

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Umum**

Perencanaan Rumah Susun Tenaga Pendidik Universitas Gadjah Mada ini menggunakan konsep BIM 5D mulai dari perencanaan struktur hingga tahap pembiayaan. Tahap awal yaitu perhitungan struktur gedung tahan gempa dengan sistem rangka pemikul momen khusus yang berdasar pada SNI 1726-2019 untuk tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan SNI 2847 2019 untuk persyaratan beton structural untuk bangunan gedung. Sedangkan pembebanan struktur bangunan gedung berdasar pada SNI 1727-2020 untuk beban desain minimum untuk bangunan gedung.

#### **2.2 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)**

SRPMK adalah singkatan dari Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus atau *special moment frames*. Sistem ini merupakan salah satu sistem struktur yang direncanakan dapat memikul gaya akibat beban gempa. Sistem rangka pemikul momen khusus biasa digunakan dengan kategori desain seismic D, E, dan F.

Salah satu konsep sistem rangka pemikul momen khusus yaitu *strong column weak beam* atau kolom harus lebih kuat dari balok. Beban lateral khususnya gempa diteruskan melalui mekanisme lentur antara hubungan balok dan kolom. Perananan hubungan atau *joint* kolom dan balok sangat penting, karena pada daerah pertemuan kolom dan balok terjadi sendi plastis.

#### **2.3 Pembebanan**

##### **2.3.1 Beban Mati**

Beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, tangga, dinding partisi tetap, finishing, klading gedung dan komponen arsitektural dan struktural lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkut material (SNI 1727:2020 pasal 3.1.1).

### 2.3.2 Beban hidup

Beban hidup adalah beban yang diakibatkan oleh pengguna dan penghuni bangunan gedung atau struktur lain yang tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan, seperti beban angin, beban hujan, beban gempa, beban banjir, atau beban mati (SNI 1727:2020 pasal 4.1).

Hunian atau penggunaan	Merata, $L_0$ psf (kN/m <sup>2</sup> )	Reduksi beban hidup dizinkan? (No. Pasal)	Reduksi beban hidup berlantai banyak dizinkan? (No. Pasal)	Terpusat Ib (kN)	Juga Lihat Pasal
<b>Rumah tinggal</b>					
Hunian satu dan dua keluarga					
Loteng yang tidak dapat dihuni tanpa gudang	10 (0,48)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		4.12.1
Loteng yang tidak dapat dihuni dengan gudang	20 (0,96)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		4.12.2
Loteng yang dapat dihuni dan ruang tidur	30 (1,44)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Semua ruang kecuali tangga	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Semua hunian rumah tinggal lainnya					
Ruang pribadi dan koridornya	40 (1,92)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
Ruang publik	100 (4,79)	Tidak (4.7.5)	Tidak (4.7.5)		
Koridor ruang publik	100 (4,79)	Ya (4.7.2)	Ya (4.7.2)		
<b>Atap</b>					
Atap datar, berbubung, dan lengkung	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-		4.8.1
Atap yang digunakan penghuni	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)	-		
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,70)	Ya (4.8.3)	-		
Atap vegetatif dan atap lansekap					
Atap bukan untuk hunian	20 (0,96)	Ya (4.8.2)	-		
Atap untuk tempat berkumpul	100 (4,79)	Ya (4.8.3)	-		
Atap untuk penggunaan lainnya	Sama dengan penggunaan yang dilayani	Ya (4.8.3)	-		
<b>Awning dan kanopi</b>					
Atap konstruksi <i>fabric</i> yang didukung oleh struktur rangka kaku ringan	5 (0,24)	Tidak (4.8.2)	-		
Rangka penumpu layar penutup	5 (0,24) berdasarkan area tributari dari atap yang didukung oleh komponen struktur rangka	Tidak (4.8.2)	-	200 (0,89)	
Semua konstruksi lainnya	20 (0,96)	Ya (4.8.2)			4.8.1
Komponen struktur atap utama, yang terhubung langsung dengan pekerjaan lantai tempat bekerja					
Titik panel tunggal dari kord bawah rangka batang atap atau suatu titik sepanjang komponen struktur utama pendukung atap diatas pabrik, gudang penyimpanan dan pekerjaanya, dan garasi bengkel				2000 (8,90)	
Semua komponen struktur atap utama lainnya				300 (1,33)	
Semua permukaan atap dengan beban pekerja pemeliharaan				300 (1,33)	

(Sumber SNI 1727:2020 tabel 4.3.1)

Gambar 2. 1 Tabel Beban hidup terdistribusi merata minimum,  $L_0$  dan beban hidup terpusat minimum

### 2.3.3 Beban Hujan

Setiap bagian dari atap harus dirancang untuk mampu menahan beban dari air hujan yang terakumulasi apabila sistem drainase primer pada bagian tersebut terhambat ditambah beban merata akibat kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran desainnya (SNI 1727:2020 pasal 8.3).

$$R = 5,2 (d_s + d_h)$$

$$R = 0,0098 (d_s + d_h)$$

Keterangan :

R = Beban air hujan pada atap yang tidak melendut, dalam kN/m<sup>2</sup>.

$d_s$  = kedalaman air pada atap yang tidak melendut meningkat ke lubang masuk sistem drainase sekunder apabila sistem drainase primer tertutup (yakni, tinggi statis), dalam mm

$d_h$  = tambahan kedalaman air pada atap yang tidak melendut di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada aliran desainnya (yakni, kepala hidraulik), dalam mm

### 2.3.4 Beban Gempa

Dalam perencanaan rumah susun ini beban gempa dihitung dengan mengacu pada peraturan SNI 1726:2019 (Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung).

1. Menentukan klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 5.3 berdasarkan perhitungan SPT rata – rata ( $N$ ). berikut ini adalah tabel klasifikasi situs.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Situs

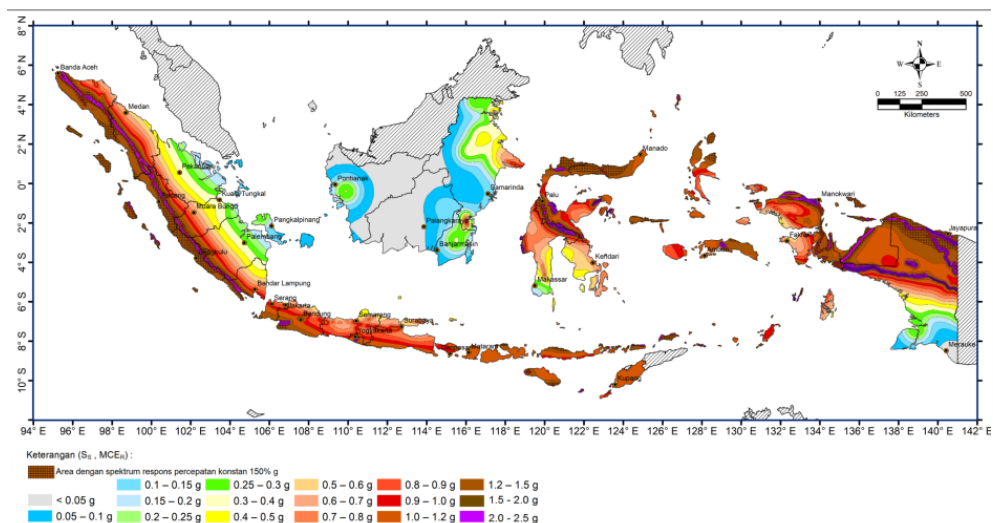
Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m / detik)	N atau Nch	Su (kPa)
SA (batuan Keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SD (tanah sedang)	175 – 350	>50	≥100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50

	<p>Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Indeks plastisitas, <math>PI &gt; 20</math> ,</li> <li>2. Kadar air, <math>w \geq 40\%</math> ,</li> <li>3. Kuat geser niralir <math>su &lt; 25</math> kPa</li> </ol>
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)

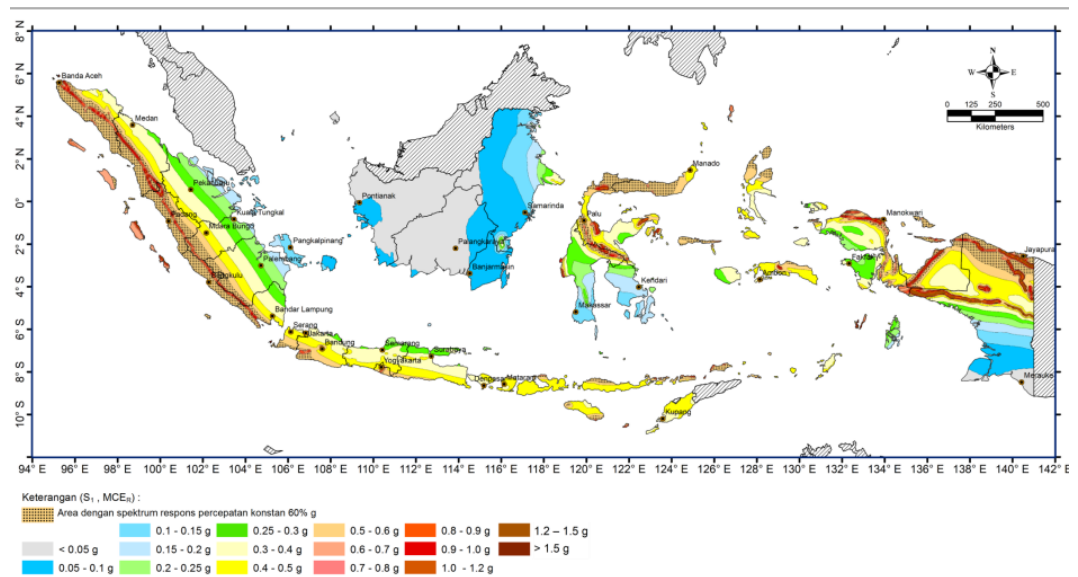
(Sumber SNI 1726:2019 tabel 5)

2. Menentukan parameter – parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCER).

(SNI 1726:2019 pasal 6.2). Parameter  $S_S$  dan  $S_1$  ditetapkan dengan menggunakan peta gempa yang bisa didapatkan di aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021.



Gambar 2. 2 Peta Wilayah  $S_1$   
(Sumber SNI 1726:2019 gambar 15)



Gambar 2. 3 Peta Wialayah  $S_s$   
(Sumber SNI 1726:2019 gambar 16)

3. Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada periode 0,2 detik dan periode 1 detik (SNI 1726:2019 pasal 6.2). 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 ( $F_v$ ) (SNI 1726:2019 pasal 6.2). Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek ( $S_{MS}$ ) dan periode 1 detik ( $S_{M1}$ ) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perhitungan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a \times S_s$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1$$

Dimana :

$S_{MS}$  = parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk periode pendek

$S_{M1}$  = parameter respons spektral percepatan gempa  $MCE_R$  terpetakan untuk periode 1,0 detik

Tabel 2. 2 Koefisien Situs,  $F_n$ 

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, $S_s$					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,75$	$S_s \leq 1,0$	$S_s \leq 1,25$	$S_s \leq 1,5$
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	1,0	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 6)

Tabel 2. 3 Koefisien Situs,  $F_v$ 

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode 1 detik, $S_1$					
	$S_1 \leq 0,25$	$S_1 \leq 0,5$	$S_1 \leq 0,75$	$S_1 \leq 1,0$	$S_1 \leq 1,25$	$S_1 \leq 1,5$
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	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	$SS^{(a)}$					

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 7)

4. Menentukan parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek  $S_{DS}$  dan periode 1 detik  $S_{D1}$  sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 6.3. Nilai  $S_{DS}$  dan  $S_{D1}$  didapatkan melalui rumusan berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1}$$

5. Respon Spektrum Desain

Menurut SNI 1726:2019 pasal 6.4 poin 1 untuk periode yang lebih kecil dari  $T_0$ , spektrum respons percepatan desain,  $S_a$ , harus diambil dari persamaan;

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

Menurut SNI 1726:2019 pasal 6.4 poin 2 untuk periode lebih besar dari atau sama dengan  $T_0$  dan lebih kecil dari atau sama dengan  $T_s$ , spektrum respons percepatan desain,  $S_a$ , sama dengan  $S_{DS}$ ;

Menurut SNI 1726:2019 pasal 6.4 poin 3 Untuk periode lebih besar dari  $T_s$  tetapi lebih kecil dari atau sama dengan  $T_L$ , respons spektral percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}$$

Menurut SNI 1726:2019 pasal 6.4 poin 4 untuk periode lebih besar dari  $T_L$ , respons spektral percepatan desain,  $S_a$ , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2}$$

Dimana :

SDS : parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek

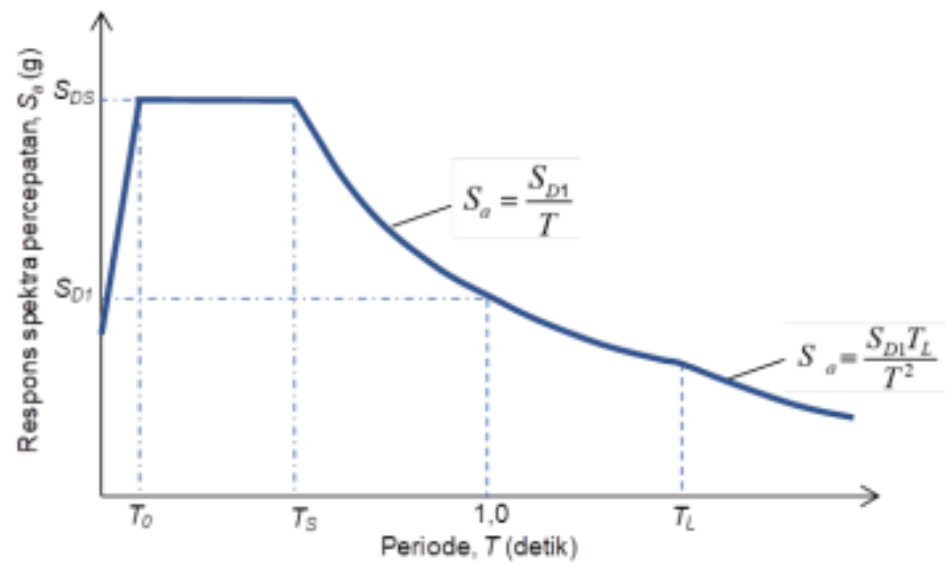
SD1 : parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik

T : periode getar fundamental struktur

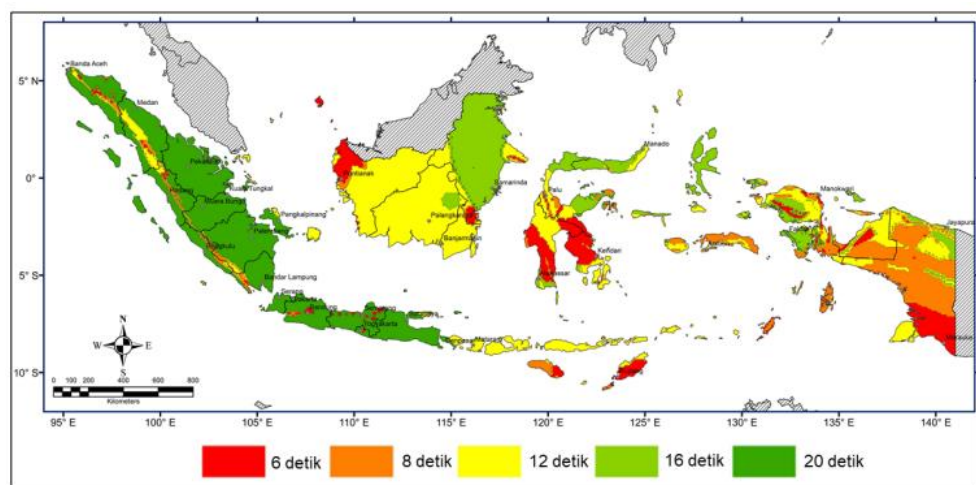
$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$T_L$  : Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 yang nilainya diambil dari Gambar 2.5



Gambar 2. 4 Respon Spektrum Desain  
(Sumber SNI 1726:2019 gambar 3)



Gambar 2. 5 – Peta transisi periode panjang,  $T_L$ , wilayah Indonesia  
(Sumber SNI 1726:2019 gambar 20)

6. Menentukan Kategori Desain Seismik (KDS) berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 6.5.



Tabel 2. 4 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

Nilai $S_{Ds}$	Kategori Resiko	
	I, II atau III	IV
$S_{Ds} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{Ds} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{Ds} < 0,5$	C	D
$0,5 \leq S_{Ds}$	D	D

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 8)

Tabel 2. 5 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

Nilai $S_{D1}$	Kategori Resiko	
	I, 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
$0,2 \leq S_{D1}$	D	D

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 9)

- Menentukan nilai koefisien modifikasi respon ( $R$ ) sesuai dengan struktur yang dipakai. Nilai koefisien modifikasi respon didapatkan dari SNI 1726:2019 pasal 7.2.2.

Tabel 2. 6 Koefisien modifikasi respon ( R )

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, $R^a$	Faktor kuat lebih sistem, $\Omega_0^b$	Faktor pembesaran defleksi, $C_d^c$	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n$ (m) <sup>d</sup>				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D <sup>e</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
19.Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20.Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
21.Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
22.Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23.Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24.Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25.Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26.Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
<b>C. Sistem rangka pemikul momen</b>								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 <sup>e</sup>	TI <sup>e</sup>	TI <sup>e</sup>
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI <sup>f</sup>	TI <sup>f</sup>	TI <sup>f</sup>
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus <sup>g</sup>	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10.Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11.Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12.Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan <sup>h</sup>	3½	3 <sup>e</sup>	3½	10	10	10	10	10
<b>D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25 % gaya seismik yang ditetapkan</b>								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus <sup>g,h</sup>	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa <sup>g</sup>	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
10.Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	3	5	TB	TB	TB	TB	TB
11.Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	3	3½	TB	TB	TI	TI	TI
12.Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
13.Dinding geser pelat baja khusus	8	2½	6½	TB	TB	TB	TB	TB

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 12)

8. Menentukan periode fundamental pendekatan ( $T_a$ ) sesuai SNI 1727:2019 dengan rumusan sebagai berikut

$$T_a = C_t h_n^x$$

Keterangan :

$h_n$  adalah ketinggian struktur bangunan (m), koefisien  $C_t$  dan  $x$  ditentukan dari tabel dibawah ini :

Tabel 2. 7 Nilai parameter periode pendekatan  $C_t$  dan  $x$ 

<b>Tipe Struktur</b>	$C_t$	$x$
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 sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

(Sumber SNI 1726:2019 tabel 18)

9. Menentukan faktor keutamaan gempa dan kategori risiko bangunan struktur bangunan sesuai dengan SNI 1726:2019 pasal 4.1.2

Tabel 2. 8 Kategori risiko bangunan gedung untuk beban gempa

<b>Jenis Pemanfaatan</b>	<b>Kategori Risiko</b>
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan</li> <li>▪ Fasilitas sementara</li> <li>▪ Gudang penyimpanan</li> <li>▪ Rumah jaga dan struktur kecil lainnya</li> </ul>	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Perumahan</li> <li>▪ Rumah toko dan rumah kantor</li> <li>▪ Pasar</li> <li>▪ Gedung perkantoran</li> <li>▪ Gedung apartemen/ rumah susun</li> <li>▪ Pusat perbelanjaan/ mall</li> <li>▪ Bangunan industri</li> <li>▪ Fasilitas manufaktur</li> <li>▪ Pabrik</li> </ul>	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bioskop</li> <li>▪ Gedung pertemuan</li> <li>▪ Stadion</li> <li>▪ Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit</li> </ul>	III

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ gawat darurat</li> <li>▪ Fasilitas penitipan anak</li> <li>▪ Penjara</li> <li>▪ Bangunan untuk orang jompo</li> </ul> <p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pusat pembangkit listrik biasa</li> <li>▪ Fasilitas penanganan air</li> <li>▪ Fasilitas penanganan limbah</li> <li>▪ Pusat telekomunikasi</li> </ul> <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bangunan-bangunan monumental</li> <li>▪ Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan</li> <li>▪ Rumah ibadah</li> <li>▪ Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat</li> <li>▪ Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat</li> <li>▪ Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya</li> <li>▪ Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat</li> <li>▪ Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat</li> <li>▪ Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat.</li> </ul> <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

Tabel 2. 9 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

### 2.3.5 Beban Angin

Menurut SNI 1726-2020 pasal 26.1.1 bangunan gedung dan struktur lain, termasuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) dan seluruh Komponen dan Klading (K&K) gedung, harus dirancang dan dilaksanakan untuk menahan beban angin seperti yang ditetapkan menurut Pasal 26 sampai Pasal 31. Ketentuan dalam Pasal ini mendefinisikan parameter angin dasar untuk digunakan dengan ketentuan lainnya yang terdapat dalam standar SNI 1726-2020.

### 2.3.6 Kombinasi Pembebanan

Menurut SNI 1726-2020 pasal 4.2.2.1 “Struktur, komponen-elemen struktur dan elemen-elemen fondasi harus didesain sedemikian hingga kuat rencananya sama atau melebihi pengaruh beban-beban terfaktor dengan kombinasi-kombinasi sebagai di bawah”.

1.  $1,4D$
2.  $1,2D + 1,6L + 0,5Lr$
3.  $1,2D + 1W + L + 0,5Lr$
4.  $0,9D + 1W$

Sementara kombinasi pembebanan dengan faktor kuat lebih, digunakan kombinasi pembebanan sesuai dengan SNI 1726-2019 pasal 8.3.2.3 sebagai berikut :

$$(1,2 + 0,2S_{DS})D + E + L$$

$$(0,9 - 0,2S_{DS})D + E$$

Keterangan :

$D$  = beban mati yang diakibatkan oleh berat konstruksi permanen, termasuk dinding, lantai, atap, plafon, partisi tetap, tangga, dan peralatan layan tetap.

$L$  = beban hidup yang ditimbulkan oleh penggunaan gedung, termasuk kejut, tetapi tidak termasuk beban lingkungan seperti angin, hujan, dan lainlain.

$L_r$  = beban hidup di atap yang ditimbulkan selama perawatan oleh pekerja, peralatan, dan material, atau selama penggunaan biasa oleh orang dan benda bergerak.

$R$  = beban hujan

$W$  = beban Angin.

$E$  = beban gempa

## 2.4 Preliminary Design

### 2.4.1 Perencanaan Balok

SNI 2847-2019 pasal 9.3.1.1 mengatur tentang ketinggian minimum balok nonprategang, dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 2. 10 Tinggi minimum balok nonprategang

Kondisi Perletakan	Minimum $h$
Perletakan sederhana	$l/16$
Menerus satu sisi	$l/18,5$
Menerus dua sisi	$l/21$
Kantilever	$l/8$

Rumusan dapat diaplikasikan untuk beton mutu normal dan tulangan mutu 420. Untuk kasus lain, minimum  $h$  harus dimodifikasi sesuai dengan 9.3.1.1.1 hingga 9.3.1.1.3, sebagaimana mestinya.

(Sumber SNI 2847:2019 pasal 9.3.1.1)

Berdasarkan tabel diatas maka ketinggian minimum untuk balok induk yaitu:  $h_{min}$

$= \frac{L}{16}$ , jika nilai  $f_y$  420 MPa.

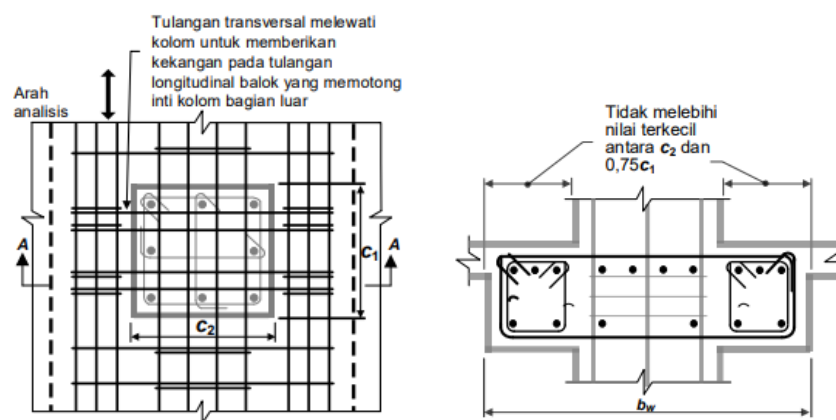
$h_{min} = \frac{L}{16} \times \left(0,4 + \frac{f_y}{700}\right)$ , jika  $f_y$  selain 420 Mpa

Sedangkan  $b$  (lebar) balok dapat ditentukan dari minimal  $\frac{1}{2}$  dari  $h$  (tinggi balok).

Selain untuk balok persamaan diatas juga digunakan untuk menentukan dimensi dari *tie beam*.

Sementara persyaratan balok dengan SRPMK gaya tekan aksial terfaktor tidak boleh melebihi  $A_g \cdot f'_c / 10$ . Untuk batasan dimensi harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.6.2.1 :

- Bentang bersih,  $l_n$ , harus minimal  $4d$
- Lebar penampang  $b_w$ , harus sekurangnya nilai terkecil dari  $0,3h$  dan  $250$  mm
- Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari  $c_2$  dan  $0,75c_1$  pada masing-masing sisi kolom.



Gambar 2. 6 Lebar efektif maksimum balok lebar (wide beam) dan persyaratan tulangan transversal  
(Sumber SNI 2847:2019 gambar R18.6.2)

#### 2.4.2 Perencanaan Pelat Lantai

- Menentukan pelat 1 arah / 2 arah, dengan mencari nilai  $l_n$  dengan rumusan berikut ini :

$$l_n = \frac{L_y}{L_x}$$

Dimana :

$l_n$  : Jarak bersih ke arah memanjang, diukur dari muka ke muka tumpuan  
 $L_y$  : bentang panjang

$L_x$  : bentang pendek

Jika nilai  $l_n \leq 2$ , maka digunakan pelat dua arah.

- Menentukan dimensi ketebalan pelat lantai berdasarkan SNI 2847:2019

Tabel 2. 11– Ketebalan minimum pelat solid satu arah nonprategang

Kondisi Tumpuan	$h$ minimum
Tumpuan sederhana	$l/20$
Satu ujung menerus	$l/24$
Kedua ujung menerus	$l/28$
Kantilever	$l/10$

(Sumber SNI 2847:2019 pasal 7.3.1.1)

Tabel 2. 12 Ketebalan minimum pelat dua arah nonprategang tanpa balok interior (mm)

$F_y$ MPa	Tanpa drop panel			Dengan drop panel		
	Panel eksterior		Panel Interior	Panel eksterior		Panel interior
	Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi		Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi	
280	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/40$	$l_n/40$
420	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
520	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$

(Sumber SNI 2847:2019 tabel 8.3.1.1)

3. Untuk pelat nonprategang dengan balok membentang di antara tumpuan di semua sisi, ketebalan pelat keseluruhan  $h$  harus memenuhi batasan pada tabel 8.3.1.2 SNI 2847:2019.

Tabel 2. 13 Ketebalan minimum pelat dua arah nonprategang dengan balok di antara tumpuan pada semua sisinya

$\alpha_{fm}$	$h$ minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Pasal 8.3.1.1 SNI 2847:2019 berlaku (a)	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari :	$\frac{l_n \left( 0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$ (b)
		125 (c)



$\alpha_{fm} > 0,2$	Terbesar dari :	$\frac{l_n \left( 0,8 + \frac{f_y}{1400} \right)}{36 + 9\beta}$	(d)
		90	€

(Sumber SNI 2847:2019 tabel 8.3.1.2)

### 3.4.3 Perencanaan Dimensi Kolom

Perencanaan dimensi kolom untuk sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) harus memenuhi persyaratan SNI 2847:2019 pasal 18.7.2.1 :

1. Dimensi penampang terkecil, diukur pada garis lurus yang melalui pusat geometri, tidak kurang dari 300 mm / 30 cm.
2. Rasio dimensi penampang terkecil terhadap dimensi tegak lurus tidak kurang dari 0,4.

Perencanaan dimensi kolom dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{h_{kolom}}{I_{kolom}} > \frac{H_{balok}}{I_{balok}}$$

Dimana ;

$h_{kolom}$  : Tinggi bersih kolom

$h_{balok}$  : Tinggi bersih balok

$I_{kolom}$  : Inersia kolom  $\left( \frac{1}{12} \times b \times h^3 \right)$

$I_{balok}$  : Inersia balok  $\left( \frac{1}{12} \times b \times h^3 \right)$

## 2.5 Penulangan Struktur

### 2.5.1 Penulangan Balok

As min penulangan tulangan lentur minimum pada balok harus memenuhi persyaratan SNI 2847:2019 pasal 9.6.1.2 harus lebih besar dari persamaan a, dan b

a.  $AS_{min} \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} b_w \times d$

b.  $\frac{1,4}{f_y} b_w \times d$

Rasio tulangan,  $\rho$  , tidak boleh melebihi 0,025, dan harus disediakan paling sedikit dua batang tulangan pada kedua sisi atas dan bawah.

1. Perhitungan Penulangan Lentur Balok

Untuk menghitung penulangan balok pada tumpuan dan lapangan, maka digunakan rumus :

$$mn = \frac{mu}{\phi}$$

$$Rn = \frac{Mu}{b \times d^2}$$

$$\rho = \frac{1}{mn} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2mn \times Rn}{fy}} \right)$$

$$\rho b = \frac{0,85 \times \beta_1 \times fc'}{fy} \left( \frac{600}{600 + fy} \right)$$

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

$A_{s_{min}}$  tumpuan positif menurut SNI 2847:2019 pasal 18.6.3.2 harus tidak kurang dari 0,5  $A_s$  tumpuan negatif. Sedangkan  $A_{s_{min}}$  lapangan negatif tidak boleh kurang dari 0,25  $A_s$  pada momen maksimum lapangan positif.

## 2. Perhitungan tulangan transversal balok

Gaya geser maksimum tumpuan dan lapangan diperoleh dari program ETABS

### a. Menentukan nilai $V_c$ dan $V_s$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{fc'} \times bw \times d$$

Gaya geser minimum yang harus dimiliki tulangan sengkang / geser :

$$V_{s_{min}} = \frac{1}{3} \times bw \times d$$

$$V_{s_{max}} = \frac{2}{3} \times \sqrt{fc'} \times bw \times d$$

$$V_s = \frac{Av \times fy \times d}{s}$$

Luasan tulangan geser minimum yang harus terpasang :

$$Av_{min} = \frac{bw \times s}{3 \times fy}$$

### b. Perhitungan tulangan geser berdasarkan kondisi:

#### 1) Kondisi 1

$$Vu \leq 0,5 \times \phi \times V_c$$

Maka, tidak memerlukan tulangan geser

#### 2) Kondisi 2

$$0,5 \times \varphi \times Vc \leq Vu \leq \varphi \times Vc$$

Diperlukan tulangan geser minimum.

$$Av_{min} = \frac{bw \times s}{3 \times fy} \quad Vs_{min} = \frac{1}{3} \times bw \times d$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm}$$

3) Kondisi 3

$$\varphi \times Vc < Vu \leq \varphi(Vc + Vs_{min})$$

Diperlukan tulangan geser minimum

$$Av_{min} = \frac{bw \times s}{3 \times fy} \quad Vs_{min} = \frac{1}{3} \times bw \times d$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm}$$

4) Kondisi 4

$$\varphi(Vc + Vs_{min}) < Vu$$

Diperlukan tulangan geser

$$\varphi \times Vs_{perlu} = Vu - \varphi \times Vc$$

$$Vs = \frac{Av \times fy \times f}{s}$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm}$$

5) Kondisi 5

$$\varphi \left( Vc + \frac{1}{3} \sqrt{fc'} \times bw \times d \right) < Vu \leq \varphi \left( Vc + \frac{2}{3} \sqrt{fc'} \times bw \times d \right)$$

Diperlukan tulangan geser

$$\varphi \times Vs_{perlu} = Vu - \varphi \times Vc$$

$$Vs = \frac{Av \times fy \times f}{s}$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm}$$

## 2.5.2 Penulangan Kolom

1. Perhitungan tulangan lentur kolom

- a. Luas tulangan longitudinal  $Ast$  tidak boleh kurang dari  $0,01A_g$  dan tidak lebih dari  $0,06A_g$  (SNI 2847:2019 pasal 18.7.4.1)
- b. Kekuatan lentur kolom harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.7.3.2 :

$$\sum M_{nc} \geq (1,2) \sum M_{nb}$$

## 2. Tulangan transversal

Panjang minimum untuk menyediakan tulangan transversal yang rapat pada ujung kolom, dimana leleh lentur biasanya terjadi (SNI 2847:2019 pasal 18.7.5.1). Panjang  $l_0$  tidak boleh kurang dari nilai :

- a. Tinggi kolom pada muka joint atau pada penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
- b. Seperenam tinggi bersih kolom
- c. 450 mm

Menurut SNI 2847:2019 pasal 18.7.5.2 tulangan transversal harus sesuai:

- a. Setiap tekukan ujung sengkang pengekuat persegi dan ikat silang harus mengait batang tulangan longitudinal terluar.
- b. Tulangan harus diatur sedemikian sehingga spasi  $h_x$  antara tulangan-tulangan longitudinal di sepanjang perimeter penampang kolom yang tertumpu secara lateral oleh sudut ikat silang atau kaki-kaki sengkang pengekuat tidak boleh melebihi 350 mm.
- c. Ketika  $P_u > 0,3A_g f_c'$  atau  $f_c' > 70$  MPa pada kolom dengan sengkang pengekuat, setiap batang atau bundel tulangan longitudinal di sekeliling inti kolom harus memiliki tumpuan lateral yang diberikan oleh sudut dari sengkang pengekuat maupun ikat silang gempap, dan nilai  $h_x$  tidak boleh lebih dari 200 mm.  $P_u$  harus merupakan gaya tekan terbesar yang konsisten dengan kombinasi beban terfaktor termasuk E.

Di luar panjang  $l_0$  yang ditetapkan dalam 18.7.5.1, kolom harus diberi tulangan spiral atau sengkang yang memenuhi 25.7.2 hingga 25.7.4 dengan spasi  $s$  tidak melebihi nilai terkecil dari enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil dan 150 mm, kecuali bila jumlah tulangan transversal yang lebih besar disyaratkan oleh pasal 18.7.4.3 atau 18.7.6.

### 2.5.2 Penulangan Pelat Lantai

1. Spasi maksimum penulangan pelat lantai diatur dalam SNI 2847:2019 pasal 8.7.2.2  
 $S_{max} = 2 \times \text{tebal plat dan } 450 \text{ mm}$
2. Luas minimum tulangan lentur,  $A_{s_{min}}$ , harus disediakan sesuai Tabel 7.6.1.1.

Tabel 2. 14  $A_{s_{min}}$  untuk pelat satu arah nonprategang

Typo Tulangan	$f_y, \text{MPa}$	$A_{s_{min}}$	
Batang Ulir	< 420	0,0020 $A_g$	
Batang ulir atau kawat las	$\geq 420$	Terbesar dari :	$\frac{0,0018 \times 420}{f_y} A_g$
			0,0014 $A_g$

(Sumber SNI 2847:2019 pasal 7.6.1.1 , 8.6.1.1)

3. Menghitung tebal efektif penampang,  $d$ , dengan menggunakan persamaan :

$$d = h - c_c - d_b - \frac{d_b}{2}$$

Dimana :

 $d$  : tinggi efektif penampang pelat lantai $c_c$  : selimut beton $h$  ; tebal pelat $d_b$  : diameter tulangan

4. Menghitung jumlah tulangan dalam 1 meter

$$n = b / s$$

Dimana :

 $n$  : jumlah tulangan dalam 1 meter $s$  : jarak tulangan yang dipakai

5. Menghitung  $A_{s_{pasang}}$

$$A_{s_{pasang}} = n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2$$

Nilai  $A_{s_{pasang}}$  harus memenuhi persyaratan tabel 2.13

6. Menghitung blok beton,  $a$ ,

$$a = A_s \times f_y / (0,85 \times f_c' \times b)$$

7. Menghitung kapasitas lentur,  $M_n$  pasang

$$M_n = A_s \times f_y / (d - a/2)$$

8. Menghitung kapasitas lentur tereduksi,  $\phi$

$$\phi \times M_n$$

9. Cek Kapasitas,  $\phi M_n > M_u$

Tabel 2. 15 Faktor reduksi kekuatan ( $\phi$ ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial

Regangan Tarik netto ( $\varepsilon_t$ )	Klasifikasi	$\phi$			
		Jenis Tulangan Transversal			
		Spiral		Tulangan lainnya	
$\varepsilon_t \leq \varepsilon_{ty}$	Tekanan Terkontrol	0,75	a)	0,65	b)
$\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}$ < 0,005	Transisi	$0,75 + 0,15 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{0,005 - \varepsilon_{ty}}$	c)	$0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{ty})}{0,005 - \varepsilon_{ty}}$	d)
$\varepsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,90	e)	0,90	f)

(Sumber SNI 2847:2019 tabel 21.2.2)

10. Menghitung kapasitas Momen ultimit,  $M_u$ , nilai  $M_u$  diperoleh dari *output* ETABS
11. Cek kapasitas,  $\phi M_n > M_u$

## 2.6 Pondasi

Pondasi adalah bagian dari struktur bawah bangunan yang berfungsi meneruskan beban dari struktur di atasnya ke lapisan tanah. Pondasi berdasarkan kedalaman terdapat dua macam, yaitu pondasi dangkal dan dalam. Dalam perencanaan ini, digunakan pondasi dalam *bored pile*.

### 2.4.1 Pondasi *Bored pile*

Pondasi *bored pile* adalah salah satu jenis pondasi dalam dengan bentuk seperti tabung dengan diameter tertentu terdiri dari campuran beton bertulang dengan yang dicor didalam tanah dengan menggunakan metode salah satunya *kelly drilling* sampai panjang kedalam dengan tingkat kekerasan daya dukung tanah yang direncanakan. Menurut Hary Crhistady Hardiyatmo (2011), keuntungan dalam pemakaian pondasi *bored pile* dibandingkan dengan pondasi tiang pancang yaitu, pemasangan tidak menimbulkan gangguan suara dan getaran yang membayakan bangunan sekitarnya dan kedalaman tiang dapat divariasikan.

### 2.4.2 Perhitungan Daya Dukung Pondasi

Daya dukung pondasi bored pile atau tiang bor diperoleh dari penjumlahan tahanan ujung dan tahanan gesek selimut tiang. Dalam perencanaan tugas akhir ini daya dukung pondasi dihitung dengan metode *Reese & Wright*.

#### 1. Daya dukung ujung tiang

$$Q_p = q_p \times A$$

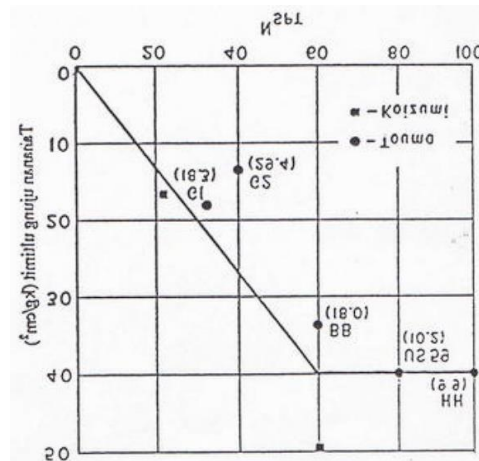
Dimana :

$Q_p$  = daya dukung ujung tiang (Ton)

$q_p$  = tahanan ujung (Ton/m<sup>2</sup>)

$A$  = luas penampang ujung tiang (m<sup>2</sup>)

Untuk kasus tanah *non-kohesif* terdapat korelasi antara tahanan ujung  $q_p$  dengan nilai N-SPT.



Gambar 2. 7 Korelasi Tahanan Ujung dengan Nilai N\_SPT  
(Sumber : Reese & Wright, 1977))

#### 2. Daya dukung selimut tiang

$$Q_s = f \times L \times p$$

Dimana :

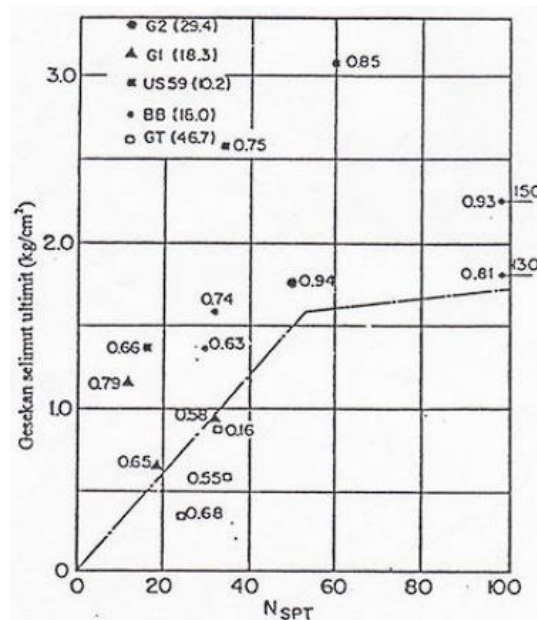
$Q_s$  = daya dukung selimut tiang (Ton)

$f$  = gesekan selimut tiang (Ton/m<sup>2</sup>)

$L$  = panjang tiang (m)

$p$  = keliling penampang tiang (m)

Gesekan selimut tiang dipengaruhi oleh jenis tanah. Pada tanah *non-kohesif*, nilai  $f$  dapat diketahui dari korelasi langsung dengan nilai N-SPT



Gambar 2. 8 Korelasi langsung tahanan selimut dengan N-SPT  
(Sumber : Wright, 1977))

### 2.4.3 Kapasitas Kelompok dan Efisiensi Tiang

Apabila jarak antar tiang dalam satu grup (kepala tiang) tidak memenuhi jarak minimum yang disyaratkan, maka daya dukung grup tiang tidak akan sama dengan daya dukung satu tiang dikalikan dengan jumlah tiang dalam grup tersebut, melainkan ada satu faktor pengali yang besarnya kurang dari satu dan biasa disebut dengan efisiensi grup tiang. Dengan demikian daya dukung total grup tiang bisa dituliskan:

$$Eg = 1 - \left[ \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \right] \arctan D/s$$

Dimana :

- Eg = efisiensi kelompok tiang
- m = jumlah tiang pada deret baris
- n = jumlah tiang pada deret kolom
- s = jarak antar as tiang



D = diameter tiang

Kapasitas ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang kelompok :

$$Q_g = E_g \times n \times Q_u$$

Dimana :

$Q_g$  = beban maksimum kelompok tiang

$Q_u$  = kapasitas daya dukung tiang tunggal

n = jumlah tiang dalam satu kelompok

## 2.7 Pemodelan 3D

Pemodelan 3D pada perencanaan gedung rumah susun ini menggunakan *software Tekla Structures* dengan acuan pada data dan informasi *Detail Engineering Design (DED)* Rumah Susun Tenaga Pendidik Universitas Gadjah Mada.

## 2.8 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Perencanaan biaya merupakan salah satu aspek penting yang tidak terlepas dari manajemen proyek bangunan. Perencanaan biaya menyajikan prakiraan biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan proyek hingga akhir. Perencanaan biaya disusun sebelum dimulainya proyek berlangsung dan dapat diperbaharui secara berkala selama siklus hidup proyek. Prinsip dari perencanaan biaya itu sendiri yakni menghitung volume pekerjaan kemudian dikalikan dengan harga satuan pekerjaan setempat. Pada perencanaan ini menggunakan bantuan *software Tekla Structures* untuk menghitung secara otomatis kebutuhan volume pekerjaan melalui metode *Organizer*.

## 2.9 Penjadwalan Proyek dan Simulasi Proyek

Jadwal merupakan sebuah parameter tolak ukur keberhasilan sebuah proyek konstruksi, di samping anggaran dan mutu. Penjadwalan perlu memperhatikan dalam manajemen proyek untuk menentukan durasi maupun urutan kegiatan proyek, sehingga nantinya terbentuk suatu penjadwalan yang logis dan realistis. Adapun penjadwalan proyek pada umumnya menggunakan estimasi durasi yang pasti. Namun, banyak faktor ketidakpastian sehingga durasi masing-masing

kegiatan tidak dapat ditentukan dengan pasti. Di mana faktor penyebab ketidakpastian durasi tersebut di antaranya adalah cuaca, produktivitas pekerja dan lain-lain (Febriana & Aziz, 2021).

Simulasi proyek merupakan tahapan *Building Information Modeling* (BIM) 4D. simulasi proyek menampilkan progress pekerjaan dari awal hingga selesai berdasarkan penjadwalan yang telah disusun. Simulasi proyek memungkinkan untuk mengetahui efektivitas pekerjaan maupun *clash* antar urutan pekerjaan. Penjadwalan dan simulasi proyek pada tugas akhir ini menggunakan *software Tekla Structures*.