Gaya tarik tulangan tarik dengan luas tulangan ( $A_{s2}$ )

$$T_2 = A_{s2} \cdot f_y$$

Gaya tekan tulangan tekan ( $C_s$ )

$$C_s = A'_s \cdot f_s'$$

Dimana nilai  $T_2 = C_s$  dimana  $f_s'$  adalah nilai tegangan leleh pada tulangan tekan  $A_s'$  ( $A_{s2} = A_s'$ ) sehingga momen nominalnya adalah

$$M_{n2} = T_2 (d - d')$$

$$M_{n2} = A_{s2} f_s' (d - d')$$

Berdasarkan penjelasan mengenai kondisi-1 dan kondisi-2, maka dapat diperoleh nilai momen nominal ( $M_n$ ) pada balok tulangan rangkap adalah ebagai berikut.

$$M_{n1} = M_{n1} + M_{n2}$$

$$M_{n1} = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d')$$

Nilai  $C_c$  dapat diketahui dengan persamaan

$$T = T_1 + T_2$$

$$T = C_c + C_s$$

$$C_c = C_s - T = (A'_s \cdot f_s') - (A_s \cdot f_y)$$

Sehingga besaran momen nominalnya menjadi

$$M_n = [(A'_s \cdot f_s') - (A_s \cdot f_y)] \left( d - \frac{a}{2} \right) + (A'_s \cdot f_s') (d - d')$$

Dan persyaratannya adalah

$$\phi \times M_n \geq M_u$$

Dengan nilai  $\phi = 0,9$  untuk balok terkontrol tarik

### 2.4.1.8 Perencanaan Balok Tulangan Rangkap

Desain perencanaan balok tulangan rangkap mengacu pada SNI 2847-2019 Pasal 22.2. berikut ini adalah detail dari prosedur tersebut.

1. Mengasumsikan nilai  $\frac{c}{dt} \leq 0,375$

Pada Langkah ini dilakukan trial and error dengan mengasumsikan nilai  $\frac{c}{dt} \leq 0,375$  agar balok tergolong terkontrol tarik (*tension controlled*)

2. Menghitung nilai  $c$  sesuai dengan asumsi nilai  $\frac{c}{dt}$  pada Langkah pertama
3. Menghitung nilai blok tegangan ( $a$ )

Nilai blok tegangan ( $a$ ) dapat diketahui dengan persamaa

$$a = \beta_1 \cdot c$$

Dimana nilai  $\beta_1$  ditentukan berdasarkan nilai mutu beton ( $f_c$ ) yang digunakan. Berikut ini adalah ketentuan menentukan nilai  $\beta_1$ .

- Jika  $17 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 28 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85$
  - Jika  $28 \text{ MPa} < f_c' < 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,85 - 0,005 \left( \frac{f_c' - 28}{7} \right)$
  - Jika  $f_c' > 55 \text{ MPa}$ , maka nilai  $\beta_1 = 0,65$
4. Menghitung gaya tekan ( $C_c$ )

$$C_c = 0,85 f_c' \cdot b \cdot a$$

5. Menghitung nilai  $A_{s1}$

$$T = C_c$$

$$C_c = A_{s1} \cdot f_y$$

$$A_{s1} = \frac{C_c}{f_y}$$

6. Menghitung nilai  $M_n$  dan  $M_{n1}$

$$M_{n1} = A_{s1} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

Nilai  $M_n$  dapat dicari nilainya dengan pendekatan

$$M_n = \frac{M_u}{\phi}$$

Catatan:

- Apabila nilai  $M_{n1} < M_n$ , maka membutuhkan tulangan tekan (balok tulangan rangkap)
- Apabila nilai  $M_{n1} > M_n$ , maka tidak membutuhkan tulangan tekan (balok tulangan tunggal)

7. Menghitung nilai  $M_{n2}$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2}$$

$$M_{n2} = M_n - M_{n1}$$

8. Menghitung nilai tegangan tulangan tekan ( $f_s'$ )

Regangan ( $\epsilon_s'$ )

$$\epsilon_s' = \frac{c - d'}{c} \times 0,003$$

Tegangan ( $f_s'$ )

$$f_s' = E_s \times \epsilon_s'$$

Catatan:

- Apabila  $f_s' \geq f_y$ , maka tulangan tekan leleh ( $f_s' = f_y$ )
- Apabila  $f_s' < f_y$ , maka tulangan tekan tidak leleh ( $f_s' = E_s \times \epsilon_s'$ )

9. Menghitung nilai  $A_s'$

$$A_s' = A_{s2} = \frac{M_{n2}}{f_s'(d - d')}$$

10. Mencari nilai luasan teoritis  $A_s$  dan  $A_s'$

$$A_s = A_{s1} + A_{s2}$$

$$A_s' = A_{s2}$$

11. Menghitung luas tulangan aktual

- Jumlah tulangan tarik ( $A_s$ )

$$n_{tarik} = \left( \frac{A_s \text{ teoritis}}{\frac{1}{4} \pi D^2} \right)$$

Sehingga luasan tulangan tarik aktual adalah

$$A_s = n_{tarik} \times \frac{1}{4} \pi D^2$$

- Jumlah tulangan tekan ( $A_s'$ )

$$n_{tekan} = \left( \frac{A_s \text{ teoritis}}{\frac{1}{4} \pi D^2} \right)$$

Sehingga luasam tulangan tekan aktual adalah

$$A_s = n_{tekan} \times \frac{1}{4} \pi D^2$$

Selanjutnya perlu diperiksa apakah tulangan dipakai satu lapis atau lebih. Oleh karena itu, perlu dihitung vesaran tinggi efektif balok yang baru (d)

$$y = \frac{(n_1 \times A_{tulangan} \times l_1) + (n_2 \times A_{tulangan} \times l_2)}{n_{total} \times A_{tulangan}}$$

Sehingga nilai (d) adalah

$$d = h - y$$

12. Menghitung tinggi blok tegangan ( $a$ ) yang baru

$$T = T_1 + T_2$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 f_c' \cdot b \cdot a + A_{s2} \cdot f_s'$$

Jadi nilai blok tegangan ( $a$ )

$$a = \frac{[(A_s \cdot f_y) - (A'_{s2} \cdot f_s')]}{0,85 \cdot f_c' \cdot b}$$

13. Menghitung garis netral (c) yang baru

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Maka diperoleh nilai  $\frac{c}{d}$  yang besarnya harus  $\leq 0,375$  agar termasuk terkontrol tarik (*tension controlled*)

14. Menghitung kapasitas nominal dan cek penampang

$$M_n = [(A'_{s2} \cdot f_s') - (A_s \cdot f_y)] \left( d - \frac{a}{2} \right) + (A'_{s2} \cdot f_s')(d - d')$$

$$\phi \times M_n \geq M_u$$

## 2.4.2 Kuat Geser Balok

Gaya geser adalah gaya yang perlu diperhatikan dalam perencanaan balok beton bertulang sehingga perlu disediakan tulangan geser sepanjang betang balok. Balok yang perencanaan kuat gesernya kurang baik akan berpeluang mengalami kerusakan/kegagalan permanen. Prinsipnya adalah nilai resultan tegangan geser pada penampang nilainya harus sama besar atau lebih terhadap gaya geser akibat beban luar yang bekerja. Berikut ini adalah subbab penjelasan mengenai kebutuhan kuat geser penampang balok beton bertulang.

### 2.4.2.1 Perencanaan Balok Tulangan Geser

Dalam perencanaan harus berdasarkan SNI 2847-2019 dimana persyaratan kapasitas geser nominalnya sebagai berikut.

$$\phi \times Mn \geq Mu \dots\dots\dots (2.34)$$

Adapun faktor reduksi untuk geser adalah  $\phi = 0,75$  berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 21.2.1 Tabel 21.2.1 dan  $Vu$  adalah gaya geser ultimit yang didapatkan dari analisa struktur.

Selain itu, dimensi balok perlu dicek apakah mampu menahan beban geser. Pengecekan menggunakan persyaratan SNI 2847-2019 Pasal 22.5.1.2 yakni:

$$Vu \leq \phi (Vc + 0,66\sqrt{fc'}b_wd) \dots\dots\dots (2.35)$$

Bila tidak memenuhi persyaratan, maka penampang balok harus diperbesar.

Paremeter  $Vc$  dan  $Vs$  harus diperhitungkan sehingga didapatkan nilai  $Vn$ . Dalam menentukan  $Vs$ , persamaan 2.34 atau persamaan 2.35 dapat digunakan, namun disarankan tidak lebih besar dari persyaratan SNI 2847-2019 Pasal 22.5.1.2.

$$Vs,max = 0,66\sqrt{fc'}b_wd \dots\dots\dots (2.36)$$

Sedangkan untuk menentukan nilai  $Vc$  dapat dilihat pada SNI 2847-2019 Pasal 22.5.5. Nilai  $Vc$  untuk balok bentuk sederhana berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.5.5.1 adalah sebagai berikut:

$$Vc = 0,17\lambda\sqrt{fc'}b_wd \dots\dots\dots (2.37)$$

Namun terdapat rumus yang lebih rinci dari persamaan 2.48 berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 22.5.5.1 dimana nilai  $V_c$  yang diambil adalah nilai yang terkecil dari tiga persamaan berikut:

$$V_c = \left( 0,16\lambda\sqrt{f'c'} + 17\rho_w \frac{V_{ud}}{M_u} \right) b_w d \dots\dots\dots (2.38)$$

$$V_c = \left( 0,16\lambda\sqrt{f'c'} + 17\rho_w \right) b_w d \dots\dots\dots (2.39)$$

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'c'} b_w d \dots\dots\dots (2.40)$$

Keterangan:

$\lambda$  = Faktor modifikasi (beton normal  $\lambda = 1$ ).

$\rho_w$  = Rasio tulangan tarik lentur pada balok.

$V_u$  = Gaya geser ultimate hasil analisa software struktur (N)

$M_u$  = Gaya geser ultimate hasil analisa software struktur (Nmm).

$b_w$  = Lebar dimensi penampang balok (mm).

$d$  = Tinggi efektif penampang balok (mm)

Dalam pengaplikasiannya, luas tulangan geser ( $A_{v\bar{L}}$ ) yang digunakan sebisa mungkin tidak terlalu besar dan tidak terlalu kecil guna menghindari keruntuhan getas. Selain itu, hal ini bertujuan agar tulangan geser mengalami leleh pada saat terjadi retak pada balok. Oleh karena itu, berdasarkan SNI 2847-2019 Pasal 9.6.3.3 Tabel 9.6.3.3 mengatur jumlah luasan minimum tulangan geser. Nilai  $A_v$  yang diambil adalah nilai yang terbesar dari persamaan berikut ini:

$$A_{v,min} = 0,062\sqrt{f'c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$A_{v,min} = \frac{0,35b_w s}{f_{yt}} \dots\dots\dots (2.42)$$

Dengan mendapatkan nilai  $A_{v,min}$ , maka  $V_{s,min}$  bisa didapatkan dari nilai terbesar dua persamaan berikut ini:

$$V_{s,min} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{f_{yt} d}{s} \left[ \frac{0,35b_w s}{f_{yt}} \right] = 0,35b_w d \dots\dots\dots (2.43)$$

$$V_{s,min} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} = \frac{f_{yt} d}{s} \left[ 0,062\sqrt{f'c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \right] = 0,062\sqrt{f'c'} b_w d \dots\dots\dots (2.44)$$

### 2.4.2.2 Syarat dan Kategori Perencanaan Tulangan Geser

Dalam perencanaan, terdapat beberapa kategori yang harus diperhatikan dalam menentukan kebutuhan tulangan geser berdasarkan nilai gaya geser ultimit yang diperoleh dari hasil analisa struktur menggunakan software ( $\phi = 0,75$ ), yaitu sebagai berikut:

- a) Kategori 1, Jika  $V_u \leq 0,5\phi V_c$

Secara teoritis balok tidak pada kategori 1 ini tidak memerlukan tulangan geser karena kekuatan yang dimiliki beton ( $V_c$ ) dianggap masih mampu untuk menahan gaya geser ultimitnya ( $V_u$ ). Akan tetapi, untuk penampang balok dengan  $h \geq 600\text{mm}$  tetap menggunakan tulangan sengkang dengan ketentuan  $A_{vmin}$ .

- b) Kategori 2, Jika  $0,5\phi V_c \leq V_u \leq \phi V_c$

Pada kategori ini, kondisi yang terjadi sesuai dengan SNI 2847-2019 pada Pasal 9.6.3.3 dan Pasal 9.7.6.2.2, sehingga nilai  $V_s$  dan  $A_v$  yang digunakan adalah nilai terkecil.

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

$$A_{v,min} = 0,062 \sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} = \frac{0,35 b_w s}{f_{yt}}$$

Dengan jarak spasi ( $s$ ) maksimal tulangan geser adalah:

$$s \leq \frac{d}{s} \leq 600 \text{ mm}$$

Pada kategori 2 ini tidak berlaku untuk

- Balok yang memiliki tinggi efektif ( $d$ ) kurang dari 250 mm
- Balok yang memiliki tinggi efektif ( $d$ ) kurang dari 2,5x tebal sayap T-beam atau 1,5x lebar badan penampang
- Sistem balok satu arah
- Sistem pelat dan pondasi satu arah

- c) Kategori 3, Jika  $\phi V_c \leq V_u \leq \phi (V_c + V_{s,min})$

Dengan ketentuan  $V_{s,min}$ :

$$V_{s,min} = 0,062 \sqrt{f_c'} b_w d \text{ atau } V_{s,min} = 0,35 b_w d$$

Luas tulangan gesernya adalah:

$$A_{v,min} = 0,062\sqrt{f_c'}\frac{b_w s}{f_{yt}} \text{ atau } A_{v,min} = \frac{0,35b_w s}{f_{yt}}$$

Dengan jarak spasi (s) maksimal tulangan geser adalah:

Perbedaan dengan kategori 2 adalah kategori 3 berlaku untuk segala jenis komponen tanpa terkecuali.

- d) Kategori 4, Jika  $\phi (V_c + V_s, \min) \leq V_u \leq \phi(V_c + 13\sqrt{f_c'}b_w d)$

Kondisi 4 ini sesuai dengan kondisi pada SNI 2847-2019 Pasal 9.7.6.2.2, Pasal 22.5.10.1, dan Pasal 22.5.10.5.3 dimana nilai gaya geser tulangnya adalah:

$$V_s = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi}$$

Luasan tulangan gesernya adalah:

$$A_v = \frac{V_s \cdot s}{f_{yt} \cdot d}$$

Dengan jarak spasi (s) maksimal tulangan geser adalah:

$$s \leq \frac{d}{2} \leq 600 \text{ mm}$$

- e) Kategori 5, Jika  $\phi (V_c + \frac{1}{3}\sqrt{f_c'}b_w d) \leq V_u \leq \phi(V_c + \frac{2}{3}\sqrt{f_c'}b_w d)$

Besaran nilai gaya geser tulangnya adalah:

$$V_s = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi}$$

Luasan tulangan gesernya adalah:

$$A_v = \frac{V_s \cdot s}{f_{yt} \cdot d}$$

Dengan jarak spasi (s) maksimal tulangan geser adalah:

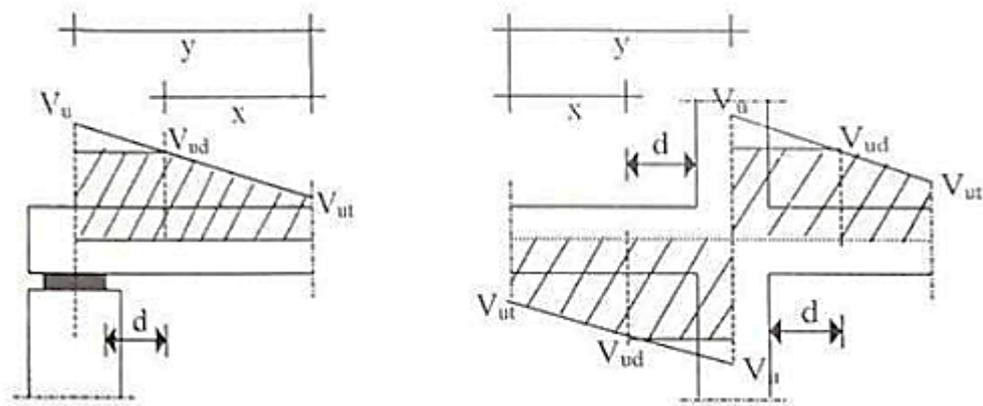
$$s \leq \frac{d}{4} \leq 300 \text{ mm}$$

#### 2.4.2.3 Perhitungan Desain Tulangan Geser

Berikut ini adalah tahapan prosedur desain tulangan geser yang digunakan untuk memudahkan desainer dalam menentukan tulangan geser balok:

### 1. Langkah 1

Menentukan besaran nilai geser ultimate ( $V_u$ ) hasil dari analisa struktur menggunakan bantuan software analisa. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 9.4.3.2 menyatakan bahwa besaran nilai  $V_u$  yang diambil dari sejarak  $d$  dari kolom, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2. 10** Lokasi geser maksimum ( $V_{ud}$ ) untuk perencanaan

Sumber: Asroni, 2017: 118

Dari Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa nilai geser  $V_u$  yang diambil sejarak  $d$  dari muka kolom. Hal ini dikarenakan, nilai  $V_u$  hasil output software biasanya diambil dari as kolom, sehingga perlu dilakukannya interpolasi linier untuk mencari nilai  $V_u$  sejarak  $d$ .

### 2. Langkah 2

Menghitung nilai kuat geser beton  $V_c$  menggunakan persamaan berikut.

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f_c'}b_wd$$

Bisa juga menggunakan perhitungan yang lebih rinci dimana nilai kuat geser beton  $V_c$  diambil yang terkecil dari tiga persamaan berikut.

$$V_c = \left( 0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \frac{V_{ud}}{M_u} \right) b_wd$$

$$V_c = \left( 0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_w \right) b_wd$$

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f_c'}b_wd$$

## 3. Langkah 3

Periksa kemampuan penampang dalam menahan gaya geser

$$V_u \leq \phi (V_c + 0,66\sqrt{f_c'}b_wd)$$

## 4. Langkah 4

Mengklasifikasikan nilai  $V_u$  (kategori 1-5) seperti pada subbab 2.4.2.6.

## 5. Langkah 5

Menghitung nilai  $V_s$  rencana berdasarkan klasifikasi kategori yang telah ditentukan pada langkah sebelumnya.

## 6. Langkah 6

Menentukan jarak spasi tulangan geser yang akan diaplikasikan berdasarkan syarat kategori desain yang telah ditentukan.

## 7. Langkah 7

Menghitung nilai  $A_v$  sesuai dengan nilai  $V_s$  dan  $s$

## 8. Langkah 8

Memastikan nilai  $A_v$  aktual berdasarkan tulangan geser yang akan digunakan di lapangan.

## 9. Langkah 9

Menghitung kembali nilai  $V_s$  berdasarkan luas tulangan aktual  $A_v$  pada langkah 7.

## 10. Langkah 10

Kapasitas penampang geser ( $V_n$ ) dicek apakah kekuatan desain yang direncanakan sudah aman terhadap gaya ultimit yang terjadi ( $V_u$ )

## 2.5 Kolom Beton Bertulang

Kolom adalah elemen vertikal yang memikul sistem lantai struktural. Elemen ini merupakan elemen yang mengalami tekan dan pada umumnya disertai dengan momen lentur. Kolom merupakan salah satu unsur terpenting dalam peninjauan keamanan struktur sehingga kolom direncanakan mampu memikul kombinasi antara beban aksial tekan dan momen lentur. Secara umum, struktur kolom diatur pada SNI 2847-2019 pasal 10. Kolom juga merupakan elemen yang berperan penting dalam menahan beban lateral, khususnya akibat gempa. Berdasarkan SNI

2847-2019 Pasal 10.6.1.1 dijelaskan bahwa batas minimum rasio tulangan kolom adalah 1% dan batas maksimumnya adalah 8%.

Berdasarkan nilai kelangsingannya, kolom dapat dibedakan menjadi dua yakni kolom pendek (*short reinforced concrete column*) dan kolom langsing (*slender reinforced concrete column*). Berikut ini adalah penjelasannya:

1. Kolom pendek (*short reinforced concrete column*) merupakan kolom yang pola keruntuhannya adalah keruntuhan material. Keruntuhan material adalah kondisi dimana elemen kolom runtuh akibat beban yang dipikul jauh lebih besar dibanding kapasitas material penyusunnya.
2. Kolom langsing (*slender reinforced concrete column*) merupakan kolom yang pola keruntuhannya adalah keruntuhan tekuk. Keruntuhan tekuk adalah keruntuhan akibat kolom yang terlalu langsing sehingga ketika ada beban aksial maka akan terjadi tekuk meskipun belum mencapai batas maksimal kekuatan materialnya.

Selain itu, elemen kolom juga dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan tipe pembenanan dan bentuk struktur, yakni kolom bergoyang dan tidak bergoyang. Berikut ini adalah penjelasannya:

1. Kolom bergoyang  
Kolom bergoyang terjadi karena struktur dibebani beban gravitasi yang tidak simetris dan adanya beban lateral (contohnya beban gempa) sehingga memungkinkan kolom mengalami deformasi lateral (bergoyang).
2. Kolom tak bergoyang  
Kolom tak bergoyang terjadi akibat adanya beban gravitasi simetris pada struktur sehingga kolom hanya menerima aksial tekan tanpa adanya deformasi lateral.

### 2.5.1 Distribusi Horizontal Gaya Gempa

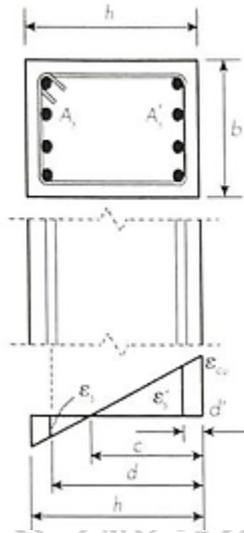
Terikait perilaku tekan murni pada kolom, salah satu contoh yang dapat diambil adalah kolom pendek yang diberi beban sentris. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 22.4.2.2 kuat kolom yang menerima beban sentris ( $P_o$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_o = 0,85f_c(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y \dots\dots\dots (2.45)$$

Keterangan:

$A_g$  = Luas penampang kolom

$A_{st}$  = Luas tulangan longitudinal kolom



**Gambar 2.11** Distribusi regangan pada kolom

Sumber: Setiawan, 2016: 158

Pada Gambar 2.11, luasan penampang kolom dapat dinyatakan sebagai  $A_g = bh$  dan  $A_{st} = (A_1 + A_2)$ . Adapun faktor 0,85 adalah nilai perbandingan antara kuat tekan penampang kolom dengan kuat tekan silinder. Sehingga persamaan 2.57 dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_o = A_g [0,85f'_c(1 - \rho_g) + \rho_g f_y] \dots\dots\dots (2.46)$$

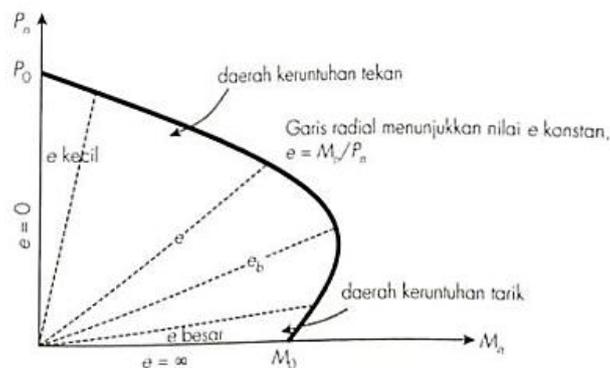
Dimana untuk nilai, sehingga apabila disubstitusikan ke persamaan 2.57 akan menjadi sebagai berikut:

$$P_o = A_g [0,85f'_c + \rho_g (f_y - 0,85f'_c)] \dots\dots\dots (2.47)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019 tabel 22.4.2.1 untuk besaran kuat nominal desain tidak boleh melebihi  $0,8 P_o$

### 2.5.2 Diagram Interaksi Aksial Tekan dan Momen Pada Kolom

Kolom adalah elemen struktur yang direncanakan menerima beban kombinasi yakni kombinasi aksial tekan dan momen. Interaksi antara aksial tekan ( $P$ ) dan momen ( $M$ ) dapat dilihat pada Gambar 2.12.



**Gambar 2. 12** Diagram interaksi kolom dengan beban aksial dan momen lentur

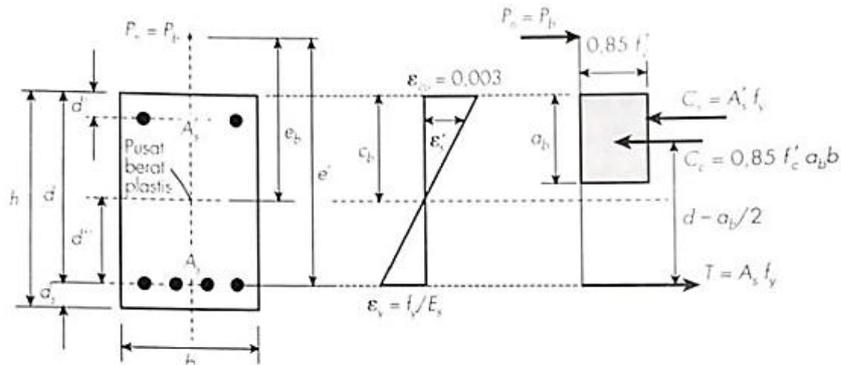
Sumber: Setiawan, 2016: 159

Berdasarkan diagram interaksi P-M diatas dapat diketahui bahwa terdapat 2 kondisi, yakni: compression dan tension. Pada kondisi compression (tekan) seluruh penampang kolom mencapai regangan tekan maksimalnya ( $\epsilon_c = 0,003$ ) sebelum tulangan baja kolom mengalami leleh ( $\epsilon_y = f_s/E_s$ ), sedangkan pada kondisi tension (tarik) seluruh penampang kolom mencapai regangan tarik maksimalnya dan secara bersamaan tulangan baja kolom mengalami leleh ( $\epsilon_y$ ). Kondisi ini dikenal sebagai kondisi berimbang (balanced strain condition).

Dalam kondisi berimbang ini juga dikenal istilah compression control limit yang berarti bahwa apabila rasio interaksi P-M berada pada batas ini kolom tergolong compression controlled. Pada kondisi compression controlled ini factor reduksi pada kolom berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 21.2.2 adalah 0,75 (kolom bulat) dan 0,65 (kolom persegi).

### 2.5.3 Kondisi Regangan Berimbang

Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*) adalah pembatas antara transition zone dan compression controlled pada diagram interaksi P-M pada kolom. Pada kondisi ini penampang tekan kolom dan tulangan baja sama-sama mencapai kondisi batas maksimumnya yakni  $\epsilon_c = 0,003$  dan  $\epsilon_y = f_s/E_s$ . Contoh penampang kondisi berimbang dapat dilihat pada Gambar 2.13.



**Gambar 2. 13** Penampang Kolom pada saat Kondisi Berimbang

Sumber: Setiawan, 2016: 162

Berdasarkan gambar diatas, persamaan kondisi berimbang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{C_b}{d} = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003}$$

$$C_b = \frac{0,003}{\frac{f_y}{E_s} + 0,003} d = \left( \frac{600d}{600 + f_y} \right) \dots\dots\dots (2.48)$$

Gaya-gaya yang terjadi memiliki persamaan sebagai berikut.

$$P_b = C_c + C_s - T \dots\dots\dots (2.49)$$

Pada kuat tekan beton elemen kolom saat diberi beban aksial tekan murni adalah  $k3fc'$ , yang mana nilai  $k3 = 0,85$  dan kuat tekan beton =  $0,85fc'$ . Namun karena kolom berada dibawah titik keseimbangan maka pada kondisi berimbang ini nilai  $k3 = 1$  sehingga persamaan  $Cc$  dapat ditulis sebagai berikut.

$$C_c = K_3(0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a) = 1(0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a) = 1(0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c) \dots\dots (2.50)$$

Dan gaya tarik dapat ditulis

$$T = A_s \times f_y \dots\dots\dots (2.51)$$

Selanjutnya gaya tekan dari tulangan tekan

$$C_s = A'_s \times (f_y \cdot 0,85 \cdot f'_c) \dots\dots\dots (2.52)$$

Sehingga dapat ditulis menjadi

$$P_b = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c + A'_s \times (f_y \cdot 0,85 \cdot f'_c) - A_s \cdot f_y \dots\dots\dots (2.53)$$

Eksentrisitas  $eb$  dapat dihitung jaraknya dari plastis centroid seperti pada gambar diatas. Dalam kasus ini, pada penampang simetris, plastis centroid terletak pada

tengah dari tinggi penampang. Sehingga perhitungan momen adalah sebagai berikut:

$$M_b = P_b e_b = C_c \left( d - \frac{a}{2} - d'' \right) + C_s (d - d' - d'' ) - T d'' \dots\dots\dots (2.54)$$

#### 2.5.4 Pengaruh Kelangsingan Kolom

Pada struktur yang mengalami perilaku tekan tentunya harus memperhitungkan nilai kelangsingannya, salah satunya ada kolom yang mengalami gaya tekan. Selain itu, kolom harus didesain mampu memikul momen yang disebabkan landutan akibat kelangsingan. Rasio kelangsingan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{k \cdot l_u}{r} \dots\dots\dots (2.55)$$

Keterangan:

$k$  = Faktor panjang efektif yang nilainya tergantung dari kekangan lateral dan rotasional kedua ujungnya.

$l_u$  = Panjang kolom

$r$  = Jari-jari girasi (radius of gyration) penampang kolom

Menurut SNI 2847-2019 pasal 6.2.5.1, nilai jari-jari girasi adalah sebagai berikut:

$$r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}} \dots\dots\dots (2.56)$$

Atau

$r = 0,3 \times \text{dimensi arah stabilitas pada kolom yang ditinjau}$

Atau

$r = \frac{1}{2} \times \text{diameter kolom bulat}$

Berdasarkan pengaruh kelangsingan dan adanya pembesaran momen, kolom dapat dibedakan menjadi kolom bergoyang dan kolom tak bergoyang. Berikut ini adalah pembahasan detailnya:

##### 2.5.5.1 Kolom Bergoyang (*Sway Column*)

Pada kolom bergoyang, kelangsingan dapat diabaikan apabila dapat memenuhi persyaratan pada SNI 2847-2019 pasal 6.2.5 persamaan 6.2.5a yakni:

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

Pada SNI 2847-2019 pasal 6.6.4.7 mengatur metode pembesaran momen untuk kolom bergoyang (*sway column*) yakni:

### 2.5.5.2 Kolom Tak Bergoyang (*Non-Sway Column*)

Pada kolom tak bergoyang (*Non-Sway Column*), nilai kelangsingan dapat diabaikan apabila memenuhi persyaratan berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 6.2.5 yakni:

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 34 + 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \dots\dots\dots (2.57)$$

$$\frac{k \cdot l_u}{r} \leq 40 \dots\dots\dots (2.58)$$

Nilai  $M_1/M_2$  negatif apabila lendutan terjadi pada kolom yang tergolong lendutan tunggal dan bernilai positif apabila kolom tergolong lendutan ganda. Metode pembesaran momen pada kolom tak bergoyang (*Non-Sway Column*) berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 6.6.4.5 yakni

$$M_C = \delta M_2 \dots\dots\dots (2.59)$$

Keterangan:

$\delta$  = momen terfaktor  $M_2$  orde pertama yang diperbesar

$M_C$  = faktor pembesaran momen pada komponen struktur tekan

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 6.6.4.5.4 nilai  $M_2$  tidak boleh kurang dari  $M_{2,min}$ . Berikut ini adalah persamaan  $M_{2,min}$ :

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

adapun nilai  $\delta$  dihitung berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 6.6.4.5.2 yakni:

$$\delta = \frac{C_m}{1 - P_u / 0,75 P_c} \dots\dots\dots (2.60)$$

Keterangan:

$P_u$  = gaya aksial terfaktor (diambil negatif untuk tarik dan positif untuk tekan).

$P_c$  = beban tekuk kritis (sesuai persamaan 2.83).

$C_m$  = faktor penghubung antara diagram momen aktual dan momen seragam ekuivalen.

Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 6.6.4.5.3, nilai  $C_m$  harus ditentukan dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Pada kolom tanpa adanya beban transversal pada kedua tumpuannya

$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} \dots\dots\dots (2.61)$$

Nilai  $M_1/M_2$  negatif apabila lendutan terjadi pada kolom yang tergolong lendutan tunggal dan bernilai positif apabila kolom tergolong lendutan ganda.

2. Pada kolom dengan adanya beban transversal pada kedua tumpuannya.

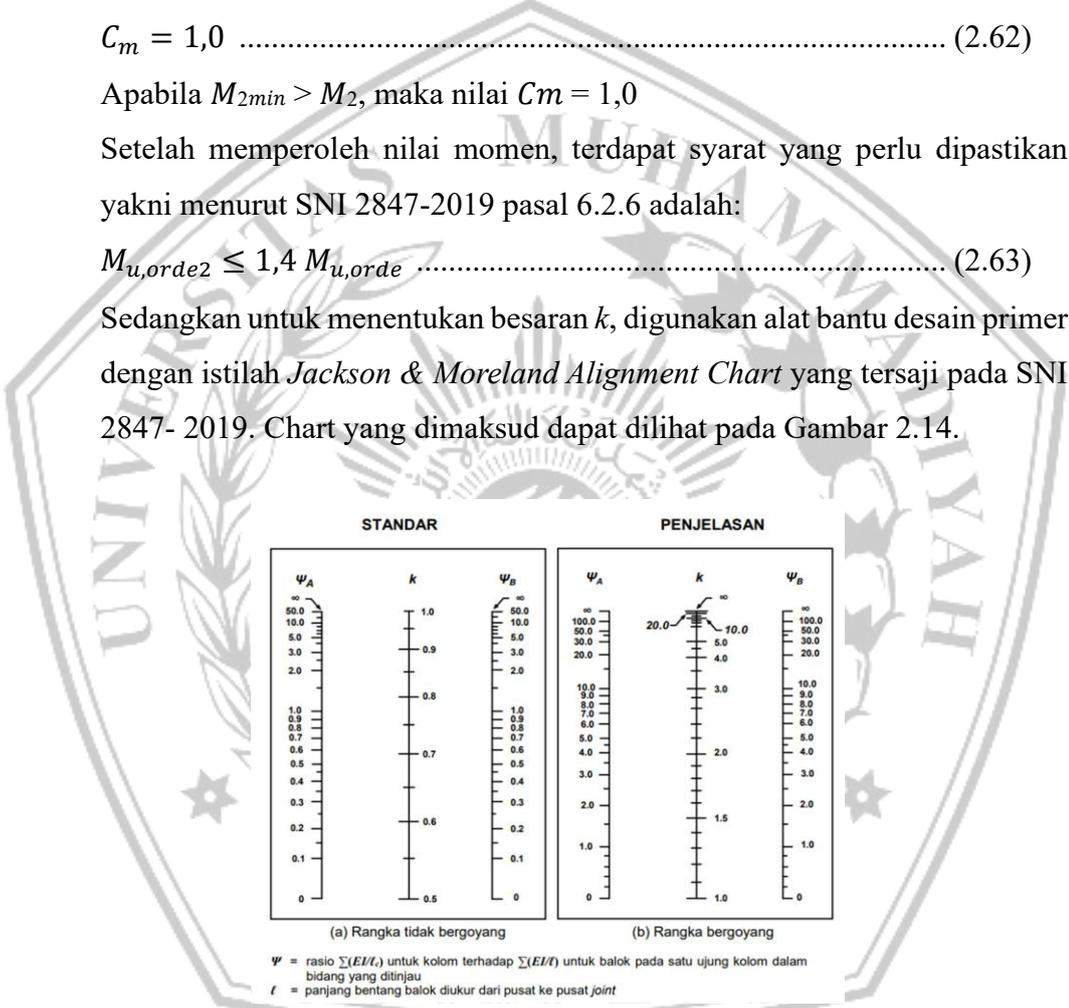
$$C_m = 1,0 \dots\dots\dots (2.62)$$

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

Setelah memperoleh nilai momen, terdapat syarat yang perlu dipastikan yakni menurut SNI 2847-2019 pasal 6.2.6 adalah:

$$M_{u,orde2} \leq 1,4 M_{u,orde} \dots\dots\dots (2.63)$$

Sedangkan untuk menentukan besaran  $k$ , digunakan alat bantu desain primer dengan istilah *Jackson & Moreland Alignment Chart* yang tersaji pada SNI 2847- 2019. Chart yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 2.14.



**Gambar 2. 14** *Jackson & Moreland Alignment Chart*

Sumber: SNI 2847- 2019: 93

### 2.5.5 Desain Kapasitas Geser Kolom

Kolom adalah elemen struktur yang menahan kombinasi beban aksial tekan dan momen lentur sehingga nilai  $V_c$  akan berbeda dengan elemen balok yang hanya

menahan momen lentur saja. Berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 22.5.6.1 besaran nilai  $V_c$  adalah sebagai berikut:

$$V_c = 0,17 \left(1 - \frac{N_u}{14g}\right) \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \dots\dots\dots (2.64)$$

Keterangan:

$N_u$  = gaya aksial yang terfaktor

$Ag$  = luasan penampang kolom

$\lambda = 1,00$  (beton normal)

$d = 0,8h$

Terdapat cara lain untuk memperoleh nilai  $V_c$  lebih detail. Terdapat dua persamaan berdasarkan SNI 2847-2019 pasal 22.5.6.1 tabel 22.5.6.1 dimana nilai yang terkecil adalah nilai yang diambil. Berikut ini adalah persamaannya:

$$V_c = \left[ 0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17p_w \frac{V_u d}{(M_u - N_u)\left(\frac{4h-d}{8}\right)} \right] b_w d \dots\dots\dots (2.65)$$

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

$$V_c = 029\lambda\sqrt{f_c'} b_w d \sqrt{1 + \left(\frac{0,29N_u}{Ag}\right)} \dots\dots\dots (2.66)$$

Keterangan:

$M_u$  = Momen yang terfaktor

$N_u$  = Gaya aksial yang terfaktor

$V_u$  = Gaya geser yang terfaktor

$P_w$  = Rasio  $A_s$  terhadap nilai  $b_w d$

Adapun mengenai kebutuhan tulangan geser pada kolom, perhitungan dan prosedur perencanaan hamper sama dengan balok. Hal ini dapat ditandai dengan persamaan berikut:

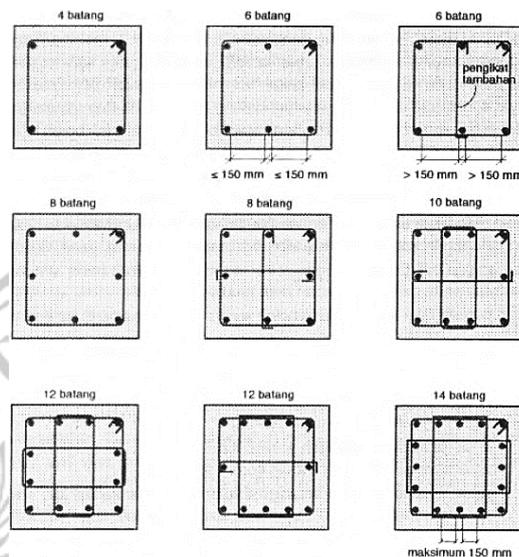
$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \dots\dots\dots (2.67)$$

Berdasarkan SNI 2847-2019, terdapat aturan mengenai diameter dan jarak tulangan sengkang yang secara umum dapat dibedakan menjadi tiga kelompok, yakni:

1. Tulangan sengkang ikat (SNI 2847-2019 pasal 25.7.2).
2. Tulangan sengkang spiral (SNI 2847-2019 pasal 25.7.3).

### 3. Tulangan sengkang pengekuat (SNI 2847-2019 pasal 25.7.5).

Susunan sengkang dan jarak antar tulangan tidak boleh melebihi 125 mm jika menggunakan kolom persegi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.15



**Gambar 2. 15** Susuna sengkang tipikal

Sumber: McCormac 2003: 284

## 2.6 Dinding Geser (*Shear Wall*)

Dinding Geser (*Shear Wall*) adalah struktur *slab* atau biasa disebut kolom pipih yang tersusun dari material beton bertulang atau pelat baja pada posisi struktur gedung tertentu yang dipasang secara vertikal untuk meningkatkan kinerja struktural dalam menopang gaya lateral (gaya geser dan momen) akibat gempa. Deformasi (Lendutan) horizontal terjadi relatif kecil karena sistem ini bersifat rigid. Fungsi utama *shear wall* yang perlu diperhatikan adalah kekakuan dan kekuatan struktur gedung agar tahan terhadap gaya gempa yang terjadi. Selain itu, dinding geser (*shear wall*) juga berperan dalam menahan beban gravitasi yang berasal dari plat lantai.

Pemilihan sistem struktur tahan gempa dinding geser (*shear wall*) dinilai kurang efektif pada bangunan kategori low rise building, karena sistem rangka dinilai masih cukup untuk menerima beban lateral gempa. Dinding geser (*shear wall*) lebih efektif digunakan pada bangunan kategori *middle/high rise building*,

bahkan dapat menjadi keharusan untuk mengurangi gaya geser dan momen akibat beban lateral gempa.

Parameter yang harus diperhatikan dalam perencanaan dinding geser (*shear wall*) adalah kekakuan (*stiffness*), kekuatan (*strenght*), dan daktilitas (*ductility*). Tentunya dalam memenuhi parameter itu harus mengikuti pedoman yang berlaku, yakni SNI 2847-2019 yang mengacu pada ACI 318-14. Pada SNI 2847-2019 telah diatur mengenai penulangan dinding geser (*shear wall*) yakni tulangan longitudinal (memanjang), tulangan transversal (melintang), dan tulangan boundary element. Hal ini bertujuan agar memastikan perencanaan dinding geser (*shear wall*) dapat berperilaku daktail saat menerima beban lateral gempa.

### **Konsep Penempatan Dinding Geser (Shear Wall)**

Penempatan dinding geser (*shear wall*) juga sangat berpengaruh terhadap efektifitas dan stabilitas struktur bangunan saat menerima beban lateral gempa. Banyak sekali faktor yang mempengaruhi penempatan dinding geser (*shear wall*), baik dari segi struktur, arsitektur, maupun permintaan khusus owner. Oleh karena itu, terkadang penempatan dinding geser (*shear wall*) tidak memperhatikan efektifitasnya yang mengakibatkan perencanaan yang terjadi akan lebih rumit dan tidak ekonomis.

Pada dasarnya adalah dinding geser (*shear wall*) direncanakan harus mampu menerima beban lateral yang memungkinkan terjadi pada bangunan gedung tersebut, baik itu gempa maupun angin. Saat menerima beban angin, dinding geser (*shear wall*) harus berperilaku elastis, yakni struktur akan berdeformasi namun ketika beban angin berakhir, maka struktur akan kembali seperti semula tanpa adanya kerusakan. Berbeda dengan saat dinding geser (*shear wall*) menerima beban gempa, khususnya intensitas gempa yang besar, dinding geser (*shear wall*) direncanakan memiliki perilaku plastis (*inelastis*) dimana terdapat kerusakan pada strukturnya namun tidak mengalami keruntuhan. Namun demikian pada saat intensitas gempa yang kecil maka perilaku dinding geser (*shear wall*) akan direncanakan elastis, sama dengan saat menerima beban angin.

Selain itu, faktor *center of mass* (CM) dan *center of rigidity* (CR) juga sangat berpengaruh terhadap perilaku struktur dan penempatan dinding geser (*shear*

*wall*). semakin berdekatan jarak *center of mass* (CM) dan *center of rigidity* (CR) maka perilaku struktur akan lebih stabil tanpa adanya torsi yang berlebih pada saat menerima beban lateral gempa. Posisi dinding geser (*shear wall*) tergantung dari posisi CR sehingga akan meningkatkan stabilitas torsi pada bangunan gedung. Pada saat dinding geser (*shear wall*) bekerja efektif dalam menguraikan beban lateral gempa, maka elemen penyusun struktur rangka, yakni balok dan kolom dapat direduksi dimensinya.

Berdasarkan penjelasan diatas, dapat disimpulkan bahwa setidaknya ada dua aspek yang harus dijadikan pertimbangan dalam menentukan posisi dinding geser (*shear wall*) yakni sebagai berikut:

1. Struktur bangunan gedung harus memiliki tahanan torsi yang baik. Dalam perencanaannya posisi dinding geser (*shear wall*) terletak pada keliling bangunan sisi terluar gedung, baik berupa *single shear wall* maupun *couple shear wall*.
2. Pondasi dinding geser (*shear wall*) harus direncanakan memiliki kapasitas menyerap dan menguraikan gaya dalam (*overturning moment*) yang terjadi pada dinding geser (*shear wall*) akibat adanya beban yang amat besar, baik berupa beban gravitasi maupun beban lateral khususnya gempa.

### 2.6.1 Jenis Penampang Dinding Geser (*Shear Wall*)

Berdasarkan *ACI-SP-17M-14 section 10.2.3* halaman 391, dinding geser (*shear wall*) dikategorikan menjadi tiga jenis, yakni *plane*, *flanged*, dan *channel*.

Penggunaan dinding geser (*shear wall*) pada gedung bertingkat dapat menggunakan sistem *single* atau *couple*. Adapun mengenai ketebalan dimensi dinding geser (*shear wall*) mengacu pada aturan yang tercantum pada SNI 2847-2019 dan dapat dipengaruhi oleh intensitas beban gempa yang diterima.

Salah satu elemen penting penyusun dinding geser (*shear wall*) adalah *boundary element*, yakni sebuah penebalan di ujung sisi dinding geser (*shear wall*) yang umumnya memiliki ketebalan lebih besar dari tebal dinding geser (*shear wall*). bentuk tulangnya hamper sama dengan penulangan kolom yang terdiri dari tulangan longitudinal dan tulangan transversal. Fungsi dari *boundary element* adalah sebagai berikut:

1. Membantu mestabilkan dinding geser (*shear wall*) pada saat menahan gaya geser dan momen pada kedua ujung sisi dinding geser (*shear wall*).
2. Mencegah terjadinya tekuk lokal (*buckling*) pada dinding geser (*shear wall*) yang memiliki ketebalan yang cukup tipis.
3. Sebagai tempat tulangan longitudinal dinding geser (*shear wall*) apabila space untuk kebutuhan tulangan longitudinal tidak mencukupi pada body dinding geser (*shear wall*).

Meskipun cukup penting, namun tidak semua dinding geser (*shear wall*) didesain menggunakan *boundary element*. Berdasarkan ACI-SP-17M-14 pasal 10.1 dijelaskan bahwa *boundary element* hanya digunakan pada struktur dual system yang memiliki kategori khusus seismik D, E, dan F, sehingga struktur yang memiliki kategori A, B, dan C (SRPMB/SRPMM) tidak diwajibkan menggunakan *boundary element*. Penggunaan *boundary element* hanya diwajibkan pada struktur yang memiliki kategori D, E, dan F (SRPMK) karena memiliki intensitas gempa yang tinggi. Selanjutnya berdasarkan SNI 2847-2019, terdapat beberapa aturan mengenai perencanaan dinding geser (*shear wall*), yakni untuk struktur yang dikategorikan A, B, dan C (SRPMB/SRPMM) mengacu pada SNI 2847-2019 pasal 11 dan struktur yang dikategorikan kategori D, E, dan F (SRPMK) mengacu pada SNI 2847-2019 pasal 11 dan 18.10. Selain itu, persyaratan *boundary element* pada struktur khusus diatur dalam SNI 2847-2019 pasal 18.10.6.

Selain itu, terdapat element penting lainnya yang perlu diperhatikan, yakni lebar efektif sayap (*effective flange width*) yang digunakan pada penampang tipe channel. Lebar efektif sayap (*effective flange width*) adalah pertemuan dua sisi dinding geser (*shear wall*) yang tegak lurus. dinding geser (*shear wall*) yang terdapat sayap efektif akan memiliki ketahanan lateral yang baik dari dua arah sisinya. Saat terjadi momen bolak-balik akibat gaya lateral yang bekerja, maka sayap akan mengalami kondisi tekan dan tarik.

Dalam menentukan besaran lebar efektif sayap (*effective flange width*) terdapat perbedaan mengenai aturan dan code antara akademisi dan praktosi. Berikut ini adalah penjelasannya.

1. Pendapat akademisi diwakilkan melalui pedoman peraturan ACI 318-2014 pasal 18.10.5.2 dan SNI 2847-2019 pasal 18.10.5.2 yang menyatakan bahwa lebar efektif sayap (*effective flange width*) wajib ditentukan oleh nilai terkecil dari:
  - a.  $0,5 \times$  badan dinding geser (*shear wall*) terdekat
  - b. 25% dari total tinggi badan dinding geser (*shear wall*)
2. Pendapat praktisis diwakilkan oleh *Council on Tall Building and Urban Habitat* (CTBUH) melalui artikel penelitian yang berjudul *Seismic Design and Detailing of Compound Shear Wall Plan Configuration* Pada artikel penelitian tersebut terdapat beberapa poin penting yakni:
  - a. Besaran nilai yang dijelaskan pada peraturan diatas adalah nilai maksimum yang boleh digunakan, bukan nilai yang disyariatkan
  - b. Total tinggi dinding geser (*shear wall*) yang dimaksud adalah total tinggi dinding geser (*shear wall*) yang ditinjau, bukan tinggi totalnya. Sehingga nilainya bergantung pada level/posisi/tingkat dinding geser (*shear wall*) yang ditinjau.

Pada perencanaan ini, aturan yang digunakan adalah mengacu pada artikel penelitian yang dikeluarkan oleh CTBUH, sehingga nilai batasan yang tercantum pada SNI 2847-2019 pasal 18.10.5.2 adalah batasan maksimal yang digunakan.

### **2.6.2 Variasi Dinding Geser (*Shear Wall*) Arah Vertikal**

Aspek lain yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain dinding geser (*shear wall*) adalah variasi dinding geser (*shear wall*) arah vertikal. Salah satu alasan adanya variasi ini adalah karena terdapat perbedaan pola gaya dan momen yang bervariasi sesuai dengan level ketinggian dinding geser (*shear wall*). Lantai dasar memiliki nilai gaya/momen paling besar kemudian mengecil seiring bertambahnya ketinggian dinding geser (*shear wall*).

Akibat adanya perbedaan pola perilaku dan gaya/momen menyebabkan variasi yang dilakukan dapat berupa pengurangan ketebelan atau pengurangan lebar dinding geser (*shear wall*). Perubahan dapat berupa lebar dinding geser (*shear wall*) yang sama setiap lantai, namun ketebalannya berbeda. Pada tingkat dasar, ketebalan

dinding geser (*shear wall*) yang digunakan paling besar, hal ini bertujuan untuk mengatasi adanya gaya/momen terbesar pada lantai dasar. Seiringbertambahnya ketinggian, nilai gaya/momen yang bekerja semakin kecil, sehingga ketebalan dinding geser (*shear wall*) dapat dikurangi sesuai dengan kebutuhan nilai gaya/momen yang bekerja.

Variasi juga dapat ditinjau bentuk secara vertikal, yakni adanya perbedaan lebar atau panjang dinding geser (*shear wall*) baik tipe beraturan (*gradually*) atau tipe mengerucut (*tapered*). Namun dinding geser (*shear wall*) dengan tipe ini harus memiliki perencanaan yang baik, terutama detail tulangan guna menyediakan kapasitas penampang yang optimal dalam menahan gaya/momen yang bekerja.

### 2.6.3 Konsep Slender Wall dan Squat Wall pada Dinding Geser (Shear Wall)

Terdapat dua jenis dinding geser (*shear wall*) apabila ditinjau berdasarkan aspek rasio panjang dan lebar ( $hw/lw$ ), yakni *slender wall* dan *squat wall*. Berikut ini adalah subba yang menjelaskan slender wall dan squat wall.

#### 1. Dinding Geser (*Shear Wall*) tipe *Slender Wall*

Dinding geser (*shear wall*) tipe *slender wall* ini biasanya digunakan pada bangunan dengan kategori *high rise building*. Penampang ini tergolong penampang yang langsing dengan rasio  $hw/lw \geq 2,0$ . Tipe *slender wall* ini memiliki perilaku yang sama dengan kantilever dimana terdapat perilaku *inelastic* dari *slender wall* yakni *ductile flexural yielding* berupa sendi plastis pada bagian dasar dinding geser (*shear wall*) pada saat terjadinya gempa. Dengan adanya kondisi tersebut maka akan terjadi kerusakan pada bagian dasar dinding geser (*shear wall*) sehingga diperlukan perencanaan lebih pada bagian yang kritis.

Pada bagian yang kritis tersebut, metode yang biasanya digunakan adalah dengan memperbesar kapasitas penampang terhadap momen lentur dan aksial melebihi kekuatan yang disyaratkan ( $\phi Mn \geq Mu$ ).

Selain *flexural yielding*, terdapat parameter penting lainnya yakni kegagalan akibat gaya geser (*shear failure*). Apabila gaya geser yang bekerja sangat besar ( $Vu > .10\sqrt{fc'}Acv$ ), maka dapat berpeluang

mengurangi kemampuan dalam memikul beban aksial. Kerusakan dapat terjadi pada dasar badan (*web*) dinding geser (*shear wall*) sehingga dalam perencanaannya harus memenuhi aturan yang berlaku untuk menghindari kegagalan akibat gaya geser (*shear failure*).

## 2. Dinding Geser (*Shear Wall*) tipe *Squat Wall*

Dinding geser (*shear wall*) tipe *squat wall* ini biasanya digunakan pada bangunan dengan kategori low rise building. Penampang ini tergolong penampang yang tidak langsing dengan rasio  $hw/lw < 2,0$ . Karakteristik *squat wall* adalah perilakunya yang kaku (kekuatan lentur yang tinggi) namun lemah terhadap gaya geser (*shear*).

Terdapat dua kegagalan pada *squat wall* yang terjadi akibat gaya geser, yakni *shear yielding* dan *shear sliding* yang terletak pada badan (*web*).

Berdasarkan gambar 2.24, fenomena *shear yielding* ditandai dengan adanya retak miring pada badan (*web*) dinding geser (*shear wall*). Pada segmen CDE dibutuhkan tulangan horizontal untuk menahan gaya horizontal  $FH$  dan tulangan vertikal untuk menahan gaya vertikal  $FV$ . Sedangkan, pada fenomena *shear sliding* terjadi pada konstruksi join, termasuk pada pertemuan badan (*web*) dinding geser dan pondasi. Tulangan  $AV_f$  dan gaya normal  $N_u$  berperan penting dalam menahan *shear sliding* akibat gaya geser yang bekerja dengan menyediakan gaya jepit (*clamping force*).

### 2.6.4 Perilaku Kerusakan Dinding Geser (*Shear Wall*)

Pada konsepnya dinding geser (*shear wall*) wajib direncanakan berperilaku duktail (*ductile*) pada saat beban gempa bekerja, sehingga akan mengalami fenomena *flexural yielding* pada sendi plastisnya yang berada pada dasar pertemuan dinding (*wall*) dan pondasi. Fungsinya adalah untuk mengontrol deformasi inelastic, kontrol kekuatan, dan mekanisme penyerapan energi (*dissipation energy*). Pola kerutuhan getas dan limited ductile sangat tidak diharapkan terjadi pada struktur gedung yang memiliki sistem penahan gempa dual system (SRMPK dan

*shear wall*). Berikut ini adalah beberapa variasi kerusakan/keruntuhan yang terjadi pada dinding geser (*shear wall*).

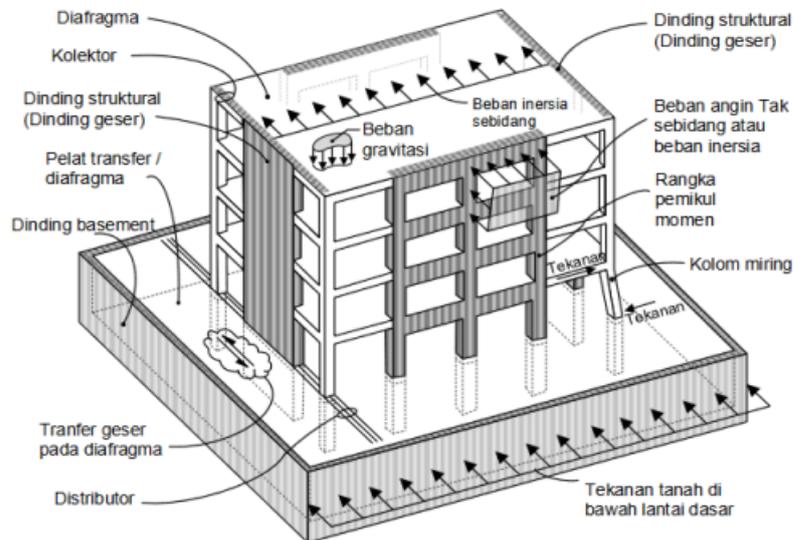
dapat diketahui beberapa kerusakan yang dapat terjadi pada dinding geser (*shear wall*). Berikut adalah penjelasannya:

1. Terjadinya leleh (*yielding*) pada tulangan longitudinal di area plastis (biasanya terletak pada dasar dinding) sehingga membuktikan adanya penyerapan energi (*dissipation energy*) pada dinding geser (*shear wall*).
2. Terjadinya *diagonal compression* atau *diagonal tension* yang diakibatkan oleh adanya gaya geser gempa yang bekerja.
3. Terjadinya *sliding shear* pada pertemuan dinding (*wall*) dan pondasi.
4. Instability penampang *thin wall* akibat dimensi penampang yang terlalu tipis.
5. *Bond failure* atau *shear failure* yang terjadi pada pertemuan tulangan yang diangkur pada pondasi dengan tulangan longitudinal dinding geser (*shear wall*).

Oleh karena itu, dengan adanya perilaku keruntuhan tersebut, maka penggunaan tulangan vertikal (logitudinal) dan horizontal (transversal) penting dalam mendesain dinding geser (*shear wall*) agar mampu menahan beban lateral gempa yang bekerja. Tulangan vertikal (logitudinal) berfungsi untuk menahan kombinasi momen lentur dan aksial serta tulangan horizontal (transversal) untuk menahan gaya geser.

## **2.7 Diafragma**

Diafragma umumnya adalah elemen planar horizontal atau hampir horizontal yang berfungsi untuk mentransfer gaya lateral ke elemen vertikal pada sistem pemikul gaya lateral. Tipikalnya, diafragma juga difungsikan sebagai pelat lantai dan atap. Sebuah diafragma biasanya terdiri dari kord dan kolektor (SNI 2847-2019). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.26.



**Gambar 2. 16** Aksi diafragma tipikal

Sumber: SNI 2847-2019:242

Diafragma juga mengikat elemen-elemen bangunan menjadi satu system struktur yang utuh dan memberikan dukungan lateral pada elemen – elemen dengan menghubungkan ke sistem penahan lateral (SNI 2847-2019). Diafragma juga berfungsi sebagai plat lantai dan atap, atau sebagai struktur ramp gedung parkir. Oleh karena itu diafragma juga berperan untuk menahan beban gravitasi (SNI 2847-2019).

### 2.7.1 Gaya Desain Diafragma

Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.10.1.1 diafragma lantai dan atap harus di desain untuk menahan gaya seismik desain dari analisa struktur, tetapi tidak boleh kurang dari yang di tentukan sesuai dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_{px} = \frac{\sum_i^n = xF_i}{\sum_i^n = xW_i} W_{px}$$

Keterangan:

$F_{px}$  = Gaya desain diafragma pada tingkat-x

$F_i$  = Gaya desain yang di terapkan pada tingkat-i

$W_i$  = Tributari berat sampai tingkat-i

$W_{px}$  = Tributari berat sampai diafragma di tingkat-x

Gaya yang ditentukan dari persamaan diatas tidak boleh kurang dari:

$$F_{px} = 0,2 \text{ SDS } I_e W_{px}$$

dan tidak boleh melebihi:

$$F_{px} = 0,4 \text{ SDS } I_e W_{px}$$

Semua diafragma harus di desain untuk gaya inersia yang dihitung dari persamaan di atas untuk semua gaya transfer lainnya.

### 2.7.2 Fleskibilitas Diafragma

Menurut SNI 1726:2019 diafragma adalah kaku jika perbandingan  $S/De$  tidak lebih dari tiga. Lalu diafragma adalah fleksibel jika defleksi diafragma maksimum (DDM) dibagi dengan simpangan rata-rata elemen vertikal (SREV) melebihi dari dua.

Menurut SNI 1726:2019 diafragma harus dapat memikul tegangan geser dan lentur yang dihasilkan dari gaya seismik desain dari elemen pemikul vertikal di masing-masing lantai ( $F_x$ ) ke elemen pemikul vertikal lainnya. Diafragma harus mempunyai pengikat atau strut untuk mendistribusikan gaya pengangkuran dinding ke diafragma. Sambungan diafragma harus berupa sambungan tipe mekanis, tipe las, atau sambungan positif.

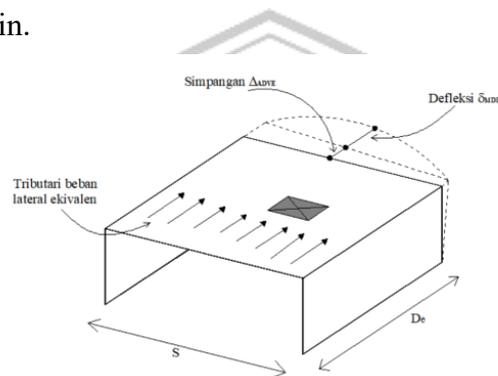
Penggunaan diafragma pada struktur plat lantai akan memiliki kekakuan yang dianggap tidak terhingga sehingga akan mampu untuk membantu menahan beban gempa

Diafragma dibedakan menjadi 3 berdasarkan kekakuannya yaitu rigid diaphragm, semi rigid diaphragm, dan flexible. Berdasarkan dari ketiga kategori tersebut dapat dibedakan berdasarkan tegangan yang terjadi.

- a. Diafragma kaku memindahkan beban ke rangka atau dinding geser tergantung ada fleksibilitasnya dan lokasinya dalam struktur. Diafragma kaku yaitu dimana perpindahan pusat atau titik tengah diafragma kurang dari dua kali perpindahan di ujung sudutnya. Diafragma ini meningkatkan tuntutangeser pada sistem penahan yang digunakan, tetapi semuanya akan mengalami deformasi yang sama.
- b. Diafragma semi kaku ini harus dimodelkan ketika deformasi inplane yang signifikan terjadi dengan mempertimbangkan kekakuan masing-masing diafragma. Dianjurkan menggunakan diafragma semi kaku jika mode rotasi

mendominasi karena banyaknya eksentrisitas antara pusan massa dan pusat kekakuan.

- c. Fleksibilitass diafragma mempengaruhi distribusi gaya lateral ke komponen vertikal dari elemen lateral yang menahan elemen struktur. Flexible diaphragm yaitu elemen struktur horizontal yang perpindahan titik tengah dibawah beban lateral melebihi dua kali perpindahan rata-rata dari dukungan izin.

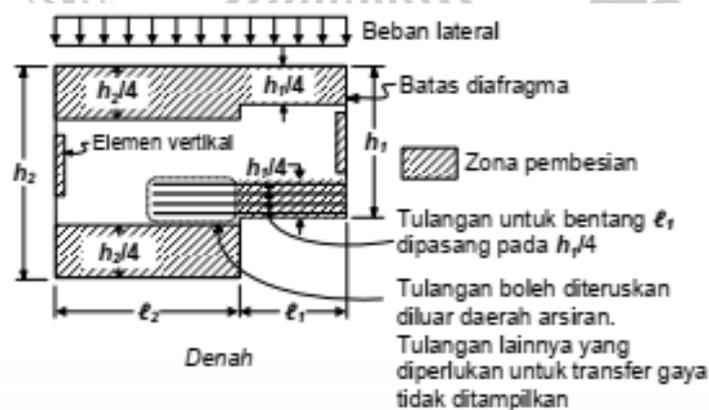


**Gambar 2. 17** Pengecekan Fleksibilitas diafragma

Sumber: SNI 1726-2019:57

### 2.7.3 Kord

Kord merupakan elemen struktur yang dapat berupa balok atau plat yang berada pada tepi bangunan sebagai penahan gaya tarik dan tekan akibat adanya gaya gempa pada diafragma. Area penulangan kord dijelaskan pada Gambar 2.18.



**Gambar 2. 18** Area penulangan kord

Sumber: SNI 2847-2019:251

### Detailing Kord

- Penulangan kord tarik akibat momen harus diletakkan selebar 1/4 dari tepi tarik diafragma
- Ketika kedalaman diafragma berubah sepanjang bentangnya, diperbolehkan menempatkan panjang penyaluran ke segmen diafragma di dekatnya yang tidak termasuk ke dalam batas 1/4 segmen tersebut
- Ketika tulangan kord diposisikan pada tepi diafragma, persamaan untuk menghitung area tulangan tarik kord ( $\phi = 0,9$ )

$$A_s = \frac{1 T_u}{\phi f_y}$$

- Kord dengan tegangan tekan  $\geq 0.2 f_c'$  memerlukan *confinement* pada detailingnya

#### 2.7.4 Kolektor

Kolektor merupakan bagian dari diafragma yang berfungsi menyalurkan gaya antara diafragma dan elemen vertikal pada sistem pemikul gaya lateral. Kolektor pada bangunan umumnya identik dengan pelat ataupun balok yang menyalurkan gaya dari dinding geser ke elemen penahan lateral lainnya seperti rangka. Kolektor sebagai elemen tarik atau tekan yang mengumpulkan gaya geser dari diafragma dan menyalurkan gaya ke elemen vertikal. Elemen kolektor merupakan elemen tarik atau tekan yang mengumpulkan gaya geser dari diafragma dan menyalurkan gaya ke elemen vertikal. Kolektor sendiri dapat berupa balok atau zona yang diberi tulangan di dalam pelat lantai.

Dalam SNI 1726:2019 telah dijelaskan untuk struktur yang termasuk ke dalam kategori desain seismik C, D, E, dan F elemen kolektor dan sambungannya, termasuk sambungan elemen kolektor ke elemen vertikal harus di rencanakan agar dapat memikul 1,5 kali dari gaya inersia diafragma ditambahkan 1,5 kali dari gaya transfer desain.

Elemen tegangan dan kompresi yang disebut kolektor diperlukan untuk "mengumpulkan" geser dan mengirimkannya ke dinding. Gaya tarik dan tekan pada kolektor ditentukan di mana lebar kolektor sama dengan lebar dinding. Dimulai dari

ujung bebas, tegangan atau gaya tekanmeningkat secara linier saat geser dipindahkan ke kolektor. Budiono, dkk (2019). Kolektor dapat dipasang dengan lebar yang sama dengan dinding, namun pada beberapa kasus karena keterbatasan ketebalan atau gaya transfer yang cukup besar, kolektor harus disebar sepanjang  $b_{eff}$ .

Detailing kolektor

$$- b_{eff} = t + \left(\frac{l}{2}\right)$$

Dimana:

h = Tebal pelat

t = Tebal dinding

l = Panjang dinding

$$- A_s = \frac{V_u}{\phi f_y}$$

$$- \phi V_n = \phi A_s f_y$$

- Kontrol

$$\phi V_n > V_u$$

### 2.7.5 Fungsi Diafragma

Diafragma merupakan bagian penting dari sistem penahan gaya gempa dan memerlukan perhatian desain oleh insinyur struktural untuk memastikan sistem struktural bekerja dengan baik saat gempa terjadi. Dengan perilaku sebagai konektor transversal, diafragma sebagaimana dipakai dalam kontruksi bangunan adalah komponen struktural (lantai dan atap) yang memberi sebagian atau semua fungsi dibawah ini (SNI 2847:2019):

- a. Pemikul komponen struktur bangunan (seperti dinding, dinding pemisah dan *cladding*) penahan gaya horizontal tapi bukan merupakan bagian dari sistem pemikul beban gempa.
- b. Mentransfer beban lateral dari titik tangkap ke elemen vertikal dari sistem pemikul beban gempa
- c. Sambungan dari berbagai komponen dari sistem pemikul beban gempa vertikal dengan kekuatan, kekakuan dan daktilitas yang sesuaisehingga respons bangunan berperilaku seperti yang diinginkan dalam desain

## **2.7.6 Gaya-Gaya Diafragma**

### **1. Gaya Diafragma Sebidang**

Gaya lateral dari kombinasi pembebanan termasuk angin, gempa, dan tekanan horizontal fluida atau tanah yang menimbulkan aksi geser, aksial, dan lentur sebidang disepanjang bentang diafragma dan mentransfer gaya-gaya tersebut ke elemen vertikal pada sistem pemikul gaya lateral.

Untuk beban angin, gaya lateral ditimbulkan oleh tekanan angin yang bekerja pada penutup bangunan yang diteruskan diafragma ke elemen vertikal.

Untuk gaya gempa, gaya inersia yang ditimbulkan diafragma dan gaya gaya tributari pada dinding, kolom, dan elemen selanjutnya diteruskan oleh diafragma ke elemen vertikal. (SNI 2847:2019)

### **2. Gaya Diafragma pada Sistem Ganda**

Gaya transfer yang signifikan umumnya terjadi pada plat lantai di level podium dan ground dengan level basement

Pada plat-plat tersebut, gaya didistribusikan keluar dari elemen-elemen vertikal seperti dinding geser, dan di transfer ke dinding podium atau dinding basement melalui diafragma

### **3. Gaya Sambungan**

Tekanan angin yang bekerja di permukaan dinding luar bangunan menghasilkan gaya tak sebidang pada bagian permukaannya. Selain itu, goyangan akibat gempa goyangan akibat gempa dapat menghasilkan gaya inersia pada elemen-elemen rangka vertikal dan non-struktural seperti cladding. Gaya-gaya ini di transfer dari elemen tersebut yang kemudian di teruskan ke diafragma melalui sambungannya. (SNI 2847:2019).

### **4. Gaya Kolom Bresing**

Konfigurasi arsitektural kadangkala memerlukan kolom miring, yang mana dapat menghasilkan gaya dorong horizontal yang besar dalam bidang diafragma akibat aksi gravitasi dan guling

Gaya dorong ini dapat bekerja pada arah berbeda tergantung pada orientasi kolom, baik dalam kondisi tekan maupun tarik.

Diafragma juga memberikan tahanan lateral pada kolom yang tidak di desain sebagai bagian dari sistem pemikul momen gaya lateral dengan cara menghubungkannya ke elemen lain yang memiliki stabilitas lateral pada stuktur tersebut. (SNI 2847:2019)

### 5. Gaya Diafragma Tak Sebidang

Diafragma pada umumnya adalah bagian dari lantai dan atap rangka yang berfungsi untuk menahan beban gravitasi peraturan umum bangunan mungkin juga memuat pertimbangan adanya gaya tak sebidang akibat tekanan angin ke atas pada plat atap dan percepatan bertikal akibat pengaruh gempa. (SNI 2847:2019)

### 6. Gaya Transfer Diafragma

Elemen-elemen vertikal pada sistem pemikul gaya lateral mungkin memiliki properti berbeda setinggi elemennya atau tahanan bidangnya dapat berubah dari satu tingkat ke tingkat lainnya, sehingga menimbulkan gaya transfer antara elemen-elemen vertikal. (SNI 2847:2019)

#### 2.7.7 Batasan Desain Diafragma

Ketebalan minimum diafragma-diafragma mungkin diperlukan untuk menahan momen, gaya geser dan gaya aksial sebidang. Untuk diafragma seluruhnya dicor ditempat atau terdiri dari lapisan penutup yang komposit dengan komponen pracetak, tebal diafragma harus cukup menahan gaya - gaya tersebut.

Selain persyaratan tahanan gaya sebidang, diafragma yang merupakan bagian dari konstruksi lantai dan atap harus memenuhi persyaratan yang berlaku untuk ketebalan pelat atau sayap (*flange*) (SNI 2847:2019)

#### 2.7.8 Geser Diafragma

Untuk diafragma yang secara keseluruhan dicor ditempat, maka nilai  $V_n$  harus dihitung sesuai dengan persamaan berikut:

$$V_n = A_{cv} \left( 0,17\lambda \sqrt{f_c' + \rho_t f_y} \right)$$

Dimana  $A_{cv}$  adalah luasan bruto beton yang dibatasi oleh ketebalan badan dan tinggi diafragma dikurangi dengan luasan bukaan bila ada nilai  $\sqrt{f_c'}$  untuk menghitung  $V_n$  tidak boleh melebihi 8,3 Mpa

Untuk diafragma yang seluruhnya dicor ditempat, dimensi penampang harus memenuhi persamaan berikut:

$$V_u \leq \phi 0,66 A_{cv} \sqrt{f_c'}$$

Dimana nilai  $\sqrt{f_c'}$  yang digunakan untuk menghitung  $V_n$  tidak boleh, melebihi 8,3 Mpa dan nilai  $\phi$  harus di ambil sebesar 0,75 (SNI 2847:2019)

### 2.7.9 Geser Friksi

Tujuan pasal ini adalah untuk menyediakan metode desain terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan geser gelincir (*sliding shear*) pada suatu bidang.

Kondisi ini termasuk bidang yang terbentuk oleh retak pada beton monolit, bidang kontak antara beton dan baja dan bidang yang dicor antara waktu berbeda.

Konsep geser friksi ini mengansumsi bahwa retak akan selalu terjadi, dan bahwa tulangan harus disediakan melewati retak untuk menahan perpindahan relatif sepanjang retak tersebut.

Jika tulangan geser friksi tegak lurus terhadap bidang geser, kekuatan geser nominal pada asumsi bidang geser harus dihitung dengan ketentuan berikut, dengan koefisien friksi yang dapat dilihat pada Tabel 2.19.

$$\phi V_n = \phi \mu A_{vf} f_y$$

$$V_n = A_{vf} \phi f_y \mu$$

**Tabel 2. 19** Koefisien Friksi

Kondisi Permukaan kontak	Koefisien friksi $\mu$	
Beton yang dicor secara monolit	1,4 $\lambda$	a)
Beton yang dicor di atas permukaan beton yang telah mengeras yang bersih, bebas material halus (laitance), dan secara sengaja dikasarkan sampaiu amplitudo penuh kira-kira 6 mm	1,0 $\lambda$	b)
Beton yang dicor di atas permukaan beton yang telah mengeras yang bersih, bebas material halus (laitance), dan secara sengaja tidak dikasarkan	0,6 $\lambda$	c)
Beton yang dicor di atas permukaan baja struktural yang bersih, tidak di cat dan dengan geser yang di transfer pada permukaan dengan stud berkepala, atau tulangan ukur, atau dengan tulangan ulir yang dilas, atau kawat	0,7 $\lambda$	d)

Sumber: SNI 2847-2019

### 2.7.10 Kekuatan Perlu Diafragma

Kombinasi beban terfaktor umumnya perlu mempertimbangkan beban tak sebidang yang bekerja secara bersamaan dengan gaya diafragma sebidang.

Sebagai contoh, hal ini disyaratkan pada balok lantai yang juga berfungsi sebagai kolektor, dimana dalam kasus ini balok tersebut harus di desain untuk menahan gaya aksial yang bekerja sebagai kolektor dan momen lentur yang bekerja sebagai balok lantai yang menahan beban gravitasi. (SNI 2847:2019).

