

## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Konsep Perencanaan Gedung

Menurut UU No. 20 tahun 2003, pendidikan adalah usaha sadar dan terencana untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran agar peserta didik secara aktif mengembangkan potensi dirinya untuk memiliki kekuatan spiritual keagamaan, pengendalian diri, kepribadian, kecerdasan, akhlak mulia, serta keterampilan yang diperlukan dirinya, masyarakat, bangsa dan negara.

Suatu konsep perencanaan dari konstruksi bangunan perlu memperhatikan kriteria-kriteria perencanaan. Pada perencanaan struktur gedung Fakultas Teknik ini perlu ditetapkan aspek-aspek yang akan digunakan sebagai tolak ukur untuk menentukan pemilihan jenis struktur yang akan digunakan. Kriteria perencanaan konstruksi bangunan antara lain:

##### 1. Teknis

Persyaratan teknis yang harus dipenuhi suatu bangunan yaitu bangunan yang didirikan harus kokoh agar deformasi yang terjadi tidak melebihi yang ditentukan serta kuat untuk menerima beban yang dipikul.

##### 2. Fungsional

Hal ini berkaitan dengan penggunaan ruang yang biasanya akan mempengaruhi penggunaan bentang elemen struktur yang digunakan.

### 3. Estetika

Konstruksi yang dibangun harus memperhatikan aspek-aspek keindahan, tata letak dan bentuk sehingga orang-orang yang menempatnya akan merasa aman dan nyaman.

## 2.2 Struktur Beton Bertulang

Pada perencanaan struktur gedung Fakultas Teknik Universitas Siliwangi ini menggunakan struktur beton bertulang. Beton bertulang adalah kombinasi dari beton dan tulangan baja, yang bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban yang ada. Beton bertulang merupakan salah satu jenis material bangunan yang paling sering digunakan dalam pembuatan berbagai jenis struktur. Proses desain struktur secara garis besar dilakukan melalui dua tahapan: (1) menentukan gaya-gaya dalam yang bekerja pada struktur tersebut dengan menggunakan metode analisis yang tepat dan (2) menentukan dimensi dari tiap elemen struktur secara ekonomis dengan mempertimbangkan faktor keamanan, stabilitas, kemampuan, serta fungsi dari struktur tersebut. (Setiawan, 2016, p. 2).

Untuk meningkatkan kekuatan lekatan antara tulangan dengan beton di sekelilingnya telah dikembangkan jenis tulangan uliran pada permukaan tulangan, yang selanjutnya disebut sebagai baja tulangan *deform* atau ulir. Mengacu SII 0136-80, Dipohusodo menyebutkan pengelompokan baja tulangan untuk beton bertulang sebagaimana ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Jenis dan Kelas Baja Tulangan Menurut SII 0136-80

Jenis	Kelas	Simbol	Batas Ulur Maksimum (N/mm <sup>2</sup> )	Kuat Tarik Minimum (N/mm <sup>2</sup> )
Polos	1	BJTP-24	235	382
	2	BJTP-30	294	480
Ulir	1	BJTD-24	235	382
	2	BJTD-30	294	480
	3	BJTD-25	343	490
	4	BJTD-40	392	559
	5	BJTD-50	490	610

Berdasarkan SNI 03-2847-2013, untuk melindungi tulangan terhadap bahaya korosi maka disebelah tulangan luar harus diberi selimut beton. Untuk beton bertulang, tebal selimut beton minimum yang harus disediakan untuk tulangan harus memenuhi ketentuan sebagai berikut.

Tabel 2.2 Batasan Tebal Selimut Beton

Kondisi Struktur	Tebal Selimut
a) Beton yang dicor langsung di atas tanah dan selalu berhubungan dengan tanah	75
b) Beton yang berhubungan dengan tanah atau cuaca : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Batang D-19 hingga D-56</li> <li>- Batang D-16, jaring kawat polos P16 atau ulir D16 dan yang lebih kecil</li> </ul>	50 40
c) Beton yang tidak langsung berhubungan dengan cuaca atau tanah : <p><u>Pelat dinding, pelat berusuk:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Batang D-44 dan D-56</li> <li>- Batang D-36 dan yang lebih kecil</li> </ul> <p><u>Balok, kolom :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tulangan utama, pengikat, sengkang, lilitan spiral</li> </ul> <p><u>Komponen struktur cangkang, pelat melipat:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Batang D-19 dan yang lebih besar</li> <li>- Batang D-16, jaring kawat polos P16 atau ulir D16 dan yang lebih kecil</li> </ul>	40 20 40 20 13

Dalam penggunaannya, beton bertulang sendiri memiliki keuntungan sekaligus kerugian. Adapun keuntungan dari beton bertulang diantaranya, adalah (Setiawan, 2016, p. 3) :

1. Memiliki kuat tekan yang tinggi.
2. Memiliki ketahanan api yang lebih baik dibandingkan dengan material baja.
3. Membentuk struktur yang kaku.
4. Memiliki umur layan yang panjang dan biaya perawatan yang rendah.
5. Beton dapat dicetak menjadi beragam bentuk penampang, sehingga banyak digunakan dalam industri pracetak.
6. Tidak terlalu dibutuhkan tenaga kerja dengan keterampilan tinggi, bila dibandingkan dengan struktur baja.

Disamping keunggulan-keunggulan tersebut, adapun kerugian dari beton bertulang sendiri diantaranya, adalah (Setiawan, 2016, p. 3):

1. Mutu beton bergantung pada bahan material dan pelaksanaannya.
2. Memiliki kuat tarik yang rendah, yaitu sekitar 10% dari kuat tekannya.
3. Ukuran dan dimensi penampang struktur beton pada umumnya lebih besar dari baja, sehingga memiliki berat konstruksi yang lebih besar.
4. Tidak dapat dibongkar pasang.
5. Biaya pembuatan cetakan beton cukup tinggi, menyamai harga beton yang dicetak.
6. Adanya retakan pada beton akibat susut beton dan beban hidup yang bekerja.

### 2.3 Pembebanan Struktur

Beban adalah gaya luar yang bekerja pada suatu struktur. (Setiawan, 2016, p. 4). Acuan yang digunakan dalam merencanakan pembebanan antara lain, sebagai berikut :

1. Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 03-2847-2013)
2. Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 03-2847-2013)
3. Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2013)
4. Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (SKBI-1.3.53.1987)
5. Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia 1984.

Beban yang bekerja pada struktur digolongkan menjadi beban gravitasi dan beban lateral. Beban gravitasi terdiri dari beban mati (*Dead Load*), dan beban hidup (*Live Load*). Sedangkan beban lateral terdiri dari beban gempa (*Earthquake*) dan beban angin (*Wind*).

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

Menurut Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG) SKBI-1.3.53.1987, beban mati adalah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang sifatnya tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin, serta peralatan tetap

yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu. Berikut ini disajikan tabel dari berat sendiri bahan bangunan dan komponen gedung :

Tabel 2.3 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Material Gedung	Berat (kg/m <sup>3</sup> )
Baja	7850
Batu alam	2600
Batu belah, batu bulat, batu gunung ( berat teumpuk )	1500
Batu karang ( berat tumpuk )	700
Batu pecah	1450
Besi tuang	7250
Beton	2200
Beton Bertulang	2400
Kayu ( kelas I )	1000
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
Pasangan bata merah	1700
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
Pasangan batu cetak	2200
Pasangan batu karang	1450
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
Pasir (jenuh air)	1800
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
Tanah lempung dan lanau ( kering udara sampai lembab )	1700
Tanah lempung dan lanau ( basah)	2000
Timah hitam	11400

Tabel 2.4 Berat Sendiri Komponen Gedung

Komponen Gedung	Kg/m <sup>2</sup>
Adukan, per cm tebal	
Dari semen	21
Dari kapur, semen merah atau tras	17
Aspal, termasuk bhan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
Dinding pasangan bata merah	
Satu bata	450
Setengah bata	250
Dinding pasangan batako	
Berlubang :	
Tebal dinding 20 cm (HB 20)	200
Tebal dinding 10 cm (HB 10)	120
Tanpa Lubang :	
Tebal dinding 15 cm	300
Tebal dinding 10 cm	200
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari :	
Semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm	11
Kaca, dengan tebal 3 – 5 mm	10
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m <sup>2</sup>	40
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m	7
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m <sup>2</sup> bidang atap	50
Penutup atas sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m <sup>2</sup> bidang atap	40
Penutup atap seng gelombang (BJLS-25) tanpa gordeng	
Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	10 24
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11

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

Menurut Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG) SKBI-1.3.53.1987, beban hidup adalah semua beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung, dan ke dalamnya termasuk beban-beban pada lantai yang asalnya dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang tidak merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup dari gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Khusus pada atap, ke dalam beban hidup dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan maupun akibat tekanan jatuh (energi kinetik) butiran air. Berikut ini disajikan tabel dari beban hidup pada lantai gedung :

Tabel 2.5 Beban hidup pada lantai gedung

Beban Hidup	Berat (kg/m <sup>3</sup> )
a) Lantai dan tangga rumah tinggal, kecuali yang disebut dalam (b)	200
b) Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana dan gudang-gudang tidak penting yang bukan untuk toko, pabrik, atau bengkel	125
c) Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama dan rumah sakit.	250
d) Lantai ruang olahraga	400
e) Lantai ruang dansa	500
f) Lantai dan balkon dalam dari ruang-ruang pertemuan yang lain daripada yang disebut dalam a s/d e, seperti mesjid, gereja, ruang pagelaran, ruang rapat, bioskop dan panggung penonton dengan tempat duduk tetap.	400
g) Panggung penonton dengan tempat duduk tidak tetap atau untuk penonton yang berdiri.	500
h) Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dalam c	300

Beban Hidup	Berat (kg/m <sup>3</sup> )
i) Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dalam d, e, f, dan g	500
j) Lantai ruang pelengkap dari yang disebut dalam c, d, e, f, dan g.	250
k) Lantai untuk pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, toko besi, ruang alat-alat dan ruang mesin, harus direncanakan terhadap beban hidup yang ditentukan tersendiri dengan minimum	400 800
l) Lantai gedung parkir bertingkat: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Untuk lantai bawah</li> <li>- Untuk lantai tingkat lainnya</li> </ul>	400
m) Balkon-balkon yang menjorok bebas keluar harus direncanakan terhadap beban hidup dari lantai ruang yang berbatasan, dengan minimum.	300

### 2.3.3 Beban Gempa (*Earthquake*)

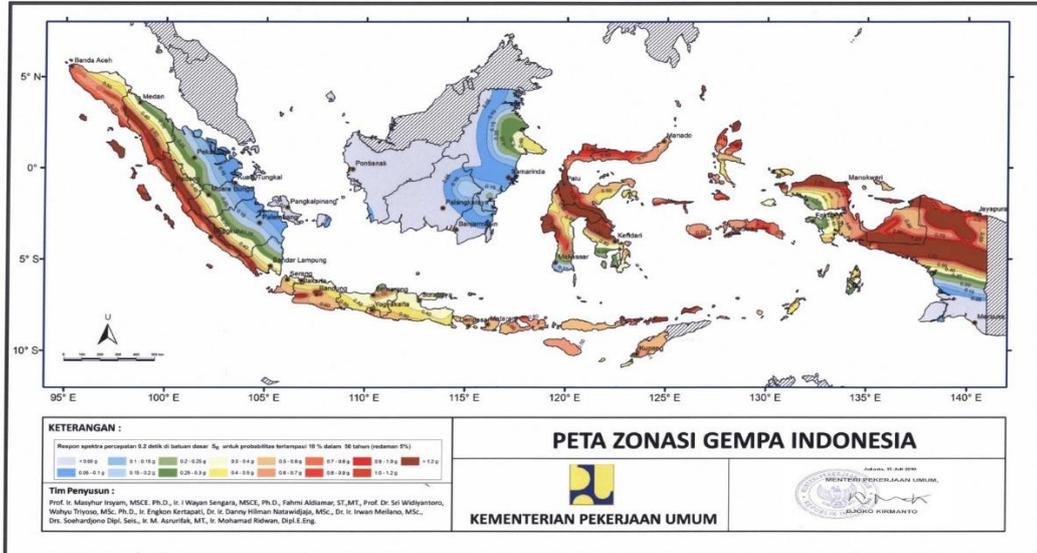
Menurut Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPPURG) SKBI-1.3.53.1987, Beban Gempa adalah semua beban statik ekwivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Dalam hal pengaruh gempa pada struktur gedung ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, maka yang diartikan dengan beban gempa di sini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu.

Pada saat terjadi gempa, suatu struktur mengalami getaran gempa dari lapisan tanah di bawah dasar bangunannya secara acak dalam berbagai arah. Apabila struktur tersebut sangat kaku dan dengan kata lain mempunyai waktu getar alami  $T$  yang mendekati nol detik, maka besarnya gaya inersia  $F$  yang timbul akibat gempa dan yang bekerja pada titik pusat massa:

$$F = m \times A_g$$

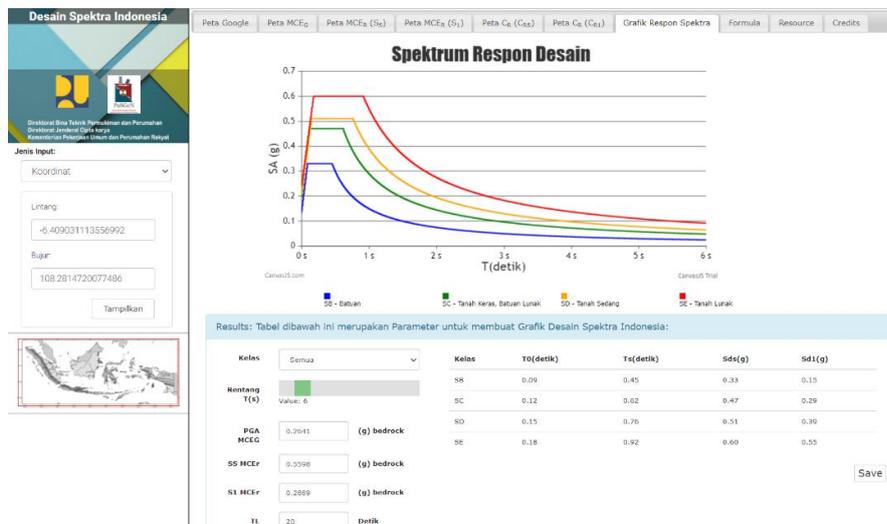
Berdasarkan peraturan SNI-1726-2012 tiap kota atau wilayah di Indonesia akan memiliki grafik spektrum respons masing-masing, tidak hanya terbatas pada 6

Wilayah Gempa seperti pada SNI 1726-2002. Berikut ini disajikan gambar peta zona gempa di seluruh wilayah di Indonesia :



Gambar 2.1 Peta gempa Indonesia

Untuk mengetahui grafik spektrum gempa, dapat menggunakan program grafik gempa yang dapat diakses melalui website resmi. Adapun grafik spektrum respon gempa wilayah Tasikmalaya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.2 Respon Spektrum Gempa Kota Tasikmalaya

Prosedur analisis dan desain seismik yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung dan komponennya harus seperti yang ditetapkan dalam

pasal 7 SNI-1726-2012. Struktur bangunan gedung harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang lengkap, yang mampu memberikan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas disipasi energi yang cukup untuk menahan gerak tanah desain dalam batasan-batasan kebutuhan deformasi dan kekuatan yang disyaratkan. Gerak tanah desain harus diasumsikan terjadi di sepanjang setiap arah horizontal struktur bangunan gedung.

### **2.3.3.1 Parameter Analisa Beban Gempa Dinamik**

Terdapat dua metoda dalam analisa beban gempa dinamik yaitu analisa ragam spektrum respons dan *time history*. Dalam penyusunan tugas akhir ini analisa beban gempa dinamik hanya menggunakan analisa ragam spektrum respons. Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam analisa ragam spektrum respons adalah sebagai berikut:

#### 1. Kategori resiko bangunan

Kategori resiko bangunan terdapat dalam tabel kategori resiko bangunan gedung dan non gedung untuk beban gempa berdasarkan tabel 1 dalam SNI 1726-2012.

#### 2. Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan gempa terdapat dalam tabel faktor keutamaan gempa berdasarkan tabel 2 dalam SNI 1726-2012. Berikut ini disajikan tabel kategori resiko bangunan disertai dengan faktor keutamaan gempa :

Tabel 2.6 Kategori resiko bangunan dan faktor keutamaan gempa

<b>Jenis Pemanfaatan</b>	<b>Kategori Resiko</b>	<b>Faktor Keutamaan Gempa</b>
Gedung & non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan dan perikanan</li> <li>- Fasilitas sementara</li> <li>- Gudang penyimpanan</li> <li>- Rumah jaga dan struktur kecil lainnya</li> </ul>	I	1,00
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <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>- Pusat perbelanjaan/mall</li> <li>- Bangunan industri</li> <li>- Fasilitas manufaktur</li> <li>- Pabrik</li> </ul>	II	1,00

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa
<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 tidak memiliki unit bedah dan UGD</li> <li>- Fasilitas penitipan anak</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> <p>Pusat pembangkit listrik biasa</p> <ul style="list-style-type: none"> <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 batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III	1,25

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa
<p>Gedung dan Non Gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <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 energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat 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> <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV	1,5

### 2.3.3.2 Menentukan Klasifikasi Situs

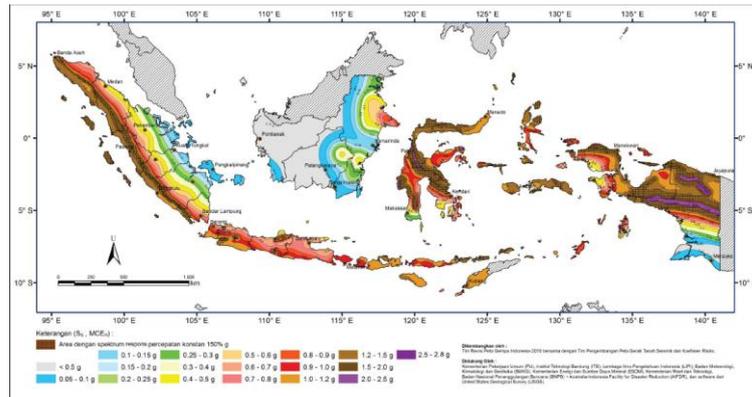
Penentuan klasifikasi situs berguna untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Berdasarkan tabel 3 dalam SNI 1726 : 2012. Berikut ini disajikan tabel klasifikasi situs :

Tabel 2.7 Klasifikasi situs

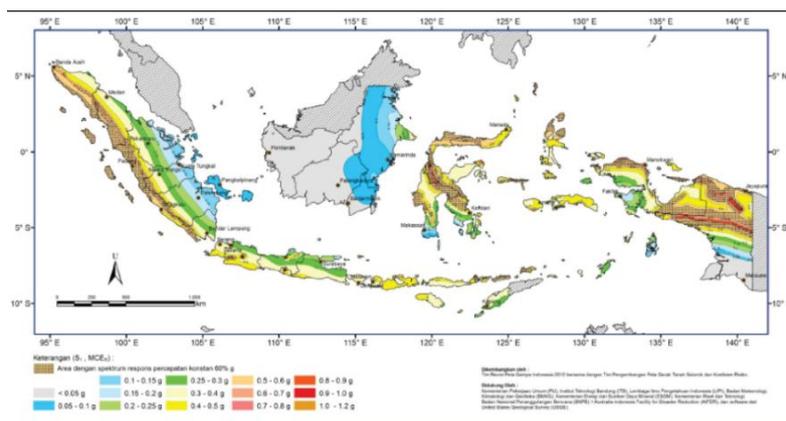
Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500 m/s	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500 m/s	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 – 750 m/s	>50	$\geq 100 \text{ kN/m}^2$
SD (tanah sedang)	175 – 350 m/s	15 – 50	50 – 100 $\text{kN/m}^2$
SE (tanah lunak)	<175 m/s	<15	<50 $\text{kN/m}^2$
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25 \text{ kPa}$		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisa respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 \text{ m}$ ) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5 \text{ m}$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$ ) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35 \text{ m}$ dengan $\bar{S}_u < 50 \text{ kPa}$		

### 2.3.3.3 Parameter Percepatan Terpetakan ( $S_s$ dan $S_1$ )

Parameter percepatan batuan dasar pada perioda pendek ( $S_s$ ) dan percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik harus ditetapkan masing-masing dari respons spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik dengan kemungkinan 2 persen terlampaui dalam 50 tahun ( $MCE_R$ , 2 persen dalam 50 tahun).



Gambar 2.3 Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-tertarget ( $MCE_R$ ).



Gambar 2.4  $S_1$ , Gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko-tertarget ( $MCE_R$ )

### 2.3.3.4 Faktor Implifikasi Getaran

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

Tabel 2.8 Koefisien situs  $F_a$ 

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_s$				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	$SS^b$				
Catatan:					
a) Untuk nilai-nilai antara $S_s$ , dapat dilakukan interpolasi linier					
b) $SS^b$ = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisa respons situs-spesifik, lihat 6.10.1					

Tabel 2.9 Koefisien situs  $F_v$ 

Kelas situs	Parameter respon spektral percepatan gempa ( $MCE_R$ ) terpetakan pada periode 1 detik, $S_1$				
	$S_1 \leq 0,25$	$S_1 = 0,5$	$S_1 = 0,75$	$S_1 = 1,0$	$S_1 \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	$SS^b$				
Catatan:					
a) Untuk nilai-nilai antara $S_1$ , dapat dilakukan interpolasi linier					
b) $SS^b$ = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisa respons situs-spesifik, lihat 6.10.1					

### 2.3.3.5 Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan resiko tertarget ( $MCE_R$ ).

Parameter spektrum respons percepatan pada periode pendek ( $S_{MS}$ ) dan periode 1 detik ( $S_{M1}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan persamaan berikut:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.3.1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.3.2)$$

Di mana :  $S_s$  = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan perioda pendek,  
 $S_1$  = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan perioda 1 detik.

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

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

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.3.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.3.4)$$

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

$$S_a = S_{DS} \left( 0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.3.5)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.3.6)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.3.7)$$

### 2.3.3.7 Kategori Desain Seismik

Berdasarkan nilai  $S_{DS}$ ,  $S_{D1}$  dan kategori risiko gedung akan didapatkan dua kategori desain seismik. Nilai yang diambil adalah yang paling besar dari kedua  $K_{DS}$  tersebut. Nilai tersebut didapatkan dari nilai dalam Tabel 2.10 dan Tabel 2.11.

Tabel 2.10 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek,  $S_{DS}$

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

Tabel 2.11 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik,  $S_{D1}$

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

### 2.3.3.8 Koefisien Respon Seismik

Berdasarkan tabel 9 dalam SNI 1726: 2012 berikut merupakan faktor-faktor

$R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$  :

Tabel 2.12 Faktor  $R$ ,  $\Omega_0$ ,  $C_d$  untuk sistem struktur tahan gempa

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, $R$	Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0$	Faktor pembesaran defleksi, $C_d$	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n$ (m)				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
Sistem rangka bangunan								
1. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5/2	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	2½/3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Catatan: TB = tidak dibatasi TI = tidak diizinkan								

### 2.3.4 Kombinasi Pembebanan

Setiap komponen struktur harus dirancang sedemikian rupa sehingga mampu memikul beban yang lebih besar daripada beban layan atau beban aktual guna menjamin keamanan terhadap kegagalan struktur. (Setiawan, 2016).

Kombinasi pembebanan yang harus diperhitungkan dalam perencanaan Berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 9.2 kombinasi pembebanan yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur adalah :

1. Kuat perlu  $U$  untuk menahan beban mati  $D$  paling tidak harus sama dengan:

$$U = 1,4D \quad (2.3.8)$$

2. Kuat perlu  $U$  untuk menahan beban mati  $D$ , beban hidup  $L$ , dan juga beban atap  $A$  atau beban hujan  $R$ , paling tidak harus sama dengan:

$$U = 1,2D + 1,6L + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2.3.9)$$

3. Kuat perlu  $U$  untuk menahan beban mati  $D$ , beban hidup  $L$ , dan juga beban atap  $A$  atau beban hujan  $R$ , paling tidak harus sama dengan:

$$U = 1,2D + 1,6L + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2.3.10)$$

4. Bila ketahanan struktur terhadap beban angin  $W$  harus diperhitungkan dalam perencanaan, maka pengaruh kombinasi beban  $D$ ,  $L$ , dan  $W$  berikut harus ditinjau untuk menentukan nilai  $U$  yang terbesar, yaitu:

$$U = 1,2D + 1,0L \pm 1,6W + 0,5 (A \text{ atau } R) \quad (2.3.11)$$

5. Kombinasi beban juga harus memperhitungkan kemungkinan beban hidup  $L$  yang penuh dan kosong untuk mendapatkan kondisi yang paling berbahaya, yaitu:

$$U = 0,9D \pm 1,6W \quad (2.3.12)$$

6. Bila ketahanan struktur terhadap beban gempa  $E$  harus diperhitungkan dalam perencanaan, maka nilai kuat perlu  $U$  harus diambil sebagai:

$$U = 1,2D + 1,0L \pm 1,0E \text{ atau } U = 0,9D \pm 1,0E \quad (2.3.13)$$

Dalam hal ini nilai  $E$  ditetapkan berdasarkan ketentuan SNI-1726-2012 tentang standar perencanaan ketahan gempa untuk struktur bangunan gedung

Keterangan :

$U$  = kombinasi beban terfaktor

$D$  = Beban mati (*Dead Load*)

$L$  = Beban hidup (*Live Load*)

$A$  = Beban hidup atap

$R$  = Beban air hujan

$W$  = Beban Angin (*Wind Load*)

$E$  = Beban gempa (*Earth Quake Load*)

## 2.4 Perencanaan Desain Struktur Atas

Struktur atas suatu gedung adalah seluruh bagian struktur gedung yang berada di atas muka tanah. Komponen-komponen struktur atas gedung meliputi struktur atap, balok, pelat, kolom, tangga, *shear wall*, dan *basement*.

### 2.4.1 Rangka Atap Struktur Baja

Atap merupakan bagian struktur bangunan yang berfungsi sebagai penutup atau pelindung bangunan dari panas matahari dan hujan sehingga memberikan kenyamanan bagi penggunaan bangunan. Struktur atap terdiri dari penutup atap,

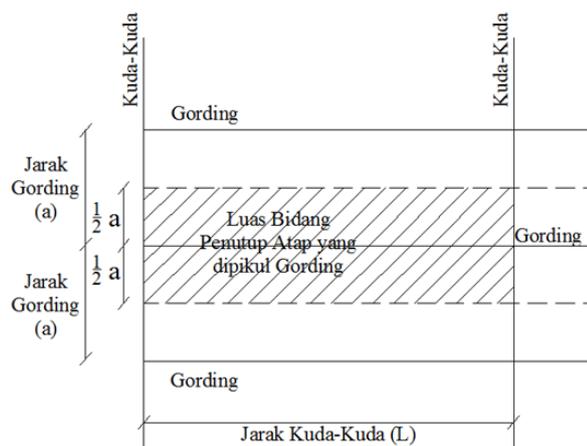
gording serta kuda-kuda. Pada perencanaan struktur rangka atap ini menggunakan konstruksi portal kaku (*Gable Frame*). Perhitungan gaya-gaya batang dari rangka atap dapat dianalisis dengan bantuan program *SAP 2000 versi.22.0.0* selanjutnya dapat direncanakan profil dimensi struktur serta sambungan. Untuk persyaratan perencanaan konstruksi baja berpedoman pada Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI 1984). Tahapan perencanaan rangka atap baja akan dijelaskan di bawah ini :

1. Perencanaan Panjang Truss
2. Perencanaan Gording
  - a. Pembebanan pada gording meliputi :

1. Beban Mati (DL)

- 1) Berat penutup atap :

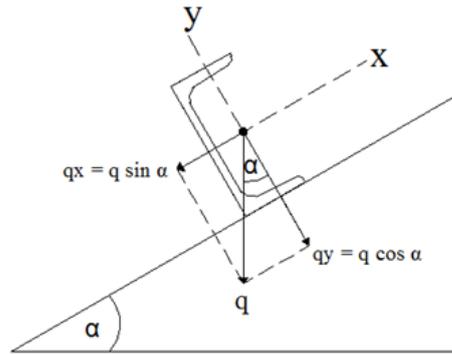
$$= \text{jarak gording} \times \text{berat penutup atap per m}^2 \text{ (kg/m)}$$



Gambar 2.5 Berat penutup atap yang dipikul gording

- 2) Berat sendiri gording

Distribusi beban mati pada gording ditampilkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.6 Beban mati pada gording

$$q_x = q \cdot \sin \alpha \quad (2.4.1)$$

$$q_y = q \cdot \cos \alpha \quad (2.4.2)$$

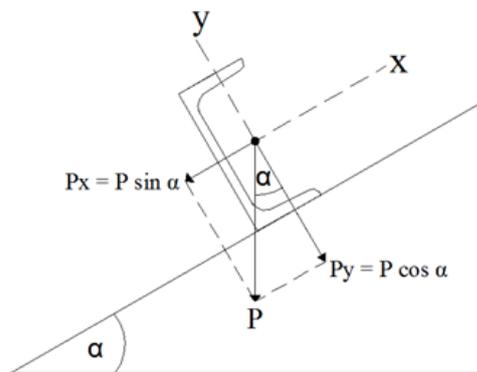
Keterangan:  $q_x$  = beban mati arah x (kg/m).

$q_y$  = beban mati arah y (kg/m).

$\alpha$  = sudut kemiringan ( $^\circ$ ).

## 2. Beban hidup (LL)

Beban hidup diperhitungkan sebesar  $P = 100$  kg, berdasarkan PPPURG 1987. Beban hidup berada di tengah bentang gording, beban ini diperhitungkan jika ada orang yang bekerja di atas gording.



Gambar 2.7 Beban hidup yang bekerja pada gording

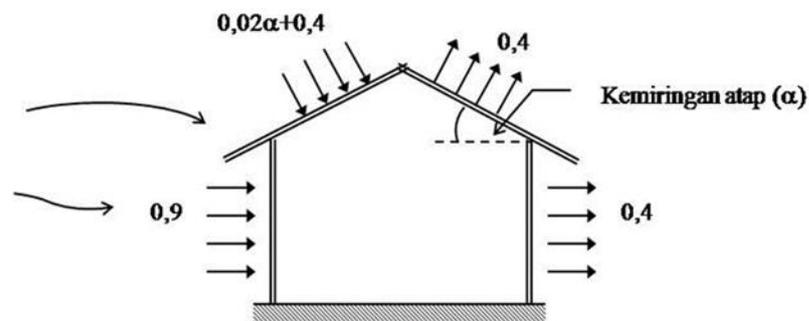
$$P_L x = P L \cdot \sin \alpha \quad (2.4.3)$$

$$P_L y = P L \cdot \cos \alpha \quad (2.4.4)$$

Keterangan :  $P_L x$  = beban hidup arah x (kg).

$PL_y$  = beban hidup arah y (kg).

3. Beban angin diperhitungkan dengan menganggap adanya tekanan positif (tiup) dan tekanan negatif (hisap) yang bekerja tegak lurus pada bidang atap.

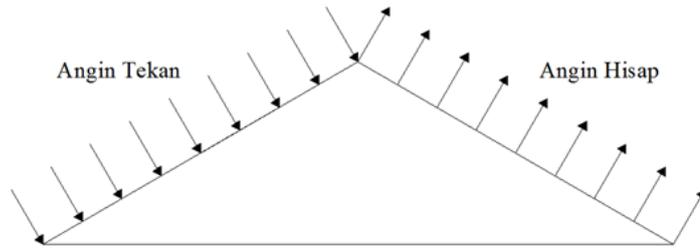


Gambar 2.8 Gaya angin

Menurut PPPURG 1987, tekanan tiup harus diambil  $25 \text{ kg/m}^2$ . Adapun

ha-hal yang berpengaruh terhadap beban angin, yaitu :

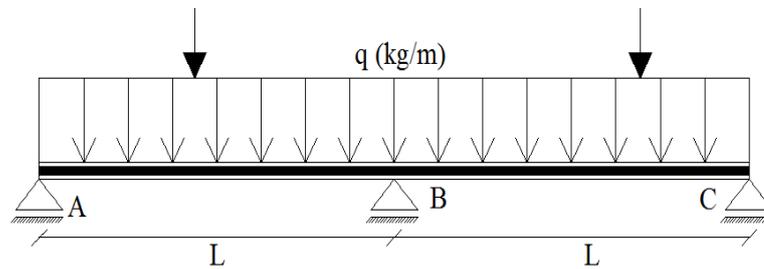
- 1) Kemiringan atap = ( $\alpha = 30^\circ$ )
- 2) Jarak antar gording = (a1)
- 3) Lokasi = Tasikmalaya
- 4) Muatan Angin (q) =  $25 \text{ kg/m}^2$  (jarak lebih 5 km dari pantai)
- 5) Koef. angin tekan =  $(0,02 (\alpha) - 0,4)$
- 6) Koef. angin hisap =  $(-0,4)$
- 7) Angin tekan (Wt) =  $(0,02 (\alpha) - 0,4) \times q \times \text{jarak Gording}$
- 8) Angin hisap (Wh) =  $(-0,4 \times q \times \text{jarak gording})$



Gambar 2.9 Koefisien angin

**3. Momen Maksimum pada Gording**

Gording diletakan di atas beberapa kuda-kuda, sehingga digambarkan sebagai balok menerus. Momen pada gording dapat dihitung dengan menggunakan metode persamaan 3 momen (*clapeyron*).



Gambar 2.10 Gaya yang bekerja pada gording

Dimana, momen pada bentang A-B-C dicari dengan persamaan :

$$M_A \left( \frac{L_1}{I_1} \right) + 2M_B \left( \frac{L_1}{I_1} + \frac{L_2}{I_2} \right) + M_C \left( \frac{L_2}{I_2} \right) = - \frac{6(A_1 + A_2) \cdot \alpha_1}{I_1 \cdot L_1} - \frac{6(A_1 + A_2) \cdot \alpha_2}{I_2 \cdot L_2} \quad (2.4.5)$$

Berdasarkan persamaan di atas didapat momen maksimum yang terjadi pada gording.

**4. Kontrol Tegangan dan Lentutan Terhadap Momen**

1. Kontrol Tegangan

Berdasarkan Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia 1984, kontrol tegangan untuk mutu baja yang telah direncanakan.

$$\bar{\sigma} = \frac{f_y}{1,5} \quad (2.4.6)$$

Akibat beban tetap, yaitu beban mati + beban hidup.

$$\sigma = \frac{M_x}{\omega_y} + \frac{M_y}{\omega_x} \leq \bar{\sigma} \quad (2.4.7)$$

Beban sementara yaitu beban mati, beban hidup, beban angin, beban hujan, maka besarnya tegangan dasar dapat dinaikan sebesar 30%, berdasarkan PPBBI 1984 Bab 2 pasal 2.2.(8).

$$\sigma = \frac{M_x}{\omega_y} + \frac{M_y}{\omega_x} \leq 1,3 \bar{\sigma} \quad (2.4.8)$$

Keterangan :  $\sigma$  = tegangan yang bekerja (kg/cm<sup>2</sup>)

$\bar{\sigma}$  = tegangan ijin maksimal (kg/cm<sup>2</sup>)

$M_x$  = beban arah x (kgm).

$M_y$  = beban arah y (kgm).

## 2. Kontrol Lendutan

Lendutan maksimum akibat beban mati dan beban hidup menurut PPBBI 1984 adalah :

$$F < \frac{1}{250} L \quad (2.4.9)$$

Pada balok yang terletak bebas atas dua tumpuan, L adalah bentang balok tersebut, pada balok menerus atas banyak peralatan, L adalah jarak antara titik-titik beloknya akibat beban mati, sedangkan pada balok kantilever L adalah dua kali panjang kantilevernya. Lendutan yang diijinkan untuk gording (pada arah x terdiri 2 wilayah yang ditahan oleh *trackstang*).

$$f_x = \frac{5 \cdot q_x \cdot L^4}{348 \cdot E \cdot I_y} + \frac{1 \cdot P_x \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \quad (2.4.10)$$

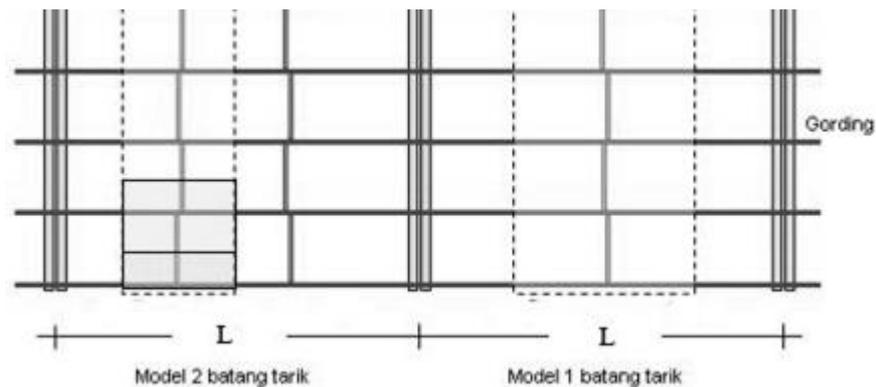
$$f_y = \frac{5 \cdot q_y \cdot L^4}{348 \cdot E \cdot I_x} + \frac{1 \cdot P_y \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (2.4.11)$$

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \text{ketentuan : } f \leq F$$

- Keterangan:
- $f_x$  = lendutan arah x (cm)
  - $f_y$  = lendutan arah y (cm)
  - $E$  = modulus elastisitas (MPa).
  - $I_x$  = momen inersia penampang x (cm<sup>4</sup>).
  - $I_y$  = momen inersia penampang y (cm<sup>4</sup>).

## 5. Perencanaan Sagrod

Batang tarik (*Trackstang*) atau dikenal dengan sagrod berfungsi untuk mengurangi lendutan gording pada arah sumbu x (miring atap) sekaligus untuk tegangan lendutan yang timbul pada arah x.



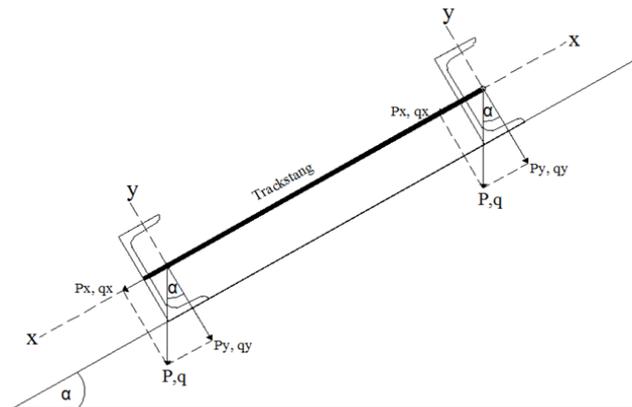
Gambar 2.11 Pemodelan batang tarik

Beban-beban yang dipikul oleh trackstang yaitu sejajar bidang atap (sumbu x), maka gaya yang bekerja adalah gaya tarik  $G_x$  dan  $P_x$ .

$G_x$  = berat sendiri gording + penutup atap sepanjang sumbu x

$P_x$  = beban hidup arah sumbu x

$$P_{\text{total}} = G_x + P_x = (q_x \cdot L) + P_x$$



Gambar 2.12 Rencana batang tarik

Jika batang tarik yang dipasang dua buah, maka per batang tarik adalah:

$$P = \frac{P_{\text{total}}}{2} = \frac{(q_x \cdot L) + P_x}{2} \quad (2.4.12)$$

$$= \frac{P}{F_n} \leq \bar{\sigma} \quad (2.4.13)$$

$$F_n = \frac{P}{\sigma} \quad (2.4.14)$$

- Keterangan:
- P = beban hidup
  - $q_x$  = beban mati arah x
  - L = lebar bentang
  - $F_n$  = gaya yang terjadi
  - $\sigma$  = tegangan yang bekerja
  - $\bar{\sigma}$  = tegangan ijin

## 6. Pembebanan Kuda-kuda

### 1. Beban Mati ( $q_D$ )

Beban mati terdiri dari berat penutup atap, berat sendiri gording, dan berat penutup plafon dan alat pengantung

## 2. Beban Hidup (qL)

Beban hidup diperhitungkan sebesar  $P = 100$  kg, sesuai PPPURG 1987.

## 3. Beban Angin (qW)

$$\text{a) Angin Tekan (W)} = (0,02 \cdot \alpha - 0,4) \cdot q$$

Beban angin per joint :

$$P = W \times \text{jarak gording} \times \text{jarak kuda-kuda}$$

Distribusi beban angin terhadap arah horizontal (x) dan vertikal (y)

$$\text{yaitu :} \quad W_{tx} = P \sin \alpha$$

$$W_{ty} = P \cos \alpha$$

$$\text{b) Angin Hisap (W)} = (-0,4) \cdot q$$

Beban angin per joint :

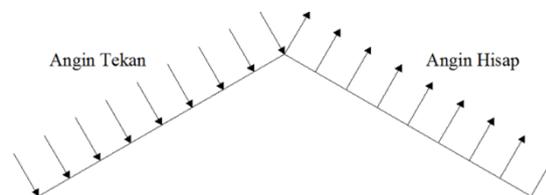
$$P = W \times \text{jarak gording} \times \text{jarak kuda-kuda}$$

Sementara itu, distribusi beban angin terhadap arah horizontal (x) dan vertikal (y) yaitu sebagai berikut :

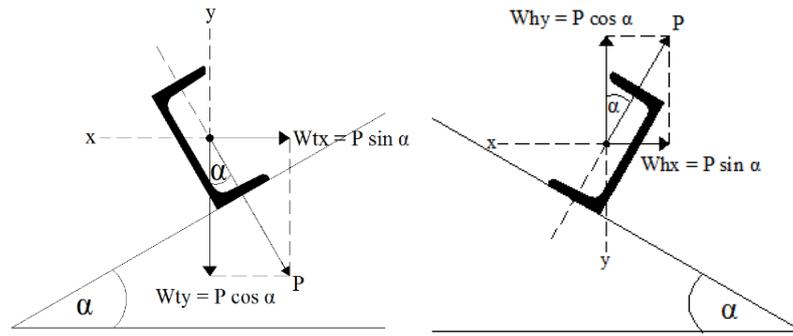
$$W_{hx} = P \sin \alpha$$

$$W_{hy} = P \cos \alpha$$

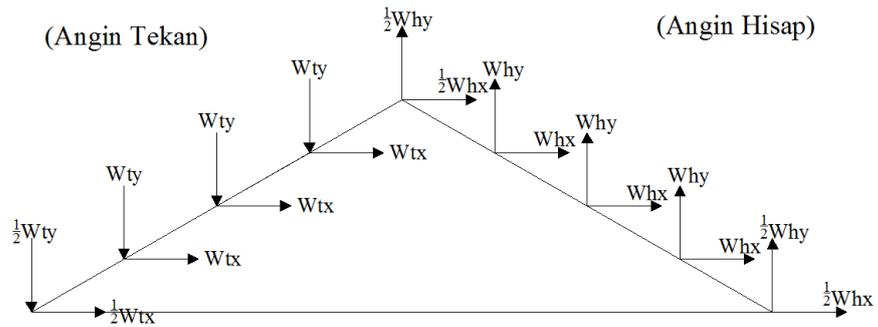
Beban Angin kiri



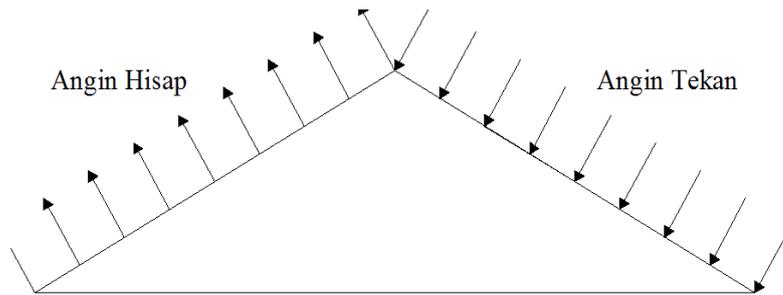
Gambar 2.13 Arah beban angin kiri



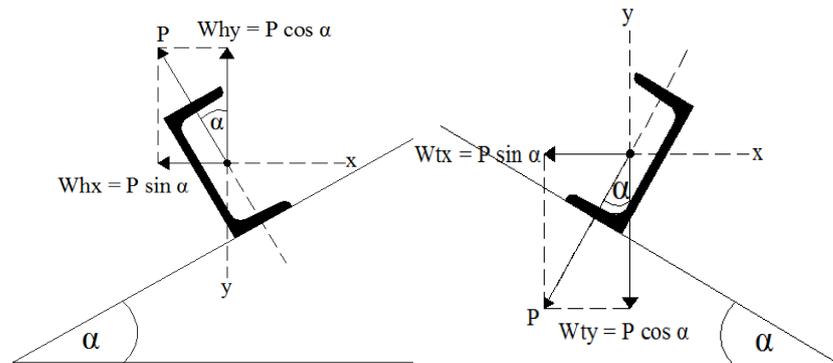
Gambar 2.14 Distribusi angin tekan dan hisap pada beban angin kiri



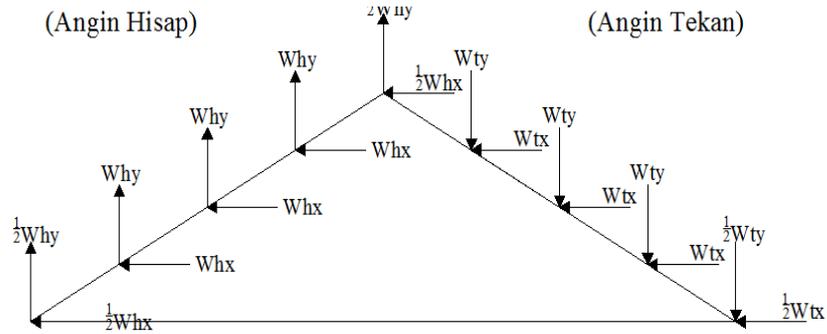
Gambar 2.15 Beban angin kiri



Gambar 2.16 Arah beban angin kanan



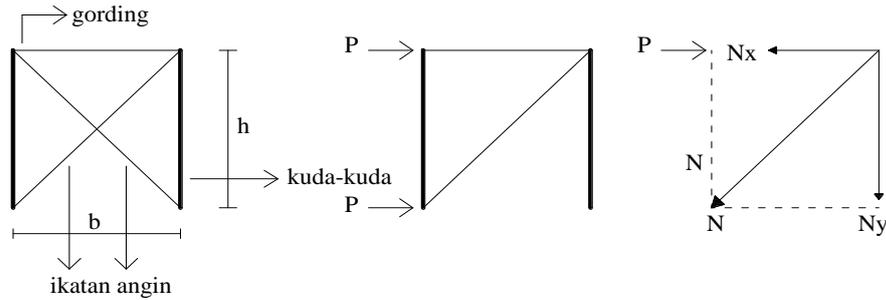
Gambar 2.17 Distribusi Angin Tekan dan Hisap pada Beban Angin Kanan



Gambar 2.18 Beban Angin Kanan

**7. Ikatan Angin**

Ikatan angin (*bracing*) hanya bekerja menahan gaya normal (*axial*). Adapun cara kerjanya adalah apabila salah satu ikatan angin bekerja sebagai batang tarik, maka yang lainnya tidak menahan gaya apapun. Sebaliknya apabila arah angin berubah, maka secara bergantian batang tersebut bekerja sebagai batang tarik.



Gambar 2.19 Pembebanan pada ikatan angin

$$\beta = \text{arc tg} \left( \frac{\text{panjang sisi miring}}{\text{jarak kuda - kuda}} \right) \tag{2.4.15}$$

$$\sum H = 0 \rightarrow N_x = P \tag{2.4.16}$$

$$N \cos \beta = P \tag{2.4.17}$$

$$N = P / \cos \beta \tag{2.4.18}$$

$$Fn = N/\bar{\sigma} \quad (2.4.19)$$

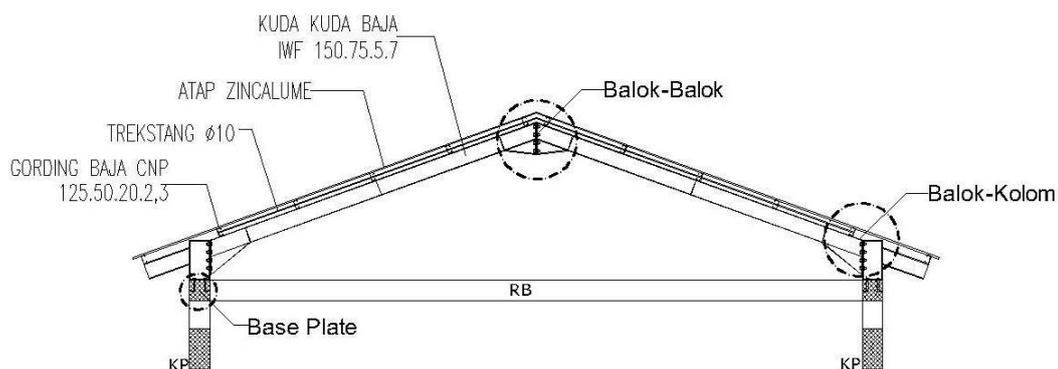
$$Fbr = 125\% Fn \quad (2.4.20)$$

$$Fbr = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (2.4.21)$$

$$d = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \cdot Fbr}{\pi}} \quad (2.4.22)$$

## 8. Perencanaan Sambungan

Struktur baja merupakan gabungan dari beberapa komponen batang yang disambungkan dengan alat pengencang, salah satunya sambungan baut. *Gable frame* memiliki 3 jenis sambungan, yaitu sambungan *base plate*, balok-balok dan kolom-balok. Berikut gambar sambungan pada *gable frame*:

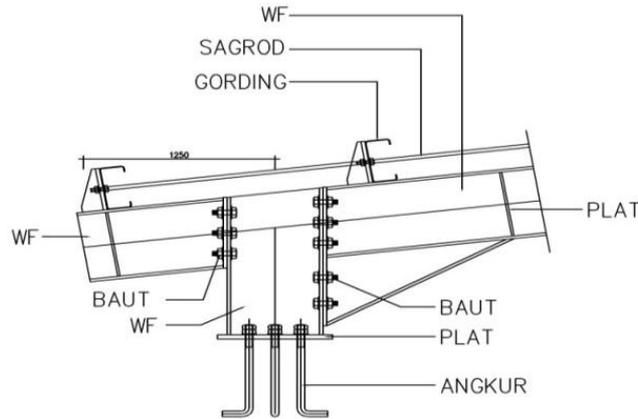


Gambar 2.20 Sambungan pada *Gable Frame*

Sambungan baut adalah Jenis sambungan yang paling banyak digunakan pada rangka baja. parameter sambungan baut sebagai berikut:

- Minimal dipakai 2 buah baut
- Jarak minimum antar baut =  $3 \times df$

- Jarak minimum baut menuju ujung profil =  $1,5 \times df$   
 dimana :  $df$  = diameter baut



Gambar 2.21 Sambungan baut balok dan kolom

Sambungan harus direncanakan sesuai dengan beban yang bekerja pada batang yang disambung. Sambungan pada struktur atap *gable frame* terdiri atas :

Sambungan baut yang dibebani geser dapat gagal dalam satu atau beberapa mode kegagalan. Mode tersebut adalah mode kegagalan tumpu pada material yang disambungkan. Untuk menghitung kapasitas tumpu yang lebih rendah dari dua batang berdasarkan ketebalan dan kuat tariknya. Kuat tumpu pelat yang mengalami kontak dengan baut ditentukan dengan rumus berikut berdasarkan Peraturan Pembebanan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI) 1984 pasal 8.2 yaitu:

- 1) Tegangan dasar

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}_t}{1,5} \tag{2.4.23}$$

- 2) Tegangan geser baut

$$\bar{\sigma}_{gs} = 0,6 \bar{\sigma} \tag{2.4.24}$$

- 3) Tegangan tarik baut

$$\bar{\sigma}_{tr} = 0,7 \bar{\sigma} \quad (2.4.25)$$

- 4) Tegangan tumpu/desak

$$\bar{\sigma}_{tu} = 1,5 \bar{\sigma} \rightarrow S_1 \geq 2d \quad (2.4.26)$$

$$\bar{\sigma}_{tu} = 1,2 \bar{\sigma} \rightarrow 1,5d \leq S_1 \leq 2d \quad (2.4.27)$$

- 5) Menentukan kekuatan satu baut

$$N_{gs} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times \sigma_{gs} \quad (2.4.28)$$

$$Nt_p = t \times d \times \bar{\sigma}_{tu} \quad (2.4.29)$$

- 6) Jumlah baut yang dibutuhkan

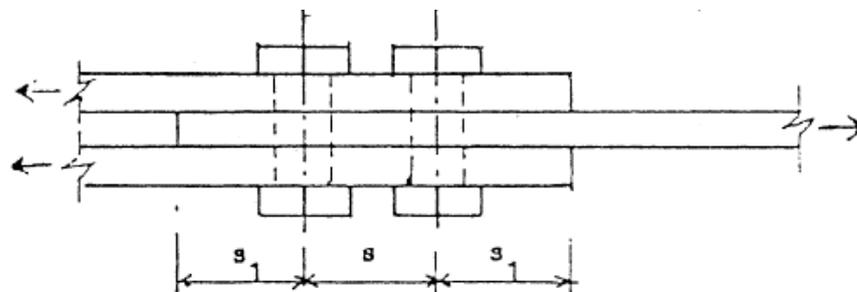
$$n = \frac{N}{N'} \quad (2.4.30)$$

Keterangan:  $S$  = jarak dari sumbu baut yang paling luar ke tepi bagian yang disambung (mm)

$D$  = diameter baut (mm)

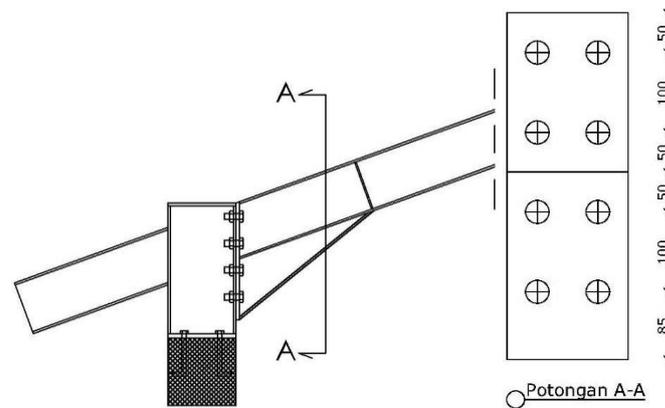
$\bar{\sigma}$  = tegangan dasar ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

- 7) Banyaknya baut yang dipasang pada satu baris yang sejajar arah gaya tidak boleh lebih dari 5 buah.



Gambar 2.22 Letak sambungan baut

- 8) Jarak antara sumbu baut paling luar ke tepi atau ke ujung bagian yang disambung, tidak boleh kurang dari  $1,2 d$  dan tidak boleh lebih besar dari  $3 d$  atau  $6 d$ . Dimana  $t$  merupakan tebal terkecil bagian yang disambungkan.



Gambar 2.23 Geometri penempatan baut

- 9) Pada sambungan yang terdiri dari suatu baris baut, jarak dari sumbu ke sumbu dari 2 baut yang berurutan tidak boleh kurang dari  $2,4 d$  dan boleh lebih dari  $7 d$  atau  $14 t$ .

#### 2.4.1.1 Perencanaan Struktur Baja Menggunakan SAP 2000 versi 22.0.0

Adapun tahapan analisis gaya batang pada rangka atap baja menggunakan program SAP 2000 versi 22.0.0 sebagai berikut:

1. Menggambar model atap dengan model *2D trusses* dengan tumpuan sendi-rol serta panjang batang sesuai perhitungan.
2. Mendefinisikan beban yang bekerja pada atap.
3. Masukan beban yang bekerja, seperti beban mati, beban hidup, beban angin kanan dan beban angin kiri.
4. *Run analysis*, untuk mendapat gaya dalam pada setiap batang.

5. Cek dimensi profil batang hasil perhitungan batang tarik dan batang tekan.

#### 2.4.2 Pelat Lantai

Menurut Asroni (2010:191), pelat beton bertulang yaitu struktur tipis yang dibuat dari beton bertulang dengan bidang yang arahnya horizontal, dan beban yang bekerja tegak lurus pada bidang struktur tersebut. Pelat merupakan komponen struktur horizontal yang banyak digunakan pada bangunan sipil baik sebagai lantai bangunan, lantai atap suatu gedung, lantai kendaraan jembatan, maupun lantai pada dermaga. Beban-beban yang bekerja pada pelat beton bertulang umumnya adalah beban tegak lurus bidangnya atau beban gravitasi yang berupa beban mati dan beban hidup, beban tersebut menyebabkan pelat mengalami momen lentur sehingga pelat beton bertulang direncanakan seperti pada kasus balok beton bertulang.

Bila perbandingan antara panjang dan lebar pelat tidak melebihi 2, digunakan penulangan 2 arah.

Jenis-jenis pelat dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pelat satu arah (*one way slab*). Pelat yang hanya ditumpu di kedua sisinya, kemudian 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. Memiliki rasio  $\frac{l_y}{l_x} \geq 2$
2. Sistem pelat rusuk (*Joist Construction*). Sistem pelat ini terdiri dari pelat beton dengan ketebalan 50 hingga 100 mm, yang ditopang oleh sejumlah rusuk dengan jarak beraturan. Rusuk ditopang oleh balok induk utama yang langsung menumpu pada kolom.

3. Pelat dua arah. Pelat yang keempat sisinya ditumpu oleh balok dengan perbandingan  $\frac{l_x}{l_y} \leq 2$ , perhitungan pelat didasarkan umumnya dilakukan dengan pendekatan dua arah yang tercantum dalam tabel momen pelat dua arah akibat beban terbagi rata. Sistem pelat dua arah dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berikut:

a. Sistem balok-pelat dua arah

Pada sistem struktur ini pelat beton ditumpu oleh balok di keempat sisinya. Beban dari pelat ditransfer ke keempat balok penumpu yang selanjutnya mentransfer bebannya ke kolom.

b. Sistem slab datar (flat slab)

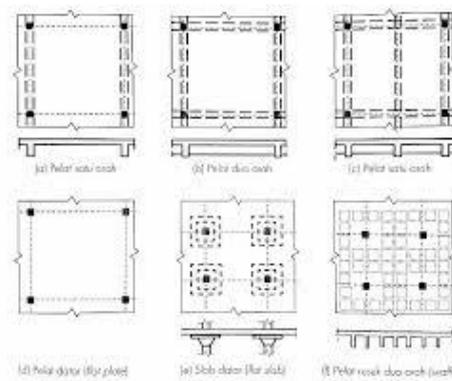
Ini merupakan sistem struktur pelat beton dua arah yang tidak memiliki balok penumpu di masing-masing sisinya. Beban pelat ditransfer langsung ke kolom.

c. Sistem pelat datar (flat plate)

Sistem ini terdiri dari pelat yang tertumpu langsung ke kolom tanpa adanya penebalan panel dan kepala kolom. Potensi kegagalan struktur terbesar akan timbul akibat geser pons, yang akan menghasilkan tegangan tarik diagonal.

4. Pelat dua arah berusuk dan pelat waffle

Ini merupakan sistem pelat dua arah dengan ketebalan pelat antara 50 mm hingga 100 mm yang ditumpu oleh rusuk-rusuk dalam dua arah. Jarak antar rusuk antara 500 mm hingga 750 mm.



Gambar 2.24 Jenis-jenis pelat

### 2.4.2.1 Penentuan Lebar Pelat

Syarat tebal pelat minimum menurut SNI 2847-2013 Pasal 9.5.3 adalah sebagai berikut :

- a. Untuk  $\alpha_{fm} \leq 0,2$  ketebalan pelat minimum adalah sebagai berikut ini :
  1. Pelat tanpa penebalan : 125 mm
  2. Pelat dengan penebalan : 100 mm
- b. Untuk  $0,2 < \alpha_{fm} < 0,2$  ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini :

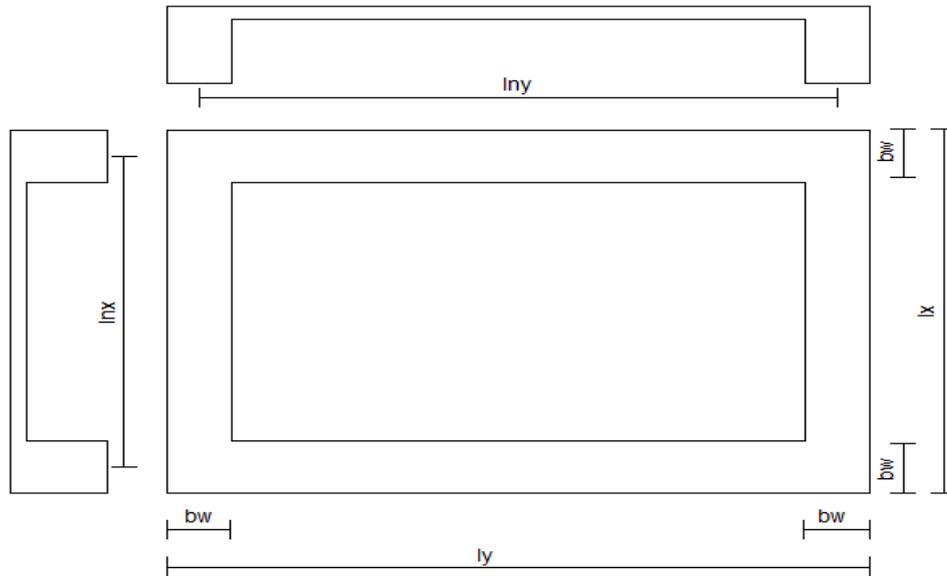
$$h = \frac{\ell_n \left[ 0,8 + \frac{f_y}{1400} \right]}{36 + 5 \cdot \beta \cdot (\alpha_m - 0,2)} \quad (2.4.31)$$

Dan tidak boleh kurang dari 120 mm.

- c. Untuk  $\alpha_{fm} \geq 2,0$  ketebalan pelat minimum harus memenuhi persamaan sebagai berikut ini :

$$h = \frac{\ell_n \left[ 0,8 - \frac{f_y}{1400} \right]}{36 - 9 \cdot \beta} \quad (2.4.32)$$

Dan tidak boleh kurang dari 90 mm.



Gambar 2.25 Pelat

Keterangan :

$h$  = tebal pelat minimum (cm)

$f_y$  = tulangan leleh baja tulangan (Mpa)

$\alpha$  = rasio kekuatan lentur penampang balok terhadap kuat lentur pelat dengan lebar yang dibatasi secara lateral oleh garis sumbu tengah dari panel-panel yang bersebelahan (bila ada) pada tiap sisi balok.

$\alpha_{fm}$  = nilai rata-rata  $\alpha$  untuk semua balok pada tepi-tepi dari suatu panel.

$\beta$  = rasio bentang bersih dalam suatu arah memanjang terhadap arah memendek dari pelat dua arah.

$l_n$  = panjang bentang bersih dalam arah memanjang dari konstruksi dua arah, diukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok dan muka ke muka balok atau tumpuan lain pada kasus lainnya.

$B_w$  = Lebar balok (mm)

d. Beban yang bekerja pada pelat

$$q_U = 1,2 \cdot q_D + 1,6 \cdot q_L \quad (2.4.33)$$

Keterangan:

$q_U$  = beban ultimit.

$q_D$  = beban mati pelat.

$q_L$  = beban hidup pelat

#### 2.4.2.2 Tebal Efektif Pelat

Untuk menentukan tinggi efektif pelat ditinjau dari dua arah yaitu:

Arah x  $d_x$  = tebal pelat – selimut beton –  $\frac{1}{2} \cdot \emptyset$  tulangan arah x

Arah y  $d_y$  = tebal pelat – selimut beton –  $\frac{1}{2} \cdot \emptyset$  tulangan arah y

#### 2.4.2.3 Momen

Mencari momen yang bekerja pada arah sumbu x dan y, dengan bantuan tabel momen Marcus.

		$l_y / l_x$																		
		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	>2,5		
I		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	44	52	59	66	73	78	84	88	93	97	100	103	106	108	110	112	125	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	44	45	45	44	44	43	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	25	
II		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	25	28	31	34	36	37	40	40	40	41	41	41	42	42	42	42	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	21	20	19	18	17	16	14	13	12	12	11	11	11	11	10	10	8
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	52	59	64	69	73	76	79	81	82	83	83	83	83	83	83	83	83	83
III		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	28	33	38	42	45	48	51	53	55	57	58	59	59	60	61	61	63	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	28	28	28	27	26	25	23	22	21	19	18	17	17	16	16	16	13	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	68	77	85	92	98	103	107	111	113	116	118	119	120	121	122	122	125	
IV		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	22	28	34	42	49	55	62	68	74	80	85	89	93	97	100	103	125	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	32	35	37	39	40	41	41	41	40	39	38	37	36	35	35	35	25	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	70	79	87	94	100	105	109	112	115	117	119	120	121	122	123	123	125	
IV		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	32	34	36	38	39	40	41	41	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	22	20	18	17	15	14	13	12	11	10	10	9	9	9	9	9	8	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	70	74	77	79	81	82	83	84	84	84	84	84	84	83	83	83	83	83
V		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	31	38	45	53	60	66	72	78	83	88	92	96	99	102	105	108	125	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	37	39	41	41	42	42	41	41	40	39	38	37	36	35	34	33	25	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	84	92	99	104	109	112	115	117	119	121	122	122	123	123	124	124	125	
V		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	37	41	45	48	51	53	55	56	58	59	60	60	60	61	61	62	63	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	31	30	28	27	25	24	22	21	20	19	18	17	17	16	16	15	13	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	84	92	98	103	108	111	114	117	119	120	121	122	122	123	123	124	125	
VI		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	26	31	36	40	43	46	49	51	53	55	56	57	58	59	60	63	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	26	27	28	28	27	26	25	23	22	21	21	20	20	19	19	18	13	
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	55	65	74	82	89	94	99	103	106	110	114	116	117	118	119	120	125	
VI		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	60	65	69	72	74	76	77	78	78	78	78	78	78	78	78	79	79	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	26	29	32	35	36	38	39	40	40	41	41	42	42	42	42	42	42	42
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	21	20	19	18	17	15	14	13	12	12	11	11	10	10	10	10	10	8
VI		$M_{lx} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	60	66	71	74	77	79	80	82	83	83	83	83	83	83	83	83	83	
		$M_{ly} = +0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	55	57	57	57	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
		$M_{tx} = -0,001 \cdot q \cdot l_x^2 \cdot X$	55	57	57	57	58	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57

Keterangan : = Terletak bebas  
 = Terjepit penuh

Gambar 2.26 Momen Pelat yang Menumpu pada Keempat tepinya Akibat Beban Terbagi Rata.

Keterangan:

- k : Koefisien momen yang tergantung dari  $l_y/l_x$  dan kondisi tumpuan (Tabel Marcus)
- q : Beban merata di atas pelat ( $kg/m^2$ )
- $l_x$  : Panjang Bentang Terpendek (m)
- $l_y$  : Panjang Bentang Terpanjang (m)
- $m_{tx}$  : Momen tumpuan arah x persatuan lebar pelat (kg.m)
- $m_{ty}$  : Momen tumpuan arah y persatuan lebar pelat (kg.m)
- $m_{lx}$  : Momen lapangan arah x persatuan lebar pelat (kg.m)
- $m_{ly}$  : Momen lapangan arah y persatuan lebar pelat (kg.m)

### 2.4.2.4 Tulangan

Langkah-langkah dalam menghitung tulangan pelat, yaitu:

1. Menghitung nilai  $d$ , berlaku :

$$d = h - s - \frac{1}{2} \emptyset \quad (2.4.34)$$

2. Menghitung nilai ratio tulangan  $\rho$  :

$$\rho_b = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.4.35)$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.4.36)$$

$$\rho_{\max} = \left( \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.4.37)$$

Rasio tulangan perlu :

$$bd^2 = \frac{Mn}{\rho \cdot f_y \cdot (1 - 0,59 \cdot \frac{f_y}{f'_c} \cdot \rho)} \quad (2.4.38)$$

Dengan persyaratan sebagai berikut:

$$\rho_{\min} < \rho_{\text{perlu}} < \rho_{\max}$$

Sebelum menentukan luas tulangan terlebih dahulu meninjau nilai  $\rho$  yang didapat.

Menghitung tulangan dengan syarat  $\rho_{\min} < \rho \leq \rho_{\max}$ .

Jika  $\rho < \rho_{\min}$ , maka menggunakan  $\rho_{\min}$  maka  $A_s$  yang digunakan  $A_{s_{\min}}$

Jika  $\rho > \rho_{\max}$ , maka pelat dibuat lebih tebal sehingga dilakukan perhitungan ulang.

3. Menentukan luas tulangan ( $A_s$ ) yang diperlukan :

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.4.39)$$

4. Menghitung jumlah tulangan :

$$n = \frac{A_s}{1/4 \cdot \pi \cdot \phi^2} \quad (2.4.40)$$

5. Spasi antara tulangan

$$x = \frac{1000}{n - 1} \quad (2.4.41)$$

$$s \leq 2 \cdot h \text{ dan } s \leq 450 \text{ mm}$$

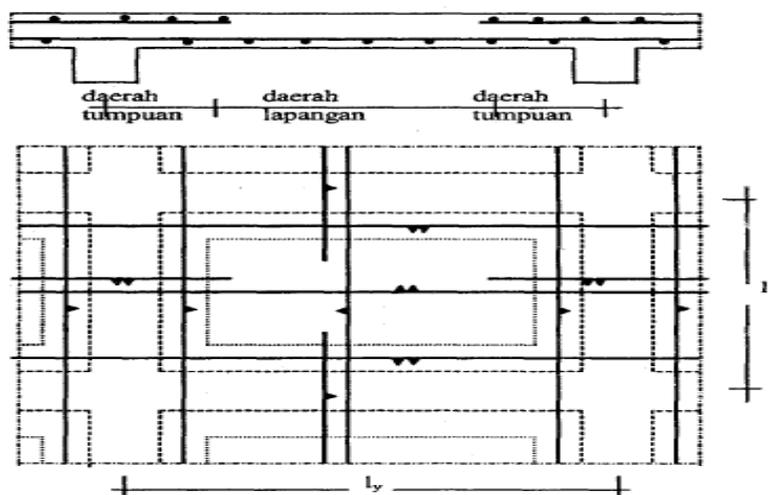
nilai  $s$  diambil yang terkecil

$$A_{s,tul} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot S}{s} \quad (2.4.42)$$

Keterangan:

$A_{s,tul}$  = luas tulangan pakai ( $\text{mm}^2$ )

$A_{s,u}$  = luas tulangan perlu ( $\text{mm}^2$ )



Gambar 2.27 Gambar Contoh Penulangan Pelat Lantai 2 Arah

### 2.4.3 Balok

Balok adalah salah satu dari elemen struktur portal dengan bentang arahnya horizontal, sedangkan portal merupakan kerangka utama dari struktur bangunan, khususnya bangunan gedung. (Asroni, 2010:41).

Balok adalah komponen struktur yang berfungsi menahan gaya-gaya yang bekerja dalam arah transversal terhadap sumbunya, yang menimbulkan momen luar sehingga balok akan melengkung ke bawah atau mengalami lenturan/lendutan. Balok yang mengalami lendutan pada dasarnya ditahan oleh kopel gaya dalam yang berupa tegangan tekan dan tegangan tarik.

Untuk desain awal (*preliminary design*) penampang balok ditentukan sesuai persyaratan SNI-2847-2013 yang disajikan dalam tabel dibawah ini.

Tabel 2.13 Tinggi (h) minimal balok non-pratekan atau pelat satu arah bila lendutan tidak dihitung

Tebal minimum, h				
Komponen struktur	Tertumpu sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
	Komponen struktur tidak menumpu atau tidak dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lainnya yang mungkin rusak oleh lendutan yang besar			
Pelat masif satu-arah	1/20	1/24	1/28	1/10
Balok atau pelat rusuk satu-arah	1/16	2/18,5	1/21	1/8

(Sumber: SNI 2847:2013)

#### Catatan :

Panjang bentang dalam mm.

Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal dan tulangan tulangan Mutu 420 MPa. Untuk kondisi lain, nilai di atas harus dimodifikasi sebagai berikut :

- a. Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis (*equilibrium density*),  $W_c$ , di antara 1440 sampai 1840  $\text{kg/m}^3$ , nilai tadi harus dikalikan dengan  $(1,65 - 0,0003W_c)$  tetapi tidak kurang dari 1,09.
- b. Untuk  $f_y$  selain 420 MPa, nilainya harus dikalikan dengan  $(0,4 + f_y/700)$ .

**2.4.3.1 Menentukan Tulangan Tunggal/Rangkap**

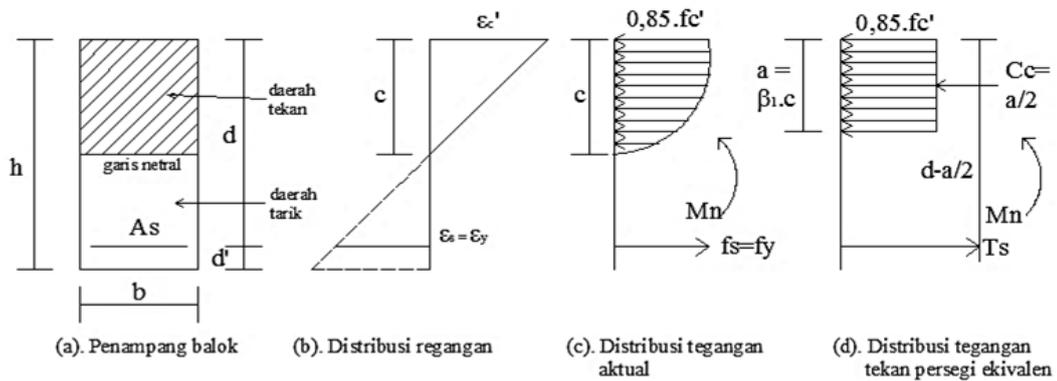
$Mu_{max} \leq Mu \rightarrow$  Balok Bertulangan Rangkap

$Mu_{max} \geq Mu \rightarrow$  Balok Bertulangan Tunggal

$$Mu_{max} = 0,85 \cdot f'_{cx} \beta_1 x_{0,75} C_b x b \left( d - \frac{\beta_1 \cdot 0,75}{2} x C_b \right) \quad (2.4.43)$$

**2.4.3.2 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Tunggal**

Balok dengan tulangan tunggal sering juga disebut dengan balok bertulangan sebelah atau balok dengan tulangan saja. Untuk keperluan hitungan balok persegi panjang dengan tulangan tunggal, berikut ini dilukiskan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton serta notasinya pada gambar berikut ini :



Gambar 2.28 Distribusi Regangan dan Tegangan pada Balok Tunggal

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

Keterangan :

a : tinggi balok tegangan beton tekan persegi ekuivalen =  $\beta_1 \cdot c$  , mm.

$A_s$  : luas tulangan tarik,  $\text{mm}^2$ .

- b : lebar penampang balok, mm.
- c : jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan, mm.
- $C_c$  : gaya tekan beton, kN.
- d : tinggi efektif penampang balok, mm.
- $d_s$  : jarak antara titik berat tulangan tarik dan tepi serat beton tarik, mm.
- $f'_c$  : tegangan tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari, MPa.
- $E_s$  : modulus elastisitas baja tulangan, diambil sebesar 200.000 MPa.
- $f_s$  : tegangan tarik baja tulangan  $E_s \cdot \varepsilon_s$ , dalam MPa.
- $f_y$  : tegangan tarik baja tulangan pada saat leleh, MPa.
- h : tinggi penampang balok, mm.
- $M_n$  : momen nominal aktual, kNm.
- $t_s$  : gaya tarik baja tulangan, kN.
- $\beta_1$  : faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen, yang bergantung pada mutu beton ( $f'_c$ ) sebagai berikut :

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

$\varepsilon'_c$  : regangan tekan beton, dengan  $\varepsilon'_c$  maksimal ( $\varepsilon_{cu}$ ) = 0,003, dimana:

$$\varepsilon'_c = \frac{a}{\beta_1 \cdot d - a} \varepsilon_y \quad (2.4.44)$$

$\varepsilon_s$  : regangan tarik baja tulangan.

$\varepsilon'_s$  : regangan tekan baja tulangan.

$$\varepsilon'_s = \frac{a - \beta_1 \cdot d_s'}{a} \cdot 0,003 \quad (2.4.45)$$

$\varepsilon_y$  : regangan tarik baja tulangan pada saat leleh.

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{200000} \quad (2.4.46)$$

Berdasarkan SNI 2847 -2013 pasal 10.2.6, Apabila balok menahan momen lentur cukup besar, maka pada serat-serat balok bagian atas akan mengalami tegangan tekan dan pada serat-serat balok bagian bawah mengalami tegangan tarik. Untuk serat-serat balok bagian atas yang mengalami tegangan tekan, tegangan ini akan ditahan oleh beton, sedangkan untuk serat-serat balok yang mengalami tegangan tarik akan ditahan oleh baja tulangan, karena kuat tarik beton diabaikan.

1. Gaya tekan beton

Gaya tekan beton dapat diperhitungkan dari hubungan tegangan dan regangan beton, dengan balok tegangan tekan persegi ekuivalen dapat dihitung besar gaya tekan beton  $C_c$  sebagai berikut :

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.4.47)$$

2. Gaya tarik tulangan baja

Gaya tarik baja tulangan ( $T_s$ ) dapat dihitung dengan cara membuat perkalian antara luas baja tulangan dan tegangan lelehnya, yaitu sebagai berikut:

$$T_s = A_s \cdot f_y \quad (2.4.48)$$

3. Luas tulangan longitudinal balok

Karena balok dalam keadaan seimbang, maka gaya tekan beton akan sama dengan gaya tarik baja tulangan, diperoleh luas tulangan balok ( $A_s$ ) sebagai berikut :

$$A_s = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b}{f_y} \quad (2.4.49)$$

## 4. Momen nominal

$$M_n = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) \text{ atau } M_n = T_s \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.4.50)$$

## 5. Faktor momen pikul

Faktor momen pikul (K) didefinisikan diperoleh hitungan/persamaan berikut:

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \rightarrow A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.4.51)$$

$$A_s = \frac{0,85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b}{f_y}, \text{ sehingga } \beta_1 \cdot c = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.4.52)$$

$$M_u = T_s \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (2.4.53)$$

$$M_u = A_s \cdot f_y (d - 0,5 \cdot \beta_1 \cdot c) \quad (2.4.54)$$

$$M_u = \rho \cdot b \cdot d \cdot f_y \left( d - 0,5 \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \right) \quad (2.4.55)$$

$$M_u = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \left( 1 - 0,59 \frac{f_y}{f'_c} \rho \right) \quad (2.4.56)$$

$$b \cdot d^2 = \frac{M_u}{\rho \cdot f_y \left( 1 - 0,59 \frac{f_y}{f'_c} \rho \right)} \quad (2.4.57)$$

Maka,  $\rho \cdot f_y \left( 1 - 0,59 \frac{f_y}{f'_c} \rho \right)$  dapat dinotasikan sebagai K atau faktor momen pikul maksimum, sehingga :

$$b \cdot d^2 = \frac{M_u}{K} \text{ atau } K = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} \quad (2.4.58)$$

## 6. Tinggi blok tegangan beton

$$a = \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot K}{0,85 \cdot f'_c}} \right) d \quad (2.4.59)$$

## 7. Regangan tekan beton

Untuk regangan tekan beton ( $\varepsilon_c'$ ) dibatasi sampai batas retak maksimum ( $\varepsilon_{cu}'$ ) sebesar 0,003. Nilai regangan  $\varepsilon_c'$  ditentukan berdasarkan diagram distribusi regangan didapat rumus :

$$\varepsilon_c' = \frac{a}{\beta_1 \cdot d \cdot a} \varepsilon_y \quad (2.4.60)$$

Regangan tekan beton  $\varepsilon_c'$  harus  $\leq \varepsilon_{cu}' = 0,003$

## 8. Momen rencana

Momen rencana  $M_r$  dihitung dengan cara sebagai berikut:

- a. Diperoleh tinggi balok tegangan tekan beton persegi ekuivalen sebagai berikut :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.4.61)$$

- b. Momen rencana dihitung dengan persamaan :

$$M_r = \phi M_n, \text{ dengan } \phi = 0,9 \quad (2.4.62)$$

### 2.4.3.3 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Rangkap

Balok beton bertulangan rangkap adalah balok beton yang diberi tulangan pada penampang beton daerah tarik dan daerah tekan. Dengan dipasang tulangan pada daerah tarik dan tekan, maka balok akan mendapatkan kelebihan-kelebihan diantaranya :

1. Mengurangi lendutan jangka panjang

Fungsi utama yang paling penting dengan memberikan tulangan tekan adalah mengurangi lendutan jangka panjang akibat beban yang secara kontinyu bekerja pada balok.

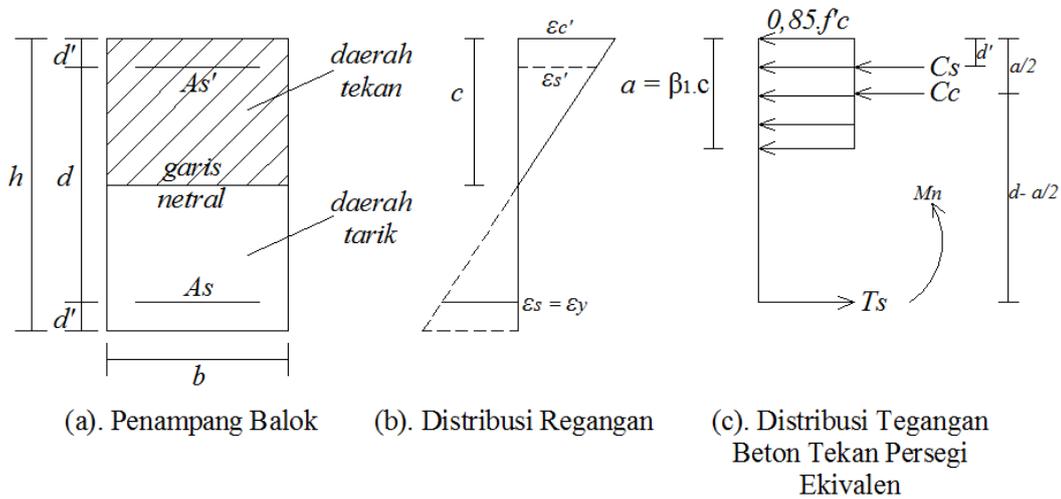
2. Meningkatkan daktilitas

Adanya tulangan tekan akan mengurangi tinggi blok tegangan tekan ekuivalen beton dan menghasilkan keruntuhan tarik beton, disamping itu untuk keperluan perencanaan struktur beton bertulang tahan gempa, disyaratkan bahwa  $\rho' \geq 0,5\rho$ .

3. Memudahkan fabrikasi

Memudahkan penempatan tulangan geser pada posisi yang tepat di dalam bekisting, biasanya tulangan geser diikatkan pada suatu tulangan lentur di sudut-sudutnya.

Distribusi Regangan dan tegangan pada balok dengan penampang beton bertulangan rangkap :



Gambar 2.29 Distribusi Regangan dan Tegangan Balok Tulangan Rangkap

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

Keterangan :

a : tinggi balok tegangan beton tekan persegi ekuivalen (mm).  $a = \beta_1 \cdot c$

$A_s$  : luas tulangan tarik (mm<sup>2</sup>).

$A_s'$  : luas tulangan tekan (mm<sup>2</sup>).

- b : lebar penampang balok (mm).
- c : jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan (mm).
- $C_c$  : gaya tekan beton (kN).
- $C_s$  : gaya tekan baja tulangan (kN).
- d : tinggi efektif penampang balok (mm).
- $d_s$  : jarak anatara titik berat tulangan tarik dan tepi serat beton tarik (mm).
- $d_s'$  : jarak anatara titik berat tulangan tekan dan tepi serat beton tekan (mm)
- $E_s$  : modulus elastisitas baja tulangan, diambil sebesar 200.000 MPa.
- $f'_c$  : tegangan tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari (MPa).
- $f_s$  : tegangan tarik baja tulangan, dalam MPa.  $f_s = \varepsilon_s \cdot E_s$
- $f_s'$  : tegangan tekan baja tulangan, dalam MPa.  $f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s$
- $f_y$  : tegangan tarik baja tulangan pada saat leleh (MPa).
- h : tinggi penampang balok (mm).
- $M_n$  : momen nominal aktual (kNm).
- $T_s$  : gaya tarik baja tulangan (kN).
- $\beta_1$  : faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi ekuivalen yang bergantung pada mutu beton ( $f'_c$ ) sebagai berikut :
- Untuk  $17 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 28 \text{ MPa}$ , maka  $\beta_1 = 0,85$
  - Untuk  $28 \text{ MPa} < f'_c < 55 \text{ MPa}$ , maka  $\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left( \frac{f'_c - 28}{7} \right)$
  - Jika  $f'_c > 55 \text{ MPa}$  maka  $\beta_1 = 0,65$
- $\varepsilon_c'$  : regangan tekan beton, dengan  $\varepsilon_c'$  maksimal 0,003
- $\varepsilon_s$  : regangan tarik baja tulangan.
- $\varepsilon_s'$  : regangan tekan baja tulangan.

$\varepsilon_y$  : regangan tarik baja tulangan pada saat leleh

Pada perencanaan beton bertulang, regangan tulangan tarik selalu diperhitungkan sudah leleh, yaitu  $\varepsilon_s = \varepsilon_y$ . Sedangkan untuk tulangan tekan, regangan tulangan tekan ( $\varepsilon_s'$ ) belum leleh. Nilai regangan tulangan tekan ( $\varepsilon_s'$ ) dapat dihitung dari distribusi regangan dengan menggunakan perbandingan segitiga, dengan penjabaran rumus sebagai berikut :

$$\frac{c}{\varepsilon_{cu}'} = \frac{c - d'}{\varepsilon_s'}, \quad \text{sehingga } \varepsilon_s' = \frac{c - d'}{c} \varepsilon_{cu}' \quad (2.4.63)$$

Dengan memasukan nilai  $a = \beta_1 \cdot c$  atau  $c = a / \beta_1$  dan regangan batas tekan beton  $\varepsilon_{cu}' = 0,003$ , maka diperoleh :

$$\varepsilon_s' = \frac{a - \beta_1 \cdot d_s'}{a} 0,003 \quad (2.4.64)$$

Tegangan tekan baja tulangan  $f_s'$  dihitung dengan rumus berikut, dengan modulus elastisitas ( $E_s$ ) = 200000 MPa. Apabila nilai  $f_s' \geq f_y$ , maka dipakai  $f_s' = f_y$ .

$$f_s' = \frac{a - \beta_1 \cdot d_s'}{a} 600 \text{ dengan ketentuan } f_s' \geq 0 \quad (2.4.65)$$

Dari diagram interaksi tegangan dan regangan di atas didapat persamaan-persamaan berikut:

Momen internal ( $M_{u1}$ ) yang dihasilkan dari gaya tekan pada beton dan gaya tarik ekuivalen pada tulangan baja,  $A_{s1}$

$$T_1 = C_c \quad (2.4.66)$$

$$A_{s1} \cdot f_y = 0,85 f_c' a \cdot b \quad (2.4.67)$$

Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen ( $a$ ) pada balok bertulangan rangkap dihitung dengan rumus :

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.4.68)$$

Nilai momen nominal :

$$M_n = M_{nc} + M_{ns} \quad (2.4.69)$$

$$M_{nc} = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right), \text{ dengan } C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \quad (2.4.70)$$

$$M_{ns} = C_s \left( d - \frac{a}{2} \right), \text{ dengan } C_s = A'_s \cdot f'_s \quad (2.4.71)$$

$$M_r = \phi \cdot M_n, \text{ dengan } \phi = 0,9 \quad (2.4.72)$$

Keterangan :

$M_n$  = momen nominal aktual penampang balok (kNm).

$M_{nc}$  = momen nominal yang dihasilkan oleh gaya tekan beton (kNm).

$M_{ns}$  = momen nominal yang dihasilkan oleh gaya tekan tulangan (kNm).

$M_r$  = momen rencana pada penampang balok (kNm).

Dimana kekuatan momen rencana ( $M_r$ ) harus lebih besar atau sama dengan momen luar rencana  $M_n$ . Pada perencanaan beton bertulang, baja tulangan tarik dimanfaatkan kekuatannya sampai batas leleh, atau tegangan tulangan tarik ( $f_s$ ) besarnya sama dengan tegangan leleh baja tulangan ( $f_y$ ).

1. Batas tulangan tarik leleh, dengan rumus-rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan :

$$a = \frac{0,003 \cdot d_d}{\frac{f_y}{200000} + 0,003} = \frac{600 \cdot d_d}{600 + f_y} \quad (2.4.73)$$

Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen :

$$a_{maks,leleh} = \frac{600 \cdot \beta_1 \cdot d_d}{600 + f_y} \quad (2.4.74)$$

Untuk tulangan tarik yang tidak lebih dari 2 baris, praktis diambil :

$$d_d = d \quad (2.4.75)$$

2. Batas tulangan tekan leleh, dengan rumus-rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

Jarak antara garis netral dan tepi serat beton tekan :

$$c = \frac{0,003 \cdot d_d}{\frac{f_y}{200000} - 0,003} = \frac{600 \cdot d_d}{600 - f_y} \quad (2.4.76)$$

Tinggi blok tegangan beton tekan persegi ekuivalen :

$$a_{min,leleh} = \frac{600 \cdot \beta_1 \cdot d_d}{600 - f_y} \quad (2.4.77)$$

Untuk tulangan tarik yang tidak lebih dari 2 baris, praktis diambil :

$$d_d = d_s' \quad (2.4.78)$$

3. Manfaat nilai  $a_{maks}$  leleh dan  $a_{min}$  leleh pada hitungan beton bertulang Nilai  $a_{maks}$  leleh dan  $a_{min}$  leleh ini berguna untuk mengetahui kondisi tulangan tarik dan tulangan tekan pada suatu penampang balok beton, apakah semua tulangan tarik dan semua tulangan tekan sudah leleh atau belum.

Pada prinsip perencanaan balok beton bertulang, semua tulangan tarik diperhitungkan sudah leleh. Kondisi tulangan tarik sudah leleh atau belumnya dihitung dengan nilai  $a$  (tinggi blok tegangan tekan beton persegi ekuivalen), kemudian dibandingkan dengan  $a_{maks}$  dan  $a_{min}$  sehingga didapat kemungkinan – kemungkinan berikut :

Untuk  $a_{maks}$

- a. Jika nilai  $a \leq a_{\text{maks leleh}}$ , berarti semua tulangan tarik sudah leleh.
- b. Jika nilai  $a > a_{\text{maks leleh}}$ , berarti tulangan tarik pada baris paling dalam belum leleh, maka sebaiknya dimensi balok diperbesar.

Untuk  $a_{\text{min}}$

- a. Jika nilai  $a \geq a_{\text{min leleh}}$ , berarti semua tulangan tekan sudah leleh.
- b. Jika nilai  $a < a_{\text{min leleh}}$ , berarti tulangan tekan pada baris paling dalam belum leleh, sehingga nilai tegangan tekan tulangan masih lebih kecil daripada tegangan lelehnya ( $f_s' < f_y$ ).

Nilai  $a$  (tinggi blok tegangan tekan beton persegi ekuivalen):

$$a = \left( \sqrt{p^2 + q} \right) - p \quad (2.4.79)$$

$$p = \frac{600 \cdot A_s' - A_s \cdot f_y}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \quad (2.4.80)$$

$$q = \frac{600 \cdot \beta_1 \cdot d_s' \cdot A_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \quad (2.4.81)$$

#### 2.4.3.4 Keruntuhan Balok Lentur

Jenis-jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan persentase tulangan baja yang digunakan adalah sebagai berikut :

- a. Keruntuhan tarik (*ductile failure*)

Pada keadaan penampang beton dengan keruntuhan tarik, baja tulangan sudah leleh sebelum beton hancur. Regangan tarik baja tulangan sudah mencapai titik leleh tetapi regangan tekan beton belum mencapai regangan batas,  $\varepsilon_{cu}' = 0,003$  atau  $\varepsilon_s = \varepsilon_y$  tetapi  $\varepsilon_c' < \varepsilon_{cu}'$ . Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan ( $\rho$ ) yang kecil dan disebut dengan *under-reinforced*.

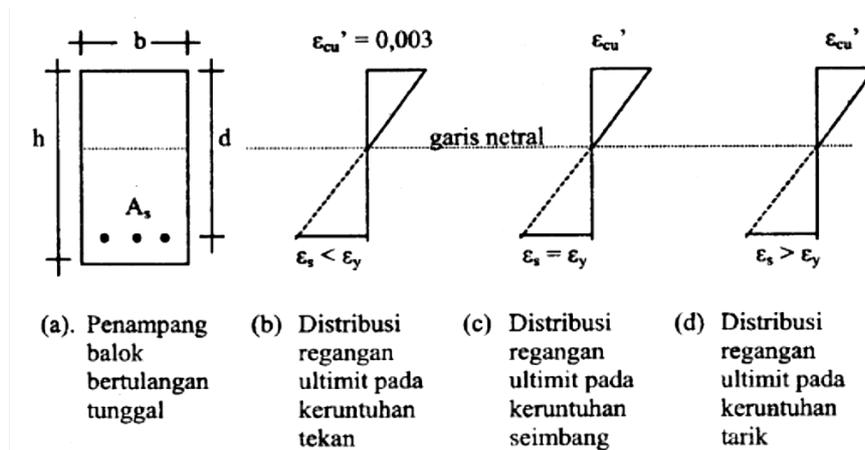
b. Keruntuhan tekan (*brittle failure*)

Pada keadaan penampang beton dengan keruntuhan tekan, beton hancur sebelum baja tulangan leleh. Regangan tekan beton sudah melampaui regangan batas,  $\epsilon_{cu}' = 0,003$  tetapi regangan tarik baja tulangan belum mencapai leleh atau  $\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$  tetapi  $\epsilon_s < \epsilon_y$ . Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan ( $\rho$ ) yang besar dan disebut *over-reinforced*.

c. Keruntuhan seimbang (*balanced*)

Pada penampang beton dengan keruntuhan seimbang, keadaan beton hancur dan baja tulangan leleh terjadi bersamaan. Regangan tekan beton mencapai regangan batas,  $\epsilon_{cu}' = 0,003$  dan regangan tarik baja tulangan mencapai leleh pada saat yang sama, atau  $\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$  dan  $\epsilon_s = \epsilon_y$ . Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang beton dengan rasio tulangan seimbang (*balance*). Rasio tulangan balance diberi notasi  $\rho_b$ .

Distribusi regangan pada penampang beton untuk ketiga jenis keruntuhan lentur tersebut digambarkan seperti dibawah ini :



Gambar 2.30 Distribusi Regangan Ultimit pada Keruntuhan Lentur

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

Keruntuhan pada beton terjadi mendadak karena beton memiliki sifat material yang getas. Dengan demikian peraturan perencanaan merekomendasikan perencanaan balok dengan tulangan yang bersifat *under reinforced* untuk memberikan peringatan yang cukup, berupa defleksi yang berlebihan, sebelum terjadinya keruntuhan.

#### 2.4.3.5 Sistem Perencanaan Balok Lentur

Sistem perencanaan beton bertulang pada penampang balok dengan keadaan seimbang (*balance*) merupakan kondisi yang paling ideal tetapi sulit dan tidak pernah dapat dicapai, sedangkan sistem perencanaan beton bertulang dengan keruntuhan tarik (*under-reinforced*) boleh digunakan, karena mudah dicapai dan dapat dijamin keamanannya karena memberikan peringatan yang cukup, seperti defleksi yang berlebihan, sebelum terjadinya keruntuhan. Secara umum ada tiga macam jenis penampang yang dapat didefinisikan :

- a. Kondisi regangan berimbang (*balanced strain condition*)

Kondisi ini terjadi pada suatu penampang ketika tulangan baja tarik mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003. Penampang demikian dinamakan sebagai penampang seimbang.

- b. Penampang terkendali tekan (*compression controlled section*)

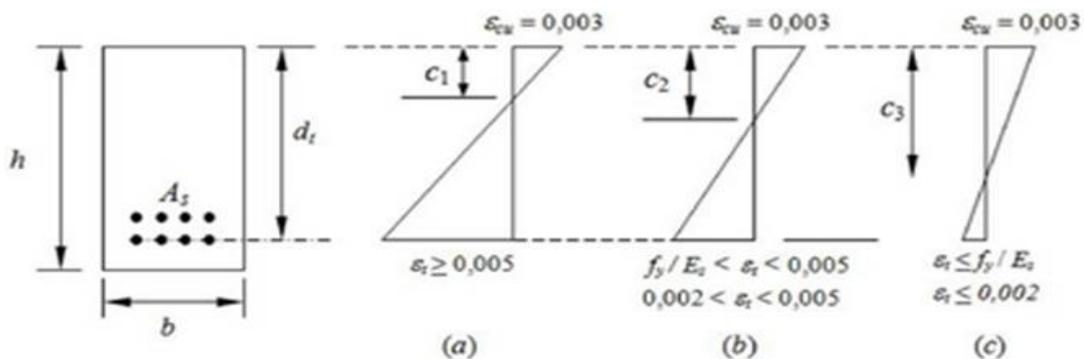
Kondisi ini terjadi apabila regangan tulangan tarik terluar sama atau kurang dari batasan yang diizinkan, sedangkan beton mencapai regangan ultimit sebesar 0,003. Untuk tulangan baja dengan  $f_y = 400$  Mpa, batasan regangan tekan sama dengan 0,002. Kasus ini umumnya terjadi pada komponen struktur yang menerima gaya aksial dan momen lentur.

c. Penampang terkendali tarik (*tension controlled section*)

Terjadi ketika regangan baja mencapai 0,005 atau lebih, yang terjadi ketika beton mencapai regangan ultimitnya sebesar 0,003.

d. Penampang kondisi transisi

Penampang lain yang berada diantara penampang terkendali tekan dan terkendali tarik dinamakan berada pada daerah transisi. Disamping itu ditambahkan pula bahwa regangan tarik  $\epsilon_t$ , pada kuat nominal di daerah transisi, tidak boleh kurang dari 0,004 untuk setiap komponen struktur lentur tanpa beban aksial, ataupun bila ada beban aksial tidak melebihi  $0,1 \cdot f'_c$ .  $A_g$ , dengan  $A_g$  adalah luas gross penampang beton. Berikut gambar yang menjelaskan jenis-jenis penampang pada balok.



Gambar 2.31 Jenis-jenis kondisi penampang balok

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

Keterangan gambar diatas tentang jenis-jenis kondisi penampang pada Balok :

- Penampang terkendali tarik
- Penampang transisi
- Penampang terkendali tekan

- a. Menurut SNI 2847 – 2013 pasal 10.5, agar tulangan yang digunakan tidak terlalu sedikit atau rasio tulangan  $\rho$  tidak terlalu kecil ditentukan rasio tulangan minimum, yaitu :

$$A_s \geq A_{s \min} \text{ atau } \rho \geq \rho_{\min} \text{ dengan } \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (2.4.82)$$

$$A_{s \min} = \rho_{\min} \cdot b \cdot d \quad (2.4.83)$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \text{ atau } \frac{0,25 \sqrt{f'_c}}{f_y} \rightarrow (\text{ambil nilai yang terbesar}) \quad (2.4.84)$$

- b. Pada pasal 10.3.6.3 SNI 2847 – 2013, agar penampang beton dapat mendekati keruntuhan seimbang ditentukan luasan serta rasio tulangan maksimum, yaitu :

$$A_s \leq A_{s \max} \text{ atau } \rho \leq \rho_{\max} \text{ dengan } \rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \quad (2.4.85)$$

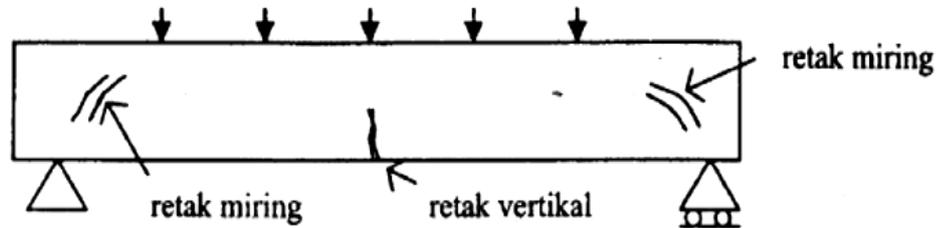
$$A_{s \max} = 0,75 A_{s,b} \text{ dan } \rho_{\max} = 0,75 \cdot \rho_b \quad (2.4.86)$$

#### 2.4.3.6 Kuat Geser Balok

Kekuatan tarik beton jauh lebih kecil dibandingkan kekuatan tekannya, maka desain terhadap geser merupakan hal yang sangat penting dalam struktur beton. Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan keruntuhan karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu, juga retak diagonalnya jauh lebih lebar dibandingkan dengan retak lentur. Perencana harus merancang penampang yang cukup kuat untuk memikul beban geser luar rencana tanpa mencapai kapasitas gesernya.

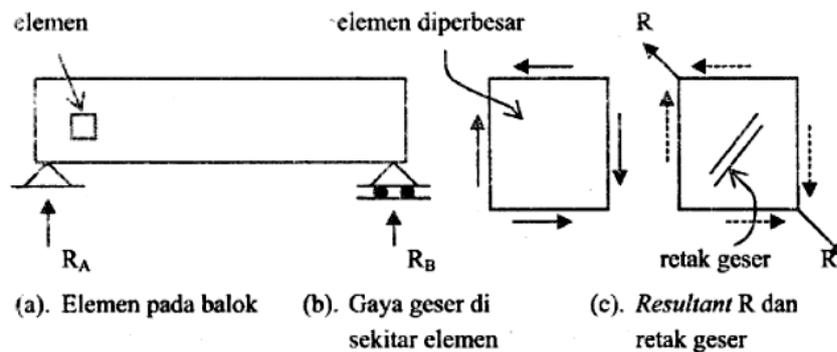
Jika ada sebuah balok yang ditumpu secara sederhana (yaitu dengan tumpuan sendi pada ujung yang satu dan tumpuan rol pada ujung lainnya), kemudian di atas

balok diberi beban cukup berat, balok tersebut dapat terjadi 2 jenis retakan, yaitu retak yang arahnya vertikal dan retak yang arahnya miring.



Gambar 2.32 Jenis retakan pada balok

Retak vertikal terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban lentur, sehingga biasanya terjadi pada daerah lapangan balok, karena pada daerah ini timbul momen lentur paling besar. Retak miring terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan beban geser, sehingga biasanya terjadi pada daerah ujung (dekat tumpuan) balok, karena pada daerah ini timbul gaya geser / gaya lintang paling besar.



Gambar 2.33 Jenis Retakan pada balok akibat gaya geser

Pada gambar di atas terjadi keadaan berikut :

1. Gaya geser ke atas pada permukaan bidang kiri dan gaya geser ke kiri pada permukaan bidang atas, membentuk *resultant* R yang arahnya miring ke kiri-atas.
2. Gaya geser ke bawah pada permukaan bidang bawah, juga juga membentuk *resultant* R yang arahnya miring ke kanan – bawah.

3. Kedua *resultant* yang terjadi dari item 1 dan item 2 tersebut sama besarnya, tetapi berlawanan arah dan saling tarik - menarik.
4. Jika elemen balok tidak mampu menahan gaya tarik dari kedua *resultant* R, maka elemen beton akan retak dengan arah miring, membentuk sudut  $\alpha = 45^\circ$ .

Penulangan geser pada dasarnya mempunyai empat fungsi utama, yaitu :

1. Memikul sebagian gaya geser luar rencana  $V_u$
2. Membatasi bertambahnya retak diagonal
3. Mengikat tulangan memanjang pada posisinya sehingga tulangan memanjang mempunyai kapasitas yang baik untuk memikul lentur.
4. Memberikan semacam ikatan pada daerah beton yang tertekan apabila sengkang ini berupa sengkang tertutup.

Beberapa rumus yang digunakan sebagai dasar untuk perhitungan tulangan geser / begel balok yang tercantum dalam pasal - pasal SNI 2847 – 2013, yaitu sebagai berikut :

1. Pasal 11.1.1 SNI 2847 – 2013, gaya geser rencana, gaya geser nominal, gaya geser yang ditahan oleh beton dan begel dirumuskan :

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.4.87)$$

Dengan :

$V_n$  = Gaya geser nominal (kN)

$V_c$  = Gaya geser yang ditahan oleh beton (kN)

$V_s$  = Gaya geser yang ditahan oleh begel (kN)

2. Pasal 11.1.3.1 SNI 2847 – 2013, nilai  $V_u$  boleh diambil pada jarak  $d$  (menjadi  $V_{ud}$ ) dari muka kolom, sebagai berikut :

$$V_{ud} = V_{ut} + \frac{x}{y} \cdot (V_u - V_{ut}) \quad (2.4.88)$$

3. Pasal 11.2.1 SNI 2847 – 2013, gaya geser yang ditahan oleh beton ( $V_c$ ) dihitung dengan rumus :

$$V_c = 0,17\lambda \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad (2.4.89)$$

4. Pasal 11.4.7.1 SNI 2847 – 2013, gaya geser yang ditahan oleh begel ( $V_s$ ) dihitung dengan rumus :

$$V_s = \frac{(V_u - \phi \cdot V_c)}{\phi} \quad (2.4.90)$$

5. Pasal 11.4.7.9 SNI 2847 – 2013, menyatakan bahwa syarat batas :

$$V_s \geq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.4.91)$$

Jika  $V_s \geq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$ , maka ukuran balok diperbesar.

6. SNI 2847-2013, luas tulangan geser per meter panjang balok yang diperlukan ( $A_{v,u}$ ) dihitung dengan memilih nilai terbesar dari rumus berikut :

- a. Pasal 11.4.7.2

$$A_{v,u} = \frac{V_s \cdot S}{f_y \cdot d} \quad (2.4.92)$$

dengan S (Panjang Balok) = 1000 mm.

- b. Pasal 11.4.6.3

$$A_{v,u} = \frac{b \cdot S}{3 \cdot f_y} \quad (2.4.93)$$

dengan S (Panjang Balok) = 1000 mm.

- c. Pasal 11.4.6.3

$$A_{v,u} = \frac{75 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot S}{1200 \cdot f_y} \quad (2.4.94)$$

dengan S (Panjang Balok) = 1000 mm.

7. Spasi begel (s) dihitung dengan rumus berikut :

$$s = \frac{n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot S}{A_{v,u}} \quad (2.4.95)$$

a. pasal 11.4.5.1 untuk  $V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d$ , maka :

$$s \leq \frac{d}{2} \text{ dan } s \leq 600 \text{ mm} \quad (2.4.96)$$

b. Pasal 11.4.5.3 untuk  $V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d$ , maka :

$$s \leq \frac{d}{4} \text{ dan } s \leq 300 \text{ mm} \quad (2.4.97)$$

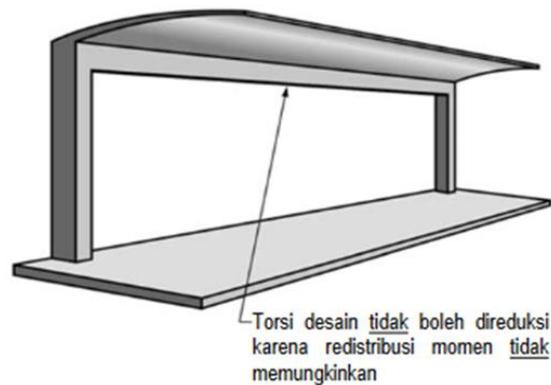
### 2.4.3.7 Momen Puntir (Torsi)

Torsi atau momen puntir adalah momen yang bekerja terhadap sumbu longitudinal balok / elemen struktur. Torsi dapat terjadi karena adanya beban eksentrik yang bekerja pada balok tersebut. Pengaruh torsi pada struktur beton bertulang dapat dibedakan menjadi dua macam :

a. Torsi primer atau torsi kesetimbangan atau torsi statis tertentu.

Jenis torsi ini muncul apabila beban luar tidak memiliki alternatif penyaluran beban kecuali melalui torsi. Dalam kasus ini torsi diperlukan untuk menjaga keseimbangan. Torsi primer tidak dapat direduksi oleh

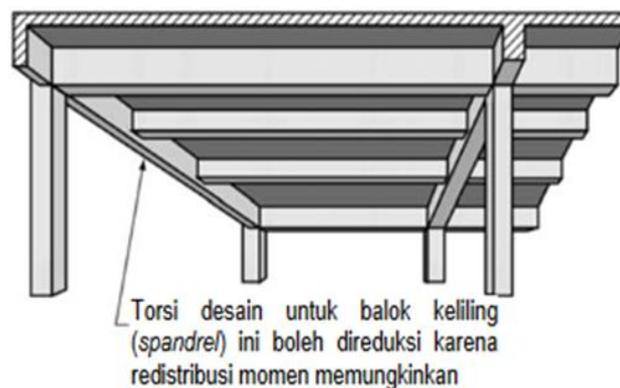
redistribusi gaya dalam atau oleh rotasi batang. Sebagai contoh adalah struktur pelat kantilever dalam gambar berikut :



Gambar 2.34 Torsi primer

- b. Torsi sekunder atau torsi kompatibilitas, atau torsi statis tak tentu.

Torsi ini muncul akibat adanya kompatibilitas atau kekontinuan deformasi dari bagian-bagian struktur yang berdekatan, akibatnya momen torsi tidak dapat dihitung hanya berdasarkan kesetimbangan statik saja. Pada kasus ini dimungkinkan terjadinya redistribusi gaya-gaya dalam sehingga akan muncul kesetimbangan gaya. Momen torsi yang timbul dapat direduksi dengan redistribusi gaya-gaya dalam setelah timbulnya retak. Contoh torsi sekunder dijumpai pada balok-balok pemikul pelat lantai yang dicor monolit pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.35 Torsi sekunder

Menurut pasal 13.6.1 SNI 2847 – 2013, Pengaruh puntir dapat diabaikan jika momen puntir terfaktor  $T_u$  memenuhi syarat berikut : engan  $\phi = 0,75$  Atau tidak melebihi :

$$T_u \leq \frac{\phi \cdot \sqrt{f'_c}}{12} \cdot \left( \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.4.98)$$

Dimana :  $\phi = 0,75$

$A_{cp}$  = Luas penampang bruto

$P_{cp}$  = Keliling penampang bruto

Peraturan SNI 2847-2013 pasal 11.5.3.1 memberikan batasan untuk ukuran penampang balok yang memikul torsi dan gaya geser :

#### 1. Penampang solid

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{T_u \cdot P_h}{1,7 A_{oh}^2}\right)} \geq \phi \left(\frac{V_c}{b \cdot d} + 0,66 \sqrt{f'_c}\right) \quad (2.4.99)$$

#### 2. Penampang berongga

$$\left(\frac{V_u}{b \cdot d}\right) + \left(\frac{T_u P_h}{1,7 A_{oh}^2}\right) \geq \phi \left(\frac{V_c}{b \cdot d} + 0,66 \sqrt{f'_c}\right) \quad (2.4.100)$$

Dengan :

$$x_o = b - 2\left(p + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.4.101)$$

$$y_o = h - 2\left(p + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.4.102)$$

$$A_{oh} = x_o \cdot y_o \quad (2.4.103)$$

$$A_o = 0,85 A_{oh} \quad (2.4.104)$$

$$P_h = 2(x_o + y_o) \quad (2.4.105)$$

Setelah terbentuk retak torsi maka momen torsi ditahan oleh kombinasi tulangan sengkang tertutup dan tulangan memanjang. Berikut perhitungan untuk keduanya :

1. Tulangan sengkang tertutup ( $A_t$ ) dihitung berdasarkan SNI 2847-2013, yaitu :

- a. Pasal 11.5.3.5

$$\phi T_n \geq T_u \quad (2.4.106)$$

- b. Pasal 11.5.3.6

$$T_n = \frac{2A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.4.107)$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2A_o f_{yt} \cot \theta} \quad (2.4.108)$$

Dengan :  $A_t$  = luas satu buah kaki tulangan sengkang ( $\text{mm}^2$ )

$f_{yt}$  = kuat luluh tulangan sengkang  $\leq 400$  MPa.

$s$  = jarak antar tulangan sengkang = 1000 mm.

$\theta$  = sudut retak  $45^\circ$  untuk non-prategang.

$T_n$  =  $T_u / \phi \rightarrow \phi = 0,75$ .

2. Tulangan memanjang ( $A_l$ ) yang dihitung berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 11.5.3.7, yaitu :

$$A_l = \left( \frac{A_t}{s} \right) P_h \left( \frac{f_{yt}}{f_y} \right) \cot^2 \theta \quad (2.4.109)$$

Apabila tulangan torsi diperlukan, maka harus diperiksa terhadap syarat tulangan torsi minimal yang disyaratkan, yaitu :

1. Tulangan sengkang tertutup yang dibutuhkan untuk kombinasi geser dan torsi

( $A_v + 2A_t$ ) diatur dalam SNI 2847-2013 pasal 11.5.5.2 :

$$A_{vt} = A_v + 2.A_t \geq \frac{0,35.b.s}{f_{yt}} ; \text{ untuk } f'c \leq 30 \text{ MPa} \quad (2.4.110)$$

Dimana :

$A_v$  = luas dua kaki tulangan sengkang tertutup untuk geser.

$A_t$  = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk torsi.

2. Berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 11.5.6.1, jarak tulangan torsi tidak lebih dari  $Ph/8$  atau 300 mm.

1. Tulangan memanjang yang diperlukan untuk torsi berdasarkan pasal 11.5.5.3 :

$$A_{l,\min} = \left( \frac{0,41 \cdot \sqrt{f'c} \cdot A_{cp}}{f_y} \right) - \left( \frac{A_t}{s} \right) \cdot Ph \cdot \left( \frac{f_{yt}}{f_y} \right) \quad (2.4.111)$$

Nilai  $A_t/s$  tidak boleh kurang dari  $0,175b/f_{yt}$  . Persyaratan tersebut untuk menjamin bahwa tulangan torsi yang disediakan tidak kurang dari 1% volume beton yang memikul beban momen torsi.

#### 2.4.3.8 Selimut Momen dan Geser Balok

1. Selimut momen balok

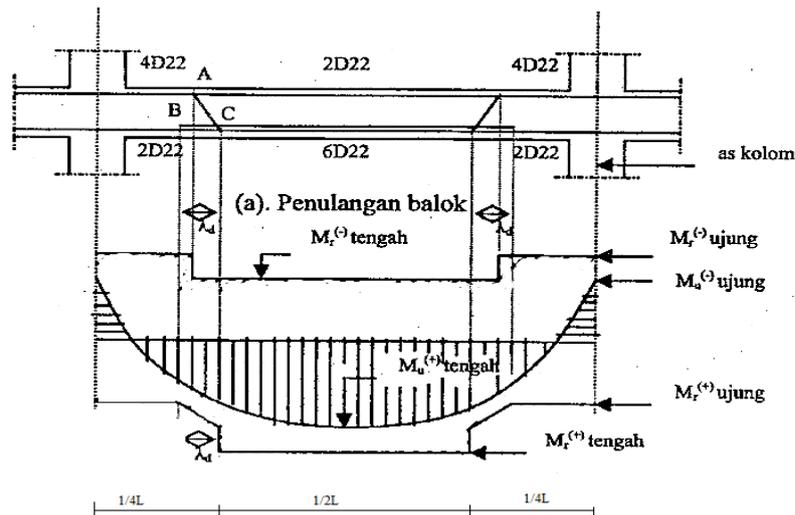
Pemberian tulangan pada struktur balok dimaksudkan agar balok tersebut mampu memikul beban lentur yang terjadi pada balok. Oleh karena itu disyaratkan, bahwa momen dukung ijin yang berada di dalam balok yaitu momen rencana ( $M_r = \phi \cdot M_n$ ) minimal sama dengan momen perlu ( $M_u$ ) akibat bekerjanya kombinasi beban terfaktor yang berada di luar balok. Maka penggambaran selimut momen balok bertujuan memberikan gambaran bahwa

momen rencana balok ( $M_r$ ) harus lebih besar atau sama dengan momen perlu ( $M_u$ ).

Pada penggambaran selimut momen balok perlu direncanakan letak pemutusan tulangan dengan suatu pertimbangan, bahwa tulangan tersebut boleh diputus pada lokasi sedemikian rupa sehingga diberi kesempatan untuk menyalurkan tegangannya sampai ke titik leleh. Hal ini berarti tulangan diputus pada jarak minimal sepanjang  $\lambda_d$  yang ditunjukkan pada gambar selimut momen, yang menyatakan bahwa garis momen rencana berada di luar garis momen perlu.

Adapun langkah-langkah yang ditempuh untuk menggambar selimut momen balok biasanya dilaksanakan dengan urutan berikut:

- 1) Dihitung tulangan longitudinal pada daerah ujung dan lapangan balok.
- 2) Dihitung momen rencana balok, baik momen positif maupun momen negatif.
- 3) Dihitung panjang penyaluran tegangan tulangan  $\lambda_d$  pada tempat pemutusan tulangan.
- 4) Membuat gambar penulangan balok lengkap dengan letak tulangan yang diputus.
- 5) Membuat gambar momen perlu dan momen rencana balok dalam bentuk garis-garis momen, dengan mempertimbangkan panjang penyaluran  $\lambda_d$  sedemikian rupa, sehingga tampak bahwa garis-garis momen rencana berada di luar garis-garis momen perlu.



Gambar 2.36 Contoh Selimut Momen Balok

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

Pada gambar di atas tersebut menunjukkan beberapa hal sebagai berikut :

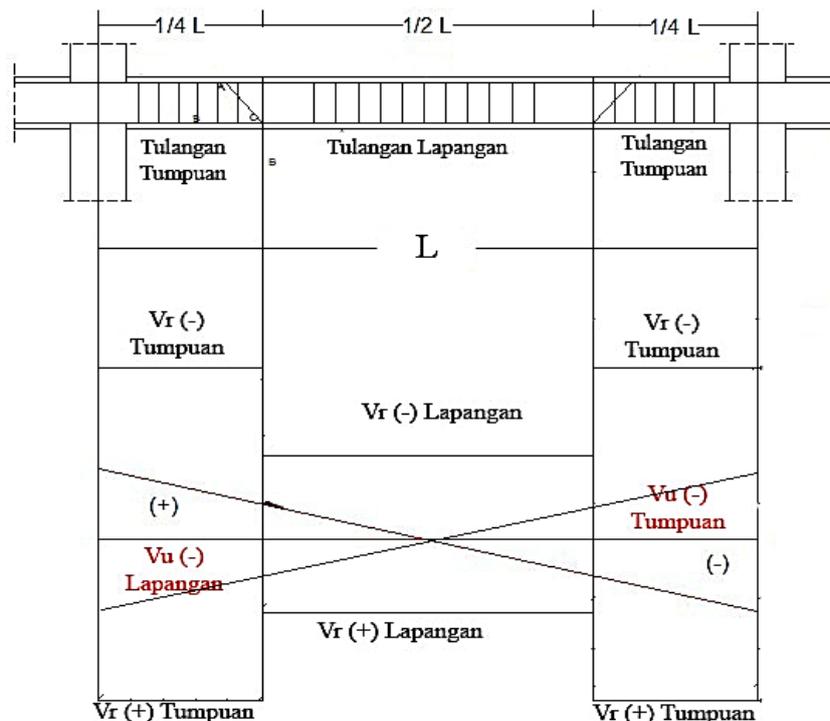
- 1) Tulangan atas pada balok ujung berjumlah 4 batang di titik A, sehingga jumlah tulangan atas di bentang tengah tinggal 2 batang.
- 2) Kekuatan momen rencana  $M_r^{(-)}$  ujung (yang ditahan oleh batang tulangan atas) akan turun secara vertikal di titik A (karena ada 2 batang yang dibengkokkan ke bawah), menjadi momen rencana  $M_r^{(-)}$  tengah (yang tinggal ditahan oleh 2 batang tulangan atas pada bentang tengah balok).
- 3) Tulangan bawah pada balok ujung berjumlah 2 batang, kemudian ada penambahan tulangan 2 batang di titik B (sehingga berjumlah 4 batang) dan penambahan lagi 2 batang di titik C (dari pembengkokan tulangan atas ke bawah, sehingga berjumlah 6 batang pada bentang tengah balok).
- 4) Kekuatan momen rencana  $M_r^{(+)}$  ujung (ditahan oleh 2 batang tulangan bawah) akan tetap sampai di titik B, kemudian secara berangsur-angsur bertambah (ditunjukkan dengan garis lurus-miring) seiring dengan

pengembangan tegangan tulangan (yang ditambahkan pada titik B sebanyak 2 batang, sehingga berjumlah 4 batang) sampai mencapai leleh di titik C, dan naik lagi secara vertikal di titik C tersebut menjadi momen rencana  $M_r^{(+)}$  tengah (karena penambahan 2 batang lagi dari pembengkokan tulangan atas, sehingga berjumlah 6 batang).

- 5) Garis momen perlu mulai dari  $M_u^{(-)}$  ujung kanan ke  $M_u^{(+)}$  tengah sampai  $M_r^{(+)}$  ujung kiri berada di dalam garis momen rencana (diantara batas garis  $M_r^{(-)}$  dan  $M_r^{(+)}$ ).

## 2. Selimut geser balok

Ketentuan mengenai selimut momen balok, juga berlaku terhadap selimut geser balok. Penggambaran selimut geser balok juga bertujuan bahwa momen rencana balok ( $V_r$ ) harus lebih besar atau sama dengan momen perlu ( $V_u$ ).



Gambar 2.37 Contoh selimut geser balok

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

#### 2.4.4 Kolom

Menurut (Ali Asroni, n.d.) Kolom adalah salah satu komponen struktur vertikal yang secara khusus difungsikan untuk memikul beban aksial tekan (dengan atau tanpa adanya momen lentur) dan memiliki rasio tinggi/panjang terhadap dimensi terkecilnya sebesar 3 atau lebih. Kolom menyalurkan beban-beban dari elevasi tinggi menuju elevasi yang lebih bawah hingga ke tanah melalui pondasi. Kolom merupakan batang tekan sehingga keruntuhan pada satu kolom adalah lokasi kritis yang dapat menyebabkan collapse atau runtuhnya lantai yang bersangkutan, dan juga runtuh batas total (ultimate total collapse) atau runtuhnya seluruh struktur.

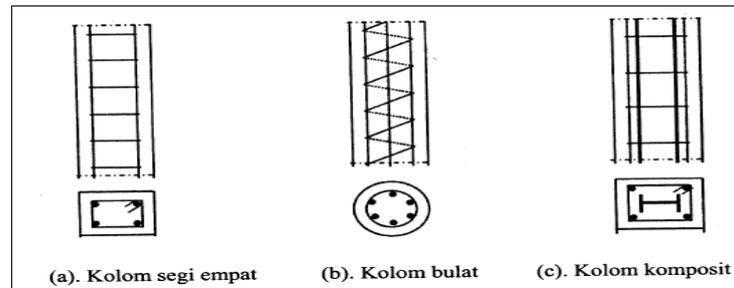
##### 2.4.4.1 Jenis Kolom

Kolom dibedakan beberapa jenis menurut bentuk dan susunan tulangan, serta letak/posisi beban aksial pada penampang kolom. Disamping itu juga dapat dibedakan menurut ukuran panjang-pendeknya kolom dalam hubungannya dengan dimensi lateral.

##### a. Jenis Kolom Berdasarkan Bentuk dan Susunan Tulangan

Berdasarkan bentuk dan susunan tulangan, kolom dibedakan menjadi 3 macam, yaitu sebagai berikut:

- 1) Kolom segi empat, baik berbentuk empat persegi panjang maupun bujur sangkar, dengan tulangan memanjang dan sengkang.
- 2) Kolom bulat dengan tulangan memanjang dan sengkang atau sepiral.
- 3) Kolom komposit, yaitu kolom yang terdiri atas beton dan profil baja struktural yang berada didalam beton.

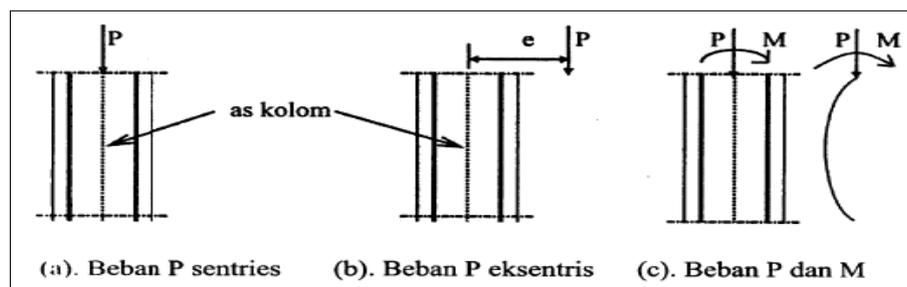


Gambar 2.38 Jenis Kolom Berdasarkan Bentuk dan Susunan Tulangan

(Sumber : Balok dan Pelat Beton Bertulang, Ali Asroni)

b. Jenis Kolom Berdasarkan Letak/Posisi Beban Aksial

Berdasarkan letak beban aksial yang bekerja pada penampang kolom, kolom dibedakan menjadi 2 macam, yaitu kolom dengan posisi beban sentris dan kolom dengan posisi beban eksentris. Untuk kolom dengan posisi beban sentris, berarti kolom ini menahan beban aksial tepat pada sumbu kolom. Pada keadaan ini seluruh permukaan penampang beton beserta tulangan kolom menahan beban tekan. Untuk kolom dengan posisi beban eksentris, berarti beban aksial bekerja diluar sumbu kolom dengan eksentrisitas sebesar  $e$ . Beban aksial  $P$  dan eksentrisitas  $e$  ini akan menimbulkan momen ( $M$ ) sebesar  $M = P.e$ . dengan demikian, kolom yang menahan beban eksentris ini pengaruhnya sama dengan kolom yang menahan beban aksial sentris  $P$  serta momen  $M$ .



Gambar 2.39 Jenis Kolom Berdasarkan Bentuk dan Susunan Tulangan

Keadaan lebih lanjut pada kolom dengan beban aksial eksentrisitas ini masih dibedakan lagi menjadi 4 macam berdasarkan nilai  $e$ , yaitu:

1) Nilai Eksentrisitas  $e$  Kecil

Untuk nilai  $e$  kecil, maka momen  $M$  ( $M = P \cdot e$ ) ditimbulkan juga kecil. Pada keadaan ini kolom akan melengkung sesuai dengan arah momen lentur, sehingga ada sebagian kecil beton serta baja tulangan di sebelah kiri menahan tegangan tarik, dan sebagian besar beton dan tulangan sebelah kanan menahan tegangan tekan. Karena tegangan tarik yang terjadi pada baja tulangan sebelah kiri cukup kecil, maka kegagalan kolom akan ditentukan oleh hancurnya material beton tekan sebelah kanan. Keadaan ini disebut kolom pada kondisi beton tekan menentukan, atau kolom pada kondisi patah tekan.

2) Nilai Eksentrisitas  $e$  Sedang

Untuk nilai  $e$  sedang, maka momen  $M$  yang ditimbulkan juga tidak begitu besar. Pada keadaan ini, sebagian beton serta baja tulangan sebelah kiri menahan tegangan tarik, sedangkan sebagian beton serta baja tulangan sebelah kanan akan menahan tegangan tekan. Tegangan tarik yang terjadi pada baja tulangan sebelah kiri dapat mencapai leleh pada saat bersamaan dengan hancurnya material beton sebelah kanan yang menahan tegangan tekan. Keadaan ini sering disebut kolom pada kondisi seimbang (*balance*).

3) Nilai Eksentrisitas  $e$  Besar

Untuk nilai  $e$  besar, maka momen  $M$  yang ditimbulkan juga besar. Pada keadaan ini, tegangan tarik pada baja tulangan sebelah kiri makin besar sehingga mencapai leleh, tetapi material beton sebelah kanan masih kuat menahan beban tekan, maka dari kegagalan yang terjadi ditentukan oleh lelehnya baja tulangan

tersebut. Keadaan ini sering disebut kolom pada kondisi tulangan tarik menentukan, atau kolom kondisi patah tarik.

#### 4) Nilai Eksentrisitas $e$ Sangat Besar

Karena nilai  $e$  sangat besar, maka momen  $M$  yang ditimbulkan juga sangat besar, sehingga beban aksial  $P$  dapat diabaikan (relatif kecil terhadap momen  $M$ ). Pada keadaan ini seolah olah kolom hanya menahan momen lentur saja, sehingga dapat dihitung seperti balok biasa.

#### c. Jenis Kolom Berdasarkan Panjang Kolom

Berdasarkan ukuran panjang dan pendeknya, kolom dibedakan atas 2 macam yaitu kolom panjang (sering pula disebut kolom langsing atau kolom kurus), dan kolom pendek (sering pula disebut kolom tidak langsing atau kolom gemuk). Beban yang bekerja pada kolom panjang, dapat menyebabkan terjadinya kegagalan/keruntuhan kolom akibat kehilangan stabilitas lateral karena bahaya tekuk ini tidak pernah dijumpai. Jadi kegagalan/keruntuhan pada kolom pendek sering disebabkan oleh kegagalan materialnya (lelehnya baja tulangan dan atau hancurnya beton).

#### 2.4.4.2 Asumsi Dasar Perencanaan Kolom

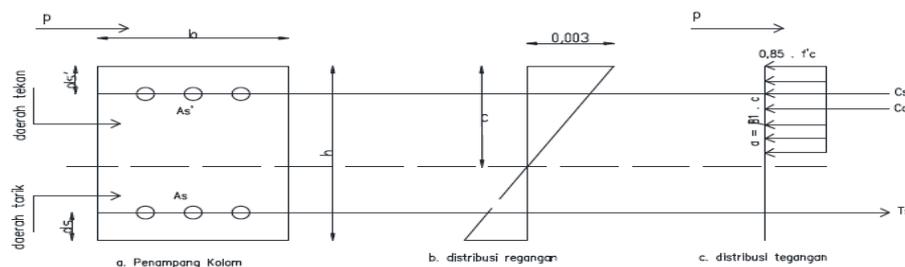
Sama halnya dengan balok, pada perencanaan kolom juga digunakan asumsi dasar.

- a. Pasal 10.2.3 SNI 2847:2013: Regangan maksimum yang dapat dimanfaatkan pada serat tekan beton terluar harus diasumsikan sama dengan 0,003.
- b. Pasal 10.2.4 SNI 2847:2013: Tegangan pada tulangan yang nilainya lebih kecil daripada kekuatan leleh  $f_y$  harus diambil sebesar  $E_s$  dikalikan regangan

baja. Untuk regangan yang nilainya lebih besar dari regangan leleh yang berhubungan dengan  $f_y$ , tegangan pada tulangan harus diambil sama dengan  $f_y$ .

- c. Pasal 10.2.7.1 SNI 2847:2013: Tegangan beton sebesar  $0,85f'_c$  diasumsikan terdistribusi secara merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis lurus yang sejajar dengan sumbu netral sejarak  $a = \beta_1c$  dari serat dengan regangan tekan maksimum.
- d. Pasal 10.3.6 SNI 2847:2013: Desain beban aksial  $\phi P_n$  dari komponen struktur tekan tidak boleh lebih besar dari  $\phi P_{n,max}$ ,
- e. Pasal 10.3.6.2 SNI 2847:2013: Untuk komponen struktur non-prategang dengan tulangan pengikat.

$$P_n(maks) = 0,8[0,85f'_c(A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y] \quad (2.4.112)$$



Gambar 2.40 Diagram Regangan dan Diagram Tegangan pada Penampang Kolom

#### 2.4.4.3 Kelangsingan Kolom

Kelangsingan kolom dapat didefinisikan sebagai rasio antara tinggi kolom dengan jari-jari inersia penampang kolom,  $\lambda = L/r$ . Kelangsingan dapat mengakibatkan tekuk ataupun momen tambahan. suatu kolom disebut kolom pendek apabila memenuhi persyaratan:

$$\frac{klu}{r} \leq 22 \quad (2.4.113)$$

1. Berdasarkan SNI-2847-2013 Pasal 10.10.1(b) komponen struktur tekan yang di-breising (*braced*) terhadap goyangan menyamping:

$$\frac{klu}{r} \leq 34 - 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \leq 40 \quad (2.4.114)$$

2. Untuk kolom yang tidak dapat bergoyang berlaku:

$$\frac{k \cdot \lambda \cdot n \cdot k}{r} \leq 34 - 12 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \quad (2.4.115)$$

$$r = \sqrt{I/A} \quad (2.4.116)$$

Dengan:

$k$  = faktor panjang efektif kolom.

$\lambda_{nk}$  = panjang bersih kolom, m.

$r$  = radius girasi atau jari-jari inersia penampang kolom, m  
=  $0,3 \cdot h$  (jika kolom berbentuk persegi), m.

$M_1$  dan  $M_2$  = momen yang kecil dan yang besar pada ujung kolom, KNm.

$I$  dan  $A$  = momen inersia dan luas penampang kolom,  $m^4$  dan  $m^2$ .

#### 2.4.4.4 Ragam Kegagalan Material pada Kolom

Berdasarkan besarnya regangan pada tulangan baja yang tertarik, penampang kolom dapat dibagi menjadi dua kondisi awal keruntuhan, yaitu:

1. Keruntuhan tarik, yang diawali dengan lelehnya tulangan yang tertarik.

Apabila tulangan tekan diasumsikan telah leleh, dan  $A'_s = A_s$ , maka:

$$P_n = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a \quad (2.4.117)$$

$$Mn = Pn \cdot e = 0,85f'_c b \cdot a \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A'_s \cdot f_y \left( \frac{h}{2} - d' \right) + A_s \cdot f_y \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad \text{atau}$$

$$Mn = Pn \cdot e = 0,85f'_c b \cdot a \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s \cdot f_y \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.4.118)$$

$$\text{Jika } \rho = \rho' = \frac{A_s}{bd}$$

$$Pn = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \left[ \left( \frac{h}{2} - e \right) + \sqrt{\left( \frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{2 \cdot A_s \cdot f_y \cdot (d - d')}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}} \right] \quad (2.4.119)$$

$$\text{Dan jika } m = \frac{f_y}{0,85 \cdot f'_c}, \text{ maka:}$$

$$Pn = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d \cdot \left[ \frac{h - 2e}{2d} + \sqrt{\left( \frac{h - 2e}{2d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \left( 1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \quad (2.4.120)$$

2. Keruntuhan tekan, yang diawali dengan hancurnya beton yang tertekan.

Agar dapat terjadi keruntuhan yang diawali dengan hancurnya beton, eksentrisitas  $e$  gaya normal harus lebih kecil dari pada *eksentrisitas balanced*  $e_b$ , dan tegangan padatan tariknya lebih kecil dari pada tegangan leleh, yaitu  $f_s < f_y$ .

3. Kondisi *balanced*.

Kondisi ini terjadi apabila keruntuhan diawali dengan lelehnya tulangan yang tertarik sekaligus juga hancurnya beton yang tertekan. Apabila  $P_n$  adalah beban aksial dan  $P_{nb}$  adalah beban aksial pada kondisi *balanced*, maka:

$$P_n < P_{nb} \quad \text{keruntuhan tarik}$$

$$P_n = P_{nb} \quad \text{keruntuhan } \textit{balanced}$$

$$P_n > P_{nb} \quad \text{keruntuhan tekan}$$

Keruntuhan *balanced* pada kolom:

$$C_b = \frac{600}{600 + f_y} \cdot d \quad (2.4.121)$$

$$A_b = \beta_1 \cdot C_b = \frac{600}{600 + f_y} \beta_1 \cdot d \quad (2.4.122)$$

Beban aksial nominal pada kondisi balance  $Pnb$  dan eksentrisitasnya  $e_b$  dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$Pnb = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a_b + A'_s \cdot f'_y - A_s \cdot f_y \quad (2.4.123)$$

$$Mnb = 0,85 f'_c b a_b \cdot \left( \frac{h}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + A_s \cdot f_y \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.4.124)$$

$$\text{Dimana } f'_s = 0,003 ; E_s \frac{C_b - d'}{C_b} \leq f_y \quad (2.4.125)$$

#### 2.4.4.5 Kuat Geser Kolom

Perencanaan penampang terhadap geser harus didasarkan pada persamaan sebagai berikut ini:

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} \quad (2.4.126)$$

Komponen struktur yang dibebani tekan aksial berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 11.2.1.2 berlaku persamaan sebagai berikut ini :

$$V_c = 0,17 \left( 1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g} \right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (2.4.127)$$

Adapun persyaratan untuk kuat geser kolom berdasarkan SNI 2847-2013 diantaranya:

1. Pasal 7.10.5.1, tulangan sengkang harus memiliki diameter minimum 10 mm untuk pengikat tulangan memanjang dengan diameter 32 mm atau

kurang, sedangkan untuk tulangan memanjang dengan diameter di atas 32 mm harus diikat dengan sengkang berdiameter minimum 13 mm.

2. Pasal 7.10.5.2, aturan untuk jarak sengkang kolom sebagai berikut:

$s \leq 16$  kali diameter tulangan memanjang.

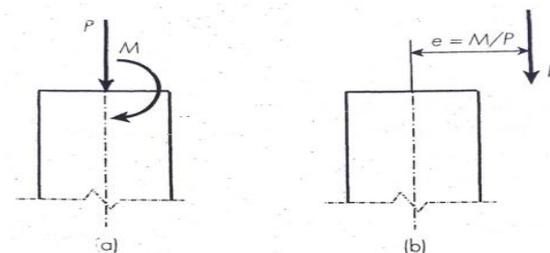
$s \leq 48$  kali diameter tulangan sengkang.

$s \leq$  dimensi terkecil dari penampang kolom.

Pasal 21.3.5.6, pada daerah sepanjang sendi plastis (sepanjang  $\lambda_o$ ), mensyaratkan untuk tetap meninjau  $V_c$  selama gaya tekan aksial termasuk akibat pengaruh gempa melebihi  $A_g f'_c / 10$ . Dalam hal ini sangat jarang gaya aksial kolom kurang dari  $A_g f'_c / 10$ . Sehingga  $V_c$  pada daerah sendi plastis bisa tetap diabaikan ( $V_c = 0$ ), hal ini karena meskipun peningkatan gaya aksial meningkatkan nilai  $V_c$  tetapi juga meningkatkan penurunan ketahanan geser.

#### 2.4.4.6 Kolom Kombinasi Beban Aksial dan Momen Lentur

Kolom dengan beban aksial murni sangat jarang dijumpai pada struktur bangunan gedung beton bertulang. Pada umumnya selain beban aksial tekan, kolom pada saat yang bersamaan juga memikul momen lentur. Dalam mendesain kolom harus diperhitungkan aksi simultan antara gaya aksial dan momen lentur karena kolom dengan beban aksial murni jarang jumpai pada struktur gedung beton bertulang.

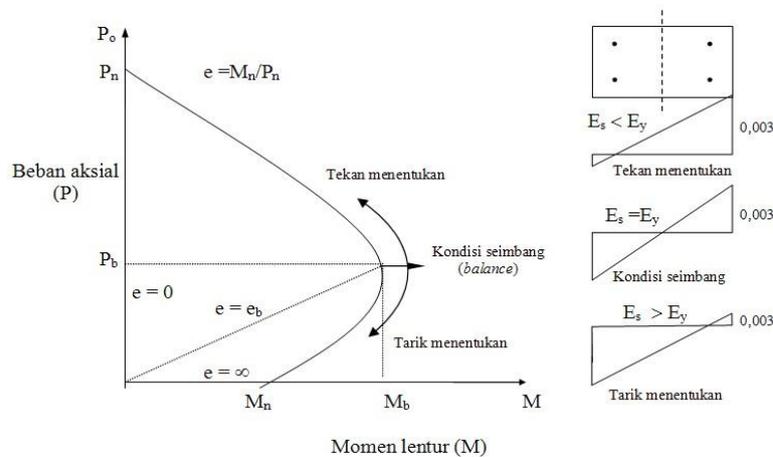


Gambar 2.41 Kolom Dengan Beban Aksial dan Momen Lentur

**2.4.4.7 Diagram Interaksi Kolom**

Beban yang terjadi pada kolom, biasanya berupa kombinasi antara beban aksial dan momen lentur. Besar beban aksial dan momen lentur yang mampu ditahan oleh kolom bergantung pada ukuran/dimensi kolom, dan jumlah serta letak baja tulangan yang ada/terpasang pada kolom tersebut. Hubungan antara beban aksial dan momen lentur digambarkan dalam suatu diagram yang disebut diagram interaksi kolom M–N. Manfaat dari diagram interaksi kolom M–N, yaitu dapat memberikan gambaran tentang kekuatan dari kolom yang bersangkutan.

Untuk satu penampang kolom, dapat digambarkan diagram interaksi kolom yang meliputi 3 macam, yaitu: diagram interaksi kolom untuk kuat rencana, diagram interaksi kolom untuk kuat nominal, dan diagram interaksi kolom untuk kuat batas (kapasitas). Untuk keperluan tersebut, nilai  $P_u$  dan  $M_u$  diplotkan pada sumbu diagram. Kemudian dengan membuat garis horizontal dari beban  $P_u$  dan membuat garis vertikal dari momen  $M_u$ , maka diperoleh titik potong R. Sebaliknya jika titik R berada di luar diagram interaksi kuat rencana, kolom tersebut tidak mampu beban yang bekerja.



Gambar 2.42 Diagram Interaksi Kolom dengan Beban Aksial dan Momen Lentur

### 2.4.5 Dinding Geser/*Shearwall*

Menurut SNI 2847-2002 Pasal 3.21 halaman 7. Dinding geser adalah komponen struktur yang berfungsi untuk meningkatkan kekakuan struktur dan menahan gaya-gaya lateral. Oleh karena itu dengan adanya dinding geser maka sebagian besar beban gempa akan terserap oleh dinding geser tersebut.

Dinding geser (*shear wall*) dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. *Frame wall*

*Frame wall* adalah dinding geser yang berfungsi sebagai penahan gaya lateral, geser dan pengaku pada sisi luar bangunan. Dinding ini terletak diantara dua kolom struktur.

2. *Core wall*

*Core wall* adalah jenis dinding geser yang terletak di pusat-pusat masa bangunan yang berfungsi sebagai pengaku bangunan gedung. Biasanya *core wall* diletakkan pada lubang lift yang berfungsi sebagai dinding lift sekaligus.

3. *Bearing wall*

*Bearing wall* adalah jenis dinding geser yang mempunyai fungsi lain sebagai penahan beban gravitasi.

Berdasarkan SNI 2847-2013 Pasal 11.9.9.3. Spasi tulangan geser horizontal tidak boleh melebihi yang terkecil dari  $lw/5$ ,  $3h$ , dan 450 mm, dimana  $lw$  adalah panjang keseluruhan dinding.

Dasar perhitungan untuk dinding geser menggunakan pendekatan yang sama dengan teori untuk perhitungan kolom.

## 2.5 Perencanaan Desain Struktur Bawah

Struktur bawah merupakan seluruh bagian struktur bangunan yang berada di bawah permukaan tanah, diantaranya pondasi.

### 2.5.1 Pondasi

Menurut (Ali Asroni, n.d.) Secara garis besar struktur bangunan dibagi menjadi 2 bagian utama, yaitu struktur di dalam tanah dan di atas tanah. Struktur bangunan di dalam tanah sering disebut struktur bawah, sedangkan struktur bangunan di atas tanah sering disebut struktur atas. Struktur bawah dari suatu bangunan lazim disebut pondasi, yang bertugas untuk memikul bangunan di atasnya. Seluruh muatan (beban) dari bangunan, termasuk beban-beban yang bekerja pada bangunan tersebut dan berat pondasinya sendiri, harus dipindahkan atau diteruskan oleh fondasi ke tanah dasar sebaik-baiknya.

Karena pondasi harus memikul seluruh bangunan dan beban-beban yang bekerja padanya, maka pondasi harus didesain sedemikian rupa sehingga proses penyaluran beban-beban dari bangunan ke lapisan tanah dapat berlangsung dengan baik dan aman. Pada perencanaan pondasi harus diperhatikan beberapa hal berikut:

1. Pondasi harus cukup kuat untuk mencegah penurunan (settlement) dan perputaran (rotasi) yang berlebihan.
2. Tidak mengalami penurunan setempat yang terlalu besar bila dibandingkan dengan pondasi di dekatnya.
3. Aman terhadap bahaya longsor,
4. Aman terhadap bahaya guling.

Beban-beban yang bekerja pada pondasi meliputi:

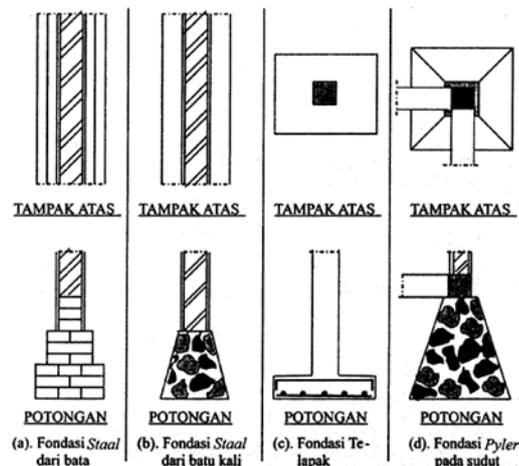
1. Beban terpusat yang disalurkan dari bangunan atas.
2. Berat merata akibat berat sendiri pondasi.

### 2.5.1.1 Jenis jenis pondasi

Berdasarkan letak kedalaman tanah kuat yang digunakan sebagai pendukung pondasi, maka pondasi digolongkan menjadi 3 jenis, yaitu:

#### 1. Pondasi Dangkal

Kedalaman tanah kuat untuk pondasi dangkal diperkirakan sampai mencapai 3 m di bawah permukaan tanah. Yang termasuk golongan pondasi dangkal, yaitu: pondasi *staal* atau pondasi lajur, pondasi telapak dan pondasi *player*.



Gambar 2.43 Macam-macam pondasi dangkal

#### a) Pondasi *Staal* atau Pondasi Lajur

Pondasi *staal* dibuat daripasangan bata atau pasangan batu kali, dengan kedalaman tanah kuat sampai 1,50 m di bawah permukaan tanah. Jika kedalaman tanah kuat sampai 2,00 m, dapat pula digunakan pondasi *staal* yang diletakan di atas timbunan pasir yang dipadatkan secara berlapis setiap  $\pm 20$  cm.

b) Pondasi Telapak (*Foot Plate*)

Pondasi telapak dibuat dari beton bertulang, dengan kedalaman tanah kuat sampai mencapai 2,00 m di bawah permukaan tanah.

c) Pondasi *Player*

Pondasi *player* dibuat dari pasangan batu kali, berbentuk piramida terpancung. Pondasi ini biasanya dipasang pada sudut-sudut bangunan dan pada pertemuan tembok-tembok dengan jarak  $\pm 2,50$  sampai dengan 3,50 m, dengan kedalaman tanah kuat 2,50 m sampai dengan 3,00 m di bawah permukaan tanah.

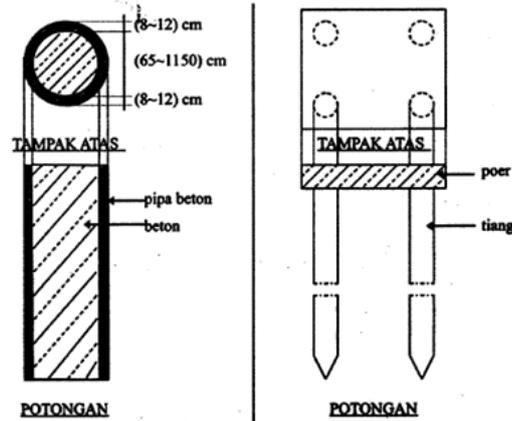
Di atas pondasi *player* ini dipasang balok *sloof*.

## 2. Pondasi Sedang

Kedalaman tanah kuat untuk pondasi sedang diperkirakan sampai mencapai 4,00 m dibawah permukaan tanah. Yang termasuk kedalam pondasi ini adalah pondasi sumuran. Pondasi sumuran dibuat dari pipa beton biasa atau pipa beton bertulang dengan tebal dinding berkisar antara 8 cm sampai 12 cm dimasukkan ke alam tanah, kemudian diisi dengan campuran adukan beton. Ukuran diameter pipa bagian dalam berkisar antara 65 cm sampai 150 cm, dan bergantung dari hasil hitungan.

## 3. Pondasi Dalam

Kedalaman tanah kuat untuk pondasi dalam minimal mencapai 4,50 m di bawah permukaan tanah. Yang termasuk kedalam pondasi ini yaitu pondasi tiang pancang. Pondasi tiang pancang dibuat dari bahan kayu, besi profil, pipa baja maupun beton bertulang, yang dapat dipancang sampai kedalaman  $\pm 60,00$ m di bawah permukaan tanah.



Gambar 2.44 Pondasi Dalam

Dalam perencanaan gedung ini dipergunakan pondasi tiang pancang. Pondasi tiang pancang dibuat menjadi satu kesatuan yang monolit dengan menyatukan pangkal tiang pancang yang terdapat di bawah konstruksi dengan tumpuan pondasi. Fungsinya sama dengan pondasi dalam lainnya seperti *bor pile*. Bedanya ada pada cara pengerjaannya saja. Pelaksanaan pekerjaan pemancangan dengan menggunakan alat berat *diesel hammer*.

Untuk jenis pondasi tiang dalam biasanya terdapat elemen struktur yang berfungsi sebagai pengikat struktur antara struktur bawah (pondasi) dengan struktur atas (kolom) yaitu yang disebut dengan *pile cap*.

### 2.5.1.2 Pemilihan Jenis Pondasi

Dalam pemilihan bentuk dan jenis pondasi yang memadai perlu diperhatikan beberapa hal yang berkaitan dengan pekerjaan pondasi tersebut. Hal ini dikarenakan tidak semua jenis pondasi dapat dilaksanakan di semua tempat. Adapun pemilihan jenis pondasi berdasarkan pada daya dukung tanah, ada beberapa hal perlu diperhatikan, yaitu sebagai berikut.

1. Bila tanah keras terletak pada permukaan tanah atau 2-3 meter di bawah permukaan tanah, maka pondasi yang dipilih sebaiknya jenis pondasi dangkal (pondasi setempat, pondasi menerus, pondasi pelat).
2. Bila tanah keras terletak pada kedalaman hingga 10 meter atau lebih di bawah permukaan tanah maka jenis pondasi yang biasanya dipakai adalah pondasi tiang *minipile* dan pondasi sumuran atau pondasi *bored pile*.
3. Bila tanah keras terletak pada kedalaman hingga 20 meter atau lebih di bawah permukaan tanah maka jenis pondasi yang biasanya dipakai adalah pondasi tiang pancang.

Dalam perencanaan struktur gedung baru fakultas teknik ini digunakan pondasi tiang pancang dan *pile cap*.

### 2.5.2 Perencanaan Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang (*pile foundation*) adalah bagian dari struktur yang digunakan untuk menerima dan mentransfer (menyalurkan) beban dari struktur atas ke tanah penunjang yang terletak pada kedalaman tertentu. Tiang pancang atau yang biasa disebut dengan *reinforced concrete pile* merupakan material beton bertulang yang memiliki daya kekuatan yang sangat tinggi untuk digunakan sebagai pondasi bangunan. Tiang pancang bentuknya panjang dan langsing yang menyalurkan beban ke tanah yang lebih dalam.

Pemakaian tiang pancang dipergunakan untuk suatu pondasi untuk suatu bangunan apabila tanah dasar di bawah bangunan tersebut tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*), yang cukup untuk memikul berat bangunan dan

bebannya, atau apabila tanah keras yang mana mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya letaknya sangat dalam.

### 2.5.2.1 Kapasitas Daya Dukung Tiang Pondasi

Kapasitas dukung tiang dapat diperoleh dari data uji boring. Apabila kita memancang tiang sampai kedalaman tanah keras melalui lapisan tanah lempung, maka untuk menghitung daya dukung tiang kita perhitungkan baik berdasarkan pada tahanan ujung (*end bearing*) maupun pelekatan (*cleef / frictio pile*).

Demikian pula harus diperhitungkan terhadap kekuatan bahan tiang itu sendiri. Namun, untuk perencanaan pondasi tiang pancang pada tugas akhir ini kekuatan bahan maupun perhitungan penulangannya sudah menurut ketentuan pabrikasi (*precest*) yang mengacu pada ketentuan yang dikeluarkan oleh PT. Beton Elemenindo Perkasa.

#### 1. Metode *Mayerhof (1956)*

Sesuai dengan apa yang dijelaskan diatas, untuk kapasitas daya dukung tiang dibedakan oleh daya dukung ujung dan daya dukung gesek, dan apabila kedua gaya tersebut dimobilisasi maka akan didapat :

$$Q_u = 40.N_b .A_p + 0,2.N .A_s \quad (2.5.1)$$

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (2.5.2)$$

$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{SF} \quad (2.5.3)$$

Dengan :

$Q_{ult}$  = Kapasitas daya dukung tiang pancang maksimum tunggal. (kN)

$Q_p$  = Kapasitas daya dukung ujung tiang yang didapat dari tanah

- dibawah ujung pondasi. (kN)
- $Q_s$  = Kapasitas daya dukung yang didapat dari gaya gesekan atau gaya adhesi antara tiang pancang dengan tanah. (kN)
- $Q_{all}$  = Kapasitas daya dukung tiang pancang ijin tunggal. (kN)
- SF = Faktor keamanan (*safety factor*), biasanya bernilai 2,5 – 3

Berdasarkan data hasil pengujian SPT (*Standard Penetration Test*). Daya dukung satu tiang untuk tanah lanau berpasir (Metode *Mayerhof, 1956*) :

$$Q_p = 40.N_b .A_p \quad (2.5.4)$$

Dimana :

$N_b$  = Harga rata-rata N-SPT terkoreksi pada 4D dibawah tiang ( $N_1$ ) dan 8D diatas tiang ( $N_2$ ).  $N_b = \frac{N_1+N_2}{2}$ , dengan Harga  $N_b \leq 40$

$A_p$  = Luas dasar tiang ( $m^2$ )

a) Kapasitas Daya Dukung Selimut Pondasi Tiang Pancang ( $Q_s$ )

$$Q_s = 0,2.N .A_s \quad (2.5.5)$$

Dimana :

$N$  = Harga rata-rata N-SPT terkoreksi sepanjang tiang, dengan Harga  $N \leq 10$

$A_s$  = Luas selimut tiang ( $m^2$ )

Perhitungan daya dukung selimut tiang akan dihitung perkedalaman 3 meter sampai kedalam tanah keras.

## 2. Metode *Terzaghi*

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah memikul tekanan, atau tekanan maksimum yang diijinkan yang bekerja pada tanah di atas pondasi. Daya dukung

terfaktor ( $q_{ult}$ ) atau Factored Bearing Capacity adalah kemampuan tanah memikul tekanan atau tekanan maksimum pada batas runtuh.

Rumusny adalah :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{ult}}{SF} \quad (2.5.6)$$

Daya dukung ultimit untuk suatu tiang pancang dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2.5.7)$$

Di mana :

$\bar{\sigma}$  = Daya Dukung izin Kg/m<sup>2</sup>

$\sigma_{ult}$  = Daya dukung terfaktor atau tekanan maksimum pada batas runtuh Kg/m<sup>2</sup>.

SF = safety factor  
= 3 untuk beban normal  
= 2 untuk beban darurat

$Q_p$  = Tahanan ujung tiang

$Q_s$  = Tahanan Friksi

Daya dukung tanah ditentukan dan dibatasi oleh:

1. Aman terhadap runtuhnya tanah ( $q_u / SF$ ).
2. Aman terhadap penurunan akibat konsolidasi tanah sehingga penurunan total tidak terlalu besar.

Daya dukung terfaktor dipengaruhi oleh:

- 1). Nilai parameter tanah ( $\phi, c, \gamma$ )
- 2). Kedalaman pondasi  $D_f$
- 3). Ukuran dan bentuk pondasi

- 4). Sifat tanah terhadap penurunan
- 5). Kedalaman muka air tanah

### 1. Perencanaan Tiang

#### 1) Kapasitas ultimit tiang

Analisis daya dukung tiang terhadap kekuatan tanah menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_u = \sigma_b + \sigma_s - W_p \quad (2.5.8)$$

Di mana:

$\sigma_u$  = Kapasitas ultimit netto

$\sigma_b$  = Tahanan ujung ultimit

$\sigma_s$  = Tahanan gesek dinding tiang ultimit

$W_p$  = Berat sendiri tiang

- Tahanan adhesi tiang dan tanah

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{F_s} \cdot K \cdot L \cdot c \quad (2.5.9)$$

$P_1$  = Tahanan adhesi dinding tiang ultimit

$K$  = Luas selimut tiang

$c$  = Adhesi antara dinding tiang dengan tanah

$L$  = Kedalaman/panjang tiang

- Tahanan gesek dinding tiang ultimit

$$\bar{P}_2 = \frac{1}{F_s} \cdot K \left( \frac{1}{2} \cdot L^2 \cdot \gamma \right) \cdot (1 + tg^2 \phi) tg \phi \quad (2.5.10)$$

$P_2$  = Tahanan gesek dinding tiang ultimit

$\gamma$  = Berat isi tanah

$K$  = Luas selimut tiang

$L$  = kedalaman/panjang tiang

$\phi$  = sudut gesek antara dinding tiang dan tanah

- Tahanan ujung tiang

$$\bar{P}_3 = A \cdot \bar{\sigma} = A \cdot \frac{1}{3} \cdot (1,3 \cdot c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0,3 \cdot \beta \cdot \gamma^2 \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma) \quad (2.5.11)$$

$P_3$  = Tahanan ujung tiang ultimit

$\gamma$  = Berat isi tanah

$c$  = Kohesi tanah di ujung tiang

$L$  = Panjang/Kedalaman tiang

$A$  = Luas penampang ujung tiang

$N_c, N_q, N_\gamma$  = Faktor daya dukung

$$\bar{P} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 \quad (2.5.12)$$

$$\bar{P}_{netto} = \bar{P} - \text{Berat tiang} \quad (2.5.13)$$

$$\sigma_u = 4N_b A_b + \frac{1}{50} \bar{N} A_s \quad (2.5.14)$$

$\sigma_u$  = Kapasitas ultimit tiang

$N_b$  = Nilai  $N$  dari uji SPT di dekatar dasar tiang

$A_b$  = Luas dasar tiang

$\bar{N}$  = Nilai rata-rata  $N$  dari uji SPT di sekitar tiang

$A_s$  = Luas selimut tiang

2) Jumlah tiang yang diperlukan

$$np = \frac{P}{\sigma_{all}} \quad (2.5.15)$$

$np$  = Jumlah tiang

$P$  = Gaya aksial yang terjadi

$\sigma_{all}$  = Kapasitas dukung ijin tiang

$$\sigma_{all} = \frac{\sigma_u}{SF} \quad (2.5.16)$$

$\sigma_u$  = Kapasitas ultimit tiang

$SF$  = Faktor aman

### 2.5.2.2 Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang

Jika beban struktur atas yang harus ditumpu oleh fondasi tiang terlalu besar, maka secara tunggal fondasi tiang tidak lagi mampu menopang beban tersebut. Untuk itu, salah satu cara untuk mengatasinya adalah dengan memasang beberapa tiang menjadi satu kelompok atau sering disebut fondasi grup tiang. Masing-masing tiang dalam satu grup diikat bagian atasnya dengan kepala tiang (*pile cap*).

Kapasitas dukung tiang gesek (*friction pile*) dalam tanah lempung akan berkurang jika jarak tiang semakin dekat. Berikut ini merupakan persamaan efisiensi tiang yang disarankan oleh *Converse-Labarre formula*, yaitu:

$$Eg = 1 - \theta \cdot \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90.m.n'} \quad (2.5.17)$$

Keterangan:

$Eg$  = efisiensi kelompok tiang.

$m$  = jumlah baris tiang.

$n$  = jumlah tiang dalam satu baris.

$\theta$  = arc tg d/s (°).

s = jarak pusat ke pusat tiang (m).

d = diameter tiang (m).

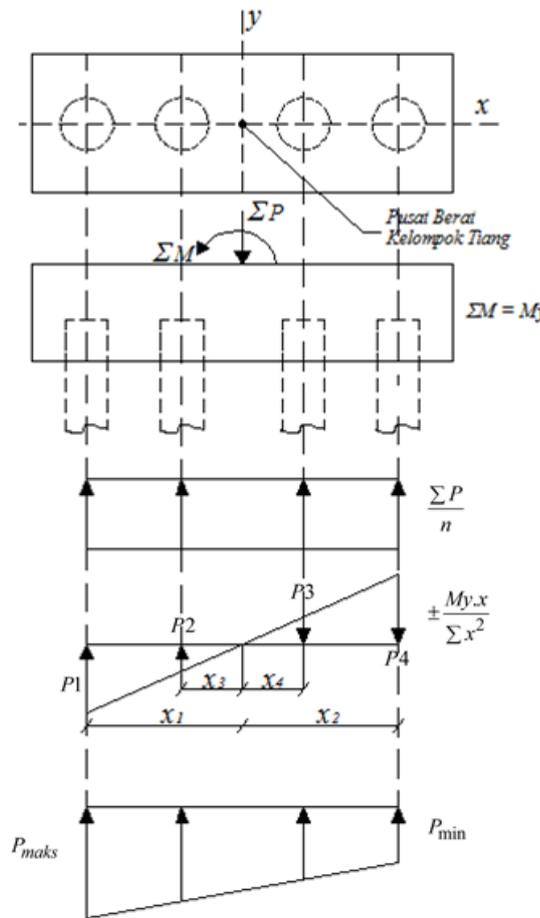
Beban maksimum kelompok tiang (Qg) yang mengakibatkan keruntuhan :

$$Q_g = E_g \cdot n \cdot Q_u \tag{2.5.18}$$

Keterangan:

Qu = beban maksimum tiang tunggal yang mengakibatkan keruntuhan (kg).

1. Besarnya beban maksimum yang diterima oleh tiang, yaitu :

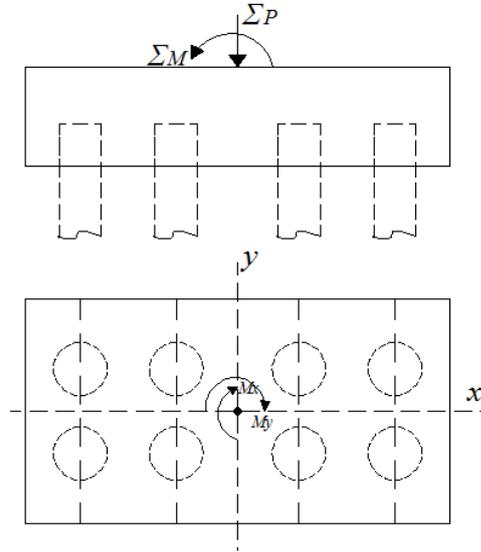


Gambar 2.45 Reaksi Tiang

(Sumber : Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo)

a. Fondasi tiang yang memikul beban dan momen satu arah.

$$P_{terjadi} = \frac{\sum P}{n} \pm \frac{My \cdot x}{\sum x^2} \leq P_{netto} \quad (2.5.19)$$



Gambar 2.46 Kelompok Tiang Dibebani Beban Vertikal dan Momen di Kedua Arah Sumbunya

(Sumber : Analisis dan Perancangan Fondasi II, Hary Christady Hardiyatmo)

a. Fondasi tiang yang memikul beban dan momen dua arah

$$P_{terjadi} = \frac{\sum P}{n} \pm \frac{My \cdot x}{\sum x^2} \pm \frac{Mx \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.5.20)$$

$$P_{maks} = \frac{\sum P}{n} + \frac{My \cdot x}{\sum x^2} + \frac{Mx \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.5.21)$$

$$P_{min} = \frac{\sum P}{n} - \frac{My \cdot x}{\sum x^2} - \frac{Mx \cdot y}{\sum y^2} \leq P_{netto} \quad (2.5.22)$$

$$P_{min} > 0$$

Keterangan:

$\sum P$  = jumlah beban vertikal yang diterima tiang (kN).

$n$  = jumlah tiang dalam grup.

$M_x, M_y$  = momen pada arah x dan y (kNm).

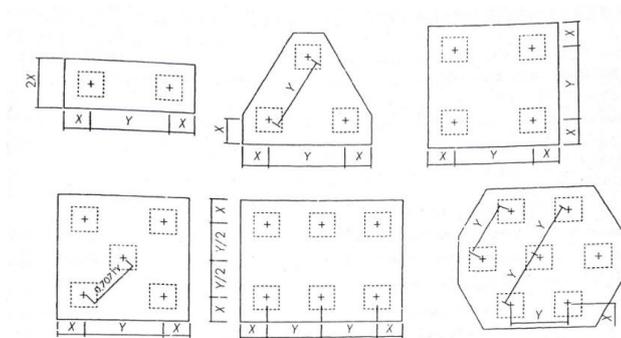
$x, y$  = berturut-turut jarak tiang terhadap sumbu x dan y (m).

$\sum x^2$  = jumlah kwadrat dari jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok tiang arah sumbu x ( $m^2$ ).

$\sum y^2$  = jumlah kwadrat dari jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok tiang arah sumbu y ( $m^2$ ).

### 2.5.3 Pile Cap

*Pile cap* merupakan elemen struktur yang berfungsi untuk mengikat tiang-tiang menjadi satu kesatuan dan memindahkan beban kolom kepada tiang. *Pile cap* biasanya terbuat dari beton bertulang. Pada proses analisisnya, pondasi *pile cap* dianggap sebagai material yang sangat kaku dan distribusi tekanan yang ditimbulkan akibat beban dapat dianggap linier. Pada pondasi *pile cap* setiap titik didukung secara langsung oleh tanah dibawahnya, sehingga momen lentur yang terjadi sangat kecil. Gambar 2.30 menunjukkan beberapa jenis tiang dalam satu grup tiang. Jarak antar tiang pusat ke pusat (Y) dibatasi sebesar 2,5 hingga 3 kali diameter tiang, sedangkan jarak as tiang ke tepi pile cap (X) dibatasi sebesar 1 hingga 1,5 kali diameter tiang.



Gambar 2.47 Jarak Tiang Fondasi  
(Sumber SNI 2847-2013)

1. Persamaan untuk menghitung tekanan aksial pada masing-masing tiang, yaitu :

$$P_{\max} = \frac{\sum V}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_1}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_1}{\sum y^2} \quad (2.5.23)$$

$$\sum x^2 = 2x_1^2 + 2x^2 \quad (2.5.24)$$

$$\sum y^2 = 2y_1^2 + 2y^2 \quad (2.5.25)$$

$$P_{\max} \leq \bar{P}_{\text{netto}} \quad (2.5.26)$$

Di mana:

$\sum V$  = Jumlah beban vertikal yang diterima tiang (kN).

$n$  = Jumlah tiang dalam grup.

$M_x, M_y$  = Momen pada arah x dan y (kNm).

$x, y$  = Berturut-turut jarak tiang terhadap sumbu x dan y (m).

$\sum x^2$  = Jumlah kwadrat dari jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok tiang arah sumbu x ( $m^2$ ).

$\sum y^2$  = Jumlah kwadrat dari jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok tiang arah sumbu y ( $m^2$ ).

Persyaratan yang harus dipenuhi :

Beban normal :  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{Tanah}}$

Beban sementara :  $\sigma_{\max} \leq 5 \times \sigma_{\text{Tanah}}$

$\sigma_{\min} > 0$  (tidak boleh ada tegangan negatif)

2. Penulangan pilecap

- 1) Beban-beban yang bekerja pada pilecap

- a) Berat sendiri pilecap

- b) Berat tanah urug
  - c) Gaya aksial tiang
- 2) Momen yang terjadi pada sisi kolom

$$M_u = P_1 x_1 + P_2 x_2 - P_{\max} x_3 \quad (2.5.27)$$

- 3) Penulangan

- a) Rasio tulangan

$$K = \frac{Mu}{\phi b d^2} \quad (2.5.28)$$

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2K}{0,85 \cdot f'_c}} \right] \quad (2.5.29)$$

$$\rho_b = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.5.30)$$

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.5.31)$$

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.5.32)$$

Dengan syarat  $\rho_{\min} < \rho_{perlu} < \rho_{maks}$

- b) Luas tulangan

$$A_s = \rho b d \quad (2.5.33)$$

Jarak antar tulangan

$$s = \frac{\frac{1}{4} \pi d^2 S}{A_s} \quad (2.5.34)$$

$$s \leq 3.h_f$$

$$s \leq 450 \text{ mm}$$

Dipilih nilai  $s$  yang terkecil.