

2 LANDASAN TEORI

2.1 Beton Bertulang

Beton adalah material konstruksi yang sering digunakan begitu pula dengan struktur beton bertulang dalam konstruksi bangunan dan infrastruktur (Roig-Flores dkk., 2021). Beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Berat jenis dari beton normal sebesar 2320 hingga 2400 kg/m³. Material beton memiliki karakteristik kuat terhadap gaya tekan namun lemah terhadap gaya tarik (Hermansyah & Sachroudi, 2023). Sehingga dalam penggunaannya sebagai material elemen struktur memerlukan tulangan agar mampu menutupi kekurangan beton terhadap gaya tarik. Tulangan di pasangankan sedemikian rupa sehingga gaya tarik yang dibutuhkan untuk momen keseimbangan setelah beton retak dapat dikembangkan oleh tulangan (Wight & MacGregor, 2012).

2.1.1 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas yang membuat benda uji hancur tatkala dibebani oleh gaya tekan. Nilai kuat tekan beton didapat dari hasil pengujian tekan pada benda uji berbentuk silinder ataupun balok. Hasil kuat tekan beton hasil pengujian benda uji silinder ialah f'_c dengan satuan MPa atau N/mm² dan benda uji balok adalah K dengan satuan kg/cm². Kuat tekan beton dipengaruhi oleh rasio air/semen, tipe semen, bahan tambah semen, agregat, dan air yang dipakai (Wight & MacGregor, 2012).

2.1.2 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas beton (E_c) besarnya dipengaruhi oleh kekuatan tekan dari beton itu sendiri. Berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 19.2.2, nilai modulus elastisitas beton normal dapat dihitung dengan pendekatan seperti pada persamaan (2.1).

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

2.1.3 Modulus Retak Beton

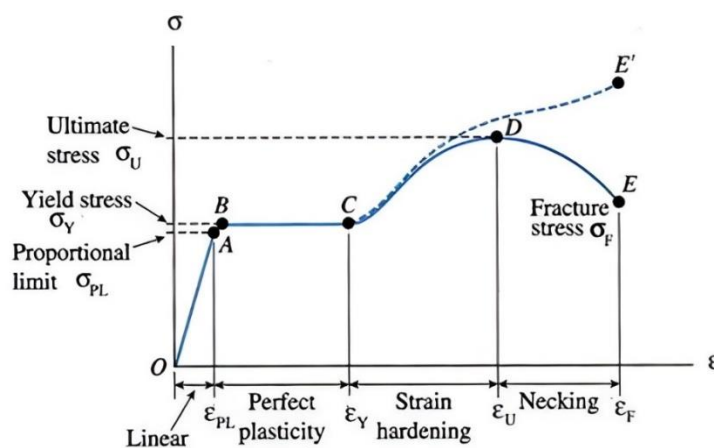
Modulus retak beton, atau sering disebut juga sebagai modulus retak tarik, adalah parameter yang digunakan untuk menentukan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh beton sebelum retak terjadi. Modulus ini penting dalam desain struktur beton bertulang karena membantu insinyur memahami bagaimana beton akan berperilaku di bawah beban tarik. Menurut SNI 2847 – 2019 Pasal 19.2.3, modulus retak beton dapat dihitung dengan rumus :

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

2.2 Baja Tulangan

Baja tulangan (*reinforcing bar*) adalah batang baja yang berberntuk menyerupai kawat baja yang digunakan sebagai penahan gaya tarik pada beton bertulang untuk memperkuat dan membantu beton menahan gaya tarik (Ruzuqi dkk., 2022). Ditinjau dari segi fungsi, besi tulangan secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik struktur. Nilai modulus elastisitas dapat diambil sebesar 200000 MPa (SNI 2847, 2019). Perilaku material baja dapat diketahui pada grafik hubungan tegangan dan regangannya. Gambar 2.1 merupakan grafik hasil uji tarik pada baja.

Titik O – B merupakan daerah *elastic* yang akan kembali ke semula ketika tegangan dihilangkan. Tepat titik B merupakan kuat leleh baja (f_y). Titik B – D merupakan daerah plastis, saat baja terdeformasi tidak akan kembali ke bentuk semula dan titik D merupakan kuat ultimit (f_u) baja, dimana kekuatan baja tidak akan meningkat ketika diaplikasikan beban lagi dan malah menurun hingga putus pada titik E. Untuk lebih jelas lihat Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kurva Tegangan-regangan Baja

(Sumber: Gere & Timoshenko, 1997)

Baja tulangan dilihat dari bentuknya terbagi 2 (dua) jenis yaitu baja tulangan polos (BjTP) dan baja tulangan sirip (BjTS). Baja tulangan sirip sesuai namanya memiliki sirip yang melintang dan memanjang pada sepanjang permukaannya, hal ini yang menjadi perbedaan diantara kedua jenis baja tulangan tersebut. Dalam industri konstruksi baja tulangan sirip lebih dominan digunakan sebagai tulangan utama karena memiliki mutu baja yang lebih tinggi dibanding baja tulangan polos, walaupun ada saat ketika baja tulangan sirip juga digunakan untuk tulangan geser karena keperluan akan beban yang dipikul. Mutu tulangan berdasarkan SNI 2052-2017 dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Mekanis Baja Tulangan sesuai SNI 2052-2017

Kelas Baja Tulangan	Kuat Leleh (f_y) (MPa)	Kuat Tarik (f_u) (MPa)
BjTP280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350
BjTS420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525
BjTS520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650
BjTS550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5
BjTS700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805

(Sumber: SNI 2052, 2017)

2.3 Pembebanan

Struktur gedung yang direncanakan harus mampu memikul dan menyalurkan beban-beban yang terjadi ke struktur bawah (fondasi) lalu disalurkan kembali kedalam tanah. Beban merupakan gaya yang bekerja pada struktur, baik beban dari

struktur itu sendiri maupun beban luar. Diasumsikan, distribusi pembebanan yang bekerja mulai dari beban pelat yang di salurkan ke balok lalu ke kolom dan oleh kolom diteruskan ke tanah melalui fondasi. Beban yang bekerja pada struktur dapat dikategorikan menjadi beban gravitasi yang mencakup beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*superimposed dead load*), beban hidup (*live load*), serta beban lateral yang meliputi beban gempa (*quake*) dan beban angin (*wind*). Acuan dalam merencanakan pembebanan ini diantaranya:

1. SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.
2. SNI 1727:2020 tentang beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain.
3. SNI 2847-2019 tentang persyaratan beton struktural untuk gedung dan penjelasan.

2.3.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Berdasarkan SNI 1727:2020, beban mati merupakan berat dari masing masing bahan/komponen yang terpasang pada bangunan termasuk kolom, balok, pelat lantai, atap, plafond, tangga, keramik, pintu, jendela dan komponen arsitektural dan struktural lainnya. Sedangkan menurut PPPURG (Departemen Pekerjaan Umum, 1987) beban mati adalah berat dari semua bagian dari suatu gedung yang bersifat tetap, termasuk segala unsur tambahan, penyelesaian-penyelesaian, mesin-mesin serta peralatan tetap yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung itu.

Penentuan beban mati untuk perancangan harus digunakan berat bahan dan konstruksi yang sebenarnya termasuk berat maksimum pengisi peralatan tetap, seperti kandungan cairan. Besarnya beban mati menggunakan nilai yang disetujui oleh pihak yang berwenang. Tabel 2.2 menampilkan berat dari komponen bangunan yang digunakan untuk menentukan beban mati.

Tabel 2.2 Berat Sendiri Bahan Bangunan

No.	Material	Berat (kg/m ³)
1	Baja	7850

No.	Material	Berat (kg/m ³)
2	Batu alam	2600
3	Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
4	Batu karang (berat tumpuk)	700
5	Batu pecah	1450
6	Besi tuang	7250
7	Beton	2200
8	Beton bertulang	2400
9	Kayu (kelas I)	1000
10	Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
11	Pasangan bata merah	1700
12	Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
13	Pasangan batu cetak	2200
14	Pasangan batu karang	1450
15	Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
16	Tanah lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700
17	Pasir (jenuh air)	1800
18	Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
19	Tanah lempung dan lanau (basah)	2000
20	Timah hitam	11400

(Sumber: SNI 1727-2020)

2.3.2 Beban Mati Tambahan (*Superimposed Dead Load*)

Beban mati tambahan dimaksudkan pada beban non-struktural yang berada/menempel permanen pada elemen struktural yang tidak termasuk berat

sendiri struktur. Beban mati tambahan meliputi elemen arsitektural seperti dinding, jendela, plafond & penggantungnya, penutup atap, serta elemen elektrik dan perpipaan. Dalam analisis struktur, beban-beban ini dipertimbangkan karena dapat mempengaruhi perilaku struktur. Penentuan beban mati tambahan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Berat Komponen Bangunan

No	Material	Berat (kg/m ²)
1	Adukan, per cm tebal - Dari semen - Dari kapur, semen merah atau tras	21 17
2	Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
3	Dinding pasangan bata merah - Satu bata - Setengah bata	450 250
4	Dinding pasangan batako berlubang - Tebal dinding 20 cm (HB 20) - Tebl dinding 10 cm (HB 10) Tanpa lubang : - Tebal dinding 15 cm - Tebal dinding 10 cm	200 120 300 200
5	Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari: - Semen asbes (eternit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimun 4 mm - Kaca, dengan tebal 3 – 5 mm	11 10
6	Penutup atas sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² atap	40
7	Penutup atap seng gelombang (BJLS-25) tanpa gordeng	10

No	Material	Berat (kg/m ²)
8	Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40
9	Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak s.k.s. minimum 0,80 m	7
10	Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50
11	Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24
12	Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	11

(Sumber: SNI 1727-2020)

2.3.3 Beban Hidup (*Live Load*)

Berdasarkan SNI 1727:2020 beban hidup merupakan beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan (beban angin, hujan, banjir dan gempa). Khusus pada atap terdapat beban hidup atap selama pelaksanaan pemeliharaan yang diakibatkan oleh pekerja, peralatan dan material, serta pada masa layan struktur yang diakibatkan oleh benda bergerak, seperti tanaman atau benda dekorasi kecil yang tidak berhubungan dengan penghunian.

Beban hidup yang digunakan dalam perancangan bangunan gedung dan struktur lain harus menggunakan beban maksimum yang diharapkan terjadi akibat penghunian dan penggunaan bangunan gedung, tetapi tidak boleh kurang dari beban merata minimum yang ditetapkan dalam pasal 4.3 SNI 1727:2020. Berikut merupakan beban hidup pada lantai gedung berdasarkan SNI 1727:2020 yang disajikan dalam Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Beban Hidup Terdistribusi Merata Minimum, Lo dan Beban Hidup Terpusat Minimum

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Apartemen (lihat rumah tinggal)				
Sistem lantai akses				
- Ruang kantor	2,4	Ya	Ya	8,9
- Ruang komputer	4,79	Ya	Ya	8,9
Gudang persenjataan dan ruang latihan	7,18	Tidak	Tidak	
Ruang pertemuan				
- Kursi tetap (terikat di lantai)	2,87	Tidak	Tidak	
- Lobi	4,79	Tidak	Tidak	
- Kursi dapat dipindahkan	4,79	Tidak	Tidak	
- Panggung pertemuan	4,79	Tidak	Tidak	
- Lantai podium	4,79	Tidak	Tidak	
- Tribun penonton stadion arena	7,18	Tidak	Tidak	
- dengan kursi tetap (terikat dilantai)	4,79	Tidak	Tidak	
- Ruang pertemuan lainnya	2,87	Tidak	Tidak	
	4,79	Tidak	Tidak	
Balkon dan dek	1,5 kali beban hidup untuk daerah yang dilayani. Tidak perlu melebihi (4,79)	Ya	Ya	
Jalur untuk akses pemeliharaan	1,92	Ya	Ya	1,33
Koridor				

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
- Lantai pertama - Lantai lain	4,79 sama seperti pelayanan hunian kecuali disebutkan lain	Ya	Ya	
Ruan makan dan restoran	4,79	Tidak	Tidak	
Hunian (lihat rumah tinggal)				
Desain mesin elevator (pada area 50 mm x 50 mm)	-	-	-	1,33
Konstruksi pelat lantai <i>finishing</i> ringan (pada area 25 mm x 25 mm)	-	-	-	0,89
Jalur penyelamatan saat kebakaran Hunian satu keluarga saja	4,79	Ya	Ya	
Tangga permanen		-	-	4.5.4
Garasi/parkir (4.10) - Mobil penumpang saja - Truk dan bus	1,92 4.10.2	Tidak -	Tidak -	4.10.1 4.10.2
Pegangan tangga dan pagar pengaman Batang pegangan	4.5.1	-	-	4.5.1 4.5.2
Helipad (4.11) - Helikopter dengan berat lepas landas sebesar 3.000 lb (13,35 kN) atau kurang - Helikopter dengan berat lepas landas lebih 3.000 lb (13,35 kN)	1,92 2,87	Tidak Tidak	- -	4.11.2 4.11.2

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Rumah Sakit				
- Ruang operasi, laboratorium	2,87	Ya	Ya	4,45
- Ruang pasien	1,92	Ya	Ya	4,45
- Koridor diatas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Hotel (lihat rumah tinggal)				
Perpustakaan				
- Ruang baca	2,87	Ya	Ya	4,45
- Ruang penyimpanan	7,18	Tidak	Ya	4,45
- Koridor diatas lantai pertama	3,83	Ya	Ya	4,45
Pabrik				
- Ringan	6,00	Tidak	Ya	8,90
- Berat	11,97	Tidak	Ya	13,35
Gedung perkantoran				
- Ruang arsip dan komputer harus dirancang untuk beban yang lebih berat berdasarkan pada perkiraan hunian				
- Lobi dan koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	8,90
	2,40	Ya	Ya	8,90
- Kantor	3,83	Ya	Ya	8,90
- Koridor diatas lantai pertama				
Lembaga hukum				
- Blok sel	1,92	Ya	Ya	
- Koridor	4,79	Ya	Ya	
Tempat rekreasi				
	3,59	Tidak	Tidak	

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
- Tempat bowling, billiard, dan penggunaan sejenis - Ruang dansa dan ballroom - Gimnasium	4,79 4,79	Tidak Tidak	Tidak Tidak	
Rumah tinggal Hunian satu dan dua keluarga - Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang - Loten yang tidak dapat dihuni dengan gudang - Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur - Semua ruang kecuali tangga Semua hunian rumah tinggal lainnya - Ruang pribadi dan koridor - Ruang publik - Koridor ruang publik	0,48 0,96 1,44 1,92 1,92 4,79 4,79	Ya Ya Ya Ya Ya Tidak Ya	Ya Ya Ya Ya Ya Tidak Ya	4.12.1 4.12.2
Atap - Atap datar, berhubung, dan lengkap - Atap yang digunakan penghuni - Atap untuk tempat berkumpul Atap vegetatif dan atap lansekap - Atap bukan untuk hunian - Atap untuk tempat berkumpul	0,96 Sama dengan penggunaan yang dilayani 4,70 0,96 4,79 Sama dengan penggunaan	Ya Ya Ya Ya Ya Ya	- - - - - -	4.8.1

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
- Atap untuk penggunaan lainnya	yang dilayani			
	0,24	Tidak	-	
<i>Awning</i> dan kanopi				
- Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	0,24 berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka	Tidak	-	0,89
- Rangk penumpu layar penutup	0,96			
		Ya		
Semua konstruksi lainnya				
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja		-	-	0,89
Titik panel tunggal dari kord bawah rangka bawah atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap diatas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjaanya, dan garasi bengkel				
Semua komponen struktur atap utama lainnya		-	-	1,33

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan		-	-	1,33
Sekolah				
- Ruang kelas	1,92	Ya	Ya	4,45
- Koridor diatas lantai pertama	3,82	Ya	Ya	4,45
- Koridor lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45
Scuttles, rusuk untuk atap kaca dan langit-langit yang dapat diakses				0,89
Jalan di pinggir untuk pejalan kaki, jalan lintas kendaraan, dan lahan/jalan untuk truk-truk	11,79	Tidak	Ya	35,60
Tangga dan jalan keluar	4,79	Ya	Ya	1,33
Rumah tinggal untuk satu dan dua keluarga saja	1,92	Ya	Ya	1,33
Gedung diatas langit-langit	0,96	Ya	Ya	
Gudang penyimpanan dan pekerja (harus dirancang untuk beban lebih berat jika diperlukan)				
- Ringan	6,00	Tidak	Ya	
- Berat	11,97	Tidak	Ya	
Toko				
Eceran				
- Lantai pertama	4,79	Ya	Ya	4,45
	3,59	Ya	Ya	4,45

Hunian atau penggunaan	Merata, Lo psf (kN/m ²)	Reduksi beban hidup diizinkan	Reduksi beban hidup berlantai banyak diizinkan	Ter- pusat (kN)
- Lantai diatasnya Grosir di semua lantai	6,00	Tidak	Ya	4,45
Penghalang kendaraan				4.5.3
Susunan jalan dan panggung yang ditinggikan (selain jalan keluar)	2,87	Ya	Ya	
Pekarangan dan teras, jalur pejalan kaki	4,79	Tidak	Tidak	

(Sumber: SNI 1727:2020)

2.3.4 Beban Angin (*Wind*)

Beban angin menurut SNI 1727-2020 adalah beban yang dihasilkan oleh hembusan angin yang bekerja pada struktur bangunan. Nilai beban ini ditentukan oleh beberapa faktor, seperti kecepatan angin, letak geografis, bentuk dan ketinggian bangunan, serta kekakuan struktur. Bangunan yang berada pada lintasan angin akan menyebabkan angin berbelok atau berhenti, mengubah energi kinetik partikel udara yang bergerak menjadi energi potensial, berupa tekanan atau hisapan pada permukaan bangunan. Berdasarkan SNI 1727:2020 untuk menghitung pengaruh angin pada struktur menggunakan parameter berikut:

1. Kecepatan angin dasar (V)

Kecepatan angin dasar (V) yang digunakan dalam menentukan beban angin desain pada bangunan gedung dan struktur lain ditentukan dari data BMKG kecepatan angin harian rata-rata Kota Tasikmalaya.

2. Faktor arah angin (K_d)

Efek arah angin dalam menentukan beban angin didasarkan pada analisis rasional dari kecepatan angin. Penentuan faktor arah angin ditentukan dari Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Faktor Arah Angin (K_d)

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan Gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap Lengkung	0,85
Kubah Berbentuk Bundar	1,0 ^a
Cerobong, Tangki dan Struktur Serupa	
Persegi	0,90
Segi Enam	0,95
Segi Delapan	1,0 ^a
Bundar	1,0 ^a
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat.	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka Bangka Menara	
Segitiga, persegi atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

(Sumber: SNI 1727:2020)

Catatan:

^aFaktor arah angin $K_d = 0,95$ diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan dengan sistem struktur non-asimetris.

3. Kategori eksposur

Untuk setiap arah angin yang diperhitungkan, eksposur arah melawan angin didasarkan pada kekasaran permukaan tanah yang ditentukan dari topografi alam, vegetasi, dan fasilitas yang telah dibangun. Berikut kategori kekasaran permukaan:

- Kekasaran permukaan B, daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran

tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.

- Kekasaran permukaan C, dataran terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya kurang dari 9,1m. Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
- Kekasaran permukaan D, permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air. Kategori ini termasuk hamparan lumpur halus.

Berikut ini kategori eksposur:

- Eksposur B, untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1m), Eksposur B berlaku bilamana Kekasaran Permukaan B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.
- Eksposur C, berlaku untuk semua kasus dimana eksposur B dan eksposur B tidak berlaku.
- Eksposur D, berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari kondisi Eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

4. Faktor topografi (K_{zt})

Efek peningkatan kecepatan angin pada daerah perkotaan secara umum tidak menimbulkan perubahan mendadak pada topografi, maka nilai $K_{zt} = 1,0$.

5. Faktor elevasi permukaan tanah

Faktor elevasi permukaan tanah untuk menyesuaikan densitas udara, K_e , harus ditentukan sesuai dengan . Untuk semua elevasi, boleh diambil nilai $K_e = 1$.

Tabel 2.6 Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Elevasi tanah di atas permukaan laut (m)	Faktor elevasi permukaan tanah (K_e)
<0	Lihat catatan
0	1,00
305	0,96
610	0,93
914	0,90
1.219	0,86
1.524	0,83
1.829	0,80
>1.829	Lihat catatan

(Sumber SNI 1727:2020)

Catatan:

- Perkiraan konservatif, boleh diambil $K_e = 1,00$ dalam semua kasus.
- Faktor K_e harus ditentukan dari Tabel 2.6 dengan menggunakan interpolasi atau dari rumus berikut untuk semua elevasi:

$$K_e = e^{-0,000119zg} \quad (zg = \text{elevasi tanah di atas permukaan laut dalam m}).$$
- Dalam semua kasus K_e boleh diambil sebesar 1,00.

6. Faktor pengaruh hambatan angin (G)

Faktor efek hembusan angin untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil sebesar 0,85.

7. Klasifikasi ketertutupan

- Bangunan gedung, tertutup; bangunan gedung yang memiliki luas total bukaan pada setiap dinding, yang menerima tekanan eksternal positif, kurang dari atau sama dengan 4 ft² (0,37 m²) atau 1 % dari luas dinding, dipilih yang lebih kecil. Kondisi ini dinyatakan untuk setiap dinding dengan persamaan berikut: $A_o < 0,01A_g$; atau 4 ft² (0,37 m²); dipilih yang lebih kecil, dengan A_o dan A_g adalah seperti yang ditetapkan untuk bangunan gedung terbuka
- Bangunan gedung, bertingkat rendah; bangunan gedung tertutup atau tertutup sebagian yang memenuhi kondisi berikut:
 - a) Tinggi atap rata-rata h sama dengan atau kurang dari 60 ft (18 m).
 - b) Tinggi atap rata-rata h tidak melebihi dimensi horizontal yang terkecil.
- Bangunan gedung, terbuka; bangunan gedung yang memiliki dinding setidaknya 80 % terbuka. Kondisi ini dinyatakan untuk setiap dinding oleh persamaan,

$$A_b \geq 0,8A_g \quad (2.3)$$

Keterangan:

A_o = luas total bukaan di dinding yang menerima tekanan eksternal positif, dalam ft²(m²); dan

A_g = luas bruto dinding untuk A_o yang diidentifikasi, dalam ft²(m²)

- Bangunan gedung, tertutup sebagian; sebuah bangunan gedung yang memenuhi kedua kondisi berikut:
 - a) Luas total bukaan di dinding yang menerima tekanan eksternal positif melebihi jumlah dari luas bukaan di keseimbangan amplop bangunan gedung (dinding dan atap) dengan lebih dari 10 %.
 - b) Luas total bukaan di dinding yang menerima tekanan eksternal positif melebihi 4 ft² (0,37 m²) atau 1 % dari luas dinding, mana

yang lebih kecil, dan persentase bukaan di keseimbangan amplop bangunan gedung tidak melebihi 20 %.

- Bangunan gedung, terbuka sebagian; bangunan yang tidak memenuhi persyaratan sebagai bangunan gedung terbuka, tertutup sebagian, atau tertutup.

8. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan internal, (GC_{pi}), harus ditentukan dari Tabel 26.13-1 berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan bangunan gedung ditentukan dari klasifikasi ketertutupan.

Tabel 2.7 Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_o kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_o > 1,1A_{oi}$ dan $A_o >$ terkecil dari $0,01A_g$ atau $0,37 \text{ m}^2$ dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Tinggi	-0,55 -0,55
Bagungan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan Klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

(Sumber: SNI 1727:2020)

Untuk bangunan tertutup sebagian yang memiliki sebuah ruangan besar tanpa sekat, koefisien tekanan internal, (GCpi), harus dikalikan dengan faktor reduksi, Ri berikut ini :

$$R_i = 0,5 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{V_i}{22,899A_{og}}}} \right) < 1,0 \quad (2.4)$$

Keterangan:

A_{og} = luas total bukaan pada amplop bangunan gedung (dinding-dinding dan atap, dalam ft^2)

V_i = volume internal ruang tanpa partisi, dalam ft^3

9. Koefisien tekanan eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal dibagi menjadi koefisien untuk dinding dan atap, nilai C_p ditentukan berdasarkan Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Koefisien Tekanan Eksternal Dinding (C_p)

Koefisien tekanan dinding (C_p)			
Permukaan	L/B	C_p	Digunakan dengan
Angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
Angin pergi	0-1	- 0,5	q_h
	2	- 0,3	q_h
	≥ 4	- 0,2	q_h
Dinding tepi	Seluruh nilai	- 0,7	q_h

(Sumber : SNI 1727:2020)

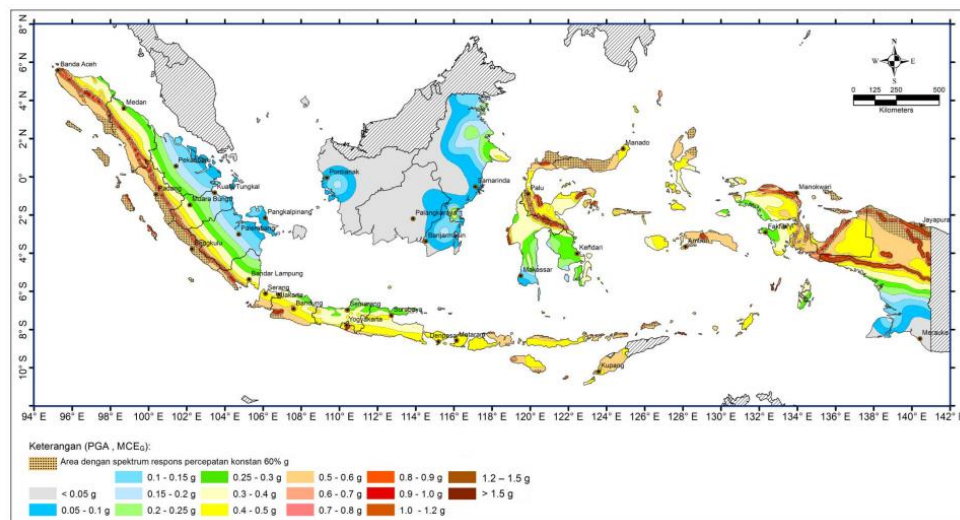
2.3.5 Beban Gempa (*Quake*)

Gempa bumi dapat didefinisikan sebagai pergerakan kerak bumi yang menyebabkan benturan pada batuan serta menghasilkan gaya lateral pada bangunan. Gaya lateral hasil dari peristiwa gempa bumi dapat merusak struktur, menghasilkan tegangan kritis serta menyebabkan goyangan lateral (Ismail dkk., 2018). Berdasarkan SNI 1726:2019 gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%.

Beban gempa yang bekerja pada struktur dianalisis menggunakan prosedur gaya lateral statik ekuivalen dan menggunakan analisis dinamik spektrum respons ragam. Prosedur analisa dan desain seismik yang digunakan dalam perencanaan struktur bangunan gedung mengacu pada SNI 1726:2019 mengenai perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Berikut merupakan parameter-parameter yang digunakan dalam analisa beban gempa:

1. Peta Zonasi Gempa Indonesia

Wilayah Indonesia dipetakan berdasarkan tingkat resiko gempa yang ditentukan atas dasar besarnya percepatan puncak batuan dasar (*Peak Ground Acceleration, PGA*). Berikut gambar peta kegempaan Indonesia:



Gambar 2.2 Peta PGA MCEG

(Sumber: SNI 1726:2019)

2. Kategori Resiko Bangunan dan Keutamaan Gempa

Berdasarkan SNI 1726:2019 penggolongan kategori resiko bangunan dan faktor keutamaan gempa disajikan dalam Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan.	I	1,00

Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk kategori risiko I,III dan IV.	II	1,00
Gedung dan non gedung yang memiliki risiko terhadap manusia pada saat terjadi kegagalan.	III	1,25
Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk dalam kategori risiko IV.	IV	1,50

(Sumber: SNI 1726:2019)

3. Klasifikasi situs dan koefisien situs

Penentuan klasifikasi situs berguna untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Perumusan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah atau penentuan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs, maka situs tersebut harus diklasifikasikan, profil tanah harus diklasifikasikan sesuai dengan Tabel 2.10, berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas. Penetapan kelas situs harus melalui penyelidikan tanah di lapangan dan di laboratorium. Berikut merupakan tabel klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019:

Tabel 2.10 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/s)	$\bar{N}$ 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)	350-750 m/s	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175-350 m/s	15-50	50-100
SE (tanah lunak)	<175 m/s	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut:		

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/s)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_U$ (kPa)
	1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_U < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisa respons spesifik-situs yang mengikuti 6.9)	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 $H > 3$ m)		

(Sumber: SNI 1726:2019)

Penentuan koefisien situs dan parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Berikut Tabel 2.11 dan Tabel 2.12 nilai koefisien situs (F_a dan F_v) berbagai kelas yang ada.

Tabel 2.11 Koefisien Situs F_a

Kelas Situs	Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,5$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1$	$S_S = 1,25$	$S_S = 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$S_S^{(a)}$					

(Sumber: SNI 1726:2019)

Catatan:

- (a) Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.
- (b) Untuk nilai antara S_s dapat dilakukan dengan interpolasi linier.

Tabel 2.12 Koefisien Situs F_v

Kelas Situs	Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan pada periode pendek, $T=1$ detik, S_1					
	$S_s \leq 0,1$	$S_s = 0,2$	$S_s = 0,3$	$S_s = 0,4$	$S_s = 0,5$	$S_s \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$S_s^{(a)}$					

(Sumber: SNI 1726:2019)

Catatan:

- (a) Situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik.
- (b) Untuk nilai antara S_s dapat dilakukan dengan interpolasi linier.

Nilai F_a dan F_v digunakan untuk menghitung parameter respons percepatan pada periode pendek (SMS) dan pada periode ($SM1$), ditentukan sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.5)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.6)$$

Keterangan:

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan
periode pendek,

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan
periode 1 detik.

4. Parameter percepatan spektral desain

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) dan pada periode 1 detik (S_{D1}) harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.7)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.8)$$

5. Spektrum respons desain

Spektrum respons desain dibentuk setelah nilai dari SDS dan SD1 dihitung. Kurva spektrum respons desain dikembangkan dengan mengacu Gambar 2.3 dan mengikuti ketentuan dibawah ini:

1. Untuk $T \leq T_0$, spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.9)$$

dengan:

$$T_0 = 0,2 \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \right) \quad (2.10)$$

T = waktu getar alami, dinyatakan dalam detik.

2. Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$, spektrum respons percepatan desain S_a , sama dengan S_{DS} , dengan:

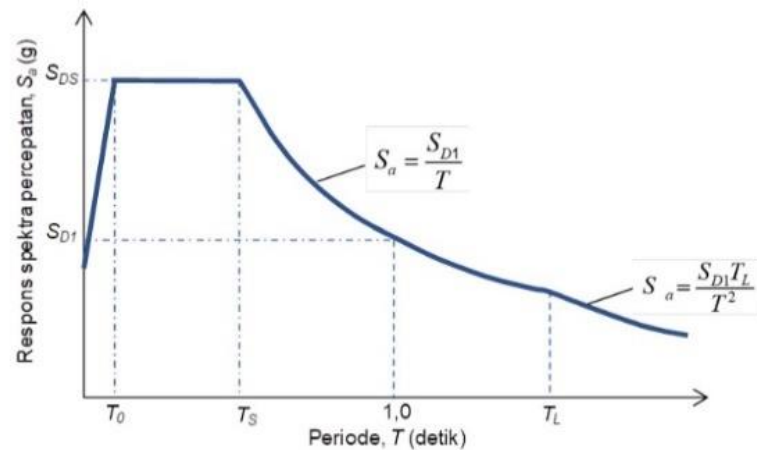
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.11)$$

3. Untuk periode yang lebih besar T_s dan lebih kecil atau sama dengan T_L , spektrum respon desain (S_a) diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.12)$$

4. Untuk periode lebih besar dari T_s , respons spektral percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (2.13)$$



Gambar 2.3 Grafik Spektrum Respon Desain

(Sumber : SNI 1726:2019)

6. Kategori desain seismik

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik yang mengikuti SNI 1726:2019. Kategori desain seismik dinyatakan dalam huruf A sampai F, dengan huruf A dikategorikan sebagai risiko gempa paling kecil. Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada periode 1 detik, $S_1 \geq 0,75$ harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F. Semua struktur lainnya harus ditetapkan kategori desain seismiknya berdasarkan kategori risiko dan parameter respons spektral percepatan desain, S_{DS} dan S_{D1} . Struktur yang masuk kedalam dua KDS, maka struktur harus ditetapkan ke dalam kategori desain seismik yang lebih parah. Berikut merupakan KDS berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang disajikan dalam Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Perioda Pendek (S_{DS})

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

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2.14 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons
Percepatan Periode Pendek (S_{D1})

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

7. Pemilihan sistem struktur

Sistem struktur gedung dibentuk oleh komponen balok, kolom, pelat dan dinding geser. Sistem struktur penahan gaya gempa lateral dan vertikal harus dipilih sesuai KDS dan ketinggian strukturnya. Setiap sistem pemikul gaya seismik yang dipilih harus didesain dan didetailkan sesuai dengan persyaratan khusus. Sistem struktur memiliki beberapa jenis yaitu sistem dinding penumpu (SDP), sistem rangka gedung (SRG), sistem rangka pemikul momen (SRPM) berdasarkan SNI 1726 terdapat 3 jenis SRPM yaitu SRPMB (B=Biasa), SRPMM (M=Menengah), SRPMK (K=Khusus) SRPMB tidak perlu pendetailan khusus. SRPMM dan SRPMK harus memenuhi persyaratan pendetailan. dan sistem ganda (SG) yang terdiri dari rangka ruang lengkap berupa SRPM yang memikul beban gravitasi dan dinding geser memikul beban lateral. Tipe-tipe sistem struktur yang dipilih harus mengacu pada Tabel 2.15 sesuai SNI 1726:2019.

Tabel 2.15 Faktor R , C_d , Ω_0 dan untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktru dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
Sistem rangka pemikul momen								
Rangka beton pemikul momen khusus	8	3	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB
Sistem ganda dengan SRPMK								
Dinding geser beton bertulang khusus	7	2 ½	5 ½	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber: SNI 1726:2019)

8. Ketidakberaturan struktur

Struktur harus diklasifikasikan beraturan atau tidak beraturan berdasarkan pada kriteria dalam pasal 7.3.2 SNI 1726:2019. Klasifikasi tersebut harus didasarkan pada konfigurasi horizontal dan vertikal dari struktur. Struktur yang mempunyai satu atau lebih tipe ketidakberaturan seperti yang terdapat dalam Tabel 13 dan 14 SNI 1726:2019 harus dinyatakan mempunyai ketidakberaturan struktur horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal. Struktur-struktur yang didesain untuk kategori desain seismik sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 13 dan tabel 14 harus memenuhi persyaratan dalam pasal-pasal yang dirujuk dalam tabel tersebut. Ketidakberaturan struktur vertikal tipe 1a, 1b atau 2 tidak perlu ditinjau jika tidak ada rasio simpangan antar lantai akibat gaya seismik lateral desain yang nilainya lebih besar dari 130% rasio simpangan antar lantai tingkat di atasnya. Pengaruh torsi tidak perlu ditinjau pada perhitungan simpangan antar lantai. Tabel 2.16 yang

menunjukkan ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan struktur vertikal berdasarkan SNI 1726:2019.

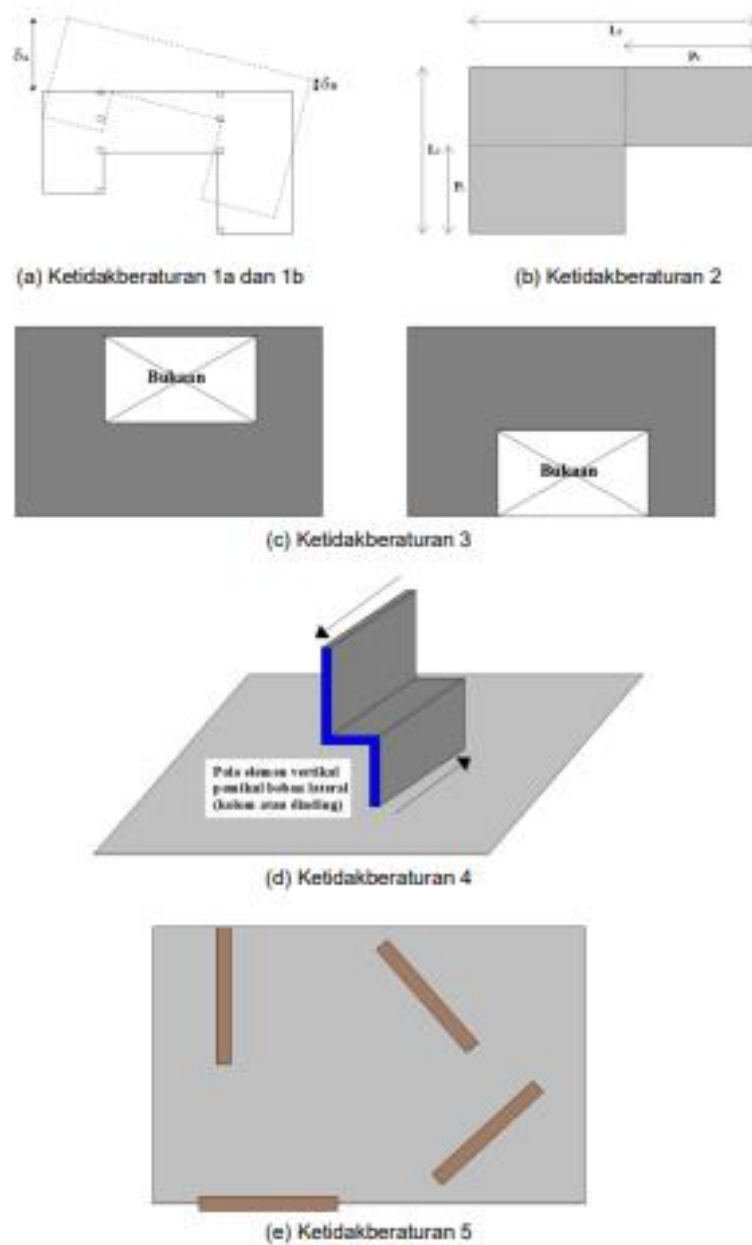
Tabel 2.16 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimun, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, disalah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur dimana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E dan F C, D, E dan F C, D, E dan F D, E dan F B, C, D, E dan F
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 16 11.3.4	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D

2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya	7.3.3.4 Tabel 16	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak turus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	B, C, D,E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefninisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

(Sumber: SNI 1726:2019)

Berikut gambar dari ketidakberaturan horizontal pada struktur:



Gambar 2.4 Ketidakberaturan Horizontal pada Struktur
(Sumber: SNI 1726:2019)

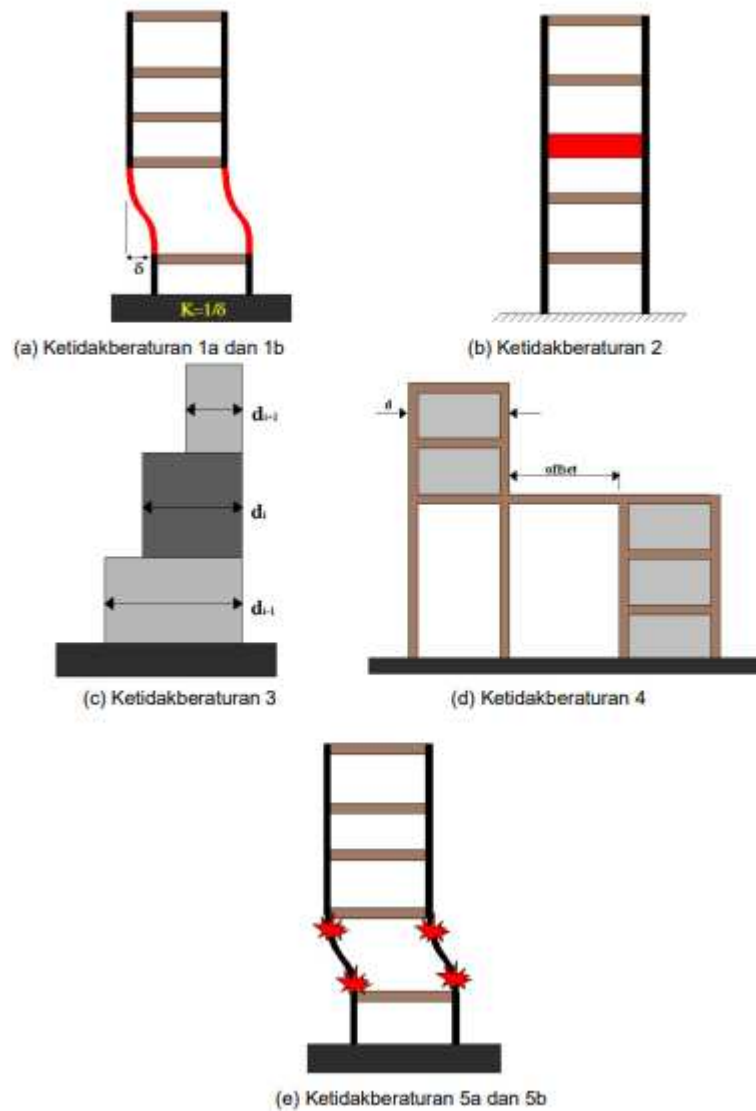
Tabel 2.17 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D,E, dan F
1b.	Ketidakberaturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E dan F
2.	Ketidakberaturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E dan F
3.	Ketidakberaturan geometrik vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130% dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya	Tabel 16	D, E dan F

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
4.	Ketidakberaturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 Tabel 16	B, C, D, E,F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
5b.	Ketidakberaturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 16	D, E, dan F B dan C D, E, dan F

(Sumber: SNI 1726:2019)

Ketidakberaturan vertikal struktur bisa dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ketidakberaturan Vertikal pada Struktur

(Sumber: SNI 1726:2019)

9. Simpangan antar lantai

Simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin (Δ_a) seperti didapatkan dari Tabel 2.18 ini untuk semua tingkat.

Tabel 2.18 Simpangan antar Tingkat Izin

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai.	$0,025 h_{sx}$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata ^d	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

(Sumber: SNI 1726:2019)

Catatan:

^a h_{sx} adalah tinggi tingkat dibawah tingkat-x.^b Untuk sistem pemikul gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen dalam kategori desain seismik D, E, F dan F, simpangan antar tingkat izin harus sesuai dengan persyaratan.^c Tidak boleh ada batasan simpangan antar tingkat untuk struktur satu tingkat dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.^d Struktur dimana sistem struktur dasar terdiri dari dinding geser batu bata yang didesain sebagai elemen vertikal kantilever dari dasar atau pendukung fondasinya yang dikonstruksikan sedemikian agar penyaluran momen di antara dinding geser (kopel) dapat diabaikan.

2.3.5.1 Prosedur Analisis Dinamik (Spektrum Respons Ragam)

Metode analisis respon spektrum merupakan metode analisis struktur bangunan dengan menggunakan spektrum gempa yang digambarkan dalam bentuk kurva hubungan antara periode dengan nilai percepatan bangunan ketika terkena beban gempa. Struktur gedung tidak beraturan yang tidak memenuhi ketentuan Pasal 7.3.2 SNI 1726:2019, pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung tersebut harus ditentukan melalui analisis respons dinamik 3 dimensi menggunakan

bantuan perangkat lunak. Upaya mencegah terjadinya respons struktur gedung terhadap pembebanan gempa yang dominan dalam rotasi, maka gerak ragam pertama (fundamental) harus dominan dalam translasi.

Ketentuan analisis spektrum respons ragam diatur dalam pasal 7.9 SNI 1726:2019. Berikut merupakan ketentuan-ketentuan analisis spektrum respons :

1. Jumlah Ragam

Analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100 % dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan analisa ini, ragam satu badan kaku (single rigid body) dengan periode 0,05 detik, diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik.

2. Parameter Respons Ragam

Nilai untuk masing-masing parameter desain terkait gaya yang ditinjau, termasuk simpangan antar tingkat, gaya dukung, dan gaya elemen struktur individu untuk masing-masing ragam respons harus dihitung menggunakan properti masing-masing ragam dan spektrum respons didefinisikan dalam R dibagi dengan kuantitas (R/I_e). Nilai untuk perpindahan dan kuantitas simpangan antar tingkat harus dikalikan dengan kuantitas (C_d/I_e).

3. Parameter Respons Terkombinasi

Nilai untuk masing-masing parameter yang ditinjau, yang dihitung untuk berbagai ragam, harus dikombinasikan menggunakan metode akar kuadrat jumlah kuadrat (SRSS) atau metode kombinasi kuadrat lengkap (CQC), sesuai dengan SNI 1726:2019. Metode CQC harus digunakan untuk masing-masing nilai ragam dimana ragam yang berdekatan mempunyai korelasi silang yang signifikan di antara respons translasi dan torsi.

4. Skala Nilai Desain untuk Respons Terkombinasi

Geser dasar (V) harus dihitung dalam dua arah horizontal ortogonal menggunakan periode fundamental struktur yang dihitung T dalam masing-masing arah dan prosedur ekuivalen. Penskalaan gaya apabila periode fundamental hasil analisis lebih besar dari $C_u.T_a$ pada suatu arah

tertentu, maka periode struktur T harus diambil sebesar $C_u T_a$. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_i) kurang dari 100 % dari gaya geser (V) yang dihitung melalui metode statik ekuivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan V/V_i , dimana V adalah gaya geser dasar statik ekuivalen yang dihitung sesuai pasal ini dan V_i adalah gaya geser dasar yang didapatkan dari hasil analisis kombinasi ragam. Apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam (V_i) $< C_s W$, dan dimana C_s ditentukan berdasarkan persamaan (2.15), maka simpangan harus dikalikan dengan $C_s W/V_i$.

5. Distribusi Geser Horizontal

Distribusi geser horizontal harus sesuai dengan persyaratan pasal 7.8.4, kecuali bahwa pembesaran torsi menurut 7.8.4.3, tidak disyaratkan bila pengaruh torsi tak terduga disertakan dalam model analisis dinamik.

6. Pengaruh P-delta

Pengaruh P-delta harus ditentukan sesuai dengan peraturan. Geser dasar yang digunakan untuk menentukan geser tingkat dan simpangan antar tingkat harus sesuai pada Pasal 7.9.1.6 SNI 1726-2019.

2.3.5.2 Prosedur Analisis Statik Ekuivalen

Prosedur perhitungan gaya lateral statik ekuivalen berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 7.8, berikut prosedur perhitungannya:

1. Geser Dasar Seismik

Gaya geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_s \cdot W \quad (2.14)$$

Keterangan:

C_s = koefisien respons seismik

W = Berat seismik efektif struktur

2. Perhitungan Koefisien Respons Seismik

a) Koefisien respons seismik, C_s harus dihitung dengan persamaan:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \quad (2.15)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter percepatan spektrum respon desain dalam rentang periode pendek

R = faktor modifikasi respon

I_e = faktor keutamaan gempa

b) Nilai C_s yang dihitung menggunakan persamaan diatas tidak perlu melebihi:

$$C_{s(maxs)} = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.16)$$

c) Nilai C_s yang dihitung juga tidak boleh kurang dari:

$$C_{s(min)} = 0,044 \cdot S_{DS} I_e \geq 0,01 \quad (2.17)$$

d) Struktur dengan nilai $S_1 \geq 0,6g$, maka C_s dihitung:

$$C_s = \frac{0,5S_1}{\left(\frac{R}{I_e} \right)} \quad (2.18)$$

Keterangan:

S_{D1} = parameter percepatan respon spektral desain pada periode sebesar 1,0 detik

T = periode fundamental struktur (detik)

S_1 = parameter percepatan respon spektral maksimum

3. Waktu Getar Alami

Periode alami struktur (T) dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode alami tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dari tabel dan periode alami pendekatan (T_a). Berikut tabel koefisien C_u :

Tabel 2.19 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respon spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4

0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber: SNI 1726:2019)

Sebagai alternatif dalam melakukan analisis untuk menentukan periode alami struktur (T) diizinkan secara langsung menggunakan periode pendekatan (T_a) yang dihitung menggunakan rumus:

$$T_a = C_t h_n^x \quad (2.19)$$

Dengan:

h_n = ketinggian struktur (m) diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktrur. C_t dan x ditentukan berdasarkan Tabel 2.20.

Tabel 2.20 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik :		
- Rangka Baja Pemikul Momen	0,0724	0,8
- Rangka Beton Pemikul Momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua struktur lainnya	0,0488	0,75

(Sumber: SNI 1726:2019)

4. Distribusi Vertikal Gaya Seismik

Pada distribusi vertikal gaya gempa, gaya gempa lateral (F_x) (kN) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.20)$$

Dengan,

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.21)$$

Keterangan:

- C_{vx} = faktor distribusi vertikal
 V = gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur, dinyatakan dalam kilonemton (kN)
 w_i dan w_x = bagian berat seismik efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x
 h_i dan h_x = tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x (m)
 k = eksponen yang terkait dengan perioda struktur sebagai berikut: untuk struktur yang mempunyai perioda sebesar 2,5 detik atau lebih, $k = 2$, untuk struktur yang mempunyai perioda antara 0,5 dan 2,5 detik, k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2.

5. Distribusi Horizontal Gaya Gempa

Sedangkan pada distribusi horizontal gaya gempa, geser tingkat desain gempa di semua tingkat (V_x) (kN) harus ditentukan dari persamaan berikut :

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (2.22)$$

Keterangan:

F_i adalah bagian dari geser dasar seismic (V) yang timbul di tingkat i , (kN).

Geser tingkat desain gempa (V_x) (kN) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal system penahan gaya gempa di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relative elemen penahan vertikal dan diafragma.

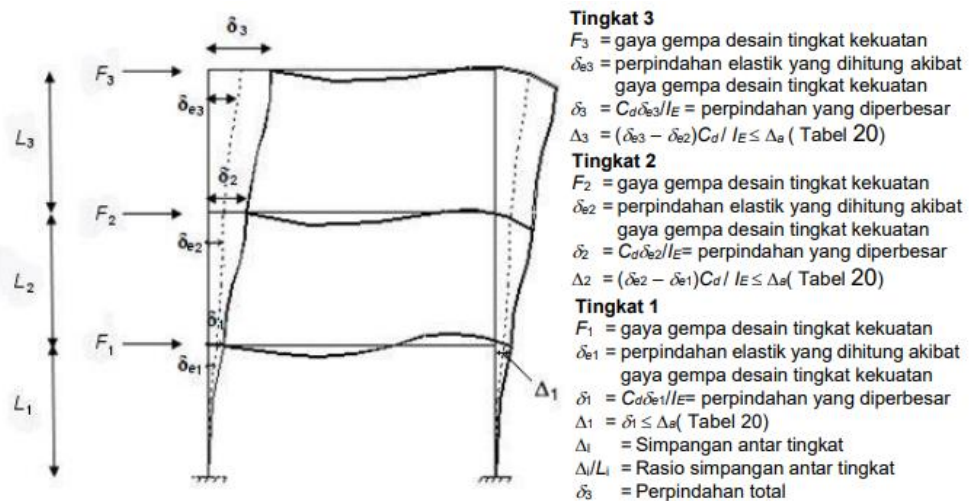
6. Penentuan Simpangan Antar Lantai (Δ)

Penentuan simpangan antar tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan simpangan pada pusat massa di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau (Gambar 2.6). Apabila pusat massa tidak segaris dalam arah vertikal, diizinkan untuk menghitung simpangan di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya.

Untuk sistem pemikul gaya seismik yang terdiri dari hanya rangka momen pada struktur yang didesain untuk kategori desain seismik D, E, atau F, simpangan antar tingkat desain (Δ) tidak boleh melebihi Δ_a/p untuk semua tingkat. Simpangan izin antar tingkat (Δ_a) dapat dilihat pada Tabel 2.21.

Tabel 2.21 Simpangan Antar Tingkat Izin (Δ_a)

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0,025h_{sx}$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser katilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$



Gambar 2.6 Penentuan Simpangan antar Lantai

(Sumber: SNI 1726:2019)

Bagi struktur yang didesain untuk kategori desain seismik C, D, E atau F yang memiliki ketidakberaturan horizontal Tipe 1a atau 1b pada Tabel 13, simpangan antar tingkat desain, Δ , harus dihitung sebagai selisih terbesar dari

simpangan titiktitik yang segaris secara vertikal di sepanjang salah satu bagian tepi struktur, di atas dan di bawah tingkat yang ditinjau. Simpangan pusat massa di tingkat-x (δx) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan (2.99):

$$\delta x = \frac{C_d \cdot \delta x_e}{I_e} \quad (2.23)$$

Keterangan:

- C_d = faktor pembesaran simpangan lateral dalam Tabel 12 SNI 1726:2019.
- δx_e = simpangan di tingkat-x yang disyaratkan pada pasal ini, yang ditentukan dengan analisis elastik
- I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan Tabel 3 pada SNI 1726:2019

7. P-delta

Pengaruh P-delta pada geser tingkat dan momen, gaya dan momen elemen struktur yang dihasilkan, dan simpangan antar tingkat yang diakibatkannya tidak perlu diperhitungkan bila koefisien stabilitas (θ) seperti ditentukan oleh persamaan (2.100) sama dengan atau kurang dari 0,10 :

$$\theta = \frac{P_x \Delta I_e}{V_x \cdot h_{sx} \cdot C_d} \quad (2.24)$$

Keterangan:

- θ = Koefisien stabilitas
- P_x = beban desain vertikal total pada dan di atas tingkat-x, (kN); bila menghitung , faktor beban individu tidak perlu melebihi 1,0
- Δ = simpangan antar tingkat desain seperti didefinisikan dalam penentuan simpangan antar lantai, terjadi secara serentak dengan V_x (mm)
- I_e = faktor keutamaan gempa yang ditentukan sesuai dengan Tabel 3 pada SNI 1726:2019
- V_x = gaya geser seismik yang bekerja antara tingkat x dan x – 1 (kN)

h_{sx} = tinggi tingkat di bawah tingkat x (mm)

C_d = faktor pembesaran defleksi dalam Tabel diatas

Koefisien stabilitas (θ) tidak boleh melebihi θ_{maks} , ditentukan sebagai berikut:

$$\theta_{maks} = \frac{0,5}{\beta C_d} \leq 0,25 \quad (2.25)$$

Keterangan:

θ_{maks} = koefisien stabilitas maksimum

β = rasio kebutuhan geser terhadap kapasitas geser untuk tingkat x dan x-1, rasio ini diizinkan secara konservatif diambil sebesar 1,0

C_d = faktor pembesaran defleksi dalam diatas.

2.3.6 Beban Kombinasi

Setiap komponen struktur dirancang untuk dapat memikul beban yang lebih besar dari pada beban layan guna memberikan jaminan keamanan terhadap kegagalan struktur. Beban-beban yang bekerja pada struktur dapat berupa kombinasi dari berbagai macam kasus beban yang mungkin terjadi pada saat yang bersamaan. Besaran faktor beban harus cukup untuk membatasi kegagalan struktur secara tiba-tiba, namun juga harus menghasilkan struktur yang seekonomis mungkin, sehingga struktur dapat berfungsi dengan baik selama umur rencana.

Berdasarkan persyaratan dalam SNI 2847:2019 pasal 5.3 besarnya kuat perlu (U) yang harus dipertimbangkan sebagai kondisi paling kritis yang harus dipikul suatu elemen struktur ditunjukkan dalam Tabel 2.22.

Tabel 2.22 Kombinasi Beban

Kombinasi beban	Persamaan	Beban utama
$U = 1,4D$	(1)	D
$U = 1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	(2)	L
$U = 1,2D + 1,6(L_r \text{ atau } R) + (1,0L \text{ atau } 0,5 W)$	(3)	L_r atau R
$U = 1,2D + 1,0W + 1,0L + 0,5(L_r \text{ atau } R)$	(4)	W
$U = 1,2D + 1,0E + 1,0L$	(5)	E
$U = 0,9D + 1,0W$	(6)	W
$U = 0,9D + 1,0E$	(7)	E

(Sumber SNI 2847:2019)

Keterangan:

U	=	kombinasi beban terfaktor
D	=	beban mati (<i>dead load</i>)
L	=	beban hidup (<i>live load</i>)
L_r	=	beban hidup atap (<i>live roof load</i>)
R	=	beban hujan (<i>rain load</i>)
W	=	beban angin (<i>wind load</i>)
E	=	beban gempa (<i>earth quake load</i>)

Berikut merupakan beberapa catatan tambahan untuk kombinasi beban:

1. Faktor beban hidup (L) dalam persamaan (4,5,6) diizinkan direduksi hingga 0,5, kecuali untuk garasi, tempat berkumpul publik dan luasan dimana L lebih besar dari 4,8 kN/m².
2. Bila beban angin (W) didasarkan pada tingkat layan, 1,6W harus digunakan sebagai pengganti dari 1,0W dalam persamaan (4 dan 6) dan 0,8W harus digunakan sebagai pengganti pada persamaan (3).

2.4 *Bubble Deck*



Gambar 2.7 *Bubble Deck*

(sumber: bubbledeck.com)

Bubble deck bukan inovasi baru ada, melainkan mulai dikembangkan pada tahun 1996 di Denmark oleh Professor Jorgen Breuning, namun penerapannya di Indonesia belum masif. *Bubble deck* ialah teknologi konstruksi prefabrikasi berbentuk bola berongga terbuat dari plastik *high density polyethylene* (HDPE).

Inovasi *bubble deck* mensubstitusi beton yang berada pada pelat, sehingga mereduksi beban mati sendiri hingga 35% (Bhowmik dkk., 2017).

Beberapa bangunan yang sudah menggunakan teknologi inovasi konstruksi ini diantaranya, Piemonte Tower di Italia, Tropicana Garden Office Tower di Malaysia, Deichman Library di Norwegia, Museo Internacional del Barroco di Meksiko. Bangunan diatas tersebut menggunakan *semi-precast module*, sehingga memudahkan dan memakan waktu lebih sedikit dalam pengerjaannya.

2.4.1 Jenis-jenis *Bubble Deck*

Jenis *bubble deck* berdasarkan cara instalasi terbagi dua yakni:

1. *In-situ concrete*, yakni pelaksanaan pengecoran sepenuhnya di lokasi sehingga yang di fabrikasi hanya tulangan dan *bubble deck*. Jenis ini memerlukan bekisting seperti pelat lantai konvensional. Jenis ini cocok untuk area konstruksi yang memiliki akses kurang lebar.



Gambar 2.8 *Insitu Concrete Bubble deck*

(sumber: bubbledeck.com)

2. *Semi-precast module*, memfabrikasi dengan membuat pelat *precast* setebal 1/5 dari tebal pelat, sehingga tulangan bagian bawah dan *bubble deck* menempel pada pelat *precast*.



Gambar 2.9 Semi-precast Module

(Sumber: bubbledeck.com)

2.4.2 Kelebihan dan Kekurangan *Bubble Deck*

Kelebihan *bubble deck* (Bhowmik dkk., 2017), antara lain:

1. Ringan, *bubble deck* menggunakan bola plastik sebagai pengganti sebagian besar beton di dalam pelat. Ini mengurangi berat total struktur, meminimalkan beban pada fondasi, dan mengurangi biaya transportasi.
2. Efisien, dengan mengurangi beton, *bubble deck* memperbesar jarak antara penyokong hingga 50% dibandingkan dengan metode beton. Ini memungkinkan ruang yang lebih luas tanpa mengorbankan kekuatan struktural.
3. Integrasi mudah, seperti pipa, saluran udara, dan penetrasi lainnya dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam pelat *bubble deck*.
4. Berkelanjutan, 1 kg plastik daur ulang dapat menggantikan 100 kg beton. Dengan penggunaan beton yang lebih sedikit, dapat mengurangi hingga 40% karbon yang terkandung dalam pelat (Shetkar & Hanche, 2015).

Kekurangan *bubble deck* (Bhowmik dkk., 2017), diantaranya:

1. *Punching shear capacity* yang rendah, ini menjadi masalah utama karena penurunan berat pelat, sehingga kekuatan pelat dalam menahan beban geser menurun.

2. Ketebalan akhir pelat lebih tinggi dibanding dengan pelat beton, hal ini terjadi karena *bubble deck* yang tersedia di pasaran hanya memiliki diameter terkecil sebesar 18 cm.
3. Diperlukan tukang yang berkemampuan atau yang sudah terbiasa dalam pemasangannya.
4. Tidak berlaku pada bangunan yang memiliki ketebalan pelat yang terbatas.

2.4.3 Hasil Pengujian pada *Bubble Deck*

Pandey & Srivastava (2016) dalam penelitiannya berjudul “*Analysis of Bubble Deck Slab Design by Finite Element Method*”, yang menjelaskan perbedaan kekuatan pelat beton dengan pelat *bubble deck*. Tegangan dan gaya internal maksimum pada model pelat geladak bubble deck melebihi tegangan dan gaya pada pelat beton. Momen maksimum dan maksimum dan tegangan internal pelat *bubble deck* 64% lebih tinggi dari pelat beton. Untuk studi lebih lanjut pada pelat *bubble deck* dan pelat beton. Analisis dilakukan pada pelat solid dan pelat geladak gelembung di ANSYS2000. Kedua pelat yang dimodelkan dalam ANSYS2000 sesuai dengan parameter model eksperimental dan pelat dianalisis untuk respon statik di bawah parameter pembebanan yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa gaya geser, tegangan dan defleksi yang terjadi pada pelat *bubble deck* lebih kecil dibanding pelat beton. Hal ini merupakan konsekuensi dari berkurangnya beban mati dari *bubble deck* yang mensubstitusi beton.

Tabel 2.23 Gaya Geser, Tegangan dan Defleksi Hasil Pengujian Pelat *Bubble Deck*

Pelat	Gaya Geser V13 (kN)	Gaya Geser V23 (kN)	Tegangan Smax (kN)	Defleksi U (mm)
Beton	340,047	339,469	95,779	2.8382
<i>Bubble deck</i>	305,896	305,434	83,289	3.5017
Selisih	10,029%	10,029%	13,04%	18,2%

(Sumber: Pandey & Srivastava, 2016)

Pemodelan pelat *bubble deck* pada aplikasi ETABS tidak jauh berbeda dengan pemodelan pelat beton. Hanya ada beberapa perubahan properti material yaitu pada *rigidity factor* (faktor kekakuan) dan *shear factor* atau faktor geser

(Jathar dkk., 2021). Hal ini terjadi dikarenakan beton yang disubstitusi oleh *bubble deck* sehingga bahan pembentuk pelat tidak seragam. Berkurangnya berat pelat ketika menggunakan *bubble deck*, ada konsekuensi yang harus diterima yakni berkurangnya kuat tekan ultimit dan pelat menjadi lebih daktil (Mahdi & Mohammed, 2021). Untuk lebih detail mengenai perubahan faktor pada pelat *bubble deck*, lihat Tabel 2.24.

Tabel 2.24 Spesifikasi Teknis *Bubble Deck*

Nama	Diameter bola (mm)	Tebal pelat minimum (mm)	Jarak minimal antar bola (mm)	Reduksi Faktor kekakuan	Reduksi Faktor geser
BD230	180	230	200	0,88	0,6
BD280	225	280	250	0,88	0,6
BD340	270	340	300	0,88	0,6
BD390	315	390	350	0,88	0,6
BD450	360	450	400	0,88	0,6
BD510	405	510	450	0,88	0,6
BD600	450	600	500	0,88	0,6

(Sumber: www.bubbledeck.com)

2.5 Sistem Struktur Tahan Gempa

Sistem struktur tahan gempa adalah metode desain dan konstruksi yang bertujuan mengurangi risiko kerusakan pada bangunan saat terjadi gempa bumi. Sistem ini dirancang untuk menyerap dan mendistribusikan kombinasi beban gravitasi dan beban lateral yang dipikul oleh elemen struktur, sehingga mengurangi risiko keruntuhan pada bagian lain bangunan.

2.5.1 Sistem Struktur Rangka (*Frame System*)

Sistem rangka pemikul momen (SRPM) adalah sitem rangka yang elemen-elemen struktur dan joinnya mampu memikul gaya yang terjadi melalui aksi lentur, geser, dan aksial (Almufid & Santoso, 2021). Berdasarkan SNI 2847-2019 sistem rangka terbagi menjadi 3 (tiga) yaitu:

1. Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB), adalah sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847-2019 pasal 18.3. Sistem rangka ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas terbatas dan hanya cocok digunakan didaerah dengan risiko gempa yang rendah (wilayah gempa 1).
2. Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM), sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847-2019 pasal 18.4. Sistem rangka ini pada dasarnya memiliki tingkat daktilitas sedang dan cocok digunakan didaerah dengan risiko gempa yang menengah (wilayah gempa 3).
3. Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), sistem rangka yang ketentuan-ketentuannya harus memenuhi SNI 2847-2019 pasal 18.6 – 18.9. Sistem rangka ini memiliki daktilitas penuh. Sistem rangka pemikul momen khusus wajib digunakan pada daerah dengan risiko gempa yang tinggi (wilayah gempa 5 dan 6) (Mahendrayu & Kartini, 2012).

2.5.2 Sistem Struktur Dinding (*Wall System*)

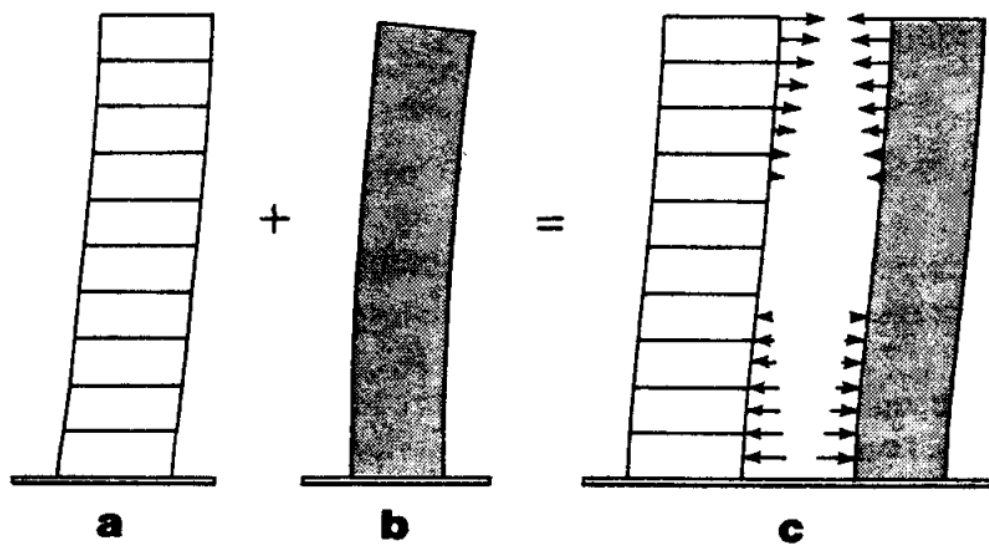
Sistem struktur ini mempunyai ciri khas penggunaan elemen dinding sebagai struktur utama dalam memikul beban gravitasi dan gempa. Dinding yang dipakai berupa beton bertulang (*shear wall*) atau susunan batu (*masonry*) yang terhubung dengan elemen balok dan kolom. Kemudian untuk proses desain struktur balok dan kolom pengaruh gempa diabaikan dan hanya difokuskan memikul beban gravitasi. Berdasarkan kekakuan struktur dan biaya sistem ini efektif untuk gedung tingkat rendah dan menengah.

Berdasarkan SNI 2847-2019 terdapat Sistem Dinding Struktur Khusus (SDSK), yang digunakan pada struktur dengan KDS D,E, atau F. Sistem ini harus memenuhi Pasal 18.10. Selain SDSK, terdapat juga dinding struktural umum untuk struktur dengan KDS A,B, atau C. Secara prinsip desain, tidak terdapat perhitungan yang berbeda dari struktural khusus. Hal yang menjadi pembeda pada struktural umum, yaitu tidak mewajibkan penggunaan *Boundary Elemen* (BE).

2.5.3 Sistem Struktur Ganda (*Dual System*)

Sistem ganda adalah sistem struktural yang kerangka dasarnya lengkap memberikan dukungan untuk beban gravitasi dan ketahanan terhadap beban lateral disediakan oleh kerangka penahan momen dan dinding geser yang dirinci secara khusus atau kerangka yang diperkuat (H. Abdulabbas & A. Ismael, 2022). Berdasarkan SNI 2847:2019 rangka penahan momen pada sistem ganda harus mampu menahan setidaknya 25% dari geser dasar dan kedua sistem harus dirancang untuk menahan beban lateral total sebanding dengan kekakuan relatifnya.

Pada struktur sistem ganda, gabungan portal dengan dinding geser saling berinteraksi antar keduanya. Hal itu dikarenakan kedua sistem tersebut memiliki perilaku defleksi yang berbeda. Dinding geser akan berperilaku *flexural/bending mode* ketika menerima beban lateral sedangkan *frame* akan berdeformasi dalam *shear mode* (Widyaningrum & Haryanto, 2019). Diagram interaksi antara portal (*frame*) dengan dinding geser dijelaskan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pola Deformasi dan Interaksi Portal (*frame*) dengan Dinding Geser

(Sumber: Schueller, 1989)

- a) Deformasi mode geser untuk rangka kaku (gambar-a), sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada dasar struktur dimana terjadi geser maksimum.
- b) Deformasi mode lentuk untuk dinding geser (gambar-b), sudut deformasi (lendutan) paling besar terjadi pada bagian atas bangunan sehingga sistem

dinding geser memberikan kekakuan paling kecil pada bagian atas bangunan.

- c) Interaksi antara rangka kaku dan dinding geser (gambar-c), interaksi diperoleh dengan membuat superposisi mode s defleksi terpisah yang menghasilkan kurva S datar. Perbedaan sifat defleksi antara dinding geser dan rangka kaku menyebabkan geser akibat gaya lateral akan dipikul oleh dinding geser dibagian bawah bangunan.

2.6 Struktur Atas

2.6.1 Balok

Balok merupakan salah satu elemen utama penyusun struktur gedung yang umumnya terpasang secara horizontal/lateral. Fungsi utama dari balok adalah menyalurkan beban gravitasi yang berasal dari pelat lantai, kemudian menyalurkan kedalam elemen kolom berupa gaya dan momen. Selain itu balok juga bisa berperan sebagai elemen penahan gempa yang bereperan aktif dalam menjaga kestabilan struktur dengan menyerap energi gempa melalui sendi plastis pada ujung ujungnya(Lesmana, 2020).

2.6.1.1 Preliminary Design Balok

Tinggi minimum balok (h) dapat ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019, pasal 9.3.1. Adapun detailnya dapat dilihat pada Tabel 2.25. Kemudian untuk lebar minimum dari balok sesuai pasal 18.6.2, yaitu minimum lebar balok (b_w) harus sekurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250 mm.

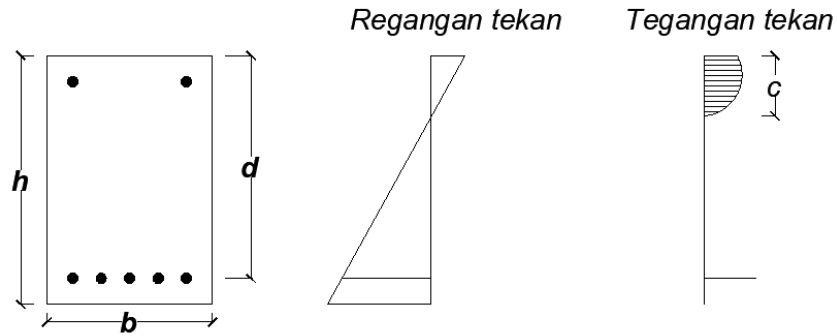
Tabel 2.25 Tinggi Minimum Balok Nonprategang

Kondisi Perletakan	Minimum $h^{[1]}$
Perletakan sederhana	$l/16$
Menerus satu sisi	$l/18,5$
Menerus dua sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

(Sumber: SNI 2847:2019)

2.6.1.2 Balok Persegi dengan Tulangan Tunggal

Balok tulangan tunggal sering juga disebut dengan balok bertulangan sebelah atau balok dengan tulangan saja. Berikut merupakan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi regangan dan tegangan beton yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Distribusi Tegangan-regangan Balok Beton Bertulang

(Sumber: *Handbook Beton Bertulang*, Yudha Lesmana)

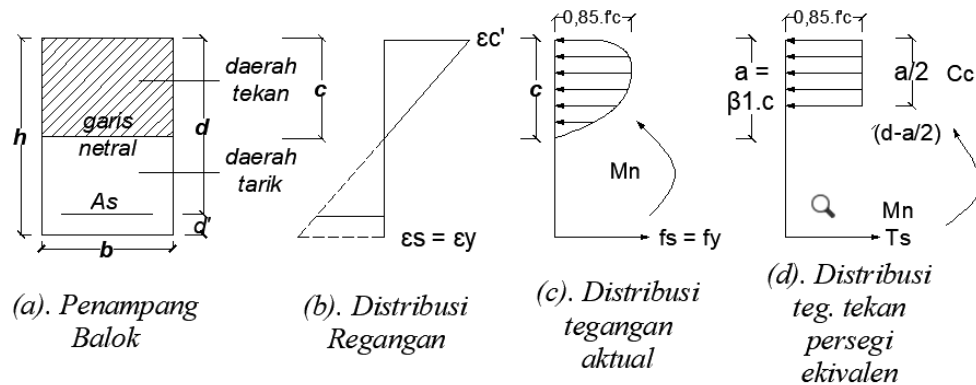
Analisis dan desain penampang balok menggunakan distribusi balok tegangan ekuivalen berbentuk persegi empat atau dikenal dengan balok tegangan Whitney. Blok tegangan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

- Tegangan tekan merata sebesar $0,85.f'_c$ diasumsikan merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis yang sejajar sumbu netral sejauh $a = \beta_1.c$ dari serat beton yang mengalami regangan maksimum.
- Jarak c dari serat dengan regangan tekan maksimum ke sumbu netral harus diukur tegak lurus sumbu tersebut.
- Faktor β_1 dapat ditentukan sebagai berikut:
 - $f'_c \leq 28 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85$
 - $28 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 56 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f'_c - 28}{7}$
 - $f'_c \geq 56 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,65$

Resultan gaya tekan yang terjadi dengan lebar b dan tinggi sumbu netral c adalah:

$$C = 0,85 f'_c \beta_1 b c \quad (2.26)$$

Pada balok persegi panjang tulangan tunggal dengan kondisi seimbang distribusi tegangan dan regangannya sebagai berikut :



Gambar 2.12 Distribusi Regangan dan Tegangan Balok Tulangan Tunggal

(Sumber : Asroni, 2010)

Dari diagram regangan pada gambar diatas, maka dengan menggunakan perbandingan segitiga akan diperoleh hubungan berikut:

$$c_b = \left(\frac{0,003}{0,003 + f_y/E_s} \right) \cdot d \quad (2.27)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya tekan dan gaya tarik baja, maka dapat dituliskan:

$$C = T$$

$$0,85 \cdot f'_c a_b b = A_{sb} \cdot f_y \quad (2.28)$$

Untuk menghitung kebutuhan tulangan terlebih dahulu dihitung presentase penulangan. Rumus rasio penulangan:

- Tulangan seimbang

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.29)$$

- Tulangan minimum

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.30)$$

- Tulangan maksimum

$$\rho_{maks} = \left(\frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.31)$$

- Tulangan perlu

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{0,85 \cdot \phi \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}} \right] \quad (2.32)$$

Momen rencana dari suatu balok persegi bertulangan tunggal dihitung dengan mengalikan C atau T dengan jarak antara kedua gaya tersebut. Maka rumusnya sebagai berikut:

$$\phi M_n = \phi \cdot C \cdot z = \phi \cdot T \cdot z \quad (2.33)$$

$$\phi M_n = \phi \cdot 0,85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.34)$$

Jika, $A_s = \rho b d$ dan nilai a disubstitusikan, maka rumus momen rencana menjadi sebagai berikut :

$$\phi M_n = \phi \cdot \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c} \right) \quad (2.35)$$

dengan:

$\phi = 0,9$ (faktor reduksi)

Prosedur perhitungan desain dan analisis penampang balok bertulangan tunggal dengan nilai b dan d diketahui, berikut prosedur perhitungannya:

1. Hitung nilai rasio tulangan maksimum (ρ_{maks}).
2. Hitung nilai momen rencana maksimum ($\phi M_{u maks}$).
3. Jika $M_u \leq \phi M_n$, maka tidak perlu tulangan tekan. Nilai ρ dan A_s dapat dihitung.
4. Jika $M_u \geq \phi M_n$, maka diperlukan tulangan tekan, yang dihitung dengan menggunakan perhitungan balok bertulangan rangkap.

2.6.1.3 Balok Persegi Panjang dengan Tulangan Rangkap

Balok bertulangan rangkap merupakan balok yang didesain memiliki tulangan tarik dan tekan. Penggunaan tulangan tekan dipakai pada daerah momen negatif serta dipasang pada balok yang memikul beban berat dengan persyaratan lendutan yang ketat. Berikut keuntungan balok tulangan rangkap :

1. Mengurangi lendutan jangka panjang.
2. Meningkatkan daktilitas.
3. Menghasilkan keruntuhan tarik pada struktur.
4. Memudahkan dalam fabrikasi.

Analisis balok tulangan rangkap terdapat dua kondisi tulangan tekan, yaitu tulangan tekan sudah luluh dan belum.

a. Tulangan tekan sudah luluh

Momen internal balok tulangan rangkap dibedakan menjadi dua macam. M_{u1} merupakan momen internal yang dihasilkan dari gaya tekan pada beton dan gaya tarik ekuivalen pada tulangan baja A_{s1} , sedangkan M_{u2} merupakan momen internal tambahan yang diperoleh dari gaya tekan pada penulangan tekan A_s' .

Rumus perhitungan M_{u1} :

$$M_{u1} = \phi \cdot A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (2.36)$$

Dengan:

$$a = \frac{A_{s1} \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \quad (2.37)$$

Syarat batas tulangan A_{s1} adalah $\rho = (A_{s1} / bd) \leq \rho_{maks}$. Berikut rumus M_{u2} dengan asumsi tulangan tekan (A_s') sudah luluh:

$$M_{u2} = \phi \cdot A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad (2.38)$$

Momen nominal yang dihasilkan dari tulangan rangkap merupakan gabungan dari M_{u1} dan M_{u2} .

$$M_n = M_{u1} + M_{u2} \quad (2.39)$$

Luas tulangan total tulangan rangkap adalah jumlah dari A_{s1} dan A_s' .

$$A_s = A_{s1} + A_s' \quad (2.40)$$

Asumsi tulangan tekan sudah luluh harus memenuhi sebagai berikut:

$$\epsilon_s' = \left(0,003 \left(\frac{c - d'}{c}\right)\right) \geq \epsilon_s \left(\frac{f_y}{E_s}\right) \quad (2.41)$$

Dari kesamaan segitiga diatas sumbu netral, serta nilai $E_s = 200000$ MPa, maka:

$$c = \left(\frac{600}{600 - f_y}\right) \cdot d' \quad (2.42)$$

Maka didapat disimpulkan rumus tulangan tekan yang mengalami luluh sebagai berikut:

$$(\rho - \rho') \geq 0,85 \cdot \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{d'}{d} \right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \quad (2.43)$$

b. Tulangan tekan belum luluh

Tulangan tekan belum luluh berarti tulangan baja tarik akan luluh sebelum beton mencapai regangan maksimum (0,003) dan regangan tulangan tekan (ϵ_s') belum mencapai ϵ_y pada saat terjadi keruntuhan. Luluhnya tulangan tekan dipengaruhi oleh letaknya terhadap serat terluar (d'), semakin tinggi rasio d'/c maka tulangan tekan semakin dekat dengan sumbu netral dan semakin kecil kemungkinan tulangan tekan mencapai kuat luluhnya. Berikut rumus untuk menentukan tulangan belum luluh :

$$(\rho - \rho') < 0,85 \cdot \beta_1 \left(\frac{f'_c}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{d'}{d} \right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_y} \right) \quad (2.44)$$

Kuat momen rencana penampang dapat dicari dengan rumus berikut:

$$\phi M_n = \phi \left[C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \quad (2.45)$$

Bila tulangan tekan belum luluh ($f_s' < f_y$), maka luas total tulangan tarik yang dibutuhkan untuk suatu penampang persegi adalah:

$$A_s = bd \left(\rho_{maks} + \frac{\rho' f_s'}{f_y} \right) \quad (2.46)$$

2.6.1.4 Kuat Geser Balok

Balok yang mengalami pembebanan akan menimbulkan reaksi berupa gaya-gaya dalam, di antaranya adalah momen lentur dan gaya geser. Balok harus didesain terhadap gaya dalam tersebut, dalam desain balok terhadap momen lentur didapat dimensi penampang serta kebutuhan tulangan lentur. Balok harus didesain untuk mencukupi memikul gaya geser yang terjadi, apabila tulangan geser tidak dipasang maka kegagalan geser akan terjadi yang ditandai dengan lendutan kecil, kurangnya daktilitas akan mengakibatkan keruntuhan struktur secara tiba-tiba. Faktor keamanan untuk geser supaya menghindari terjadinya kegagalan geser terjadi

sebelum kegagalan lentur memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan lentur yaitu sebesar $\phi = 0,75$.

Tahanan geser pada balok beton bertulang didapatkan dari kombinasi beberapa mekanisme berikut:

1. Tahanan geser beton yang didasarkan pada penampang yang masih utuh belum mengalami retak, V_z .
2. Transfer geser antar muka akibat lekatan agregat sepanjang bidang retak, V_a .
3. Tahanan yang diberikan oleh tulangan memanjang, V_d .

Beberapa rumus yang digunakan sebagai acuan untuk menghitung tahanan geser/begel balok yang terdapat dalam SNI 2847-2019, yakni sebagai berikut:

1. Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019, kuat geser nominal penampang (V_n) dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.47)$$

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 22.5.1.2 SNI 2847:2019, ukuran dimensi untuk desain penampang harus memenuhi persamaan:

$$V_u \leq \phi \left(V_c + 0,066\sqrt{f'_c}b_wd \right) \quad (2.48)$$

3. Pasal 22.5.5 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) tanpa gaya aksial dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (2.49)$$

4. Pasal 22.5.6.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tekan dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.50)$$

Apabila N_u bernilai positif untuk tekan diambil dari nilai terkecil yang dihitung dengan persamaan:

$$V_c = \left[0,16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.51)$$

$$V_c = 0,29 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29 N_u}{A_g}} \quad (2.52)$$

5. Pasal 22.5.7.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tarik dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.53)$$

6. Pasal 22.5.10.1 SNI 2847:2019, pada penampang dimana $V_u > \phi V_c$, tulangan transversal harus dipasang dan memenuhi persamaan:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.54)$$

Dengan:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{d} \quad (2.55)$$

7. Gaya geser maksimum yang dipikul tulangan geser (V_s) sebagai berikut:

$$V_s \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.56)$$

Jika V_s melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

8. Batasan minimum tulangan geser berdasarkan pasal 9.6.3.3 SNI 2847:2019 harus diambil dari yang terbesar sesuai dengan persamaan:

$$A_{v \min} = 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.57)$$

$$A_{v \min} = \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.58)$$

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

a. $s = d/2 \leq 600 \text{ mm}$, jika $V_s < V_{c1}$

b. $s = d/4 \leq 300 \text{ mm}$, jika $V_{c1} < V_c < V_{c2}$

c. $S_{\max} = \frac{A_v f_{yt}}{0,062 \sqrt{f'_c} b_w} \rightarrow f'_c > 30 \text{ MPa}$ (2.59)

d. $S_{\max} = \frac{A_v f_{yt}}{0,35 b_w} \rightarrow f'_c < 30 \text{ MPa}$ (2.60)

2.6.1.5 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. Menurut pasal 9.5.4 SNI 2847:2019, Pengaruh torsi dapat diabaikan jika T_u memenuhi syarat berikut :

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \quad (2.61)$$

atau tidak melebihi:

$$T_u \leq \phi 0,083 \lambda \sqrt{f'_c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right) \sqrt{1 + \frac{N_u}{0,33 A_g \lambda \sqrt{f'_c}}} \quad (2.62)$$

dengan:

$$\phi = 0,75$$

$$A_{cp} = \text{Luas penampang bruto}$$

$$P_{cp} = \text{Keliling penampang bruto}$$

Peraturan SNI 2847:2019 pasal 22.7.7 memberikan batasan dimensi penampang yang memikul torsi dan gaya geser:

1. Penampang Solid

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d} \right)^2 + \left(\frac{T_u}{1,7 A_{oh}^2} \right)} \leq \phi \left(\frac{V_u}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f'_c} \right) \quad (2.63)$$

2. Penampang Berongga

$$\left(\frac{V_u}{b_w d}\right) + \left(\frac{T_u}{1,7 A_{oh}^2}\right) \leq \phi \left(\frac{V_u}{b_w d} + 0,66 \sqrt{f'_c}\right) \quad (2.64)$$

dengan:

$$x_o = b - 2 \left(d + \frac{D}{2}\right) \quad (2.65)$$

$$y_o = h - 2 \left(d + \frac{D}{2}\right) \quad (2.66)$$

$$A_{oh} = x_o y_o \quad (2.67)$$

$$A_o = 0,85 A_{oh} \quad (2.68)$$

$$P_h = 2(x_o + y_o) \quad (2.69)$$

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 2847:2019 pasal 22.7.6.1:

$$T_n = \frac{2 A_o A_t f_{yt}}{s} \cot \theta \quad (2.70)$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_n}{2 A_o f_{yt} \cot \theta} \quad (2.71)$$

Dengan:

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang (mm^2)

f_{yt} = kuat luluh tulangan sengkang ≤ 400 MPa

s = jarak antar tulangan sengkang

θ = sudut retak 45° untuk non-prategang

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

2. Tulangan memanjang (A_t) yang dibutuhkan dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_t = \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h \left(\frac{f_{yt}}{f_y}\right) \cot^2 \theta \quad (2.72)$$

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 ($A_v + 2,4A_t$) diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 9.6.4.2 harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$0,062\sqrt{f_c'} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.73)$$

$$0,35 \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.74)$$

Dengan:

A_t = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk geser

A_v = luas satu kaki tulangan sengkang tertutup untuk torsi

s = jarak antar tulangan sengkang

f_{yt} = kuat luluh tulangan sengkang ≤ 400 MPa

Jarak tulangan sengkang (s) tidak boleh melebihi $P_h / 8$ atau 300 mm.

2. Tulangan memanjang yang diperlukan untuk torsi ($A_{1 \min}$) diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 9.6.4.3 harus lebih kecil dari persamaan berikut:

$$0,42\sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.75)$$

$$0,42\sqrt{f_c'} \frac{A_{cp}}{f_{yt}} - \left(\frac{0,175b_w}{f_{yt}} \right) P_h \frac{f_{yt}}{f_y} \quad (2.76)$$

Persyaratan nilai $A_{1 \min}$, agar tulangan tidak dari 1% volume beton.

2.6.1.6 Selimut Beton

Selimut beton merupakan pelindung tulangan terhadap cuaca atau efek lainnya diukur dari permukaan paling luar tulangan sengkang, ikat dan spiral jika tulangan transversal melingkupi tulangan utama. Kondisi terpapar cuaca atau kontak dengan tanah merupakan bentuk paparan langsung, tidak hanya oleh perubahan suhu tetapi juga oleh perubahan kelembaban. Komponen struktur beton yang dicor

di tempat harus memiliki selimut beton yang sekurang-kurangnya seperti pada Tabel 2.26.

Tabel 2.26 Ketebalan Selimut Beton

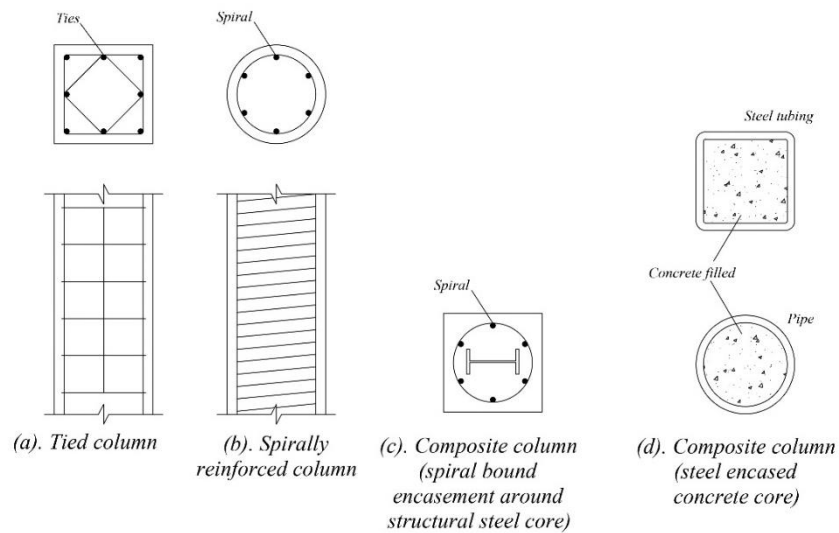
Paparan	Komponen Struktur	Tulangan	Ketebalan Selimut (mm)
Dicor dan secara permanen kontak dengan tanah.	Semua	Semua	75
Terpapar cuaca atau kontak dengan tanah.	Semua	Batang D19 hingga D57	50
		Batang D16, kawat Ø13 atau D13 yang lebih kecil	40
Tidak terpapar cuaca atau kontak dengan tanah.	Pelat, pelat berusuk dan dinding	Batang D43 dan D57	40
		Batang D36 dan yang lebih kecil	20
	Balok, kolom, pedestal dan batang tarik	Tulangan utama, sengkang, sengkang ikat, spiral dan sengkang pengekan	40

(Sumber: SNI 2847:2019)

2.6.2 Kolom

Kolom merupakan elemen struktur utama yang memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen lentur. Pada prakteknya, sangat jarang menemukan elemen kolom memikul murni gaya tekan. Umumnya kolom selalu memikul beban kombinasi aksial tekan dan momen, dan juga berperan utama dalam menahan beban lateral khususnya beban gempa.

Ditinjau dari kelangsingannya, kolom dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu kolom pendek (*short reinforced concrete column*) dan kolom langsing (*slender reinforced concrete column*). Dan jika ditinjau dari tipe penulangannya, kolom dibagi menjadi tiga jenis, yaitu kolom dengan ikatan sengkang ikat (*tied column*), kolom tulangan spiral (*spirally reinforced column*), dan kolom komposit (*composite column*).



Gambar 2.13 Jenis Kolom Berdasarkan Tipe Penulangan

(Sumber: Lesmana, 2020)

2.6.2.1 Preliminary Design Kolom

Kolom akan didesain untuk menahan gaya aksial beban terfaktor pada semua lantai atau atap. Gaya aksial dihitung menggunakan metode perlimpahan beban yang berasal dari pelat dan balok. Luasan penampang akan dihitung dengan persamaan (2.77), dengan nilai ϕ diambil sesuai pada SNI 2847-2019, pasal 21.

$$\sigma = \frac{P}{A_g} \rightarrow \frac{P}{\sigma} = \frac{P_U}{\phi \cdot f'_c} \rightarrow A_g = \frac{P_U}{0,3 \cdot f'_c} \quad (2.77)$$

Batasan dimensi kolom sesuai pada SNI 2847-2019, pasal 18.7.2.1, yang menyebutkan bahwa penampang kolom tidak boleh kurang dari 300 mm dan rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus nya tidak kurang dari 0,4.

2.6.2.2 Beban Aksial pada Kolom

Kolom dianggap menerima beban sentris, berarti beban bekerja pada pusat penampang kolom. Beban aksial tekan apabila diberikan pada kolom pendek beton bertulang, beton akan berperilaku elastis hingga batas tegangan mencapai sekitar $1/3 f'_c$, apabila beban pada kolom ditingkatkan hingga batas ultimit, beton akan mencapai kekuatan maksimumnya dan tulangan baja akan mencapai luluhnya (f_y). Kapasitas beban nominal (P_0) dapat dituliskan dalam persamaan

$$P_0 = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (2.78)$$

dengan:

A_g = Luas total penampang kolom.

A_{st} = Luas tulangan baja.

Kolom dengan vertikal sempurna tidak dapat dijumpai dalam praktek nyata, serta dengan mengasumsikan adanya sedikit eksentrisitas maka P_0 harus direduksi. Kolom dengan sengkang persegi dan spiral menunjukkan perilaku yang berbeda pada saat keruntuhan, pada SNI 2847:2019 memberi batasan faktor reduksi (ϕ) untuk kedua sengkang tersebut.

Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang persegi :

$$\phi P_n = \phi (0,8) [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y] \quad (2.79)$$

Kuat nominal kolom beban aksial dengan sengkang spiral:

$$\phi P_n = \phi (0,8) [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y] \quad (2.80)$$

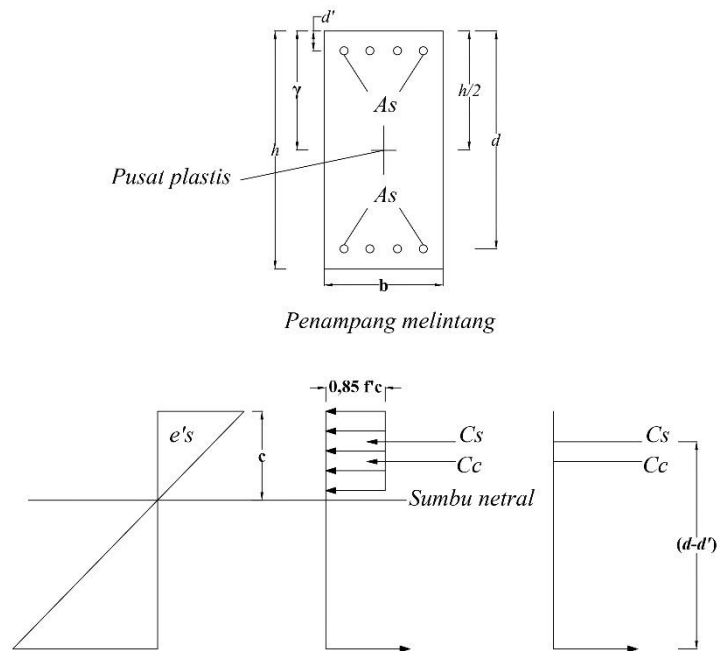
dengan:

ϕ = 0,65 untuk sengkang persegi.

ϕ = 0,75 untuk sengkang spiral.

2.6.2.3 Kolom Kombinasi Beban Aksial dan Momen Lentur

Prinsip-prinsip pada balok mengenai distribusi tegangan dan blok tegangan segiempat ekuivalennya dapat diterapkan juga pada kolom. Gambar dibawah memperlihatkan penampang melintang suatu kolom segiempat tipikal dengan diagram distribusi regangan, tegangan dan gaya. Tinggi sumbu netral ini sangat menentukan kekuatan kolom. Berikut merupakan gambar tegangan dan gaya yang terjadi pada kolom :



Gambar 2.14 Tegangan dan Gaya-gaya pada Kolom

(Sumber: Nawy, 2010)

Persamaan keseimbangan gaya dan momen dari gambar diatas untuk kolom pendek, gaya tahan nominal P_n dalam keadaan runtuh dinyatakan sebagai berikut :

$$P_n = C_c + C_s - T \quad (2.81)$$

$$P_n = 0,85 f'_c ab + A_s' f'_s - A_s f_s \quad (2.82)$$

Momen tahanan nominal M_n , yaitu sebesar $P_n \cdot e$ dapat diperoleh dengan menuliskan keseimbangan momen terhadap pusat plastis penampang. Kolom dengan tulangan simetris, pusat plastisnya sama dengan pusat geometrisnya. Berikut persamaan momen tahanan nominal :

$$M_n = P_n \cdot e \quad (2.83)$$

$$M_n = 0,85 f'_c ab \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s' f'_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) - A_s f_s \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (2.84)$$

Tulangan tekan A'_s atau tulangan tarik A_s akan mencapai kekuatan lelehnya f_y , bergantung pada besarnya eksentrisitas (e). Tegangan f'_s pada baja dapat mencapai f_y apabila keruntuhan yang terjadi berupa hancurnya beton. Apabila keruntuhan berupa lelehnya tulangan baja, besaran f_s harus disubstitusikan dengan f_y . Apabila f'_s atau f_s lebih kecil dari f_y , maka yang disubstitusikan adalah tegangan aktualnya, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang diperoleh

dari segitiga sebangun dengan distribusi regangan diseluruh tinggi penampang, yaitu persamaan :

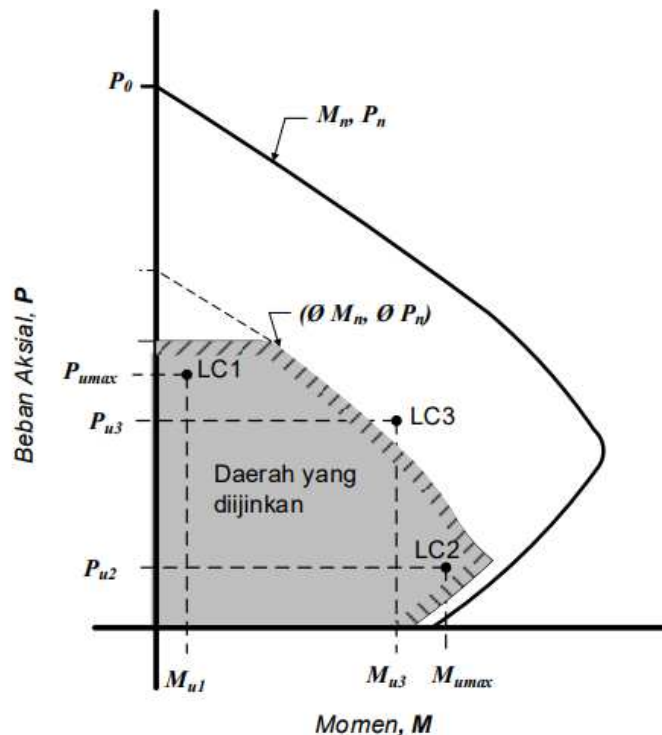
$$f_s = E_s \frac{0,003(d - c)}{c} \leq f_y \quad (2.85)$$

$$f_s = E_s \frac{0,003(c - d')}{c} \leq f_y \quad (2.86)$$

Tinggi balok tegangan beton dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$a = \beta_1 c \leq h \quad (2.87)$$

Hasil dari kedua persamaan tersebut meninggal dua variabel yaitu P_n dan c yang dapat diselesaikan secara simultan. Persamaan tersebut cukup komplet untuk diselesaikan pada prakteknya, karena perlu pembatasan f_s' dan f_s agar tidak melampaui f_y . Metode yang lebih baik dalam untuk keperluan praktis desain dengan menggambarkan diagram interaksi yang memberikan beban runtuh dan momen runtuh dari suatu penampang kolom, untuk setiap eksentrisnya dari nol sampai tak hingga. Berikut merupakan gambar diagram interaksi kolom dengan beban aksial dan lentur, ditunjukkan Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Diagram Interaksi Kolom dengan Beban Aksial dan Momen Lentur

(Sumber: SNI 2847:2019)

2.6.2.4 Jenis Kegagalan pada Kolom

Berdasarkan besarnya regangan pada tulang baja yang tertarik, kegagalan penampang kolom dapat dibagi menjadi sebagai berikut:

1. Kegagalan *Balanced*

Kondisi seimbang terjadi pada penampang kolom, ketika beban aksial yang bekerja sama dengan kuat nominal balanced ($P_n = P_{nb}$), keruntuhan diawali dengan lelehnya tulangan baja dengan regangan mencapai $\varepsilon_y = f_y / E_s$, sekaligus hancurnya beton yang tertekan yang mencapai regangan 0,003.

Persamaan tinggi sumbu netral kondisi balanced (c_b) didapat dari segitiga sebangun, yaitu:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d \quad (2.88)$$

Tinggi blok tegangan ekuivalen adalah:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} d \beta_1 \quad (2.89)$$

Dengan:

$$\beta_1 = 0,85, \text{ untuk } 17 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 28 \text{ MPa.}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7}, 28 \text{ MPa} \leq f_c' \leq 55 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 = 0,65, \text{ untuk } f_c' \geq 55 \text{ MPa}$$

Beban aksial nominal pada kondisi *balance* (P_{nb}) dan eksentrisitasnya (e_b) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$P_{nb} = 0,85f_c'a_b b + A_s'(f_s' - 0,85f_c') - A_s f_y \quad (2.90)$$

$$M_{nb} = 0,85f_c'a_b b \left(d - \frac{a}{2} - d'' \right) + A_s'(f_y' - 0,85f_c')(d - d' - d'') + A_s f_y d'' \quad (2.91)$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} \quad (2.92)$$

Dimana nilai f_s' diambil sama dengan f_y apabila tulangan tekan sudah luluh:

$$f_s' = 600 \left(\frac{C_b - d}{C_b} \right) \leq f_y \quad (2.93)$$

2. Keruntuhan Tarik

Keruntuhan tarik diawali dengan lelehnya tulangan baja yang tertarik atau ($P_n < P_{nb}$). Prosedur analisis dilakukan sebagai berikut:

- Asumsikan tegangan tulangan tekan $f_s' = f_y$
- Evaluasi P_n

$$P_n = 0,85 f_c' ab + A_s' (f_y - 0,85 f_c') - A_s f_y \quad (2.94)$$

- Hitung P_n dengan mengambil jumlah momen terhadap A_s

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.95)$$

dengan:

$$e' = e + d'' \text{ atau } e' = e + (d - h/2)$$

$$A_s = A_s'$$

- Samakan P_n langkah b dan c, menghasilkan persamaan kuadrat a sebagai berikut:

$$Aa^2 + Ba + C = 0 \quad (2.96)$$

Dengan:

$$A = 0,425 f_c' b$$

$$B = 0,85 f_c' b (e' - d)$$

$$C = A_s' (f_y - 0,85 f_c') (e' - d + d') - A_s f_y e'$$

Selesaikan a menggunakan persamaan berikut:

$$a = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

- Substitusikan nilai a ke persamaan langkah b untuk mendapatkan nilai P_n dan M_n .
- Periksa apakah tulangan tekan sudah luluh. $\epsilon_s' \geq \epsilon_y$.
- Menentukan besarnya faktor reduksi ϕ yang besarnya bervariasi antara 0,65 atau 0,7 dan 0,9.

3. Keruntuhan Tekan

Keruntuhan tekan diawali dengan hancurnya beton yang tertekan atau gaya tekan melebihi gaya tekan dalam kondisi seimbang () $P_n > P_{nb}$. Regangan akan mencapai 0,003, sedangkan regangan tulangan baja mencapai kurang dari ϵ_y . Berikut merupakan prosedur analisis kolom keruntuhan tekan :

- a. Hitung jarak sumbu netral kondisi seimbang:

$$c_b = \frac{600}{600 + f_y} \quad (2.97)$$

- b. Evaluasi P_n

$$P_n = 0,85 f'_c ab + A'_s (f_y - 0,85 f'_c) - A_s f_y \quad (2.98)$$

- c. Hitung P_n dengan mengambil jumlah momen terhadap A_s

$$P_n e' = C_c \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \quad (2.99)$$

Dengan:

$$e' = e + d'' \text{ atau } e' = e + (d - h/2)$$

$$A_s = A_s'$$

- d. Asumsikan nilai $c > c_b$, hitung $a = \beta_1 c$ dan asumsikan $f_s' = f_y$

- e. Hitung nilai f_s berdasarkan nilai c :

$$f_s = E_s \frac{0,03(d - c)}{c} \leq f_y \quad (2.100)$$

- f. Hitung P_{n1} menggunakan langkah b dan P_{n2} menggunakan langkah c, jika nilai P_{n1} dan P_{n2} cukup dengan maka P_n diambil dari nilai terkecil atau reratanya.

- g. Periksa lulu tulangan tekan dengan asumsi semula, bila $\epsilon_s' > \epsilon_y$ tulangan tekan sudah luluh dan jika belum maka hitung f_s' dengan rumus sebagai berikut:

$$f_s = E_s \frac{0,03(d - c)}{c} \leq f_y \quad (2.101)$$

- h. Regangan tulangan tarik (ϵ_t) pada kondisi keruntuhan tekan biasanya kurang dari 0,002, sehingga faktor reduksi dapat diambil 0,65 atau 0,75 untuk penampang kolom dengan sengkang spiral.

Kuat penampang kolom yang mengalami keruntuhan bisa dihitung dengan persamaan Whitney berikut:

$$P_n = \frac{b h f'_c}{\frac{3 h e}{d^2} + 1,18} + \frac{A_s f_y}{\frac{e}{(d - d')} + 0,5} \quad (2.102)$$

2.6.2.5 Kuat Geser Kolom

Kuat desain geser kolom harus dihitung berdasarkan pasal 22.5 SNI 2847:2019, berikut perhitungan kuat geser nominal:

1. Pasal 22.5.1.1 SNI 2847:2019, kuat geser nominal penampang (V_n) dihitung dengan persamaan:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.103)$$

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 22.5.1.2 SNI 2847:2019, ukuran dimensi untuk desain penampang harus memenuhi persamaan:

$$V_u \leq \phi (V_c + 0,066 \sqrt{f'_c} b_w d) \quad (2.104)$$

3. Pasal 22.5.5.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) tanpa gaya aksial dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.105)$$

4. Pasal 22.5.6.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tekan dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.106)$$

Apabila N_u bernilai positif untuk tekan diambil dari nilai terkecil yang dihitung dengan persamaan:

$$V_c = \left[0,16 \lambda \sqrt{f'_c} + 17 \rho_w \frac{V_u d}{M_u - N_u \frac{(4h - d)}{8}} \right] b_w d \quad (2.107)$$

$$V_c = 0,29\lambda\sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{1 + \frac{0,29N_u}{A_g}} \quad (2.108)$$

5. Pasal 22.5.7.1 SNI 2847:2019, gaya geser yang ditahan oleh beton (V_c) dengan gaya aksial tarik dihitung dengan rumus:

$$V_c = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{3,5A_g} \right) \lambda\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.109)$$

6. Pasal 22.5.10.1 SNI 2847:2019, pada penampang dimana $V_u > \phi V_c$, tulangan transversal harus dipasang dan memenuhi persamaan:

$$V_s \geq \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (2.110)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.111)$$

7. Gaya geser maksimum yang dipikul tulangan geser (V_s) sebagai berikut:

$$V_c \leq 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.112)$$

Jika V_s melebihi nilai tersebut maka penampang harus diperbesar.

8. Luas minimum tulangan geser ($A_{v,min}$), yang harus disediakan disemua wilayah dimana $V_u > 0,5\phi V_c$.

Tulangan geser yang diperlukan ($A_{v,min}$) berdasarkan pasal 10.6.2.2 SNI 2847:2019 harus lebih besar dari persamaan berikut:

$$A_{v,min} = 0,062\sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.113)$$

$$A_{v,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (2.114)$$

Jarak tulangan geser berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.4.3.3 yang dipasang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari nilai berikut:

- 8 kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil yang dilingkupi.
- 24 kali diameter batang tulangan sengkang pengkang.
- Setengah dimensi penampang terkecil kolom.
- 300 mm.

2.6.2.6 Rasio Kelangsingan Kolom

Elemen struktur kolom dapat dikategorikan sebagai kolom pendek atau kolom panjang. Kelangsingan kolom didefinisikan sebagai rasio antara tinggi kolom dengan jari-jari inersia penampang kolom. Batasan rasio kelangsingan kolom ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 6.2.5 yang menyatakan bahwa pengaruh kelangsingan boleh diabaikan jika (a) dan (b) terpenuhi :

- a. Untuk kolom yang tidak ditahan terhadap goyangan samping

$$\frac{kl_u}{r} \leq 22 \quad (2.115)$$

- b. Untuk kolom yang ditahan terhadap goyangan samping

$$\frac{kl_u}{r} \leq 34 + 12(M_1/M_2) \quad (2.116)$$

dan,

$$\frac{kl_u}{r} \leq 40 \quad (2.117)$$

keterangan:

M_1/M_2 adalah negatif jika kolom melentur dalam kurvatur tunggal, dan positif jika komponen struktur melentur dalam kurvatur ganda.

k = faktor panjang efektif kolom.

l_u = panjang tak tertumpu kolom.

r = radius girasi, dengan $r = \sqrt{\frac{I_g}{A_g}}$ atau $0,3h$ kolom persegi.

2.6.3 Pelat

Pelat lantai merupakan lantai yang menggantung diatas tanah/ tidak bersentuhan langsung dengan tanah melainkan ditopang oleh kolom dan balok (Mochtar dkk., 2022). Pelat merupakan elemen struktur horizontal utama yang berfungsi untuk menyalurkan beban hidup, baik yang bergerak maupun statis ke elemen balok, kolom dan dinding sebagai pemikul beban vertikal. Pelat lantai dapat direncanakan untuk berfungsi menyalurkan beban dalam satu arah (*one-way slab*) dan dapat direncanakan menyalurkan beban dalam dua arah (*two-way slab*). Desain pelat pada umumnya dianggap memiliki lebar 1 meter. Pelat banyak digunakan

pada bangunan sipil sebagai lantai bangunan, lantai atap suatu gedung, lantai kendaraan jembatan, maupun lantai pada dermaga.

2.6.3.1 Jenis-jenis Pelat

Struktur pelat beton pada gedung dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Pelat Satu Arah

Pelat satu arah adalah pelat yang memiliki tulangan pokok pada satu arah, ini terjadi ketika pelat beton bertulang lebih dominan menerima beban yang mengakibatkan momen lentur pada satu arah bentang saja. Pelat satu arah mempunyai rasio bentang panjang (l_y) terhadap bentang pendeknya (l_x) lebih besar atau sama dengan 2 (dua), maka hampir seluruh beban akan terdistribusi ke arah bentang pendek. Sistem pelat satu arah cocok digunakan pada bentang 3-6 meter, dengan beban hidup 2,5-5 kN/m².

2. Sistem Pelat Rusuk (*Joist Construction*)

Sistem pelat rusuk terdiri dari pelat beton dengan ketebalan 50 hingga 100 mm, yang ditopang oleh sejumlah rusuk dengan jarak beraturan. Rusuk mempunyai lebar minimum 100 mm dan mempunyai tinggi tidak lebih dari 3,5 kali lebar minimumnya. Rusuk biasanya bersisi miring dan disusun dalam jarak tertentu yang tidak melebihi 750 mm. Rusuk ditopang oleh balok induk utama yang langsung menumpu pada kolom. Jarak antar rusuk dapat dibentuk dengan bekisting kayu atau baja yang dapat dilepas, atau dapat juga digunakan pengisi permanen berupa lempung bakar atau ubin beton yang memiliki kuat tekan minimal sama dengan kuat tekan beton yang digunakan pada pelat rusuk. Sistem pelat rusuk cocok digunakan untuk struktur pelat dengan bentangan 6-9 meter serta memikul beban hidup sebesar 3,5 - 5,5 kN/m².

3. Pelat Dua Arah

Pelat dua arah adalah pelat segi empat yang ditumpu oleh komponen struktur yang sangat kaku di ke-empat sisinya, misalnya balok atau dinding geser. Pelat dua arah memiliki rasio bentang panjang (l_y) terhadap bentang pendek (l_x) kurang dari 2 (dua). Pelat dua arah memiliki tulangan pokok pada dua arah bentangnya, ini terjadi ketika pelat beton menahan momen lentur

pada kedua arah bentang. Sistem pelat dua arah dapat dibedakan sebagai berikut :

a. Sistem pelat datar tanpa drop panel (*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. Sistem slab datar dapat digunakan untuk struktur pelat dengan bentanfan 6 - 7,5 m. dan beban hidup sebesar 2,5 - 4,5 kN/m².

b. Pelat dua arah berusuk dan pelat *waffle*

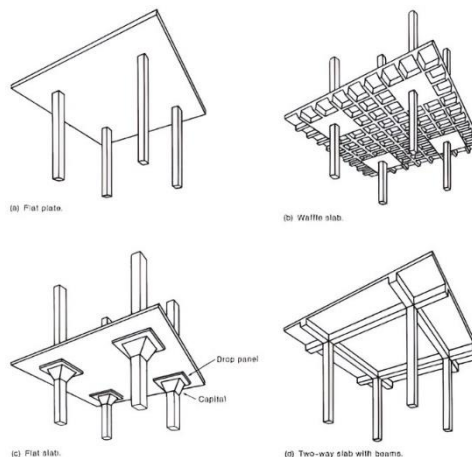
Sistem pelat dua arah ini mempunyai ketebalan pelat antara 50 mm hingga 100 mm yang ditumpu oleh rusuk-rusuk dalam dua arah. Jarak anatar rusuk antara 500 mm hingga 750 mm. Tepi-tepi pelat dapat ditopang oleh balok, atau dapat juga langsung menumpu pada kolom.

c. Sistem pelat datar dengan drop panel (*flat slab*)

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

d. 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. Balok akan meningkatkan kekakuan pelat, sehingga lendutan yang terjadi akan relatif kecil.



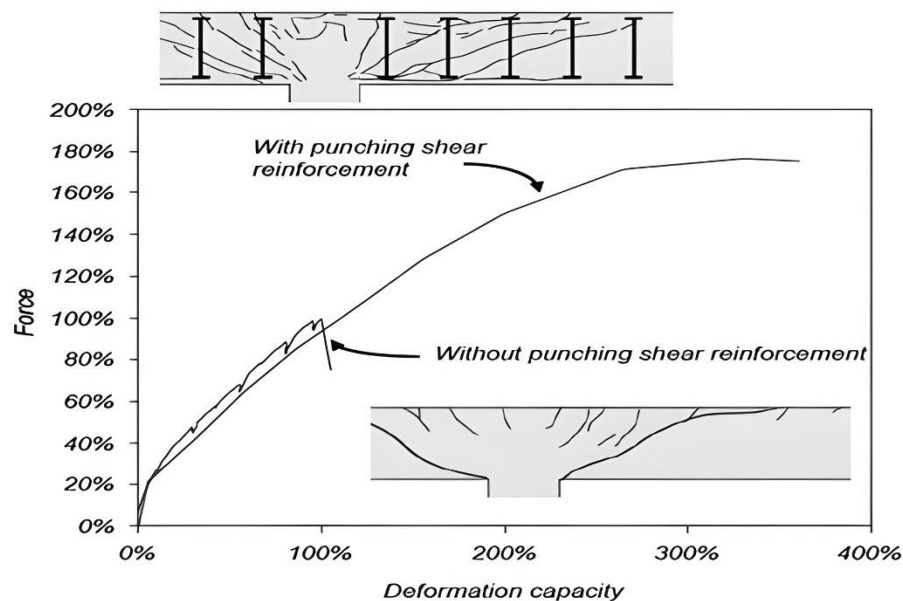
Gambar 2.16 Jenis-jenis Pelat
(Sumber: Wight & MacGregor, 2012)

2.6.3.2 Flat Slab Sistem

Flat slab merupakan sistem pelat beton bertulang yang strukturnya ditumpu langsung oleh kolom- kolom tanpa apa adanya balok induk dan balok anak. Untuk memperkuat pelat terhadap gaya geser, pons dan lentur dapat diberikan penebalan pada daerah penumpu kolom terhadap pelat yang disebut drop panel. *Flat slab* yang tidak diberi drop panel disebut *flat plate* (Putra Sanjaya & Purwanto, 2018).

Flat slab sistem cenderung lebih disukai dalam konstruksi bertingkat karena manfaat yang lebih segi ekonomi dan arsitektural. Mafaatnya meliputi, mengurani waktu konstruksi dan mengurangi tinggi lantai, serta fleksibilitas dalam penataan arsitektural. Namun *flat slab* kurangnya ketahanan terhadap beban lateral, seperti disebabkan oleh angin kencang dan gempa bumi karena tingkat kekakuan yang berkurang dan juga penyerapan yang buruk terhadap beban yang dipikul (Husain dkk., 2017).

Sistem *flat slab* ini rentan terhadap kegagalan geser (*punching shear failure*) karena menghilangkan balok. Diperlukan tulangan geser disekitar kolom yang lebih banyak untuk menopang kebutuhan akan gaya geser yang dipikul serta meningkatkan kekuatan dan daktilitas ditunjukkan Gambar 2.17



Gambar 2.17 Perbandingan Kekuatan *Punching Shear Reinforcement*

(Sumber:Husain dkk., 2017)

2.6.3.3 Perhitungan Desain Pelat

Analisis perencanaan pelat dilakukan untuk mendapatkan dimensi dan penulangan yang akan digunakan. Perhitungan pelat menggunakan ketentuan-ketentuan berdasarkan SNI 2847:2019, berikut prosedur perhitungan pelat:

1. Tebal Minimum Pelat

Berdasarkan SNI 2847-2019 untuk pelat dua arah nonprategang tanpa balok *interior* yang membentang di antara tumpuan pada semua sisinya yang memiliki rasio bentang panjang terhadap bentang pendek maksimum 2, ketebalan minimum pelat tidak boleh kurang dari batasan yang tertera pada tabel 8.3.1.1 SNI 2847-2019, dimana l_n adalah jarak bersih ke arah memanjang pelat, diukur dari muka ke muka tumpuan dalam milimeter. Dan untuk nilai f_y dengan nilai diantara yang diberikan dalam tabel, ketebalan minimum harus dihitung dengan interpolasi linear. Berikut tabel ketebalan minimum untuk *flat slab*.

Tabel 2.27 Ketebalan Minimum Pelat tanpa Balok Interior

F_y (MPa)	Tanpa drop panel		
	Panel eksterior		Panel interior
	Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi	
280	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
420	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$
520	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$

(Sumber: SNI 2847:2019)

2. Tulangan Lentur

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

Tabel 2.28 A_{smin} untuk Pelat Dua Arah Nonprategang

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

(Sumber: SNI 2847:2019)

3. Tulangan Susut dan Suhu

Tulangan susut dan suhu pada pasal 8.6.1 menyatakan bahwa tulangan susut dan suhu harus sesuai dengan pasal 24.4.3.2 dimana desain tulangan susut pelat dua arah sama dengan desain tulangan susut pelat satu arah. Tulangan susut dan suhu dipasang tegak lurus dengan tulangan lentur. Menurut pasal 7.6.4 SNI 2847 : 2019 tulangan ini dipasang guna mengantisipasi tegangan dan retak akibat pengaruh perubahan susut dan temperatur dari material beton.

Luasan tulangan susut minimum diatur pada pasal 24.4.3.2 SNI 2847 : 2019 Nilai rasio tegangan yang tertera pada Tabel 2.6 yang memiliki kesamaan dengan Tabel 2.5. Maka luasan minimum tulangan lentur dan susut adalah sama yang membedakan adalah penyajian yang dimana tabel untuk tulangan lentur dalam bentuk luasan dan tabel untuk tulangan susut adalah rasio.

Tabel 2.29 Rasio (ρ_{min}) Tulangan Susut dan Suhu Minimum

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

4. Spasi Tulangan Lentur dan Tebal Selimut Beton Pelat Dua Arah

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

2h, dan 450 mm pada penampang kritis, dan yang terkecil dari 3h dan 450 mm pada penampang lainnya. Untuk ketebalan selimut beton yang digunakan diatur pada Tabel 20.6.1.3.1 pada SNI 2847 : 2019 yang menyatakan bahwa tebal selimut pelat yang tidak terpapar cuaca atau tidak menyentuh tanah adalah 20 mm.

5. Tulangan Geser

Tulangan sudut diatur pada Pasal 8.5.3 SNI 2847:2019, bahwa kekuatan geser harus dicek pada area dekat kolom, beban terpusat, atau daerah reaksi tumpuan yang memiliki aksi dua arah. Hal ini ditujukan untuk mencegah terjadi *punching* di sepanjang kerucut terpancung (*truncated cone*) disekitar beban terpusat (area sekitar kolom).

Untuk perhitungan kuat geser (v_c) dua arah dapat menggunakan Tabel 22.6.5.2 SNI 2847:2019, diambil nilai terkecil.

Tabel 2.30 Perhitungan Kuat Geser (v_c) Elemen Dua Arah

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad & 0,33\lambda\sqrt{f_c'}A_o \\ \text{(b)} \quad & 0,17\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)\lambda\sqrt{f_c'}A_o \\ \text{(c)} \quad & 0,083\left(2 + \frac{a_s d}{b_o}\right)\lambda\sqrt{f_c'}A_o \end{aligned}$$

2.6.3.4 Kontrol Lendutan Pelat

Lendutan seketika terjadi apabila segera setelah beban bekerja seketika itu pula terjadi lendutan. Berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 24.23.5, momen inersia efektif (I_e) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.123).

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} < I_g \quad (2.118)$$

$$f_{cr} = 0,62\sqrt{f'_c} \quad (2.119)$$

$$M_{cr} = \frac{f_{cr} I_g}{y} \quad (2.120)$$

Keterangan :

M_{cr} = Momen pada saat timbul retak yang pertama kali

- M_a = Momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung (*output software* ETABS)
 f_{cr} = Tegangan retak beton (SNI 2847-2019; Pasal 24.5.2.1)
 y = Tebal pelat (t_p)/2 (jarak dari garis netral penampang utuh)
 I_g = $1/12.n.t_p^3$ (momen inersia penampang utuh terhadap sumbu berat penampang)
 I_{cr} = $0,25I_g$ (momen inersia penampang retak berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 6.6.3.1.1)

Apabila $M_{cr}/M_a > 1$ maka pelat tidak retak, sehingga digunakan $M_{cr} = M_u$ dan $I_{cr} = I_g$. Kemudian apabila $M_{cr}/M_a \leq 1$ maka pelat retak, sehingga nilai I_e harus dihitung. Lendutan seketika untuk pelat menerus dapat dihitung sebagai berikut :

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0,1(M_a + M_b)] \quad (2.121)$$

$$\delta_i = \frac{5L^2}{48E_c I_g} [M_m - 0,2M_{tumpuan}] \quad (2.122)$$

Keterangan :

- δ_i = lendutan seketika ditengah bentang
 L = panjang pelat
 E_c = modulus elastisitas beton
 I_g = $(I_{e,lap} + I_{e,tump})/2$ (momen inersia rata-rata)
 M_a, M_b = momen lentur negative di tumpuan
 M_m = Momen di lapangan (tengah bentang)

Berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 24.2.2, batasan lendutan seketika pelat lantai akibat beban hidup (LL) adalah $L/360$.

2.6.4 Dinding Geser (*Shear Wall*)

Indonesia berada pada wilayah *ring of fire* yang memiliki potensi terjadi gempa bumi setiap tahunnya. Bangunan yang menerima beban gempa mengalami pergerakan secara horizontal dan vertikal, sehingga pada bangunan tingkat tinggi (*high rise building*) memerlukan elemen struktur yang dapat menambahkan kekakuan bangunan. Dinding geser merupakan elemen struktur vertikal yang

berfungsi untuk pengaku bangunan dan menahan gaya lateral dalam hal ini beban gempa dan beban angin (Arissaputra & Widyana, 2022).

Dinding geser dikategorikan berdasarkan geometrinya, yaitu:

1. *Flexural wall* (dinding langsing), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w / l_w \geq 2$ dan desainnya dikontrol oleh perilaku struktur.
2. *Squat wall* (dinding pendek), yaitu dinding geser yang memiliki rasio $h_w / l_w \leq 2$ dan didesainnya dikontrol oleh perilaku geser.
3. *Couple shear wall* (dinding berangkai), dimana momen guling yang terjadi akibat beban gempa ditahan oleh sepasang dinding yang dihubungkan oleh balok-balok perangkai sebagai gaya-gaya tarik dan tekan yang bekerja pada masing-masing dasar pasangan dinding.

Dinding geser harus didesain dengan teliti dan diberi detailing yang sesuai dengan persyaratan, sehingga dapat memikul semua beban yang bekerja. Komponen batas (boundary element) dapat diberikan pada ujung-ujung dinding struktural yang diberi tulangan dalam arah longitudinal dan transversal. Dinding geser pada pratiknya selalu dihubungkan dengan sistem rangka pemikul gedung, dari penggabungan tersebut diperoleh suatu struktur yang lebih kuat dan ekonomis.

2.6.4.1 Preliminary Design Dinding Geser

Dinding geser akan didesain sebagai komponen penahan gaya vertikal dan lateral. Ketebalan minimum dinding geser harus sesuai dengan Tabel 11.3.1.1 pada SNI 2847-2019.

Tabel 2.31 Tebal Minimum Dinding Geser (h)

Tipe Dinding	Ketebalan minimum (h)	
Tumpu	Terbesar dari	100 mm
		1/25 nilai terkecil dari panjang dan tinggi dinding tidak tertumpu.
Bukan tumpu	Terbesar dari	100 mm
		1/30 nilai terkecil dari panjang dan tinggi dinding tidak tertumpu.

Basemen dan fondasi eksterior	190 mm
-------------------------------	--------

(Sumber: SNI 2847-2019)

2.6.4.2 Persyaratan Tulangan Dinding Geser

Tulangan geser harus disediakan dalam dua arah tegak lurus pada dinding. Rasio tulangan minimum untuk arah vertikal dan horizontal ditentukan sebagai berikut:

1. Apabila gaya geser didesain $V_u > 0,083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$, rasio penulangan ρ_l dan ρ_t tidak boleh kurang dari 0,0025.

$$0,0025 \geq \rho_l = \frac{A_{sv}}{A_{cv}} \quad (2.123)$$

$$0,0025 \geq \rho_t = \frac{A_{sn}}{A_{cn}}$$

Dengan:

ρ_l = rasio luas tulangan yang tersebar pada bidang yang tegak lurus bidang A_{cv} terhadap luas bruto beton A_{cv} .

ρ_t = rasio luas tulangan yang tersebar pada bidang yang tegak lurus bidang A_{cv} terhadap luas bruto beton yang tegak lurus terhadap tulangan tersebut.

2. Apabila gaya geser didesain $V_u < 0,083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$, maka dapat digunakan rasio tulangan minimum seperti pada dinding struktural biasa (SNI 2847:2019 pasal 11).
 - a. Rasio minimum tulangan vertikal terhadap luas bruto penampang beton (ρ_l) harus diambil:
 - 0,0012 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan f_y tidak kurang dari 420 Mpa.
 - 0,0015 untuk tulangan ulir lainnya.
 - 0,0012 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16.
 - b. Rasio tulangan minimum tulangan horizontal terhadap luas bruto penampang beton ρ_t harus diambil:

- 0,002 untuk tulangan ulir dengan diameter tidak lebih dari D16 dan f_y tidak kurang dari 420 MPa.
 - 0,0025 untuk tulangan ulir lainnya.
 - 0,002 untuk jaring kawat baja las yang berdiameter kurang dari 16.
3. Jarak tulangan masing-masing arahh pada dinding geser tidak boleh melebihi 450 mm.
 4. Paling sedikit harus dipasang tulangan dalam dua lapis apabila $V_u > 0,083A_{cv}\lambda\sqrt{f'_c}$.

2.6.4.3 Kuat Geser

Kuat geser dinding geser dikatakan mencukupi apabila memenuhi kondisi berikut:

$$V_u = \phi V_n \quad (2.124)$$

Dengan:

V_u = gaya geser terfaktor

V_n = kuat geser nominal dinding geser

ϕ = faktor reduksi kekuatan

Kuat geser nominal dinding geser ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.10.4, yang menyatakan:

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c\lambda\sqrt{f'_c} + \rho_t f_y) \quad (2.125)$$

Dengan:

Beberapa persyaratan lain terkait perencanaan geser dinding geser adalah:

- Apabila rasio dari $h_w / l_w < 2,0$ maka rasio penulangan vertikal (ρ_l) tidak boleh kurang daripada rasio penulangan harozintal (ρ_l).
- Kuat geser nominal sistem dinding struktural yang secara bersama-sama memikul beban lateral tidak boleh diambil melebihi $0,66A_{cv}\sqrt{f'_c}$ dengan A_{cv} adalah luas penampang total sistem dinding struktural dan kuat geser nominal tiap dinding vertikal individual tidak boleh diambil melebihi $0,83A_{cw}\sqrt{f'_c}$ dengan A_{cw} adalah luas penampang dinding yang ditinjau.

- Untuk segmen dinding horizontal, termasuk balok kopel, nilai V_n tidak boleh melebihi $0,83A_{cw}\sqrt{f'_c}$ dengan A_{cw} adalah luas penampang dinding horizontal atau balok kopel.

Dinding struktural yang didesain untuk memikul beban aksial dan lentur (SNI 2847:2019 pasal 18.10.5), kuat lentur dari dinding harus ditentukan seperti halnya prosedur perhitungan kolom yang dibebani gaya aksial dan momen lentur. Tulangan pada seluruh penampang dinding termasuk pada komponen batas (boundary element) harus diperhitungkan untuk menentukan kapasitas dinding tersebut.

Dinding geser yang saling berpotongan di suatu titik, maka akan terbentuk penampang L atau T. Lebar sayap efektif yang terbentuk harus diambil dari nilai terkecil antara setengah jarak dinding yang bersebelahan atau 25% dari total tinggi dinding.

2.6.4.4 Elemen Batas

Dinding geser akan berperilaku seperti balok kantilever selama berlangsungnya kejadian gempa bumi. Elemen batas yang dipasang di ujung-ujung suatu dinding geser dapat menerima beban yang besar. Sendi plastis dapat terbentuk pada dasar dinding yang memerlukan pendetailan tulangan guna memberikan kekuatan dan daktilitas yang mencukupi dari dinding geser tersebut. SNI 2847:2019 pasal 18.10.6 memberikan persyaratan desain untuk elemen batas, yaitu:

1. Pendekatan desain berbasis perpindahan, (*displacement*), dinding atau pilar-pilar dinding dengan $h_w / l_w \geq 2,0$ yang secara efektif menerus dari dasar struktur hingga sisi paling atas dinding dan didesain untuk mempunyai penampang kritis tunggal untuk lentur dan beban aksial, harus diperkuat dengan komponen batas khusus apabila:

$$c \geq \frac{l_w}{600 \left(\frac{\delta_u}{h_w} \right)} \quad (2.126)$$

dengan :

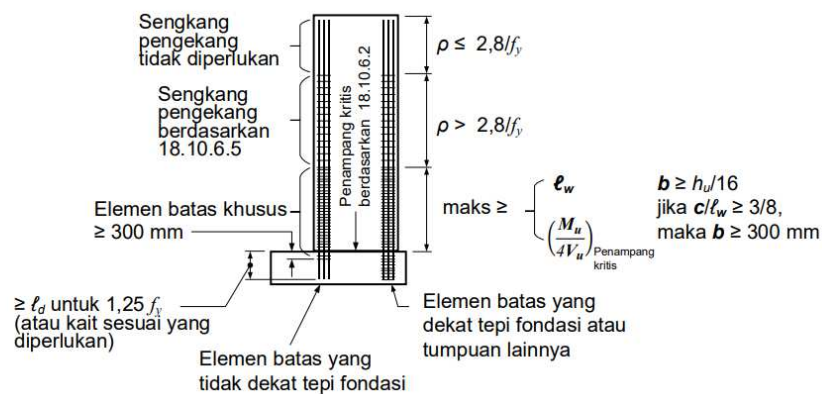
$$\delta_u / l_w > 0,005$$

c = nilai tinggi sumbu netral terbesar yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor dan kekuatan momen nominal

δ_u = perpindahan desain

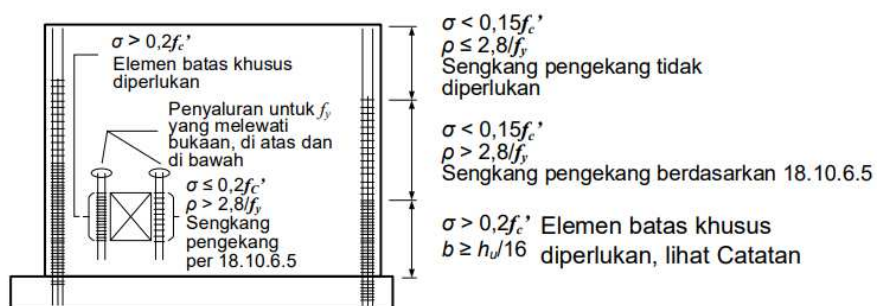
l_w = panjang keseluruhan dinding atau segmen dinding yang ditinjau dalam arah geser

Tulangan transversal elemen batas harus diperpanjang pada arah vertikal, di atas dan di bawah penampang kritis dengan jarak minimal nilai terbesar dari $l_w M_u / 4V_u$.



Gambar 2.18 Dinding yang Didesain dengan Pendekatan Berbasis Perpindahan
(Sumber: SNI 2847:2019)

2. Pendekatan desain berbasis tegangan. Dinding geser harus disediakan komponen batas di sekeliling sisi luarnya dan daerah tepi-tepi sekeliling bukaan dari dinding-dinding struktural dimana tegangan tekan serat ekstrim maksimum, akibat kombinasi pembebanan termasuk pengaruh gempa (E) melebihi $0,2 f'_c$. Elemen batas khusus dapat dihentikan pada lokasi dimana tegangan tekan yang dihitung kurang dari $0,15 f'_c$.



Gambar 2.19 Dinding yang Didesain dengan Pendekatan Desain Berbasis Tegangan

(Sumber: SNI 2847:2019)

Dinding struktural yang memerlukan komponen batas harus memenuhi persyaratan berikut:

- Elemen batas harus diperpanjang pada arah horizontal dari serat tekan terluar sejauh minimal nilai terbesar dari $c - 0,1l_w$ dan $c/2$. dimana c adalah tinggi sumbu netral terbesar yang dihitung untuk gaya aksial terfaktor dan kekuatan momen nominal yang sesuai dengan δ_u yang ditinjau.
- Lebar daerah tekan lentur (b) sepanjang jarak horizontal yang dihitung dengan (a), termasuk sayap bilamana ada, harus diambil minimal $h_u / 16$.
- Untuk dinding atau pilar-pilar dinding dengan $h_w/\ell_w \geq 2,0$ yang secara efektif menerus dari dasar struktur hingga sisi paling atas dinding, yang didesain memiliki penampang kritis tunggal untuk beban-beban lentur dan aksial, dan dengan $c/\ell_w \geq 3/8$, lebar daerah tekan lentur b disepanjang daerah yang dihitung berdasarkan (a) harus lebih besar dari atau sama dengan 300 mm.
- Pada penampang-penampang bersayap, elemen batas harus termasuk lebar sayap efektif yang mengalami tekan dan harus diperpanjang minimal 300 mm ke dalam badan dinding.
- Tulangan transversal elemen batas harus memenuhi 18.7.5.2(a) hingga (e) dan 18.7.5.3, kecuali bila nilai h_x dalam 18.7.5.2 tidak melebihi nilai terkecil antara 350 mm dan dua pertiga ketebalan elemen batas, dan batasan spasi tulangan transversal sesuai 18.7.5.3 (a) harus diambil sepertiga dari dimensi terkecil elemen batas.
- Jumlah tulangan transversal harus sesuai Tabel 2.32.

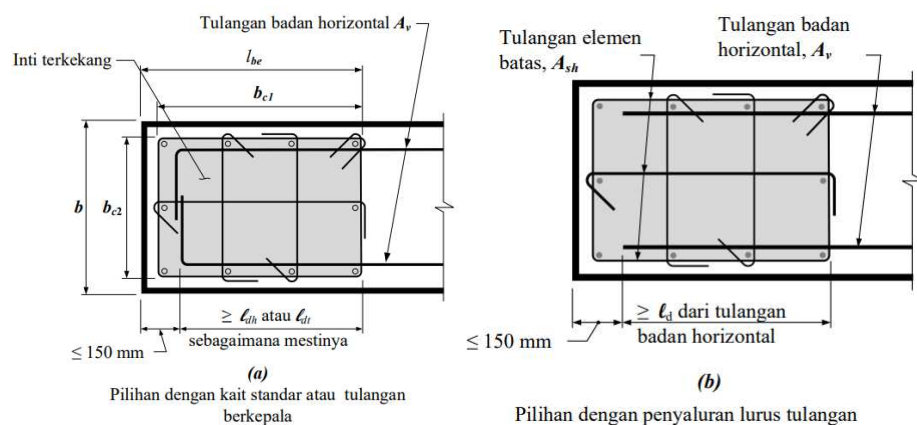
Tabel 2.32 Tulangan Transversal untuk Element Batas Khusus

Tulangan Transversal	Persamaan yang berlaku		
A_{sh} / sb_c untuk sengkang pengeang persegi	Nilai terbesar dari	$0,3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(a)
		$0,09 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(b)

ρ_s untuk spiral ataupun senggang pengekang lingakaran	Nilai terbesar dari	$0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(c)
		$0,12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$	(d)

(Sumber: SNI 2847:2019)

- g. Bila penampang kritis terjadi di dasar dinding, maka tulangan transversal elemen batas pada dasar dinding harus diperpanjang ke dalam sistem tumpuan sejauh minimal ℓ_d . Bila elemen batas khusus berhenti pada fondasi telapak, fondasi rakit atau pile cap, tulangan transversal elemen batas khusus harus menerus paling sedikit 300 mm ke dalam sistem-sistem fondasi tersebut, kecuali jika diperlukan perpanjangan yang lebih besar berdasarkan Pasal 18.13.2.
- h. Tulangan horizontal pada badan dinding harus diperpanjang masuk sedalam 150 mm pada tepi dinding. Tulangan tersebut harus diangkur dalam inti terkekang pada elemen batas menggunakan kait standar atau tulangan berkepala agar mencapai f_y . Bila panjang zona elemen batas terkekang cukup memadai untuk menyalurkan tulangan horizontal badan, dan $A_v f_y / s$ tulangan badan tidak melebihi $A_{sh} f_{yt} / s$ tulangan transversal elemen batas yang dipasang paralel dengan tulangan horizontal badan, maka tulangan horizontal badan tersebut dapat dihentikan tanpa kait standar atau kepala.



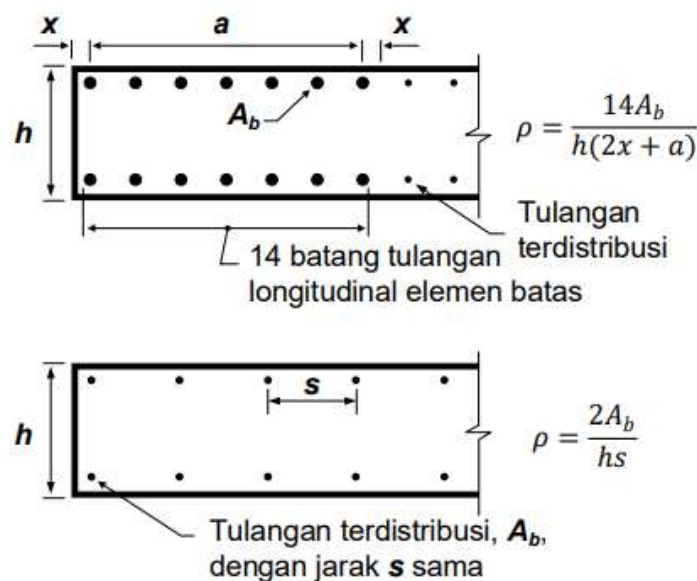
Gambar 2.20 Panjang Penyaluran Tulangan Horizontal Dinding dalam Elemen Batas yang Terkekang

(Sumber: SNI 2847:2019)

Dinding geser yang tidak memerlukan komponen batas, harus memenuhi berikut:

- Jika rasio tulangan longitudinal pada elemen batas dinding melebihi $2,8/f_y$, maka tulangan transversal pada elemen batas tersebut harus memenuhi 18.7.5.2(a) hingga (e), disepanjang jarak yang dihitung sesuai 18.10.6.4(a). Spasi arah longitudinal pada tulangan transversal tersebut tidak boleh melebihi nilai terkecil dari 200 mm dan 8db batang tulangan lentur utama terkecil, kecuali spasi tersebut tidak melebihi nilai terkecil dari 150 mm dan 6db di dalam zona sejauh nilai terbesar antara ℓ_w dan $M_u / 4V_u$ di atas dan di bawah penampang kritis dimana pelelehan tulangan longitudinal dapat terjadi akibat perpindahan lateral inelastik yang ditinjau.
- Kecuali bila V_u pada bidang dinding lebih kecil dari $c_w 0,83A_{cw}\sqrt{f'_c}$, maka tulangan horizontal yang berhenti pada tepi-tepi dinding struktural tanpa elemen batas harus memiliki kait standar yang melingkupi tulangan tepi atau tulangan tepi tersebut harus dilingkupi dalam sengkang U yang memiliki ukuran dan spasi yang sama dengan, serta disambung-lewatkan pada tulangan horizontal tersebut.

Gambar 2.21 merupakan gambar rasio tulangan longitudinal elemen batas:



Gambar 2.21 Rasio Tulangan Longitudinal untuk Elemen Batas Dinding Tipikal

(Sumber: SNI 2847:2019)

2.6.4.5 Pengecekan Retak

Retak pada dinding geser perlu dicek hal ini dikarenakan adanya perbedaan pada *stiffnes modifier* momen inersia pada dinding geser retak dengan belum retak. Jika momen dan geser terfaktor (beban kombinasi) dari analisis berdasarkan pada momen inersia dinding geser yang diambil sebesar $0,70I_g$ menunjukkan bahwa dinding akan retak oleh lentur, berdasarkan pada modulus runtuh (*rupture*), analisis harus diulang dengan mengubah momen inersia dinding geser menjadi $0,35I_g$ ditingkat-tingkat yang mengalami retak diprediksi akan terjadi oleh beban terfaktor. Untuk mengecek dinding sudah retak atau belum dengan menghitung tegangan yang terjadi pada dinding geser (f_u) kemudian dibandingkan dengan modulus retak beton (f_r), jika lebih besar maka dinding sudah retak. Untuk menghitung tegangan yang terjadi pada dinding geser dapat dilihat pada

$$f_u = \frac{P_u}{A} + \frac{M_2 \cdot y_2}{I_2} + \frac{M_3 \cdot y_3}{I_3} \quad (2.127)$$

dengan :

P_u = gaya aksial *ultimate*

A = luas penampang dinding geser (mm^2)

M_2 = momen pada sumbu lemah (Nmm)

y_2 = jarak dari garis netral ke sumbu 2 (mm)

I_2 = inersia pada sumbu lemah (mm^4)

M_3 = momen pada sumbu kuat (Nmm)

y_3 = jarak dari garis netral ke sumbu 3 (mm)

I_3 = inersia pada sumbu kuat (mm^4)

2.6.5 Struktur Sekunder (Lift)

Lift merupakan sebuah sistem transportasi vertikal dalam bangunan. Lift dipasang untuk bangunan-bangunan yang tingginya lebih dari 4 lantai karena kemampuan orang untuk naik turun dalam menjalankan tugas atau keperluan dalam bangunan tersebut hanya efektif sampai dengan 4 lantai (Tangoro, 2006). Analisis untuk menentukan kapasitas lift dihitung berdasarkan SNI 03-6573-2001.

Berdasarkan fungsinya *lift* dibagi menjadi:

- a. Lift penumpang (*passenger elevator*) digunakan untuk mengangkut manusia.
- b. Lift barang (*fright elevator*) digunakan untuk mengangkut barang.
- c. Lift uang/makanan (*dumb/waiters*)
- d. Lift pemadam kebakaran, biasanya lift ini juga berfungsi sebagai lift barang.

2.7 Struktur Bawah (Fondasi)

Fondasi merupakan struktur bawah yang berfungsi menopang struktur atasnya. Fondasi berfungsi menahan beban-beban dari atas, sehingga fondasi didisain dapat bertahan jika terjadi gempa ataupun kelebihan beban dan tidak boleh gagal terlebih dahulu. Beban dari struktur atas didistribusikan melalui kolom dengan nilai tegangan yang diijinkan sesuai dengan nilai daya dukung tanah. Ada dua jenis fondasi yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dalam merupakan salah satu jenis fondasi yang digunakan untuk menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah keras yang memiliki kapasitas daya dukung tinggi yang letaknya cukup dalam di dalam tanah (Patah dkk., 2023).

Suatu perencanaan fondasi dikatakan benar apabila beban yang diteruskan oleh fondasi ke tanah tidak melampaui kekuatan tanah yang bersangkutan. Apabila lapisan tanah tersebut keras maka daya dukung tanah tersebut cukup kuat untuk menahan beban yang ada, tetapi bila tanah lunak diperlukan penanganan khusus agar mempunyai daya dukung yang baik (Muda, 2016).

2.7.1 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah di lapangan dibutuhkan untuk data perancangan fondasi bangunan. Penyelidikan tanah dapat dilakukan dengan cara menggali lubang cobaan, pengeboran dan pengujian langsung di lapangan. Data yang diperoleh digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam menganalisis daya dukung dan penurunan. Tujuan penyelidikan tanah, antara lain :

1. Menentukan daya dukung tanah menurut tipe fondasi yang dipilih.
2. Menentukan tipe dan kedalaman fondasi.
3. Untuk mengetahui posisi muka air tanah,
4. Meramalkan besarnya penurunan.
5. Menentukan besarnya tekanan tanah.

6. Menyelidiki keamanan struktur untuk bangunan yang sudah ada.

Salah satu jenis penyelidikan tanah yang paling sering digunakan adalah standard penetration test (SPT). Hasil dari uji SPT adalah berupa nilai NSPT yang dapat memberikan indikasi rumus empiris untuk memperoleh data sifat mekanik tanah. Uji SPT dilakukan pada lubang bor, pada ujung dasar alat terdapat tabung sampel yang didorong masuk ke dalam lapisan tanah yang diinginkan dengan memanfaatkan energi jatuh dari sebuah paku seberat 63,5 kg (140 pon). Palu tersebut dijatuhkan pada ketinggian sekitar 76,2 cm (30 inci). Pengamat menghitung jumlah pukulan yang diperlukan untuk memasukan tabung tersebut kedalam 3150 mm. Jumlah pukulan pada 150 mm pertama umumnya diabaikan, N-SPT diperoleh dari jumlah pukulan pada 150 mm – 450 mm.

2.7.2 Kapasitas Daya Dukung Aksial Tiang

2.7.2.1 Kapasitas Ultimit Ujung Tiang Metode Mayerhof

Tiang pancang yang tertanam pada tanah pasir umumnya nilai daya dukungnya meningkat seiring dengan kedalaman pemancangan tiang hingga mencapai nilai maksimum penumbukan tiang. Untuk tiang pancang pada tanah pasir, $c' = 0$, maka persamaan daya dukung ujung pada kondisi ini menurut sebagai berikut :

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^* \quad (2.128)$$

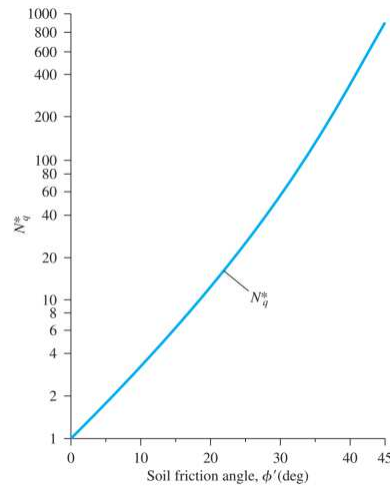
Keterangan :

N_q^* = faktor kapasitas daya dukung

q' = tegangan vertikal efektif pada ujung tiang (kN/m²)

A_p = luas penampang ujung tiang (m²)

Variasi nilai N_q^* dengan sudut gesek tanah ϕ terdapat pada Gambar 2.22, kemudian nilai interpolasi N_q^* untuk berbagai nilai sudut gesek juga ditunjukkan pada Tabel 2.33.



Gambar 2.22 Variasi Nilai Maksimum N^*q dengan sudut gesek tanah (ϕ')

Tabel 2.33 Nilai Interpolasi N^*q Berdasarkan Teori Mayerhof

ϕ'	N^*q	ϕ'	N^*q
20	12,4	33	96
21	13,8	34	115
22	15,5	35	143
23	17,9	36	168
24	21,4	37	194
25	26,0	38	231
26	29,5	39	276
27	34,0	40	346
28	39,7	41	420
29	46,5	42	525
30	56,7	43	650
31	68,2	44	780
32	81	45	930

Mayerhof mengusulkan persamaan daya dukung ujung (end bearing) pada tanah lempung tersaturasi dalam kondisi *undrained* ($\phi = 0$), sebagai berikut :

$$Q_p \approx N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p \quad (2.129)$$

Keterangan :

N_c^* = faktor kapasitas daya dukung

- c_u = kohesi *undrained* pada tanah diujung fondasi tiang (kN/m²)
 A_p = luas penampang ujung tiang (m²)

2.7.3 Kapasitas Ultimit Selimut Tiang Metode Beta (β)

Pada metode ini tahanan gesek (f) untuk tiang dapat ditentukan dengan mengacu pada tegangan efektif. Metode ini dapat digunakan untuk perhitungan kapasitas statis pada tanah tanpa kohesi, kohesif, dan juga tanah berlapis. Metode tegangan efektif digunakan untuk memodelkan kondisi kekuatan geser yang terdrainase. Persamaan yang digunakan sebagai berikut :

$$f = \beta \sigma'_o \quad (2.130)$$

Keterangan :

- σ'_o = Tegangan vertikal efektif
 β = $K \tan \phi'_R$ (atau Tabel 2.34)

Nilai tahanan gesek f dan koefisien β dapat dicari dengan persamaan-persamaan yang disebutkan diatas, dan juga dapat ditentukan dengan Tabel 2.34 dibawah ini :

Tabel 2.34 Perkiraan Rentang Nilai β dan N_t

Soil Type	ϕ'	β	N_t
Clay	25 – 30	0,23 – 0,40	3 – 30
Silt	28 – 34	0,27 – 0,34	20 – 40
Sand	32 – 40	0,30 – 0,60	30 – 150
Gravel	35 - 45	0,35 – 0,80	60 – 300

Dengan nilai f telah ditentukan, maka total friksi adalah :

$$Q_s = \beta \sigma'_o p \Delta L \quad (2.131)$$

2.7.4 Kapasitas Dukung Kelompok Tiang

Kapasitas kelompok tiang tidak selalu sama dengan jumlah kapasitas tiang tunggal yang berada dalam kelompoknya. Penurunan kelompok tiang lebih besar dari penurunan tiang tunggalnya, pada beban struktur yang sama, hal tersebut terjadi karena pada tiang tunggal luas zona tertekan pada bagian bawah tiang sangat kecil dari pada luas zona tertekan kelompok tiang. Perhitungan kapasitas tiang Terzaghi dan Peck (1948) mengambil asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Pelat penutup tiang (pile cap) sangat kaku.
2. Tanah yang berada di dalam kelompok tiang berkelakuan seperti blok padat.

Kapasitas ultimit kelompok tiang dinyatakan oleh persamaan (Terzaghi dan Peck 1948) sebagai berikut:

$$Q_g = 2D(B + L)c + 1,3c_b N_c BL \quad (2.132)$$

dengan:

Q_g = Kapasitas ultimit kelompok dengan nilai $Q_g < nQ_n$ (n = jumlah tiang dalam kelompoknya) (kN)

c = Kohesi tanah di sekeliling kelompok tiang (kN/m^2)

c_b = Kohesi tanah di bawah dasar kelompok tiang (kN/m^2)

B = Lebar kelompok tiang, dihitung dari pinggir tiang-tiang (m)

L = Panjang kelompok tiang (m)

D = Kedalaman tiang di bawah permukaan tanah (m)

N_c = Faktor kapasitas dukung

Faktor pengali 1,3 pada suku persamaan ke-2 adalah untuk luasan kelompok tiang yang berbentuk segi empat. Bentuk luasan lainnya dapat disesuaikan dengan persamaan-persamaan kapasitas dukung Terzaghi untuk fondasi dangkal.

Kapasitas dukung tiang gesek (*friction pile*) dalam tanah lempung akan berkurang jika jarak tiang semakin dekat. Besarnya kapasitas dukung total tereduksi tergantung dari ukuran, bentuk kelompok, jarak dan panjang tiangnya. Nilai pengali terhadap kapasitas dukung ultimit tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh kelompok tiang, disebut efisiensi tiang (E_g).

Persamaan efisiensi tiang yang disarankan oleh Converse-Labarre formula sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n' - 1)m + (m - 1)n'}{90mn'} \quad (2.133)$$

dengan:

E_g = Efisiensi kelompok tiang

- M = Jumlah baris tiang
 n' = Jumlah tiang dalam satu baris
 θ = Arc tg d/s , dalam derajat
 d = Diameter tiang
 s = Jarak pusat ke pusat tiang (m)

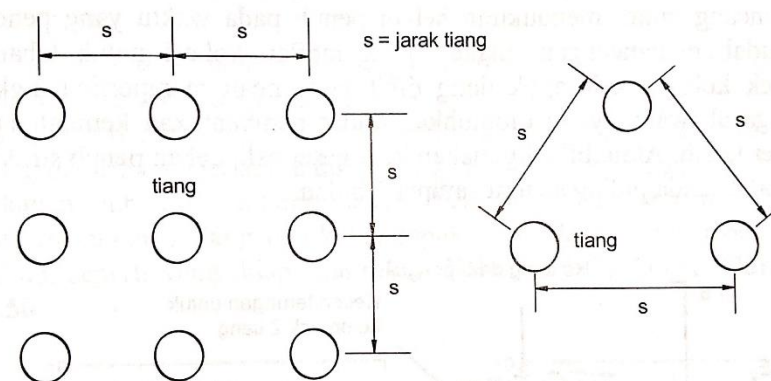
Efisiensi kelompok tiang didefinisikan sebagai:

$$E_g = \frac{Q_g}{nQ_u} \quad (2.134)$$

dengan:

- E_g = Efisiensi kelompok tiang
 Q_g = Beban maksimum kelompok tiang
 Q_u = Beban maksimum tiang tunggal
 n = Jumlah tiang dalam kelompok

Jarak yang dimaksud antar tiang dapat dilihat pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Jarak dalam Hitungan Efisiensi Kelompok Tiang
(Sumber: Hardiyatmo, 2010)

Berikut merupakan jarak antar tiang yang disajikan dalam tabel:

Tabel 2.35 Jarak antar tiang dalam kelompok tiang

Fungsi Tiang	Jarak as-as minimum (m)
Tiang dukung ujung dalam lapisan keras	$2 - 2,5d$ atau 75 cm

Fungsi Tiang	Jarak as-as minimum (m)
Tiang dukung ujung pada batuan keras	2d atau 60 cm
Tiang gesek	3 – 5d atau 105 cm

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

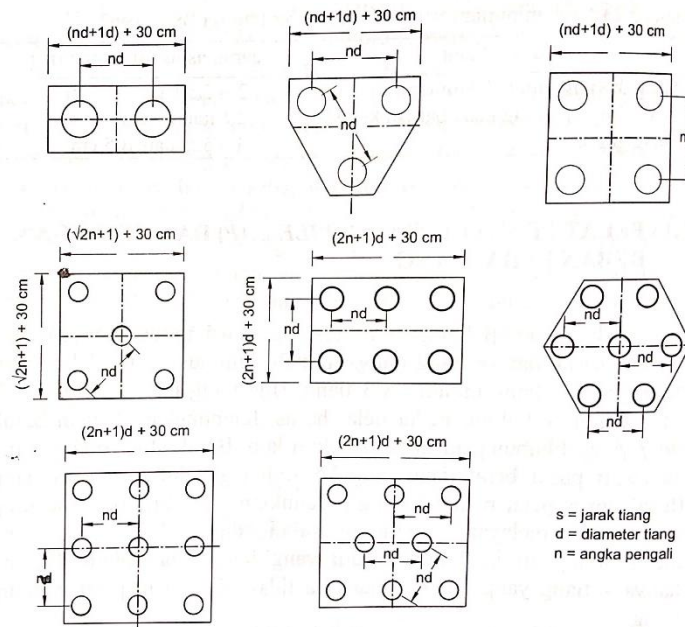
2.7.5 Pelat Penutup Tiang (*Pile Cap*)

Pelat penutup tiang (*pile cap*) berfungsi untuk menyebarkan beban dari kolom ke tiang-tiang. Jumlah minimum tiang dalam satu pelat penutup tiang umumnya 3 tiang, bila hanya terdapat 2 tiang dalam 1 kolom maka *pile cap* harus dihubungkan dengan sloof ke kolom lain. Balok sloof dibuat melewati pusat berat tiang-tiang ke arah tegak lurus deretan tiang.

Perancangan pelat penutup tiang dilakukan dengan anggapan sebagai berikut (Teng, 1962) :

- Pile cap sangat kaku.
- Ujung atas tiang menggantung pada pile cap. Karena itu, tidak ada momen lentur akibat oleh pile cap ke tiang.
- Tiang merupakan kolom pendek dan elastis.

Berikut merupakan gambar susunan kelompok tiang pada *pile cap*:

Gambar 2.24 Susunan Kelompok Tiang dalam *Pile Cap*

(Sumber: Hardiyatmo, 2010)

1. Reaksi yang bekerja pada tiang diakibatkan oleh beban aksial (V) dan momen (M_y). Berikut persamaan reaksinya :

$$Q_i = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x^2} + \frac{M_x y_i}{\sum y^2} \quad (2.135)$$

dengan :

 Q_i = Reaksi tiang atau beban aksial tiang ke-I (kN)

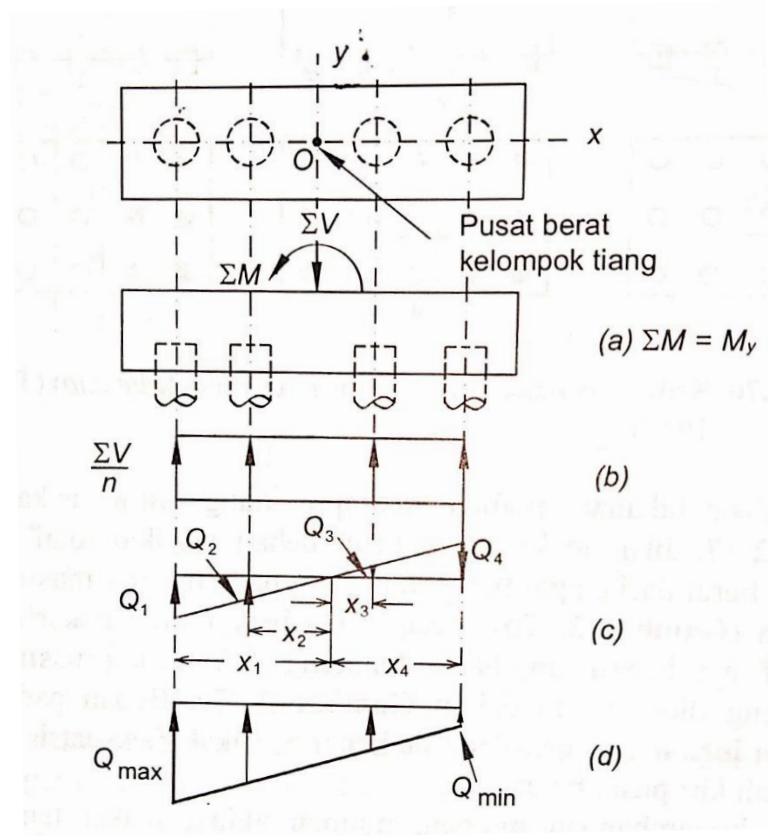
V = Jumlah gaya-gaya vertikal (kN)

 M_x, M_y = Momen terhadap sumbu x dan y (kN.m) e_x, e_y = Eksentrisitas resultan beban searah sumbu x dan y (m)

n = Jumlah tiang dalam kelompok

 x_i, y_i = Jarak tiang terhadap sumbu x dan y $\sum x^2 \sum y^2$ = Jumlah kuadran dari jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok tiang arah sumbu x dan y (m^2)

Berikut merupakan gambar diagram reaksi tiang akibat beban vertikal (V) dan momen (M) dari kedua arah:



Gambar 2.25 Diagram Reaksi Tiang

(Sumber: Hardiyatmo, 2010)

2. Kontrol terhadap geser

a. Geser 1 (satu) arah ditentukan sebagai berikut:

$$a = (L/2) - (h_k/2) - d \quad (2.136)$$

$$\sigma_a = \sigma_{\min} + \frac{(L - a)(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{L} \quad (2.137)$$

Tekanan tanah ke atas:

$$V_u = aB(\sigma_{\max} + \sigma_a)/2 \quad (2.138)$$

Gaya geser yang ditahan beton berdasarkan SNI 2847-2019:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2.139)$$

dimana:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (2.140)$$

b. Kontrol geser 2 (dua) arah

Dalam SNI 2847:2019 gaya geser dua arah diakibatkan oleh V_c , diperoleh dari nilai terkecil antara:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_0d \quad (2.141)$$

$$V_c = 0,17\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2.142)$$

$$V_c = 0,083\left(2 + \frac{a_s d}{b_0}\right)\lambda\sqrt{f'_c}b_0d \quad (2.143)$$

Tekanan tanah ke atas:

$$V_u = [BL - (b + d)(h + d)] \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.144)$$

$$\beta_c = hk/bk \quad (2.145)$$

$$b_0 = 2[(b + d)(h + d)] \quad (2.146)$$

3. Penulangan pile cap

Momen yang terjadi pada sisi kolom dihitung dengan rumus berikut:

$$M_u = \sigma_i x_1 + q_p x_2 + q_t x_3 \quad (2.147)$$

Perhitungan luas tulangan *pile cap* menggunakan rumus sebagai berikut:

$$A_s = \rho b d \quad (2.148)$$

Rasio tulangan (ρ) dihitung sebagai berikut:

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.149)$$

$$\rho_b = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.150)$$

$$\rho_{maks} = \left(\frac{0,003 + f_y/E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad (2.151)$$

$$\rho_{perlu} = \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{0,85 \cdot \phi \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}} \right] \quad (2.152)$$

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

Jarak antar tulangan dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$s = \frac{1/4 \pi d^2 S}{A_s} \quad (2.153)$$

Dengan $s \leq 2h$