

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pembebanan Struktur

Beban merupakan gaya yang bekerja pada suatu landasan struktur. Salah satu hal yang penting dalam merencanakan fondasi ialah beban-beban yang bekerja pada bangunan yang akan dipikul oleh fondasi tersebut.

2.1.1 Beban yang Bekerja Pada Gedung

Jenis beban yang diterima oleh suatu struktur digolongkan menjadi beban gravitasi yang meliputi beban mati (*Dead Load*) beban hidup (*Live Load*), beban lateral meliputi beban gempa (*Earth Quake Load*) dan beban angin (*Wind Load*).

a. Beban Mati

Berikut merupakan beban mati bahan bangunan dan komponen gedung berdasarkan Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPURG) SKBI-1.3.53.1987 pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Bahan Bangunan	Berat Jenis (kg/m ³)
Baja	7850
Batu alam	2600
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1500
Batu karan (berat tumpuk)	700
Batu pecah	1450
Besi tuang	7250
Beton	2200
Beton bertulang	2400
Kayu (kelas 1)	1000
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
Pasangan bata merah	1700

Bahan Bangunan	Berat Jenis (kg/m³)
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2200
Pasangan batu cetak	2200
Pasangan batu karang	1450
Pasir (kering udara sampai lembab)	1600
Pasir (jenuh air)	1800
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1850
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1700
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2000
Timah hitam (timbel)	11400

Tabel 2.2 Beban Mati Komponen Gedung

Komponen gedung	(kg/m²)
Adukan, per cm tebal:	
Dari semen	21
Dari kapur, semen merah atau tras	17
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
Dinding pasangan bata merah:	
Satu batu	450
Setengah batu	250
Dinding pasangan batako berlubang:	
Tebal dinding 20 cm (HB20)	200
Tebal dinding 10 cm (HB10)	120
Dinding pasangan batako tanpa lubang:	
Tebal dinding 15 cm	300
Tebal dinding 10 cm	200

Komponen gedung	(kg/m ²)
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau pengaku), terdiri dari:	
Semen asbes (ernit dan bahan lain sejenis), dengan tebal maksimum 4 mm)	11
Kaca, dengan tebal 3-4 mm)	10
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m jarak s.k.s minimum 0.80 m	7
Bidang Atap	
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ²	50
Penutup atap sirap dengan reng dan usuk/kaso, per m ² bidang atap	40
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gording	10
Penutup lantai dari ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24
Semen asbes gelombang (tebal 5 mm)	11

b. Beban Hidup

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung (PPURG) SKBI.1987 mendefinisikan beban hidup adalah beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan suatu gedung dan termasuk beban-beban pada lantai yang berasal dari barang-barang yang dapat berpindah, mesin-mesin serta peralatan yang merupakan bagian yang tak terpisahkan dari gedung dan dapat diganti selama masa hidup dari gedung itu, sehingga mengakibatkan perubahan dalam pembebanan lantai dan atap tersebut. Khusus pada atap, dalam beban hidup dapat termasuk beban yang berasal dari air hujan, baik akibat genangan maupun akibat tekanan jatuh (energi kinetik) butiran air. Berikut merupakan tabel beban hidup pada lantai gedung. Adapun besaran beban hidup pada lantai gedung berdasarkan (PPURG) SKBI.1987 pada Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3 Beban Hidup pada Lantai Gedung

Beban Hidup	(kg/m²)
Lantai dan tangga rumah tinggal, kecuali yang disebut dalam b	200
Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana dan gudang-gudang tidak penting yang bukan untuk toko, pabrik atau bengkel	125
Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama, dan rumah sakit	250
Lantai ruang olahraga	400
Lantai ruang dansa	500
Lantai dan balkon-dalam dari ruang-ruang untuk pertemuan yang lain dari yang disebut dalam a s/d e, seperti masjid, gereja, ruang pagelaran, ruang rapat, bioskop dan panggung penonton dengan tempat duduk tetap	400
Panggung penonton dengan tempat duduk tidak tetap atau untuk penonton yang berdiri	500
Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dari c	300
Tangga, bordes tangga dan gang dari yang disebut dalam d, e, f, dan g	500
Lantai ruang pelengkap dari yang disebut dalam c, d, e, f dan g	250
Lantai untuk: pabrik, bengkel, gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, toko besi, ruang alat-alat, dan ruang mesin, harus direncanakan terhadap beban hidup yang ditentukan tersendiri, dengan minimum	400
Lantai gedung parkir bertingkat:	
Untuk lantai bawah	800
Untuk lantai tingkat lainnya	400
Balkon-balkon yang menjorok bebas keluar harus direncanakan terhadap beban hidup dari lantai ruang yang berbatasan, dengan minimum	300

c. Beban Gempa

Gaya gempa rencana dapat dihitung menggunakan metode analisis statik ekuivalen, analisis dinamik ragam respons spektrum dan analisis dinamik *time history*. Respons-respons maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spectral displacement, SD*) kecepatan maksimum (*spektrum velocity, SV*) atau percepatan maksimum (*spektrum acceleration, SA*). Berdasarkan SNI 1726:2019 cara mendesain respons spektrum dapat ditentukan dengan parameter-parameter sebagai berikut:

1) Klasifikasi situs

Mengenai prosedur untuk klasifikasi suatu situs untuk memberikan kriteria desain seismik berupa faktor-faktor amplifikasi pada bangunan. Klasifikasi situs diperoleh berdasarkan data tanah di lapangan. Berikut klasifikasi Situs berdasarkan SNI 1726:2019 pada Tabel 2.4 di bawah ini.

Tabel 2.4 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u (kPa)
SA (Batuan Keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (Tanah Keras, sangat pada dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	≥ 100
SD (Tanah Sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (Tanah Lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: Indeks Plastisitas, $PI > 20$; Kadar air, $w \geq 40\%$; Kuat geser nitralisir $S_u < 25$ kPa		
SF (Tanah Khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	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); Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$); Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa		

Dengan:

\bar{N} = tahanan penetrasi standar rata-rata dalam lapisan 30 m

\bar{N}_{ch} = tahanan penetrasi standar rata-rata tanah non-kohefif dalam lapisan 30 m paling atas

\bar{S}_u = Kuat geser nitralir rata-rata di dalam lapisan 30 m paling atas

\bar{V}_s = Kecepatan rambat gelombang rata-rata pada regangan geser yang kecil, di dalam lapisan 30 m paling atas

2) Data S_s , S_1 dan T_L

Untuk mengetahui data S_s , S_1 dan T_L berupa grafik spektrum respons gempa dapat di akses secara *online* yang tersedia dari Manual Aplikasi *Online* Spektrum Desain Indonesia atau puskim.pu.go.id.

Dimana:

S_s = parameter percepatan respons spektrum MCE (*Maximum Credible Earthquake*) dari peta gempa pada periode pendek (0.2 detik) dengan redaman 5%

S_1 = parameter percepatan respons spektrum MCE (*Maximum Credible Earthquake*) dari peta gempa pada periode 1 detik dengan redaman 5%

T_L = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada peta gempa.

3) Faktor keutamaan dan ketegori risiko bangunan

Pengaruh gempa rencana harus dikalikan dengan faktor keutamaan (I_e), dimana I_e bergantung pada jenis ketegori risiko pemanfaatan bangunan berdasarkan SNI 1726:2019 disajikan pada Tabel 2.5 di bawah ini.

Tabel 2.5 Kategori Risiko Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

No	Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
1	Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan, gudang penyimpanan, rumah jaga dan struktur kecil lainnya.	I
2	Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: perumahan, rumah toko dan rumah kantor, pasar, gedung perkantoran, gedung apartemen /	II

No	Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
	rumah susun, pusat perbelanjaan/ <i>mall</i> , Bangunan industri, fasilitas manufaktur, pabrik	
3	Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: bioskop, gedung pertemuan, stadion, fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat, fasilitas penitipan anak, penjara, bangunan untuk orang jompo. 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: pusat pembangkit listrik biasa, fasilitas penanganan air, fasilitas penanganan limbah, pusat telekomunikasi	III
4	Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: bangunan-bangunan monumental, gedung sekolah dan fasilitas pendidikan, rumah ibadah, rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat, fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat, pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat, 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	IV

Adapun faktor keutamaan Ie berdasarkan SNI 1726:2019, disajikan pada Tabel 2.6 di bawah ini.

Tabel 2.6 Faktor Keutamaan

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa
I dan II	1,0
III	1,25
IV	1,50

4) Koefisien-koefisien situs

Untuk penentuan respons spektrum percepatan gempa MCE_R 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). Nilai F_a dan F_v berdasarkan SNI 1726:2019 disajikan pada Tabel 2.7 dan 2.8.

Tabel 2.7 Koefisien Situs (F_a)

Kelas Situs'	Parameter Respons Spektrum Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan pada Periode Pendek $T = 0,2$ detik S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$	
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	SS^b					

Tabel 2.8 Koefisien Situs (F_v)

Kelas Situs'	Parameter Respons Spektrum Percepatan Gempa MCE_R Terpetakan pada Periode Pendek $T = 1$ detik S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS					

5) Kategori desain seismik

Kategori desain seismik ditetapkan berdasarkan kategori risiko dan parameter respons spektrum percepatan desainnya.

$$S_{MS} = F_a \times S_s \text{ ,(2.1)}$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \text{ ,(2.2)}$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \text{ ,(2.3)}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \text{ ,(2.4)}$$

Dengan:

S_{DS} = Parameter percepatan respons spektrum pada periode pendek (0,2 detik) dengan redaman 5%

S_{D1} = Parameter percepatan respons spektrum pada periode 1 detik dengan redaman 5%

F_a = Koefisien situs untuk periode pendek (0,2 detik)

F_V = Koefisien situs untuk periode 1 detik

Adapun kategori risiko berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek dan periode 1 detik berdasarkan SNI 1726:2019 disajikan pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10.

Tabel 2.9 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek

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

Tabel 2.10 Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 detik

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

6) Spektrum respons desain

- Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain S_a , harus diambil dari persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots (2.6)$$

- Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih besar atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain S_a sama dengan S_{DS} .

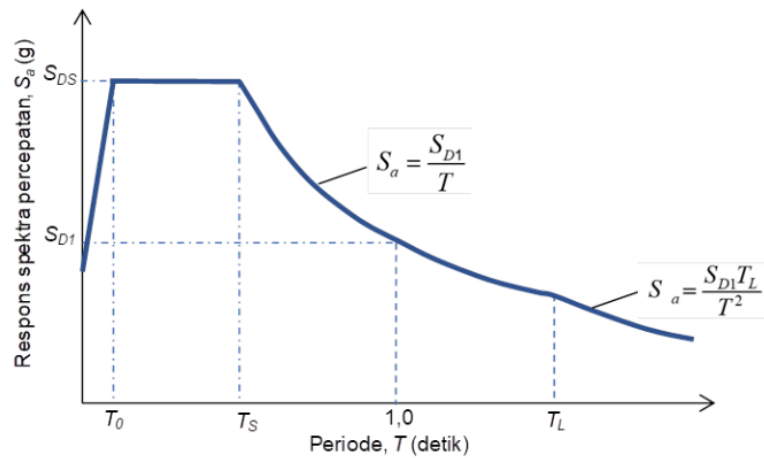
- Untuk periode lebih besar dari T_s , spektrum respons percepatan desain S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}, \dots\dots\dots(2.7)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}, \dots\dots\dots(2.8)$$

- Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektrum percepatan desain S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}T_L}{T^2}, \dots\dots\dots(2.9)$$



Gambar 2.1 Spektrum Respons Desain

(Sumber: SNI 1726:2019)

7) Kombinasi sistem struktur

Sistem struktur yang digunakan harus sesuai h_n , R , Ω_0 , dan C_d yang sesuai sebagaimana ditunjukkan pada tabel 12 SNI 1726:2019. Untuk sistem rangka pemikul momen dapat dilihat pada tabel 2.11.

Tabel 2.11 Faktor R , Ω_0 , C_d untuk Sistem Struktur Tahan Gempa

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
Sistem rangka pemikul momen								
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5 1/2	TB	TB	TB	TB	TB

Sistem penahan gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0	Faktor pembesaran defleksi, C_d	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) Kategori desain seismik				
				B	C	D	E	F
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4 1/2	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2 1/2	TB	TI	TI	TI	TI
Catatan: TB = tidak dibatasi; TI = tidak diizinkan								

d. Beban Angin

Berdasarkan SNI 1727:2020 beban angin yang digunakan dalam desain sistem penahan gaya angin utama (SPGAU) harus di desain dengan beban angin desain minimum untuk bangunan gedung tertutup atau tertutup sebagian tidak boleh lebih kecil dari 16 lb/ft² (0,77 kN/m²) dikalikan dengan luas dinding bangunan gedung.

Parameter dasar untuk menentukan beban angin ditentukan sebagai berikut:

1) Kategori risiko bangunan

Kategori risiko bangunan pada pasal 1.5.1 SNI 1727:2020 diasjikan pada Tabel 2.12 sebagai berikut:

Tabel 2.12 Kategori Risiko Bangunan & Struktur Lainnya untuk Beban Angin

Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Risiko
Bangunan gedung dan struktur lain yang merupakan risiko rendah untuk kehidupan manusia dalam kejadian kegagalan	I
Semua bangunan gedung dan struktur lain kecuali mereka terdaftar dalam ketegori risiko I, III dan IV	II
Bangunan gedung dan stuktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan risiko besar begi kehidupan manusia. Bangunan gedung dan struktur lain, tidak termasuk dalam kategori IV, dengan potensi menyebabkan dampak ekonomi substansial dan/atau gangguan masal dari hari ke hari kehidupan sipil pada saat terjadi kegagalan.	III

Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Risiko
Bangunan gedung dan struktur lain tidak termasuk dalam kategori IV (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang manufaktur, proses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat seperti bahan berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan peledak)	
<p>Bangunan gedung dan struktur lain yang dianggap sebagai fasilitas penting.</p> <p>Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan bahaya bagi masyarakat.</p> <p>Bangunan gedung dan struktur lain (termasuk, namun tidak terbatas pada fasilitas yang memproduksi, memproses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat berbahaya seperti bahan bakar, bahan zat yang sangat beracun dimana kuantitas melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup menimbulkan ancaman bagi masyarakat jika dirilis.</p> <p>Bangunan gedung dan struktur lain yang diperlukan untuk mempertahankan fungsi dari kategori risiko IV struktur lainnya.</p>	IV

2) Kecepatan angin dasar

Berdasarkan SNI 1727:2020, menjelaskan bahwa kecepatan angin dasar (v) yang digunakan dalam menentukan beban angin desain di bangunan gedung dan struktur lain harus ditentukan dari instansi yang berwenang, sesuai dengan kategori risiko bangunan gedung dan struktur.

3) Faktor arah angin

Faktor arah angin pada pasal 26.6 SNI 1727:2020 disajikan pada Tabel 2.13 sebagai berikut:

Tabel 2.13 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
Cerobong, tangki dan struktur serupa	

Tipe struktur	Faktor arah angin K_d
Persegi	0,90
Segi enam	0,95
Segi delapan	1,0
Bundar	1,0
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 batang menara	
Segitiga, persegi atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

4) Faktor topografi

Efek peningkatan kecepatan angin harus dimasukkan dalam perhitungan beban angin desain. Berdasarkan pasal 26.8 SNI 1727:2020, jika kondisi situs dan lokasi gedung dan struktur bangunan lain tidak memenuhi semua kondisi yang disyaratkan pada pasal 26.8.1 maka diambil nilai $K_{zt} = 1,0$

5) Faktor elevasi permukaan tanah

Faktor elevasi permukaan tanah berdasarkan pasal 26.9 SNI 1727:2020 disajikan pada Tabel 2.14 sebagai berikut:

Tabel 2.14 Faktor Elevasi Permukaan Tanah, K_e

Elevasi tanah di atas permukaan laut (<i>sea level</i>)		Faktor elevasi permukaan tanah K_e
Ft	m	
< 0	< 0	Lihat catatan 2
0	0	1,00
1000	305	0,96
2000	610	0,93
3000	914	0,90
4000	1219	0,86
5000	1524	0,83
6000	1829	0,80
> 6000	> 1829	Lihat catatan 2

Perkiraan konservatif, boleh diambil $K_e = 1,00$ dalam semua kasus

6) Faktor efek tiupan angin

Pada pasal 26.11 SNI 1727:2020 faktor efek tiupan angin (G), untuk suatu bangunan gedung dan struktur lain yang kaku boleh diambil sebesar 0,85.

7) Koefisien tekanan internal

Pada pasal 26.13 SNI 1727:2020 Nilai koefisien tekanan internal (GC_{pi}) ditentukan berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan gedung seperti pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Koefisien Tekanan Internal, (GC_{pi})

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal, (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_0 kurang dari terkecil $0,01 A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_0 / A_g \leq 0,2$	Sedang	-0,18 -0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_0 > 1,1 A_{0i}$ dan $A_0 >$ terkecil dari $0,01 A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_0 / A_g \leq 0,2$	Tinggi	-0,55 -0,55
Bangunan 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

8) Koefisien eksposur tekanan velositas

Pada pasal 26.10.1 SNI 1727:2020, berdasarkan kategori eksposur nilai koefisien eksposur tekanan velositas, K_z atau K_h tercantum pada tabel 2.16.

Tabel 2.16 Koefisien Eksposur Tekanan Velositas, K_z

Ketinggian diatas permukaan tanah		Eksposur		
		B	C	D
ft	m			
0 - 15	0 - 4,6	$0,57 (0,70)^a$	0,85	1,03
20	6,1	$0,62 (0,70)^a$	0,90	1,08

Ketinggian diatas permukaan tanah		Eksposur		
		B	C	D
ft	m			
25	7,6	0,66 (0,70) ^a	0,94	1,12
30	9,1	0,70	0,98	1,16
40	12,2	0,76	1,04	1,12
50	15,2	0,81	1,09	1,27
60	18	0,85	1,13	1,31
70	21,3	0,89	1,17	1,34
80	24,4	0,93	1,21	1,38
90	27,4	0,96	1,24	1,40
100	30,5	0,99	1,26	1,43
120	36,6	1,04	1,31	1,48
140	42,7	1,09	1,36	1,52
160	48,8	1,13	1,39	1,55
180	54,9	1,17	1,43	1,58
200	61	1,20	1,46	1,61
250	76,2	1,28	1,53	1,68
300	91,4	1,35	1,59	1,73
350	106,7	1,41	1,64	1,78
400	121,9	1,47	1,69	1,82
450	137,2	1,52	1,73	1,86
500	152,4	1,56	1,77	1,89

9) Tekanan kecepatan

Tekanan kecepatan, q_z yang dievaluasi pada ketinggian z di atas tanah harus dihitung dengan persamaan berikut:

$$q_z = 0,00256 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \text{ (lb/ft}^2\text{); V dalam mi/h ,.....(2.10)}$$

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \text{ (N/m}^2\text{); V dalam m/s ,.....(2.11)}$$

dengan:

K_z = koefisien eksposur tekanan kecepatan

K_{zt} = faktor topografi

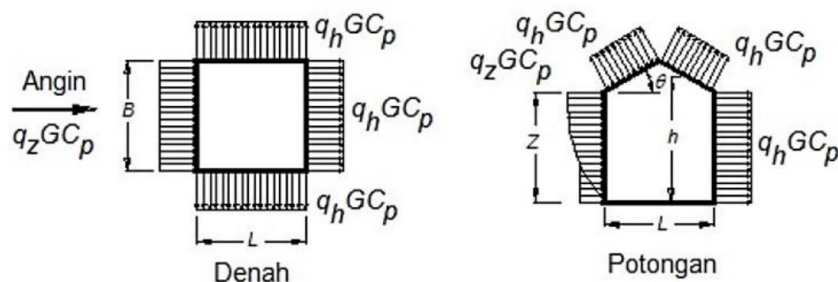
K_d = faktor arah angin

K_e = faktor elevasi permukaan

V = kecepatan angin dasar

10) Koefisien tekanan eksternal

Pada gambar 27.3-1 SNI 1727:2020, Koefisien tekanan eksternal (C_p) ditentukan berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan gedung. Pada bangunan tertutup, nilai L dan B seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bangunan Gedung Tertutup, Tertutup Sebagian

(Sumber: SNI 1727:2020)

Adapun koefisien tekanan eksternal (C_p) berdasarkan SNI 1727:2020 disajikan pada Tabel 2.17.

Tabel 2.17 Tabel Koefisien Tekanan Eksternal, C_p

Permukaan	L/B	C_p	Digunakan untuk
Dinding di sisi angin datang	Seluruh nilai	0,8	q_z
	0 – 1	- 0,5	q_h
Dinding di sisi angin pergi	2	- 0,3	q_h
	≥ 4	- 0,2	q_h
Dinding tepi	Seluruh nilai	- 0,7	q_h

2.1.2 Faktor Beban dan Kombinasi Pembebanan

Beban-beban yang bekerja pada struktur dapat berupa kombinasi dari berbagai macam kasus beban yang mungkin terjadi pada saat yang bersamaan. Sehingga struktur dapat berfungsi dengan baik selama umur rencana.

Kombinasi pembebanan yang dipakai berdasarkan SNI 2847:2019 yaitu kekuatan perlu (U) harus paling tidak sama dengan pengaruh beban terfaktor, disajikan pada Tabel 2.18 berikut.

Tabel 2.18 Kombinasi Pembebanan

No.	Kombinasi Beban
1.	$U = 1,4 D$
2.	$U = 1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$
3.	$U = 1,2 D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (1,0 L \text{ atau } 0,5 W)$
4.	$U = 1,2 D + 1,0 W + 1,0 L + 0,5 (Lr \text{ atau } R)$

No.	Kombinasi Beban
5.	$U = 1,2 D + 1,0 E + 1,0 L$
6.	$U = 0,9 D + 1,0 W$
7.	$U = 0,9 D + 1,0 E$

Untuk kombinasi nomor 5 dan 7 dengan beban gempa diatur oleh SNI 1726 :2019 pasal 7.4, faktor dan kombinasi beban untuk beban mati nominal, beban hidup nominal dan beban gempa nominal, yaitu sebagai berikut:

$$U = 1,2 D + 1,0 E + 1,0 L$$

- a. $(1,2 + 0,2 Sds) D + 1,0 L \pm 1,0 EX \pm 0,3 EY$
- b. $(1,2 + 0,2 Sds) D + 1,0 L \pm 0,3 EX \pm 1,0 EY$

$$U = 0,9 D + 1,0 E$$

- a. $(0,9 - 0,2 Sds) D + 1,0 L \pm 1,0 EX \pm 0,3 EY$
- b. $(0,9 - 0,2 Sds) D + 1,0 L \pm 0,3 EX \pm 1,0 EY$

Keterangan:

- D = Beban mati (*Dead Load*)
- L = Beban hidup (*Live Load*)
- Lr = Beban hidup atap (*Live Roof*)
- R = Beban air hujan
- W = Beban angin (*Wind Load*)
- E = Beban gempa (*Earth Quake Load*)
- EX = Beban gempa arah X
- EY = Beban gempa arah Y

2.2 Klasifikasi Tanah

Dalam merencanakan fondasi, klasifikasi tanah berguna sebagai petunjuk awal untuk memprediksi perilaku dari tanah. Secara garis besar tanah dibedakan menjadi dua golongan utama, yaitu tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar, yang termasuk tanah berbutir halus yaitu lempung dan lanau, sedangkan tanah berbutir kasar yang berukuran besar dari lanau (Hakam, 2008). Selain itu, tanah

dapat pula digolongkan menjadi dua kelompok berdasarkan sifat lekatan antar partikelnya yaitu sebagai berikut:

- a. Tanah kohesif, adalah tanah yang mempunyai sifat lekatan antara partikel-partikel tanahnya yang kuat (tanah lempung atau lanau). Jenis tanah ini untuk menentukan kuat gesernya dapat dilihat berdasarkan nilai kohesinya. Tanah kohesi mempunyai kuat geser rendah, bersifat plastis bila basah dan mudah mampat, bila kering menyusut dan bila basah mengembang.
- b. Tanah Non-kohesif, adalah tanah yang sedikit atau tidak ada sifat lekatan antara partikel-partikel tanahnya (pasir, kerikil batuan dan campurannya). Jenis tanah ini jika padat merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan, mempunyai kuat geser yang tinggi dan penurunan kapasitas dukung kecil.

2.3 Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah bertujuan untuk mengetahui sifat, struktur dan kondisi lapisan tanah yang sebenarnya di lapangan. Adapun penyelidikan tanah yang sering dilakukan antara lain:

- a. Penyelidikan lapangan (*in situ*), terdiri dari:
 - 1) *Standar Penetration Test* (SPT)
 - 2) *Cone Penetration Test* (Sondir)
 - 3) Uji beban pelat (*plate load test*)
 - 4) Uji geser kipas atau geser baling (*Vase Shear*).
- b. Penyelidikan laboratorium, diambil dari sampel tanah terganggu dan tidak terganggu.
 - 1) Tanah terganggu, seperti pengujian butiran tanah/gradasi tanah, uji plastisitas dan uji kepadatan.
 - 2) Tanah tidak terganggu, seperti uji kuat geser, uji konsolidasi dan permeabilitas tanah.

2.3.1 Standar Penetration Test (SPT)

Uji SPT bertujuan untuk memperoleh parameter perlawanan penetrasi lapisan tanah di lapangan. Parameter tersebut diperoleh dari jumlah pukulan terhadap penetrasi konus, digunakan untuk mengidentifikasi perlapisan tanah yang merupakan bagian dari desain fondasi (SNI 4153:2008).

Uji SPT dilakukan dengan prinsip pemancangan tabung belah ke dalam tanah dengan pukulan palu dan mengukur jumlah setiap pukulan pada kedalaman penetrasi untuk mengetahui sifat perlawanan dinamik tanah. Tabung belah dipukul ke dalam tanah sampai kedalaman 45 cm, kemudian setiap kedalaman 15 cm jumlah pukulan dicatat. Berat palu 63,5 kg dengan tinggi jatuh *hammer* 76 cm.

2.3.2 Cone Penetration Test (Sondir)

Alat pengujian CPT berupa kerucut dengan diameter 3,75 cm. Prosedur pengujian dengan menekan sedalam 20 cm pipa dan mata sondir secara terpisah dengan penekanan hidrolis atau gerakan gerigi dari hasil putaran dengan tangan. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh parameter perlawanan konus (q_c), perlawanan geser (f_s), angka banding geser (F_r) dan geseran total tanah (SNI 2827:2008)

2.4 Korelasi Parameter Tanah

Untuk mendapatkan nilai parameter fisis tanah dapat dicari dengan melakukan pendekatan dari karakteristik tanah pada uji lapangan. Hal ini didasarkan dengan nilai N-SPT dan karakteristik tanah kemudian dikorelasi berdasarkan teori-teori yang ada.

Dalam perencanaan daya dukung fondasi terdapat beberapa parameter data tanah yang belum diketahui dan harus dicari dengan cara korelasi N-SPT data tersebut diantaranya:

a. Konsistensi Tanah

Konsistensi tanah merupakan sifat fisika tanah yang menggambarkan ketahanan tanah pada saat memperoleh gaya atau tekanan dari luar.

Tabel 2.19 Hubungan N-SPT, Konsistensi dan C_u pada Tanah Kohesif menurut Terzaghi & Peck, 1967

Konsistensi	N	C_u (kN/m ²)
Sangat lunak	0 – 2	< 12
Lunak	2 – 4	12 – 25
Sedang	4 – 8	25 – 50
Kaku	8 – 15	50 – 100
Sangat kaku	15 – 30	100 – 200
Keras	> 30	> 200

(Sumber: PUPR Dirjen. Binamarga, 2019)

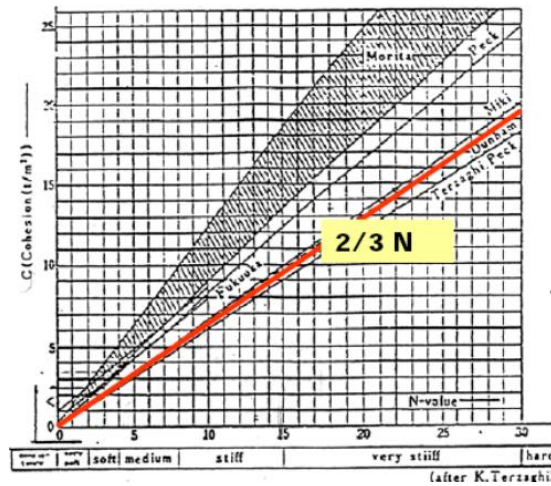
Tabel 2.20 Hubungan N-SPT dan Kepadatan Relatif (*Dr*) pada Tanah Pasir menurut Terzaghi dan Peck, 1967

N-SPT	Kepadatan Realtif, <i>Dr</i>
0 – 4	Sangat lepas
4 – 10	Lepas
10 – 30	Menengah
30 – 50	Padat
> 50	Sangat padat

(Sumber: PUPR Dirjen. Binamarga, 2019)

b. Kekuatan Geser *Undrained* (*Cu*)

Kekuatan geser *undrained* atau kohesi tak terdrainase (*Cu*) dapat dicari melalui grafik empiris berdasarkan Terzaghi.



Gambar 2.3 Kurva Korelasi Nilai N-SPT dengan Kohesi Tanah menurut Terzaghi

(Sumber: Yuliawan dan Tanjung, 2018)

$$Cu = N_{spt} \times \frac{2}{3} \times 10 \text{ (kN/m}^2\text{)} \dots\dots\dots(2.12)$$

c. Berat isi tanah (γ)

Berat isi tanah lembab atau basah (γ_b) dinyatakan dalam persamaan:

$$\gamma_b = \frac{Gs \cdot \gamma_w (1+w)}{(1+e)} \dots\dots\dots(2.13)$$

Berat isi tanah jenuh (γ_{sat}) dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w (Gs + e)}{(1+e)} \dots\dots\dots(2.14)$$

Korelasi untuk menentukan berat isi tanah (γ) dan berat isi tanah jenuh (γ_{sat}) pada tanah kohesif dan non kohesif dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.21 Tipikal Nilai Angka Pori, Kadar Air dan Berat Volume Kering

Jeni Tanah	Angka Pori, e	Kadar air pada kondisi jenuh, w (%)	Berat volume kering γ_d (kN/m^3)
Pasir lepas seragam	0,8	30	14,5
Pasir padat seragam	0,45	16	18
Pasir berlanau lepas	0,65	25	16
Pasir berlanau padat	0,4	15	12
Lempung keras	0,6	21	17
Lempung lunak	0,9 - 1,4	30 - 50	11,5 - 14,5
Lempung tanah organik	2,5 - 3,2	90 - 170	6 - 8

(Sumber: Muntohat, 2009)

Berdasarkan Hardiyatmo (2018), Berat jenis untuk berbagai jenis tanah berkisar antara 2,65 sampai 2,75. Berat jenis $G_s = 2,67$ biasanya digunakan untuk tanah tidak berkohesi atau tanah granuler, untuk tanah kohesif tidak mengandung bahan organik G_s berkisar diantara 2,68 sampai 2,72.

d. Sudut gesek dalam tanah (φ)

Menurut Kishida dalam Hardiyatmo (2018), sudut gesek dalam tanah dapat dilakukan pendekatan dengan persamaan berikut:

$$\varphi' = \sqrt{20 N} + 15^\circ, \dots\dots\dots(2.15)$$

e. Sudut Dilatasi Ψ

Sudut dilatasi, ψ dinyatakan dalam derajat. Selain tanah lempung yang terkonsolidasi sangat berlebih, tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali yaitu $\psi = 0$. Dilatasi dari tanah pasir tergantung pada kepadatan serta sudut gesernya, berdasarkan Bakker dkk,2002 dalam Dwi M, (2020) sudut dilatasi dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\Psi = \varnothing - 30^\circ, \dots\dots\dots(2.16)$$

f. *Poisson Ratio*Tabel 2.22 Hubungan N-SPT, ϕ , ν , q_c dan D_r pada Tanah Pasir menurut Schertman 1970 dalam Romadhoni (2022)

<i>Subsurface condition</i>	N	<i>Friction angle θ (deg)</i>	<i>Poisson ratio (ν)</i>	<i>Cone penetration $q_c = 4 N$</i>	<i>Relatif Density D_r (%)</i>
<i>Very loose</i>	0 – 4	28	0,45	0 – 16	0 – 15
<i>Loose</i>	4 – 10	28 – 30	0,4	16 – 40	15 – 35
<i>Medium</i>	10 – 30	30 – 36	0,35	40 – 120	35 – 65
<i>Dense</i>	30 – 50	36 – 41	0,3	120 – 100	65 – 85
<i>Very dense</i>	50 – 100	41 – 45	0,2	200 – 400	85 – 100

Tabel 2.23 Hubungan N-SPT dengan *Poisson Ratio* (ν) pada Tanah Lempung menurut Randolph (1978)

<i>Subsurface condition</i>	N	ϵ_{50} (%)	<i>Poisson's ratio (ν)</i>
Very soft	2	0,020	0,5
Soft	2 – 4	0,020	0,5
Medium	4 – 8	0,020	0,5
Stiff	8 – 15	0,010	0,45
Very stiff	15 – 30	0,005	0,40
hard	30	0,004	0,35
	40	0,004	0,35
	60	0,0035	0,30
	80	0,0035	0,30
	100	0,003	0,25
	120	0,003	0,25

(Sumber: Romadhoni, 2022)

g. Modulus Elastisitas (E_s)

Nilai modulus elastisitas (E_s) secara empiris dapat ditentukan dengan cara pendekatan terhadap jenis tanah seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.24 Modulus Elastisitas Tanah (E_s)

Jenis Tanah	E_s (kN/m^2)
Lempung	
Sangat lunak	300 – 3000
Lunak	2000 – 4000
Sedang	4500 – 9000

Jenis Tanah	Es (kN/m ²)
Keras	7000 – 20000
berpasir	30000 – 42500
Pasir	
Berlanau	5000 – 20000
Tidak padat	10000 – 25000
Padat	50000 – 100000
Pasir dan kerikil	
Padat	80000 – 20000
Tidak padat	50000 – 140000
Lanau	2000 – 20000
<i>Loose</i>	15000 – 60000
Serpih	140000 - 1400000

(Sumber: Bowless, 1992)

Adapun untuk menghitung modulus elastisitas efektif dengan persamaan sebagai berikut (Avhycanti dan Kartika, 2021):

$$Es' = 0,6 \text{ sampai } 0,8 \times Es \text{ ,.....(2.17)}$$

h. Indeks Pemampatan (Cc)

Indeks pemampatan atau indeks kompresi (Cc) berdasarkan Hough (1957) dalam buku Das (1995), persamaannya sebagai berikut:

$$Cc = 0,30 (e - 0,27) \text{ ,.....(2.18)}$$

2.5 Uji PDA (*Pile Driving Analyzer*)

PDA Test adalah suatu sistem pengujian pada fondasi tanpa merusak fondasi itu, pengujian tersebut dilakukan menggunakan data digital komputer. PDA Test memanfaatkan tumbukan antara fondasi dengan *hammer* yang diterima oleh sensor *transducer* dan *accelerometer*.

Tujuan dari pengujian PDA adalah:

- a. Mengetahui nilai daya dukung fondasi tiang tunggal
- b. Mengetahui integritas atau keutuhan tiang
- c. Mengetahui angka penurunan/*displacement* tiang
- d. Mengetahui efisiensi transfer energi *hammer* ke tiang pancang.

Prosedur pengujian PDA adalah sebagai berikut:

- a. Persiapkan palu untuk memukul kepala tiang (beban palu/*hammer* digunakan 1%-2% dari kapasitas *design load* tiang yang direncanakan).
- b. pemasangan instrumen *strain transducer* dan *accelerometer* (pemasangan dengan cara di bor pada sisi tiang dan saling tegak lurus dengan jarak minimal 1,5 diameter kepala tiang).
- c. Masukkan nilai kalibrasi, data tiang dan palu pada PDA.
- d. memulai tumbukan pada tiang di mulai dengan tinggi jatuh paling rendah (50 cm) dan bertahap sampai tinggi jatuh maksimal.
- e. Hasil pengujian dihentikan ketika beban maksimum hasil pembacaan alat bernilai 200% dari beban rencana/*design load*.

2.6 Pengertian Fondasi

Fondasi adalah bagian terendah dari bangunan yang meneruskan beban bangunan ke tanah atau batuan yang ada di bawahnya (Hardiyatmo, 2018). Pendapat lain menyebutkan bahwa fondasi merupakan bagian bangunan yang menghubungkan bangunan dengan tanah dan beban dari bangunan akan diterima oleh fondasi kemudian disebarkan ke dalam tanah sehingga batas ambang daya dukung tanah tidak terlampaui (Surendro, 2015).

2.6.1 Klasifikasi Fondasi

Terdapat dua klasifikasi fondasi, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam, penentuan macam fondasi dapat dilakukan berdasarkan keadaan perbandingan antara kedalaman fondasi (D) dan lebar fondasi (B). Jika $D/B < 1$ maka dipilih tipe fondasi dangkal, dan jika $D/B > 4$ maka dipilih tipe fondasi dalam (Surendro, 2015). Berikut penjelasan fondasi dangkal dan fondasi dalam.

2.6.1.1 Fondasi Dangkal

Fondasi dangkal adalah jenis fondasi dimana letak dasar fondasi tersebut tidak terlalu dalam dari permukaan tanah atas yang artinya lapisan tanah keras terletak dekat dengan permukaan tanah. Pada umumnya fondasi dangkal mempunyai kedalaman < 3 meter.

Adapun jenis-jenis fondasi dangkal adalah sebagai berikut:

- a. Fondasi telapak (*spread footing*)

- b. Fondasi menerus (*continuous footing*)
- c. Fondasi Rakit (*raft foundation*)
- d. Fondasi sarang laba-laba

2.6.1.2 Fondasi Dalam

Fondasi dalam didefinisikan sebagai fondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang terletak relatif jauh dari permukaan tanah. Fondasi dalam biasanya dipasang pada kedalaman lebih dari 3 meter di bawah elevasi permukaan tanah. Fondasi dalam digunakan untuk mentransfer beban bangunan ke lapisan yang lebih dalam, mencapai kedalaman tertentu sampai didapat lapisan tanah keras yang cukup kuat untuk menahan beban struktur bangunan.

Adapun jenis-jenis fondasi dalam adalah sebagai berikut:

- a. Fondasi sumuran / kaison (*pier foundation / caisson*)
- b. Fondasi tiang (*pile foundation*)

Fondasi tiang berdasarkan metode pelaksanaannya ada 2, yaitu:

- a. Tiang pancang (*Precast pile*), yaitu fondasi tiang yang dibuat atau disiapkan ditempat lain, kemudian dibawa ke lokasi pekerja untuk dimasukkan ke dalam tanah dengan cara ditumbuk atau dipancang.
- b. Tiang bor (*cast in place*), yaitu fondasi tiang dibuat di lokasi pembangunan.

2.7 Fondasi Tiang Pancang (*Precast pile*)

Tiang pancang adalah bagian konstruksi yang dibuat dari kayu, beton, dan/atau baja. Tiang pancang digunakan sebagai fondasi suatu bangunan apabila tanah dasar di bawah bangunan tersebut tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya, atau apabila tanah keras yang mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan bebannya letaknya sangat dalam (Sardjono, 1988). Penggunaan fondasi tiang pancang didasarkan pada perhitungan adanya beban yang diterima fondasi cukup besar sehingga penggunaan langsung tidak efektif, dan juga didasarkan pada jenis tanah di lokasi bangunan yang kondisinya relatif lunak (lembek) sehingga penggunaan fondasi langsung tidak ekonomis.

2.7.1 Kelebihan dan Kekurangan Fondasi Tiang Pancang

Dilihat dari segi pembuatannya fondasi tiang pancang mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan pembuatan fondasi lain, antara lain:

- a. Pelaksanaan pemancangan relatif cepat.
- b. Tiang dibuat di pabrik dan dilakukan pemeriksaan kualitas yang ketat, sehingga mutunya dapat terjamin.
- c. Dapat mencapai kedalaman yang diinginkan dengan melakukan penyambungan.
- d. Mudah diperoleh dari pabrik.
- e. Pelaksanaan tidak dipengaruhi tinggi muka air tanah.
- f. Tiang pancang beton dapat tahan lama, serta tahan terhadap pengaruh air maupun bahan-bahan yang *corrosive*.

Adapun kekurangan fondasi tiang pancang yaitu:

- a. Pada pelaksanaannya menimbulkan suara, getaran, dan deformasi tanah sehingga pada daerah yang berpenduduk padat akan menimbulkan masalah kebisingan dan menimbulkan kerusakan bangunan di sekitarnya.
- b. Kepala tiang kadang pecah akibat pemukulan yang tidak baik.
- c. Diperlukan persiapan penyambungan khusus, bila pekerjaan penyambungan tidak baik akibatnya sangat merugikan.
- d. Bila tiang beton berdiameter besar sangat berat akan sulit diangkut atau dipasang sehingga memerlukan mesin pemancang yang besar.
- e. Aksesibilitas pengangkutan yang kurang jika lokasi proyek kurang memadai.

2.7.2 Teknis Pelaksanaan Fondasi Tiang Pancang

Teknis pelaksanaan secara umum yang dilakukan dalam pekerjaan fondasi tiang pancang, diantaranya yaitu:

- a. Buat skala pada tiang pancang menurut kedalamannya
- b. Cek posisi titik/koordinat pancang
- c. Pengangkatan tiang pancang
- d. Cek ketegakkan tiang pancang
- e. Selama pemancangan pastikan posisi tiang pancang tetap tegak lurus

- f. Catat jumlah pukulan *hammer* dari saat mulai sampai dengan berakhirnya pemancangan
- g. Saat tiang pancang sudah mendekati *top pile* yang disyaratkan dilakukan proses kalendering, setelah itu pemancangan dapat dihentikan
- h. Bila sambungan diperlukan maka setelah tiang pancang tertinggal sekitar 2 meter dari atas tanah, tali besi dilepas dari tiang pancang. Setelah tali dilepas pemancangan dilanjutkan kembali hingga mendekati posisi tinggi tiang ideal untuk penyambungan.

Alat yang digunakan untuk memancang fondasi tiang pancang adalah sebagai berikut:

- a. *Drop Hammer*, jenis *drop hammer* terdiri dari massa palu yang ditarik ke atas dengan kabel dan kerekan sampai mencapai tinggi jatuh tertentu kemudian dijatuhkan tepat pada kepala tiang pancang.
- b. *Single Acting Hammer* dengan sistem pemukul diangkat ke atas dengan tenaga uap sampai mencapai tinggi jatuh tertentu kemudian dijatuhkan beban menimpa kepala tiang.
- c. *Double Acting Hammer* dengan sistem penumbuk diangkat ke atas sekaligus ditekan ke bawah dengan tenaga uap.
- d. *Diesel Hammer*, menggunakan sistem piston (pemukul) dinaikkan dengan bantuan perangkat mekanik penjatuh dan secara otomatis dilepaskan pada ketinggian tertentu.
- e. *Vibratory Hammer*, merupakan alat yang memiliki beberapa batang horizontal dengan beban eksentris, berat yang disebabkan oleh beban eksentris menghasilkan getaran dan menekan tiang ke dalam tanah.
- f. *Hydraulic Hammer*, merupakan alat pemukul yang menggunakan tekanan hidraulik untuk memancarkan tiang fondasi. *Hydraulic hammer* menghasilkan dorongan kuat dengan menggunakan tenaga hidrolis untuk memberikan pemukulan ke tiang fondasi.
- g. *Jact In Pile*, yaitu sistem pemancangan fondasi tiang yang pelaksanaannya ditekan masuk ke dalam tanah dengan menggunakan dongkrak hidraulis yang diberi beban *counterweight* sehingga tidak menimbulkan getaran dan gaya tekan dongkrak dapat dibaca melalui manometer.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam menggunakan fondasi tiang pancang diantaranya:

- a. Tiang beton dipancang minimal setelah beton berumur 28 hari, karena beton akan mencapai tingkat pengerasan secara sempurna setelah 28 hari.
- b. Pengangkatan tiang pancang tidak bisa sembarangan, harus di ikat pada titik yang telah ditentukan, di ikat di kedua ujung bisa $1/5 L$, $1/4 L$, atau satu sisi di ujung $1/3 L$.
- c. Selama pemancangan pastikan posisi tiang tetap tegak lurus terhadap dua sumbu horizontal yang saling tegak lurus.
- d. Berat palu *drop hammer* sebaiknya tidak kurang dari jumlah berat tiang beserta topinya, hubungan antara berat penumbuk (*hammer*) = $0,5 \times$ berat tiang + 600 kg (Sardjono, 1988).
- e. Pada proses pemancangan kepala tiang harus dilindungi dengan bantalan topi yang berfungsi sebagai bantalan pada saat pemancangan dan sebagai perantara penyambung tiang.
- f. Sambungan tiang terdiri dari bagian pelat penyambung, kedua bagian disambung dengan las di lapangan setelah modul tiang dipaskan pada as yang sama. Pelat tersebut dapat di las atau menggunakan baut atau menggunakan soket.
- g. Tiang pancang yang tersisa diatas elevasi rencana dikelupas betonnya sehingga tersisa besi tulangan yang akan dipakai sebagai stek untuk dihubungkan dengan *pile cap*.

2.7.3 Spesifikasi Dimensi Fondasi Tiang Pancang

Berdasarkan ukurannya fondasi tiang pancang dibedakan menjadi *micropile*, *minipile*, *big pile* dan *spun pile*

- a. *Micropile*, digunakan untuk perkuatan tanah lunak, peningkatan stabilitas lereng dan mengurangi penurunan. Ukuran persegi sekitar 10 cm, segitiga berkisar 16 cm dengan panjang 4 m. Satu tiangnya mampu menahan beban 8 sampai 10 ton.
- b. *Minipile*, digunakan sebagai fondasi pada bangunan bertingkat rendah. Ukuran persegi sekitar 20 cm dan segitiga 22 cm, 28 cm dan 32 cm dengan panjang 3 sampai 6 m. Satu tiangnya mampu menahan beban 25 sampai 40

- ton, bentuk segitiga berukuran sisi 28 cm mampu menopang beban 25-30 ton, ukuran sisi 32 cm mampu menopang beban 35-40 ton (Surendro, 2015).
- c. *Big pile*, digunakan sebagai fondasi pada jembatan, bangunan bertingkat sedang sampai bangunan bertingkat tinggi. Mampu menahan beban 50 sampai 200 ton. Ukurannya 30 sampai 60 cm panjangnya dapat bervariasi sesuai kebutuhan proyek.
 - d. *Spun pile*, termasuk kategori *big pile* namun bentuknya silinder dan menggunakan tendon (beton prategang).

2.8 Fondasi *Bore Pile*

Fondasi *Bore Pile* adalah fondasi tiang yang pemasangannya dimulai dengan pengeboran tanah dahulu sampai kedalaman tertentu, kemudian dimasukan tulangan baja dan diisi/dicor dengan beton. Berdasarkan alat pengeboran yang digunakan terdapat tiga macam fondasi *Bore Pile* yaitu:

- a. *Strauss pile*, yaitu pengeboran secara manual menggunakan tenaga manusia. Biasanya hanya digunakan pada *bore pile* dengan diameter 20 - 30 cm.
- b. *Mini crane*, yaitu pengeboran dengan mesin, diameter lubang bor dapat lebih besar 30 - 80 cm.
- c. *Bore pile* mesin gawangan, Alat *bor pile* ini memiliki sistem kerja yang mirip dengan *bor pile mini crane*, perbedaan hanya pada desain sasis atau rangka dan tiang pipa baja yang di desain menyerupai gawangan.

2.8.1 Kelebihan dan Kekurangan Fondasi *Bore Pile*

Kelebihan dari fondasi tiang bor adalah sebagai berikut:

- a. Tidak adanya getaran dan kebisingan sehingga fondasi tiang bor sangat cocok dilakukan di tempat padat pemukiman.
- b. Fleksibilitas, karena dibuat di lokasi proyek *bore pile* lebih *flexible* dibandingkan dengan tiang pancang.
- c. Diameter tiang dapat dibuat besar, dan jika perlu ujung bawah tiang dapat dibuat lebih besar (*Franki pile*) guna mempertinggi kapasitas dukungnya.
- d. Panjang tiang dapat disesuaikan dengan keadaan di lapangan.
- e. Tidak memerlukan mobilisasi tiang.

Adapun kekurangan dari fondasi *Bore Pile* adalah:

- a. Pengecoran beton dapat dipengaruhi oleh air tanah sehingga mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik.
- b. Pelaksanaan yang kurang baik dapat menyebabkan fondasi keropos, karena unsur semen larut oleh air tanah.
- c. Apabila kondisi cuaca di area konstruksi kurang baik, dapat mempersulit proses pengeboran serta pengecoran.
- d. Pengeboran dapat mengakibatkan gangguan kepadatan, bila tanah berupa pasir atau tanah yang berkerikil.
- e. Air yang mengalir ke dalam lubang bor dapat mengakibatkan gangguan tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tiang.
- f. Dapat menimbulkan tanah runtuh atau *ground loss*, sehingga diperlukan pemasangan casing yang digunakan untuk mencegah terjadinya kelongsoran.

2.8.2 Teknis Pelaksanaan Fondasi *Bore Pile*

Teknis pelaksanaan yang dilakukan dalam pekerjaan fondasi *bore pile*, diantaranya yaitu:

- a. Pertama pembuatan lubang fondasi yang dilakukan dengan cara pengeboran ditempat dan sesuai kedalaman yang telah ditentukan.
- b. Lubang bekas bor kemudian dibersihkan dengan alat pembersih khusus dengan ukuran yang sesuai dengan diameter lubang yang di bor. Pembersihan lubang bor ini dilakukan untuk membersihkan lumpur dan tanah bekas galian yang masih tersisa di dalam lubang.
- c. Masukkan tulangan yang sudah difabrikasi
- d. Pasang pipa tremi, pipa tremi harus dimasukkan ke dalam lubang dengan panjang sesuai kedalaman lubang bor.
- e. Pada tahap pengecoran terdapat dua cara yang dapat dilakukan yaitu tiang beton dicor tanpa menggunakan kulit besi (pipa besi) atau tiang beton dicor dengan menggunakan kulit besi.

Terdapat 3 metode dalam pelaksanaan fondasi *bore pile* yaitu:

- a. *Dry Method* yaitu pelaksanaan pemboran dengan cara kering, tanah di bor dengan menggunakan mata bor yang diputar ke dalam tanah dan diangkat setiap 0,5 m untuk membuang tanah
- b. Basah atau *wash boring* digunakan apabila pengeboran melewati muka air tanah, selain tanah di bor juga dibantu dengan tembakan air lewat selang bor yang dihasilkan dari pompa yang berfungsi untuk membuang tanah yang sudah terkikis menjadi lumpur dan terdorong keluar dari lubang.
- c. *Casing* digunakan jika lubang bor sangat mudah longsor, untuk menahan tanah longsor tersebut digunakan *casing* yang terbuat dari pipa baja.

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam pelaksanaan fondasi *Bore Pile*:

- a. Jenis tanah di lokasi harus diketahui terlebih dahulu sebelum dilakukan pengeboran untuk menentukan metode pengeboran yang cocok.
- b. Persiapkan bak dan saluran drainase untuk pengeboran basah.
- c. Pastikan mutu beton yang digunakan, dapat dilakukan dengan uji *slump*.
- d. Sisa-sisa tanah atau cairan hasil pengeboran harus dibersihkan.
- e. Pastikan kekuatan *Bore Pile* yang dibuat sama dengan yang direncanakan.

2.8.3 Spesifikasi Dimensi Fondasi *Bore Pile*

Diameter *bore pile* dikategorikan menjadi dua yaitu kategori besar 60 cm sampai 150 cm atau kategori kecil 20 cm sampai 30 cm (Surendro, 2015). Berbeda dengan tiang *bore pile* jenis *franky* pada umumnya digunakan diameter 100 cm dan ciri khas tiang ini adalah diperbesar dibagian bawah tiang. Kedalaman tiang *bore pile* bervariasi antara 6 m sampai 24 m, bahkan dapat lebih disesuaikan dengan kedalaman tanah keras.

2.9 Gaya Pada Tiang

Ditinjau dari segi gaya yang bekerja pada tiang minimal dapat dibedakan menjadi dua, yaitu gaya aksial dan gaya transversal/horizontal (Surendro, 2015).

- a. Gaya aksial, yaitu gaya yang bekerja searah sumbu tiang, gaya ini dapat berupa gaya tekan maupun gaya tarik. Apabila gaya yang bekerja pada tiang gaya tekan, kekuatan tiang ditentukan oleh daya dukung tanah (*end bearing pile*), gesekan (*friction*), lekatan (*adhesive*). Jika tiang menerima gaya tarik,

maka kekuatan tiang ditentukan oleh gesekan (*friction*) dan lekatan (*adhesive*).

- b. Gaya transversal/horizontal atau disebut juga gaya lateral adalah gaya yang bekerja mendatar, pada keadaan seperti ini daya dukung tiang ditentukan oleh kekuatan tiang dan daya dukung tanah, yaitu tekanan pasif. Jika tanah sangat lemah (sudut gesek ϕ dalam dan kohesi c kecil) maka secara teoritis daya dukung tiang terhadap gaya horizontal ≈ 0 .

2.10 Kekuatan Tiang

Adapun kekuatan yang bekerja pada tiang adalah sebagai berikut:

- a. *End bearing pile*

End bearing pile yaitu tiang yang dihitung berdasarkan pada tahanan ujung, tiang ini dipancang sampai tanah keras, maka kekuatan tiang ditentukan oleh daya dukung tanah keras.

- b. *Friction Pile*

Friction pile yaitu tiang dipancang pada tanah non-kohesif dan tidak mencapai tanah keras, maka kekuatan tiang ditentukan oleh gesekan antara permukaan tiang dengan tanah.

- c. *End bearing and Friction pile*

Jika pemasangan tiang sampai ke tanah keras melalui lapisan tanah lempung, maka harus diperhitungkan baik berdasarkan pada tahanan ujung/*end bearing* maupun *friction pile*.

- d. *Adhesive pile*

Adhesive pile yaitu tiang dipancang pada tanah lekat atau *cohesive soils*, dan tidak mencapai tanah keras, maka kekuatan tiang ditentukan oleh lekatan antara permukaan tiang dengan tanah.

- e. Tiang yang dipancang miring

Tiang yang dipancang miring maka gaya yang bekerja pada tiang akan diuraikan menjadi gaya vertikal (V) dan gaya horizontal (H).

2.11 Daya Dukung Tiang Tunggal

Daya dukung fondasi adalah kemampuan atau kapasitas fondasi dalam mendukung atau menahan beban yang diberikan oleh struktur di atasnya untuk di

salurkan pada tanah tanpa mengalami keruntuhan dan penurunan yang berlebih. Perhitungan kapasitas daya dukung tiang dapat dilakukan dengan cara pendekatan analitik, numerik dan dengan pengujian tiang secara statik maupun dinamik. Hitungan kapasitas tiang secara analitik dilakukan berdasarkan data-data tanah atau kondisi lapisan tanah yang ada serta geometri dari fondasi, daya dukung dengan pengujian tiang secara statik melibatkan perpindahan dan tegangan yang dihasilkan oleh beban yang diterapkan pada fondasi, sedangkan secara dinamik dilakukan dengan mengukur tegangan atau deformasi dengan alat khusus seperti dalam pengujian PDA atau daya dukung tersebut diperoleh dari data pemancangan tiang.

Persamaan umum kapasitas daya dukung aksial *ultimate* (Q_u) dan kapasitas dukung *ultimate netto* (Q_{netto}) sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s \text{ ,.....(2.19)}$$

$$Q_{netto} = Q_u - W_p \text{ ,.....(2.20)}$$

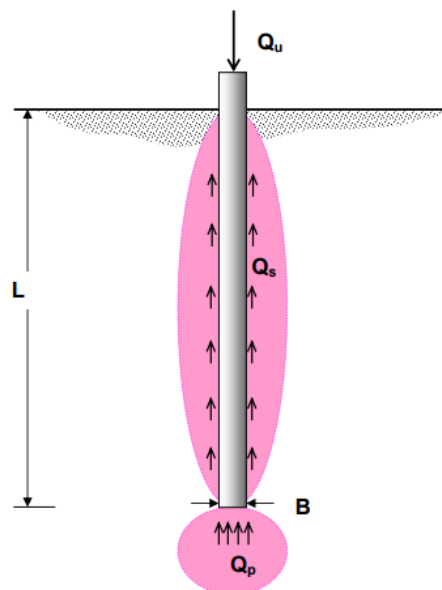
Keterangan:

Q_u = kapasitas daya dukung *ultimate* (kN)

Q_p = kapasitas daya dukung ujung (di dasar) fondasi (kN)

Q_s = kapasitas daya dukung selimut (gesekan) sepanjang fondasi (kN)

W_p = berat sendiri tiang fondasi (kN)



Gambar 2.4 Daya Dukung Fondasi Tiang

(Sumber: Hakam,A 2008)

Daya dukung tiang tunggal diperoleh dari daya dukung ujung (*end bearing capacity*) dan daya dukung gesek atau selimut (*friction bearing capacity*). Adapun persamaan empiris untuk menghitung daya dukung fondasi berdasarkan metode analitik dengan parameter penyelidikan SPT sebagai berikut.

2.11.1 Daya Dukung Ujung

Kapasitas daya dukung ujung fondasi berdasarkan data N-SPT dengan metode Meyerhof 1956 dimana metode ini sama dengan metode yang digunakan oleh Reese & Wright 1977 adalah sebagai berikut:

- a. Daya dukung ujung pada tanah non-koheusif

$$Q_p = f_p \times A_p \dots\dots\dots(2.21)$$

$$Q_p = m \times N_b \times A_p \dots\dots\dots(2.22)$$

dimana:

$$f_p = 40 \times N_b \text{ (t/m}^2\text{)} < 1600 \text{ t/m}^2\text{,}$$

$$f_p = 7 \times N_b \text{ (t/m}^2\text{)} < 400 \text{ t/m}^2\text{,}$$

Keterangan:

m = 40 untuk koefisien perlawanan ujung tiang pancang (Meyerhof)

= 7 untuk koefisien perlawanan ujung tiang bor (Reese & Wright)

$$N_b = \frac{(N_1 + N_2)}{2}$$

N₁ = nilai N_{SPT} pada ujung tiang yaitu nilai N_{SPT} rata-rata 10 d di atas kedalaman ujung tiang

N₂ = nilai rata-rata N_{SPT} sepanjang 4d dibawah ujung tiang.

A_p = luas penampang pada dasar tiang

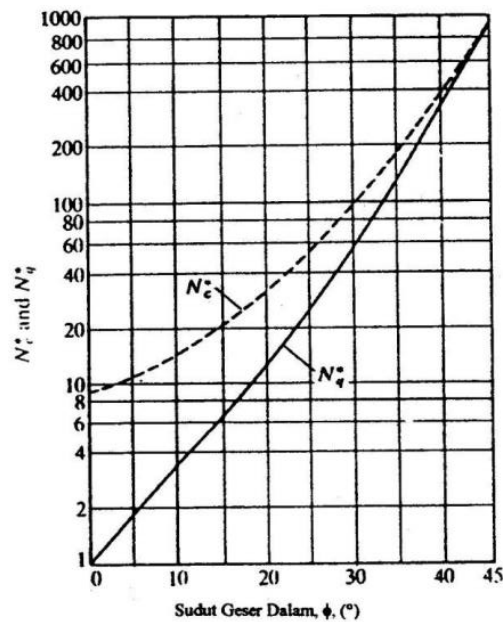
- b. Daya dukung ujung pada tanah koheusif

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p \dots\dots\dots(2.23)$$

Keterangan:

C_u = Kohesi *Undrained* (kN/m²)

A_p = Luas penampang tiang (m²)



Gambar 2.5 Faktor Daya Dukung Ujung N_c^* dan N_q^* menurut Meyerhof
(Sumber: Rahardjo, P.P, 2005)

2.11.2 Daya Dukung Selimut

Kapasitas daya dukung selimut fondasi merupakan penjumlahan (akumulasi) dari tahanan selimut sepanjang tiang yang berinteraksi dengan tanah di sekelilingnya, dituliskan dengan persamaan umum sebagai berikut:

$$Q_s = \sum A_s \times q_s , \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan

$$A_s = P \times Li , \dots\dots\dots (2.25)$$

Keterangan:

q_s = nilai tahanan selimut tiang sepanjang Li (kN/m^2)

P = keliling tiang (m)

Li = tebal lapisan tanah (m)

a. Daya dukung selimut pada tanah non-koheusif

Kapasitas daya dukung selimut pada tanah pasir atau non-koheusif menggunakan persamaan empiris Meyerhof 1956 sebagai berikut:

$$Q_s = f_s \times A_s , \dots\dots\dots (2.26)$$

$$Q_s = n \times N \times A_s , \dots\dots\dots (2.27)$$

Keterangan:

- n = 0,1 untuk tiang dengan *displacement* kecil
 = 0,2 untuk tiang dengan *displacement* besar
 A_s = luas selimut tiang
 N = nilai N_{SPT} sepanjang tiang

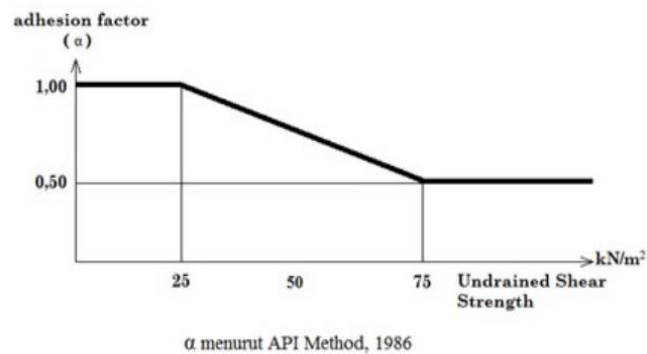
b. Daya dukung selimut pada tanah kohesif

Kapasitas daya dukung selimut pada tanah kohesif menggunakan metode α dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_s = \alpha \times C_u \times P \times L_i \text{ ,(2.28)}$$

Keterangan:

- α = Koefisien adhesi antara tanah dan tiang
 P = Keliling tiang (m)
 L_i = Tebal lapisan tanah (m)



Gambar 2.6 Faktor Adhesi untuk Tiang Pancang berdasarkan Metode API, 1986
 (sumber: Hardiyatmo, 2018)

Tabel 2.25 Faktor Adhesi untuk Tiang Bor berdasarkan Reese and O'neill, 1988

Kuat Geser Tak terdrainase C_u (Kpa)	Faktor Adhesi (α)
< 200	0,55
200 – 300	0,49
300 – 400	0,42
400 – 500	0,38
500 – 600	0,35
600 – 700	0,33
700 – 800	0,32
800 – 900	0,31
> 900	Dihitung sebagai batu

(Sumber: Hardiyatmo, 2018)

2.11.3 Faktor Aman Fondasi

Untuk memperoleh kapasitas dukung ijin tiang maka kapasitas dukung *ultimate netto* Q_n dibagi dengan faktor keamanan tertentu. Tomlison, 1977 dalam buku hardiyatmo (2018) menyarankan berdasarkan dari banyak pengujian beban tiang pancang maupun tiang bor yang berdiameter kecil sampai sedang adalah sebagai berikut.

$$Q_a = \frac{Q_n}{2,5}, \dots\dots\dots(2.29)$$

Sedangkan faktor aman untuk tiang bor sebagai berikut:

Untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan diameter $d < 2$ m:

$$Q_a = \frac{Q_n}{2,5}, \dots\dots\dots(2.30)$$

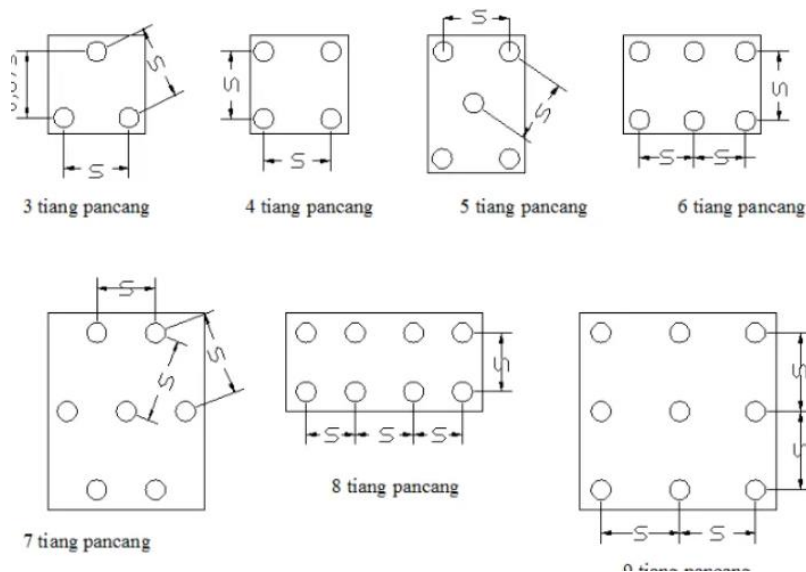
Untuk tiang tanpa pembesaran di bagian bawahnya:

$$Q_a = \frac{Q_n}{2}, \dots\dots\dots(2.31)$$

2.12 Kelompok Tiang

2.12.1 Jumlah dan Jarak Tiang yang Dibutuhkan

Pada umumnya pelaksanaan fondasi tiang sangat jarang digunakan fondasi yang hanya terdiri dari satu buah tiang tunggal saja, fondasi tiang akan terdiri dari beberapa tiang dibawah elemen fondasi yang dinamakan poer atau *pile cap* untuk menyatukan kelompok tiang tersebut.



Gambar 2.7 Pola-Pola kelompok Tiang

(Sumber: Bowles, 1993)

Jumlah tiang yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$n_p = \frac{\sum V_u}{Q_a}, \dots \dots \dots (2.32)$$

Keterangan:

n_p = jumlah tiang yang dibutuhkan

$\sum V_u$ = total muatan nominal vertikal (kN)

Q_a = kapasitas dukung ijin tiang tunggal

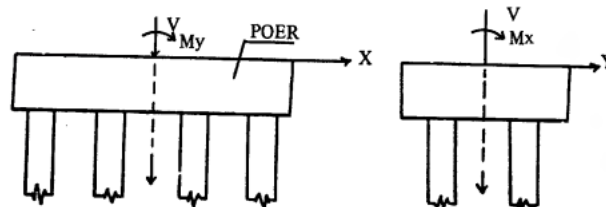
Jarak antar tiang dalam kelompok berdasarkan pada perhitungan daya dukung oleh Dirjen Binamarga Departemen P.U.T.L dalam buku Sardjono (2015), disyaratkan:

$$S \geq 2,5D \text{ atau } S \leq 3D$$

Dimana S merupakan jarak masing masing tiang dalam kelompok, dan D merupakan diameter tiang.

2.12.2 Beban Maksimum Tiang Pada Kelompok Tiang

Perhitungan beban maksimum yang diterima oleh masing-masing tiang di dalam kelompok tiang yang menerima beban normal sentris dan momen yang bekerja pada dua arah adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8 Kelompok Tiang Menerima Beban Sentris dan Momen Dua Arah

(Sumber: Sardjono,1988)

$$P = \frac{V_u}{n_p} \pm \frac{M_y \cdot x_{maks}}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_{maks}}{\sum y^2}, \text{ dengan } P_{maks} < Q_a, \dots \dots \dots (2.33)$$

Keterangan:

V_u = beban vertikal yang bekerja pada pusat kelompok tiang (kN)

M_x = momen yang bekerja tegak lurus sumbu X (kN.m)

M_y = momen yang bekerja tegak lurus sumbu Y (kN.m)

x_{maks} = jarak tiang arah sumbu X terjauh (m)

y_{maks} = jarak tiang arah sumbu Y terjauh (m)

n_p = jumlah tiang

$\sum x^2$ = jumlah kuadrat jarak tiang-tiang ke pusat berat kelompok tiang sumbu x

$\sum y^2$ = jumlah kuadrat jarak tiang-tiang ke pusat berat kelompok tiang sumbu y

2.12.3 Faktor Efisiensi Kelompok Tiang

Dikutip dalam buku hardiyatmo (2018), Beberapa pengamatan menunjukkan bahwa kapasitas dukung total dari kelompok tiang khususnya tiang dalam tanah lempung sering lebih kecil daripada hasil kali kapasitas dukung tiang tunggal yang dikalikan jumlah tiang dalam kelompoknya. Jadi besarnya kapasitas dukung total menjadi tereduksi dengan nilai reduksi yang tergantung dari ukuran, bentuk kelompok, jarak dan panjang tiangnya. Nilai pengali terhadap kapasitas dukung *ultimate* tiang, disebut efisiensi tiang (E_g atau η). Adapun persamaan efisiensi tiang dalam tanah kohesif menurut *Converse-Labarre* dalam buku Hardiyatmo (2018) adalah sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 mn} \right] \dots\dots\dots (2.34)$$

Keterangan:

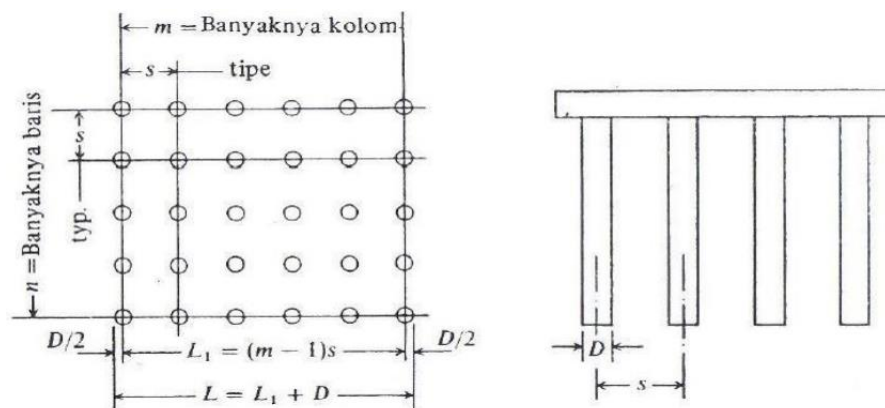
m = jumlah tiang dalam deretan kolom

n = jumlah tiang dalam deretan baris

θ = arc tan (d/s) dalam derajat

s = jarak antar tiang as ke as (m)

d = diameter tiang (m)



Gambar 2.9 Kelompok Tiang
(Sumber: Bowles, 1993)

2.12.4 Daya Dukung Ijin Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang tidak cukup hanya dengan meninjau daya dukung satu tiang yang berdiri sendiri (*single pile* dikalikan dengan banyaknya tiang dalam kelompok), sebab daya dukung tiang kelompok belum tentu sama dengan daya dukung satu tiang yang dikalikan dengan jumlah tiang.

Adapun rumus daya dukung kelompok tiang berdasarkan faktor efisiensi kelompok tiang adalah sebagai berikut:

$$Q_g = E_g \times n_p \times Q_a, \text{ dengan } Q_g > \sum Vu, \dots\dots\dots(2.35)$$

Keterangan:

E_g = faktor efisiensi kelompok tiang

n_p = jumlah tiang

Q_a = kapasitas dukung ijin tiang tunggal

2.13 Penurunan

Tiang yang dibebani akan mengalami pemendekan dan tanah disekitarnya akan mengalami penurunan (Hardiyatmo, 2018). Penurunan total terdiri atas penurunan segera/elastik (*immediated settlement*) yang akan terjadi saat beban diberikan, dan penurunan jangka panjang atau penurunan konsolidasi yang terjadi setelah pemberian beban. Persamaan penurunan total sebagai berikut:

$$S = S_e + S_c, \dots\dots\dots(2.36)$$

Keterangan:

S = penurunan total (m)

S_e = penurunan segera/elastik (m)

S_c = penurunan konsolidasi (m)

Berdasarkan SNI 8460:2017 menyatakan besar penurunan total yang di izinkan yaitu:

$$S < 15 \text{ cm} + b/600, \dots\dots\dots(2.37)$$

2.13.1 Penurunan Tiang Tunggal

Penurunan segera atau penurunan elastik dapat dibagi menjadi tiga komponen yang di totalkan. Adapun persamaan semi empiris dari penurunan elastik adalah sebagai berikut:

$$S_e = S_{e1} + S_{e2} + S_{e3} \dots\dots\dots(2.38)$$

$$S_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) L}{A_p \times E_p} \dots\dots\dots (2.39)$$

$$S_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \dots\dots\dots (2.40)$$

$$S_{e3} = \left(\frac{Q_{ws}}{P \times L} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \dots\dots\dots (2.41)$$

Keterangan:

S_e = penurunan elastis total fondasi tiang tunggal (cm)

S_{e1} = penurunan akibat deformasi aksial tiang (cm)

S_{e2} = penurunan akibat beban di ujung tiang (cm)

S_{e3} = penurunan akibat beban di sepanjang tiang (cm)

Q_{wp} = beban yang bekerja pada ujung tiang (kN)

Q_{ws} = beban yang bekerja pada selimut tiang (kN)

ξ = faktor distribusi gaya friksi sepanjang selimut tiang (0,5 atau 0,67)

A_p = luas penampang tiang (cm²)

E_p = $4700 \times \sqrt{f_c'}$ = modulus elastisitas tiang (kN/m²)

D = diameter atau sisi tiang (cm)

q_{wp} = Q_{wp}/A_p = beban titik ujung tiang (kN)

P = keliling tiang (cm)

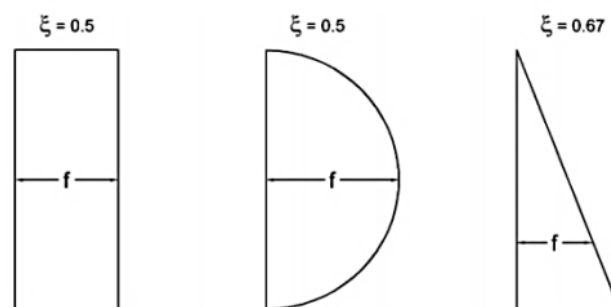
L = panjang tiang (cm)

E_s = modulus elastisitas tanah pada atau bawah tiang

μ_s = *poison ratio* tanah

I_{wp} = faktor pengaruh pada ujung tiang ($I_{wp} = 0,85$)

I_{ws} = faktor pengaruh selimut tiang ($I_{ws} = 2 + 0,35 \times \sqrt{L/D}$)



Gambar 2.10 Nilai ξ Berdasarkan Bentuk Distribusi Tahanan Friksi
(Sumber: Bowles, 1993)

2.13.2 Penurunan Pada Kelompok Tiang

Penurunan elastik fondasi kelompok dihitung dengan persamaan semi empiris sebagai berikut:

$$S_{e\text{group}} = S_{e1} + S_{e2} + S_{e3} \dots \dots \dots (2.42)$$

$$S_{e1} = \frac{(Q_{wp(g)} + \xi Q_{ws(g)}) L}{A_{p(g)} \times E_{p(g)}} \dots \dots \dots (2.43)$$

$$S_{e2} = \frac{q_{wp(g)} \times B_g}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \dots \dots \dots (2.44)$$

$$S_{e3} = \frac{Q_{ws(g)}}{P(g) \times L} \times \frac{B_g}{E_s} \times (1 - \mu_s^2) I_{ws} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$Q_{wp(g)} = E_g \frac{n_1 n_2 Q_p}{SF} \dots \dots \dots (2.46)$$

$$Q_{ws(g)} = E_g \frac{n_1 n_2 Q_s}{SF} \dots \dots \dots (2.47)$$

$$A_{p(g)} = L_g \times B_g \dots \dots \dots (2.48)$$

$$q_{wp(g)} = \frac{Q_{wp(g)}}{A_{p(g)}} \dots \dots \dots (2.49)$$

$$P = 2(L_g + B_g) \dots \dots \dots (2.50)$$

Keterangan:

$Q_{wp(g)}$ = beban yang bekerja pada ujung tiang kelompok (kN)

$Q_{ws(g)}$ = beban yang bekerja pada selimut tiang kelompok (kN)

ξ = faktor distribusi gaya *frikksi* sepanjang selimut tiang

$A_{p(g)}$ = luas susunan tiang kelompok (m²)

$E_{p(g)}$ = modulus elastisitas material tiang (kN/m²)

E_g = efisiensi kelompok tiang

n_1 = jumlah tiang dalam deretan kolom

n_2 = jumlah tiang dalam deretan baris

B_g = lebar kelompok tiang

$q_{wp(g)}$ = daya dukung ujung batas tiang kelompok per satuan luas (kg/m)

μ_s = *poisson ratio* tanah

I_{wp} = faktor pengaruh pada ujung tiang ($I_{wp} = 0,85$)

I_{ws} = faktor pengaruh selimut tiang ($I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{B_g}}$)

L_g = panjang kelompok tiang

P = keliling susunan tiang kelompok (m)

L = panjang tiang yang tertanam (m)

Penurunan akibat konsolidasi primer untuk kelompok tiang dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\sum S_{c(i)} = \frac{C_{c(i)} H_i}{1 + e_{0(i)}} \log \left[\frac{\sigma'_{0(i)} + \Delta\sigma'_{(i)}}{\sigma'_{0(i)}} \right], \dots\dots\dots(2.51)$$

Keterangan:

$\sum S_{c(i)}$ = total penurunan konsolidasi (m)

$C_{c(i)}$ = indeks pemampatan (*compression index*) pada lapis *i*

H_i = tebal tanah lapis *i* (m)

$e_{0(i)}$ = angka pori awal

$\sigma'_{0(i)}$ = tegangan sebelum konstruksi lapis *i* (kg/m²)

$\Delta\sigma'_{(i)}$ = tegangan yang meningkat pada tengah lapis *i* (kg/m²)

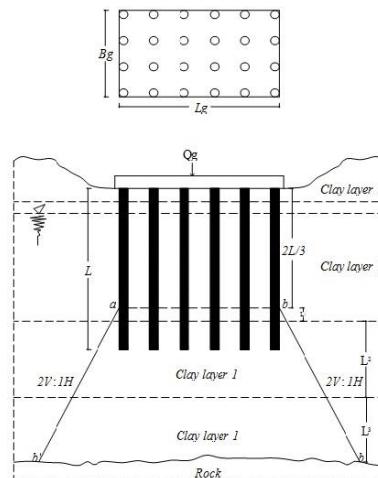
$$\Delta\sigma'_{(i)} = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}, \dots\dots\dots(2.52)$$

Keterangan:

Q_g = daya dukung kelompok tiang (kg)

z_i = kedalaman setelah 2/3L di bawah fondasi yang ditinjau (m)

B_g dan L_g = lebar dan panjang kelompok tiang

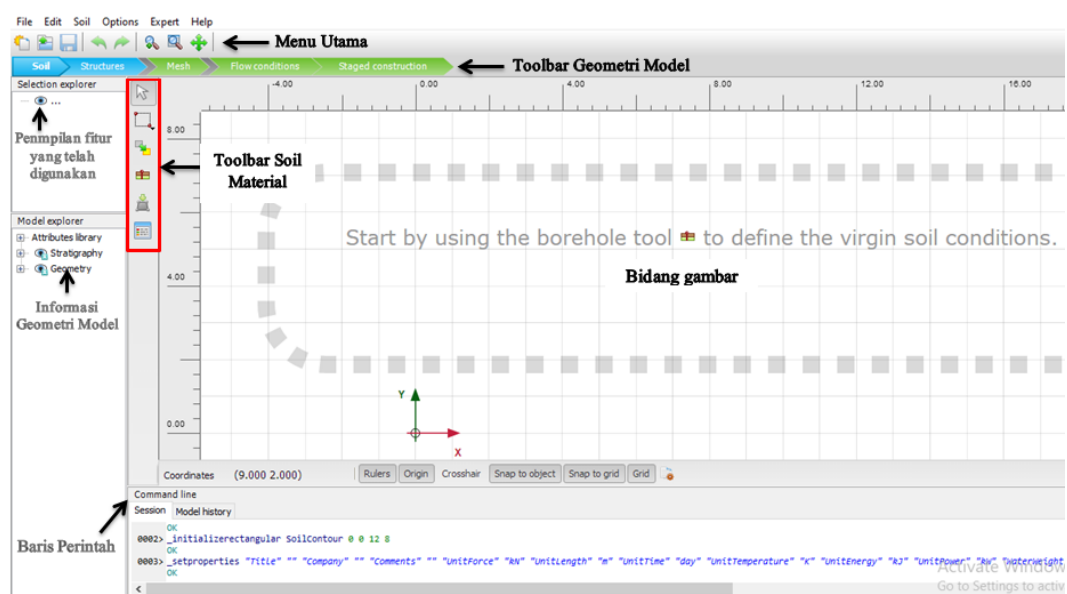


Gambar 2.11 Simulasi Penurunan Konsolidasi kelompok tiang (Sumber: Das, 2011)

2.14 Software Plaxis Dua Dimensi

Plaxis adalah salah satu program aplikasi komputer yang dikembangkan berdasarkan konsep metode elemen hingga untuk memodelkan serta menganalisis respons tanah dan struktur, termasuk perhitungan daya dukung fondasi, distribusi tegangan, dan deformasi di bidang geoteknik (Susila. dkk, 2007). *Software* plaxis ini dapat melakukan simulasi terhadap perilaku dari suatu kondisi tanah menggunakan parameter tanah yang di inputkan dan memodelkan tiap lapisan tanah.

Plaxis dapat digunakan untuk menghitung daya dukung fondasi berdasarkan parameter tanah dan struktur fondasi yang di *inputkan* serta pembebanan yang diterapkan pada fondasi. *Software* ini membantu mengevaluasi kemampuan fondasi untuk menahan beban dan deformasi yang terjadi pada tanah.



Gambar 2.12 Tampilan Utama Plaxis 2D V.20

Pada *Software* plaxis terdiri dari 6 tahapan simulasi yaitu:

1. Definisi Geometri

Definisi geometri yaitu pemodelan gambar tanah, struktur dan beban. membuat pemodelan geometri dua dimensi terdiri dari titik-titik, garis-garis dan komponen lainnya dalam bidang x y, kemudian memasukkan parameter-parameter sesuai data jenis material tanah atau struktur di lapangan.

2. *Generata Mesh*

Jaringan elemen hingga (Mesh) merupakan tahapan yang harus dilakukan dalam analisis plaxis dengan menghasilkan model menjadi elemen-elemen segitiga yang berbentuk menyerupai jaring (*mesh*). Jumlah dan besaran segitiga yang dibentuk dapat diatur tingkat kekasarannya menjadi sangat kasar, kasar, sedang, halus dan sangat halus. Semakin halus tingkatannya, maka jumlah elemennya semakin banyak. Dengan demikian, ketelitian hasil perhitungannya semakin tinggi.

3. *Flow Conditions*

Tahap ini menempatkan garis freatik sesuai kondisi di lapangan serta akan dihitung tekanan air secara otomatis oleh *software*.

4. *Staged Contruction*

Pada tahap ini mendefinisikan dan memulai perhitungan elemen hingga dengan mendefinisikan jenis perhitungan dan jenis pembebanan atau tahapan konstruksi. Contoh dari tahapan perhitungan adalah mendefinisikan kondisi tanah asli, aktivasi material fondasi, aktivasi dari suatu pembebanan pada waktu tertentu, simulasi tahapan konstruksi, perhitungan faktor keamanan, dan lain-lain.

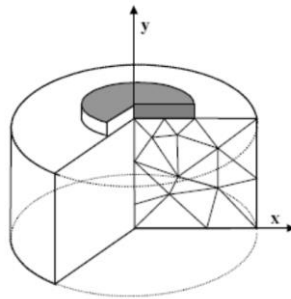
5. *Calculate*

Setelah selesai mendefinisikan tahapan kondisi awal dan tahapan konstruksi maka dapat dilakukan perhitungan dengan *software* sesuai urutan (*phase*) yang di definisikan sebelumnya.

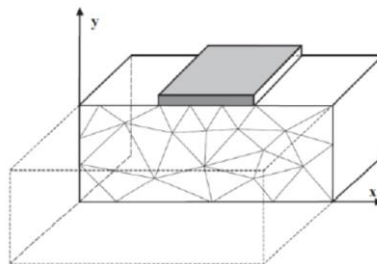
6. *Ispect Result*

Program keluaran, memuat seluruh fasilitas untuk menampilkan hasil dari data masukan yang telah dibentuk serta hasil dari perhitungan elemen hingga. *Output* yang dihasilkan adalah *deformasi mesh*, profil penurunan, besarnya tegangan di dalam lapisan tanah, serta gaya-gaya dalam yang ditanggung oleh struktur yang dimodelkan. Hasil tersebut berupa tabel dan grafik.

Pemodelan geometri dalam program ini terdiri dari *axi-symetris* dan *plane strain*. Pemodelan *axi-symetris* digunakan untuk menganalisis struktur yang simetris atau berbentuk lingkaran (*circular structures*) yang memiliki potongan berbentuk radial dan pembebanan berupa beban seragam terhadap pusat, serta tegangan dan deformasi yang dianggap searah dengan radial, contoh struktur dengan kondisi ini adalah fondasi pelat lingkaran, sedangkan *plane strain* digunakan untuk menganalisis struktur yang memiliki potongan melintang yang pembebanannya serta kondisi tegangan yang seragam, perpindahan atau deformasi searahnya dianggap nol, contoh struktur dengan kondisi ini misalnya fondasi menerus.



Gambar 2.13 Ilustrasi Model *Axi-symetris* pada Plaxis



Gambar 2.14 Ilustrasi Model *Plane Strain* pada Plaxis

(Sumber: Susila. dkk, 2007)