

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Preliminary Design*

2.1.1 Perencanaan Pelat

Pelat merupakan elemen struktur horizontal yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan beban hidup maupun beban mati ke sistem pendukung vertikal atau balok. Dalam tahapan perancangannya, diperlukan klasifikasi sistem penyaluran gaya guna menentukan metode analisis yang tepat.

a. Penentuan klasifikasi sistem pelat

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 7 sampai 8 klasifikasi pelat menjadi sistem searah (*one-way slab*) atau dua arah (*two-way slab*) ditentukan berdasarkan rasio aspek bentang bersihnya. Evaluasi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Ln = \frac{Ly}{Lx} \quad (2.1)$$

Keterangan:

Ln = Rasio perbandingan bentang.

Ly = Dimensi bentang bersih pada arah yang panjang.

Lx = Dimensi bentang bersih pada arah yang pendek.

Berdasarkan kriteria teknis, apabila nilai rasio $Ln \leq 2$, maka struktur pelat tersebut dikategorikan sebagai pelat dua arah. Sebaliknya, jika $Ln > 2$, maka pelat dikategorikan sebagai pelat satu arah.

b. Estimasi dimensi ketebalan pelat

Penetapan dimensi ketebalan minimum pelat wajib dipelajari dan dihitung berdasarkan ketentuan spesifikasi yang diatur dalam SNI 2847:2019, guna menjamin terpenuhinya syarat batas layan terkait kontrol lendutan.

Tabel 2.1 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 Tabel 7.3.1.1

Tabel 2.2 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah Nonprategang Tanpa Balok Interior (mm)

fy, 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	ln/33	ln/36	ln/36	ln/36	ln/40	ln/40
420	ln/30	ln/33	ln/33	ln/33	ln/36	ln/36
520	ln/28	ln/31	ln/31	ln/31	ln/34	ln/34

Sumber: SNI 2847:2019 Tabel 8.3.1.1

- c. Ketebalan total pelat (h) wajib memenuhi limitasi ambang batas bagi pelat nonprategang yang memiliki balok pendukung pada seluruh sisinya, dengan mengacu pada ketentuan kriteria yang tercantum dalam **Tabel 2.3** berikut ini.

Tabel 2.3 Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah Nonprategang dengan Balok di antara Tumpuan pada Semua Sisinya

α_{fm}	h minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Pasal 8.3.1.1 SNI 2847:2019 berlaku	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$
		125
$\alpha_{fm} > 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 9\beta}$
		90

Sumber: SNI 2847:2019 Tabel 8.3.1.2

Nilai α_{fm} merupakan nilai rata – rata dari α_f balok keempat sisi pelat yang dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\alpha_f = \frac{E_{cb} \times I_b}{E_{cs} \times I_s} \quad (2.2)$$

Keterangan:

E_{cb} : Modulus elastis balok

I_b : Momen inersia balok

E_{cs} : Modulus elastis pelat

I_s : Momen inersia pelat

d. Pemilihan material pelat komposit bondek

Sebagai alternatif dari pelat beton konvensional, *redesign* struktur pelat pada gedung ini mengaplikasikan sistem pelat komposit menggunakan material bondek. Spesifikasi material yang digunakan merujuk pada produk Union Floor Deck W-1000 produksi PT. Union Metal. Produk ini dipilih karena diproduksi di dalam negeri sehingga mudah diperoleh, menggunakan baja mutu tinggi dengan tegangan leleh minimum 560 MPa berlapis galvanis, memenuhi SNI 07-2053-2006 serta dilengkapi tonjolan (*embossment*) untuk meningkatkan lekatan mekanis dengan beton (Badan Standardisasi Nasional, 2006) . Dek ini tersedia dalam empat tebal logam dasar (*base metal thickness*, BMT), yaitu 0,65 mm; 0,70 mm; 1,00 mm; dan 1,40 mm, dengan berat berturut-turut 6,52; 7,00; 9,89; dan 13,76 kg/m², tinggi gelombang 50 mm, dan lebar efektif 995 mm (PT. UNION METAL, 2021).

Pelat komposit bondek bekerja dalam dua tahap. Pada tahap konstruksi, dek baja berfungsi sebagai bekisting tetap yang memikul berat beton basah dan beban kerja, sehingga bentang tanpa penopang dibatasi sesuai data pabrikan. Setelah beton mengeras, dek baja bekerja sebagai tulangan tarik momen positif melalui lekatan mekanis (*embossment*) dengan beton. Aksi komposit ini hanya terjadi searah gelombang dek, sehingga pelat bondek diperlakukan sebagai pelat satu arah. Momen negatif di atas tumpuan dipikul tulangan atas, dan arah tegak lurus gelombang memerlukan tulangan susut dan suhu.

Karena perilaku dua tahap tersebut, tebal dek tidak dipilih berdasarkan kelengkapan data brosur, melainkan melalui tiga kriteria desain pelat komposit (Johnson, 2004; Steel Deck Institute, 2017) . Pertama, kriteria tahap konstruksi: sebelum beton mengeras, dek bekerja sendiri sehingga momen, geser, dan lendutan akibat berat beton basah ditambah beban konstruksi harus dapat dipikul

oleh penampang baja; kriteria ini menentukan bentang maksimum tanpa penopang atau kebutuhan penopang sementara. Kedua, kriteria tahap komposit: kapasitas lentur dan kapasitas geser memanjang (lekatan geser) pelat komposit harus melampaui momen dan geser ultimit, sedangkan lendutannya harus memenuhi batas izin SNI 2847:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Ketiga, kriteria ekonomi: berat, dan dengan demikian harga dek, meningkat hampir sebanding dengan tebalnya (BMT 1,00 mm sekitar 41% lebih berat daripada BMT 0,70 mm), sehingga dipilih tebal paling tipis yang memenuhi kedua kriteria sebelumnya. Tebal yang lebih besar pada dasarnya hanya diperlukan apabila bentang atau beban tahap konstruksi melampaui kapasitas dek yang lebih tipis. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa dek W-1000 dengan BMT 0,65–1,00 mm telah menghasilkan kapasitas momen yang melampaui pelat konvensional yang digantikannya (Weli dkk., 2021). Namun, pemilihan tebal dek juga perlu mempertimbangkan metode hitung kapasitasnya: dibandingkan hasil uji, metode ultimit memberikan galat rata-rata 35,57%, lebih besar daripada metode tegangan kerja (9,48%) dan SDI-ANSI C-2017 (−10,31%, konservatif) (Yulianto, 2021). Oleh karena itu, cadangan kapasitas lentur pelat bondek pada Bab IV ditafsirkan dengan mempertimbangkan kecenderungan tersebut. Atas dasar tersebut, *redesign* ini menggunakan dek BMT 0,70 mm dengan tebal pelat total 100 mm, yang kecukupan kekuatan dan lendutannya diverifikasi pada Bab IV.

2.1.2 Perencanaan Balok dan *Tie Beam*

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.3.1.1, diuraikan mengenai tinggi minimum balok nonprategang berdasarkan **Tabel 2.4** berikut.

Tabel 2.4 Tinggi Minimum Balok Nonprategang

Kondisi Perletakan	Minimum h
Perletakan sederhana	1/16
Menerus satu sisi	1/18,5
Menerus dua sisi	1/21
Kantilever	1/8

Sumber: SNI 2847:2019

Rumusan dapat diaplikasikan pada beton mutu normal dan tulangan dengan mutu 420 MPa. Pada kasus lain, minimum h harus dimodifikasi sesuai dengan pasal 9.3.1.1.1 hingga 9.3.1.1.3, sebagaimana mestinya.

Berdasarkan tabel tersebut di atas, tinggi balok induk minimum yaitu: $h_{min} = \frac{L}{16}$, apabila nilai f_y 420 MPa.

$$h_{min} = \frac{L}{16} \times \left(0,4 + \frac{f_y}{700}\right), \text{ apabila nilai } f_y \text{ selain } 420 \text{ MPa.} \quad (2.3)$$

Penentuan dimensi lebar balok (b_w) dapat diestimasi sekurang-kurangnya bernilai setengah dari tinggi total balok (h). Selain diaplikasikan pada elemen balok, persamaan rasio dimensi tersebut juga dapat diimplementasikan dalam menentukan proporsi geometris *tie beam*.

Adapun bagi balok yang dirancang sebagai bagian dari Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), terdapat limitasi terkait gaya tekan aksial terfaktor (P_u) yang disyaratkan tidak melampaui ambang batas berikut:

$$P_u \leq \frac{A_g \cdot f'_c}{10} \quad (2.4)$$

Lebih lanjut, penetapan batasan dimensi struktural wajib mereferensi pada regulasi SNI 2847:2019 Pasal 18.6.2.1, yang mencakup kriteria sebagai berikut:

- a. Bentang bersih (l_n), yaitu jarak bebas antar muka tumpuan atau bentang bersih komponen struktur tidak diperkenankan kurang dari empat kali tinggi efektif balok ($4d$)

$$d = h - c - d_s - \frac{dl}{2} \quad (2.5)$$

- b. Lebar penampang (b_w), yaitu dimensi lebar penampang komponen struktur sekurang-kurangnya diambil dari nilai terkecil antara $0,3h$ atau 250 mm.
- c. Eksentrisitas lebar balok, yaitu apabila terdapat proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu, maka lebar proyeksi tersebut pada setiap sisi tidak boleh melebihi nilai minimum antara dimensi kolom c_2 atau $0,75c_1$.

$$L_n = L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_2}{2} \quad (2.6)$$

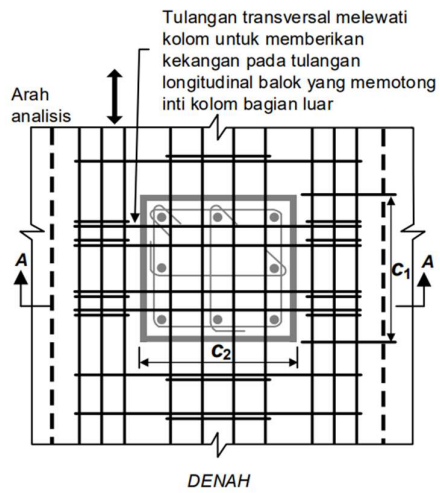
Keterangan:

d_l = tulangan longitudinal

d_s = tulangan sengkang

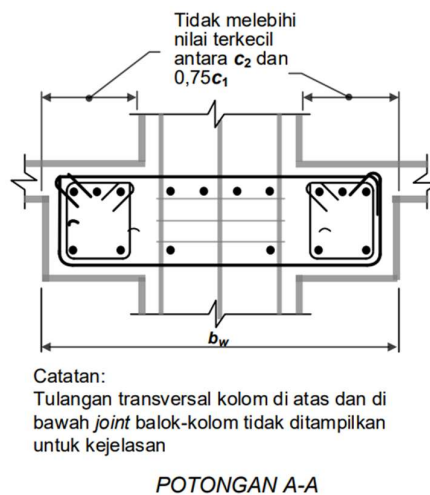
c_1 = ukuran kolom (1)

c_2 = ukuran kolom (2)



Gambar 2.1 Denah lebar efektif maksimum balok lebar (*wide beam*) dan persyaratan tulangan transversal

Sumber: SNI 2847:2019



Gambar 2.2 Potongan A-A Lebar efektif maksimum balok lebar (*wide beam*) dan persyaratan tulangan transversal

Sumber: SNI 2847:2019

2.1.3 Perencanaan Dimensi Kolom

Pada perancangan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), komponen kolom harus didesain agar memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan balok (*strong column-weak beam*). Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.2.1, dimensi penampang kolom wajib memenuhi kriteria geometris sebagai berikut:

- a. Dimensi penampang minimum; yaitu ukuran terkecil penampang kolom, yang diukur pada garis lurus melalui pusat geometri, tidak diperkenankan kurang dari 300 mm.
- b. Rasio aspek penampang; yaitu perbandingan antara dimensi terkecil penampang terhadap dimensi tegak lurusnya disyaratkan tidak kurang dari 0,4.

Dalam menentukan estimasi dimensi awal kolom agar memenuhi syarat kekakuan relatif terhadap balok, dapat digunakan pendekatan perbandingan nilai kekakuan (EI/L) sebagai berikut:

$$\frac{h_{kolom}}{I_{kolom}} > \frac{h_{balok}}{I_{balok}} \quad (2.7)$$

Keterangan:

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

2.2 Pembebanan

2.2.1 Beban Mati

Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2020) SNI 1727:2020 Pasal 3.1.1., beban mati merupakan berat total dari seluruh komponen material konstruksi yang terpasang secara permanen pada bangunan gedung. Beban ini mencakup elemen struktur dan arsitektur seperti dinding, lantai, atap, plafon, tangga, partisi tetap, serta *finishing* dan *cladding*. Selain itu, beban mati juga meliputi peralatan layanan tetap,

termasuk sistem pengangkut material dan berat derek yang menjadi bagian integral dari fungsi bangunan.

2.2.2 Beban Hidup

(Badan Standardisasi Nasional, 2020) SNI 1727:2020 pada Pasal 4.1, menjelaskan beban hidup merupakan beban non permanen yang berasal dari penggunaan serta penghunian bangunan gedung atau struktur lainnya. Kategori beban ini tidak mencakup beban konstruksi maupun beban lingkungan seperti beban angin, hujan, gempa, dan banjir serta tidak termasuk dalam komponen beban mati.

2.2.3 Beban Hujan

Pada SNI 1727:2020 Pasal 8.1 (Badan Standardisasi Nasional, 2020), beban hujan merupakan beban yang dihitung berdasarkan volume air yang terakumulasi pada atap akibat lendutan struktur atau kegagalan sistem drainase, yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan progresif pada komponen bangunan.

Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2020) SNI 1727:2020 Pasal 8.3, seluruh elemen atap wajib dirancang agar mampu memikul beban akumulasi air hujan yang terjadi jika sistem drainase primer mengalami hambatan. Beban tersebut dihitung dengan menjumlahkan beban merata akibat kenaikan air di atas lubang masuk sistem drainase sekunder pada kondisi aliran desainnya. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$R = 5,2 (d_s + d_h) \quad (2.8)$$

$$R = 0,0098 (d_s + d_h) \quad (2.9)$$

Jika sistem drainase sekunder menggunakan beberapa saluran, maka seluruh saluran beserta titik pembuangannya wajib dipisahkan dari sistem drainase primer. Perhitungan beban air hujan harus didasarkan pada ketinggian total yang merupakan penjumlahan antara tinggi statis (d_s) dan kepala hidraulik (d_h) yang sesuai dengan laju aliran desain pada sistem drainase sekunder. Penentuan tinggi total tersebut wajib mengacu pada hasil data uji hidraulik yang valid.

Keterangan:

- R = beban air hujan pada atap yang tidak melendut, dalam lb/ft^2 (kN/m^2)
- 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 in. (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 in. (mm)

2.2.4 Beban Gempa

Beban gempa merupakan beban yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah oleh gempa bumi, baik tektonik maupun vulkanik. Berikut tahapan dalam menghitung beban gempa pada struktur bangunan:

1. Penentuan klasifikasi situs mengacu pada **Tabel 2.5**, di mana kategori kelas situs ditetapkan berdasarkan hasil perhitungan nilai *Standard Penetration Test* (SPT) rata-rata ($\bar{N}$) Nilai N-SPT rata-rata pada 30 m teratas dihitung dengan $\bar{N} = \sum d_i / \sum (d_i/N_i)$, dengan d_i adalah tebal lapisan ke- i dan N_i adalah nilai N-SPT lapisan tersebut, sesuai ketentuan klasifikasi situs SNI 1726:2019 Pasal 5. (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

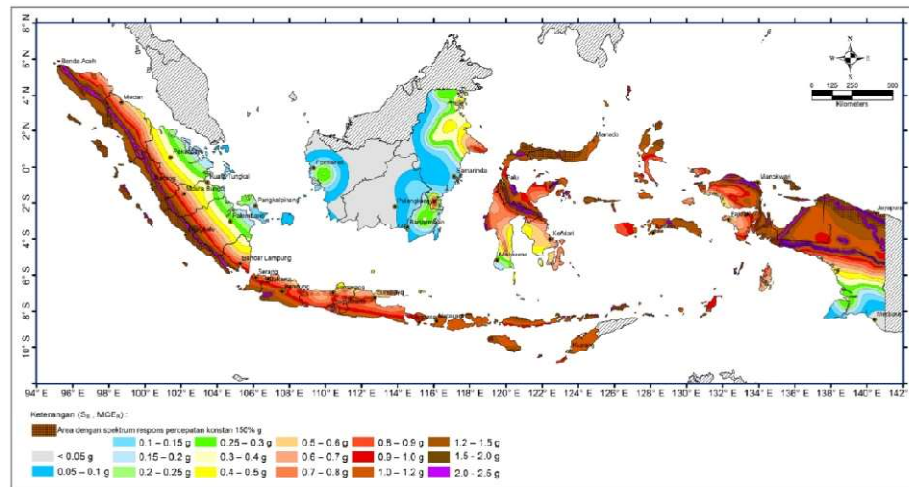
Tabel 2.5 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
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: a. Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah b. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) c. Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plasitisitas $PI > 75$) Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kPa		

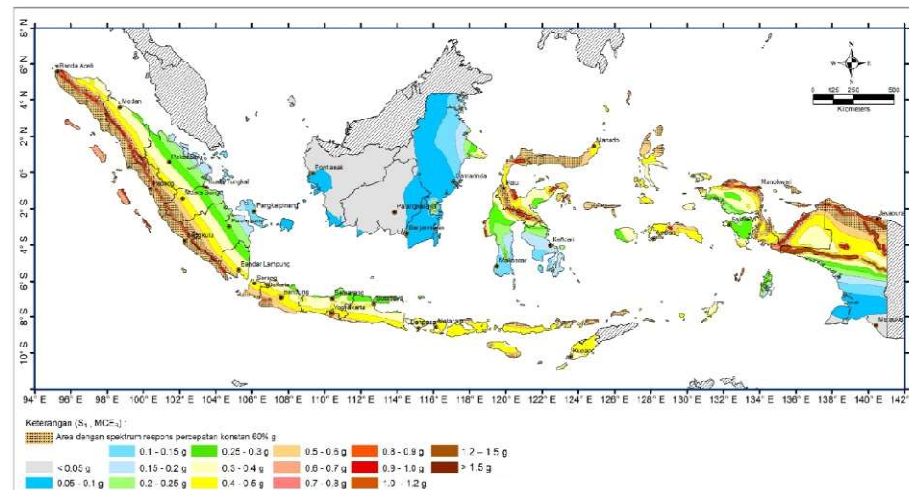
Catatan: N/A = tidak dapat dipakai

Sumber: SNI 1726:2019

2. Penentuan parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang mengacu pada risiko tertarget (MCE_R) dilakukan berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726:2019 Pasal 6.1.2. Parameter percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s) dan periode 1 detik (S_1) diperoleh melalui pembacaan peta respons spektral percepatan untuk masing-masing periode 0,2 detik dan 1 detik.



Gambar 2.3 Peta Wilayah S_1
 Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 15



Gambar 2.4 Peta Wilayah S_s
 Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 16

3. Penentuan respons percepatan gempa MCE_R pada permukaan tanah memerlukan faktor amplifikasi seismik untuk periode 0,2 detik dan 1 detik. Faktor-faktor tersebut meliputi koefisien amplifikasi getaran periode pendek (F_a) serta periode 1 detik (F_v), sebagaimana diatur dalam (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726:2019 Pasal 6.2. Adapun parameter respons percepatan yang telah disesuaikan dengan klasifikasi situs, yakni S_{MS} dan S_{M1} dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S_{MS} = Fa \times S_S \quad (2.10)$$

$$S_{M1} = Fv \times S_1 \quad (2.11)$$

Keterangan:

S_S = Parameter respons percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek;

S_1 = Parameter respons percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1,0 detik.

Tabel 2.6 Koefisien Situs, F_a

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_S					
	$S_S \leq 0,25$	$S_S = 0,5$	$S_S = 0,75$	$S_S = 1,0$	$S_S = 1,25$	$S_S \geq 1,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
SF	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 6

Tabel 2.7 Koefisien Situs, F_v

Kelas situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 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	$SS^{(a)}$					

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 7

4. Penetapan parameter percepatan spektral desain, baik untuk periode pendek (S_{DS}) maupun periode 1 detik (S_{D1}), dilakukan dengan merujuk pada ketentuan yang berlaku. Adapun besaran nilai desain tersebut dihitung melalui formulasi sebagai berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.12)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.13)$$

5. Penentuan spektrum respons desain

Apabila prosedur gerak tanah spesifik-situs tidak diterapkan, maka penyusunan kurva spektrum respons desain harus mengikuti kriteria sebagai berikut:

- a. Untuk periode yang nilainya kurang dari T_0 , spektrum respons percepatan desain (S_a) ditentukan menggunakan persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.14)$$

- b. Untuk periode yang berada di rentang lebih besar dari atau sama dengan T_0 hingga lebih kecil dari atau sama dengan T_S besarnya spektrum respons percepatan desain (S_a) adalah setara dengan nilai S_{DS} .

- c. Untuk periode yang lebih besar dari T_S namun tidak melebihi T_L , nilai respons spektral percepatan desain (S_a) dihitung berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (2.15)$$

- d. Untuk periode yang melampaui nilai T_L , besarnya respons spektral percepatan desain (S_a) ditetapkan melalui persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} \times T_L}{T^2} \quad (2.16)$$

Keterangan:

S_{DS} = parameter respons spektral percepatan desain pada periode pendek;

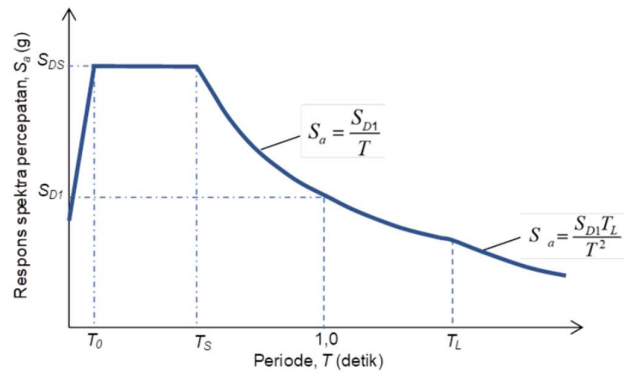
S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada periode 1 detik;

T = periode getar fundamental struktur.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.17)$$

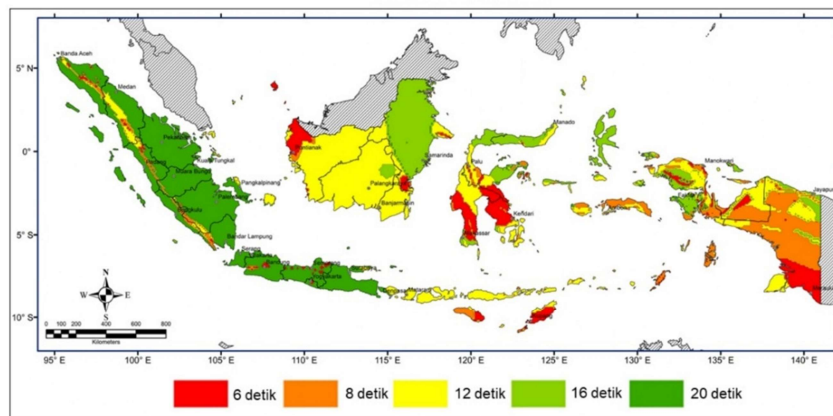
$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2.18)$$

T_L = Peta transisi periode panjang yang ditunjukkan pada **Gambar 2.6** yang nilainya diambil dari **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Respon Spektrum Desain

Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 3



Gambar 2.6 Peta Transisi Periode Panjang, T_L , Wilayah Indonesia

Sumber: SNI 1726:2019 Gambar 20

6. Penentuan kategori desain seismik berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.5.

Tabel 2.8 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

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 8

Tabel 2.9 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

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 9

7. Penentuan nilai koefisien modifikasi respons (R) dilakukan berdasarkan jenis sistem struktural yang diterapkan pada bangunan. Besaran koefisien tersebut ditetapkan dengan merujuk pada ketentuan yang tercantum dalam (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2.

Tabel 2.10 Faktor R, C_d , dan W_0 untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik (Lanjutan)

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, W_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n(m)^d$				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
19. Dinding geser batu bata polos didetail	2	$2^{1/2}$	2	TB	TI	TI	TI	TI
20. Dinding geser batu bata polos biasa	$1^{1/2}$	$2^{1/2}$	$1^{1/4}$	TB	TI	TI	TI	TI
21. Dinding geser batu bata prategang	$1^{1/2}$	$2^{1/2}$	$1^{3/4}$	TB	TI	TI	TI	TI
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	$2^{1/2}$	$4^{1/2}$	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	$2^{1/2}$	$4^{1/2}$	TB	TB	22	22	22
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	$2^{1/2}$	$2^{1/2}$	$2^{1/2}$	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	$2^{1/2}$	5	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	$5^{1/2}$	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	$5^{1/2}$	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	$4^{1/2}$	3	4	TB	TB	10^k	TI^k	TI^k

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, W_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n(m)^d$				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3 ^{1/2}	3	3	TB	TB	TI ^l	TI ^l	TI ^l
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^m	8	3	5 ^{1/2}	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4 ^{1/2}	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2 ^{1/2}	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5 ^{1/2}	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4 ^{1/2}	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5 ^{1/2}	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2 ^{1/2}	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ⁿ	3 ^{1/2}	3 ⁰	3 ^{1/2}	10	10	10	10	10
D. Sistem ganda dengan rangka pemikul momen khusus yang mampu menahan paling sedikit 25% gaya seismik yang ditetapkan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2 ^{1/2}	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2 ^{1/2}	5 ^{1/2}	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus ^{g,h}	7	2 ^{1/2}	5 ^{1/2}	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	6	2 ^{1/2}	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2 ^{1/2}	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2 ^{1/2}	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7 ^{1/2}	2 ^{1/2}	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2 ^{1/2}	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2 ^{1/2}	5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5 ^{1/2}	3	5	TB	TB	TB	TB	TB
11. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	3	3 ^{1/2}	TB	TB	TI	TI	TI
12. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2 ^{1/2}	5	TB	TB	TB	TB	TB

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, W_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n(m)^d$				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
13. Dinding geser pelat baja khusus	8	2 ^{1/2}	6 ^{1/2}	TB	TB	TB	TB	TB

Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2.

8. Penentuan periode struktur

Periode fundamental struktur (T) pada arah yang ditinjau harus ditetapkan berdasarkan analisis teknis yang mempertimbangkan sifat struktural serta karakteristik deformasi dari elemen pemikul beban. Besaran periode fundamental struktur (T) dibatasi agar tidak melampaui hasil perkalian antara koefisien batas atas (C_u), sebagaimana tercantum dalam **Tabel 2.11**, dengan periode fundamental pendekatan (T_a) yang dihitung sesuai ketentuan yang berlaku. Selain itu, prosedur analisis juga mengizinkan penggunaan periode bangunan pendekatan (T_a) secara langsung sebagai alternatif dalam menetapkan nilai periode fundamental struktur.

Tabel 2.11 Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1}	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 17

9. Penetapan periode fundamental pendekatan

Besaran periode fundamental pendekatan (T_a), dalam satuan detik, wajib ditentukan dengan merujuk pada formulasi berikut ini:

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

Keterangan:

Parameter h_n merupakan ketinggian total struktur yang diukur dalam satuan meter (m) dari dasar hingga tingkat tertinggi bangunan. Adapun nilai koefisien C_t dan x ditetapkan berdasarkan kriteria yang tercantum dalam **Tabel 2.12**.

Tabel 2.12 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismic:		
d. Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
e. 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

10. Penentuan faktor keutamaan gempa dan kategori risiko struktur

Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726:2019 Pasal 4.1.1, penentuan pengaruh gempa rencana pada berbagai kategori risiko bangunan gedung maupun nongedung harus mengacu pada klasifikasi dalam **Tabel 2.13**, yang kemudian dikalikan dengan faktor keutamaan gempa (I_e) sesuai dengan **Tabel 2.14**. Khusus bagi struktur bangunan yang tergolong dalam kategori risiko IV, apabila diperlukan akses operasional melalui struktur di sekitarnya, maka bangunan yang bersebelahan tersebut wajib didesain dengan standar kategori risiko IV yang sama.

Tabel 2.13 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Nongedung untuk Beban Gempa

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: a. Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, dan perikanan b. Fasilitas sementara c. Gudang penyimpanan d. Rumah jaga dan struktur kecil lainnya	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: a. Perumahan b. Rumah toko dan rumah kantor c. Pasar d. Gedung perkantoran e. Gedung apartemen/ rumah susun f. Pusat perbelanjaan/mall g. Bangunan industri h. Fasilitas manufaktur i. Pabrik	II

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: a. Bioskop b. Gedung pertemuan c. Stadion d. Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat e. Fasilitas penitipan anak f. Penjara g. 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: a. Pusat pembangkit listrik biasa b. Fasilitas penanganan air c. Fasilitas penanganan limbah d. Pusat telekomunikasi 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.	III
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: a. Bangunan-bangunan monumental b. Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan c. Rumah ibadah d. Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat e. Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat f. Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya g. Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat h. Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat i. 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	IV

Jenis pemanfaatan	Kategori risiko
material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat	
Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 3

Tabel 2.14 Faktor Keutamaan Gempa

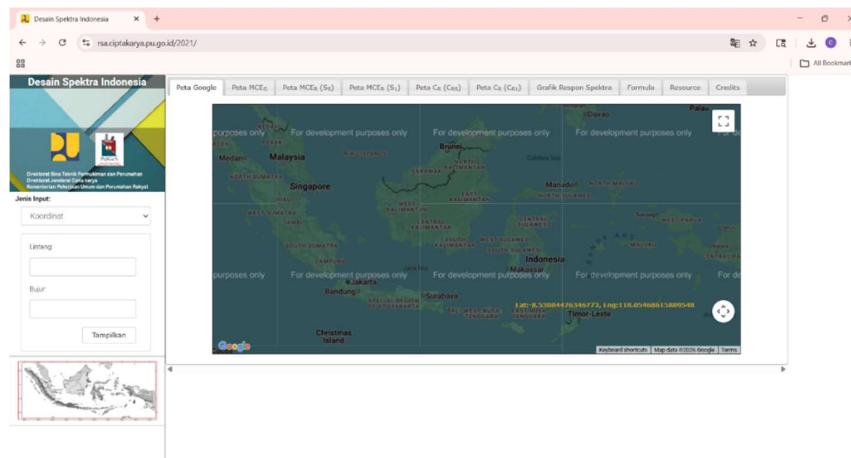
Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber: SNI 1726:2019 Tabel 4

Berikut merupakan langkah-langkah mengeluarkan beban gempa dari RSA Cipta Karya:

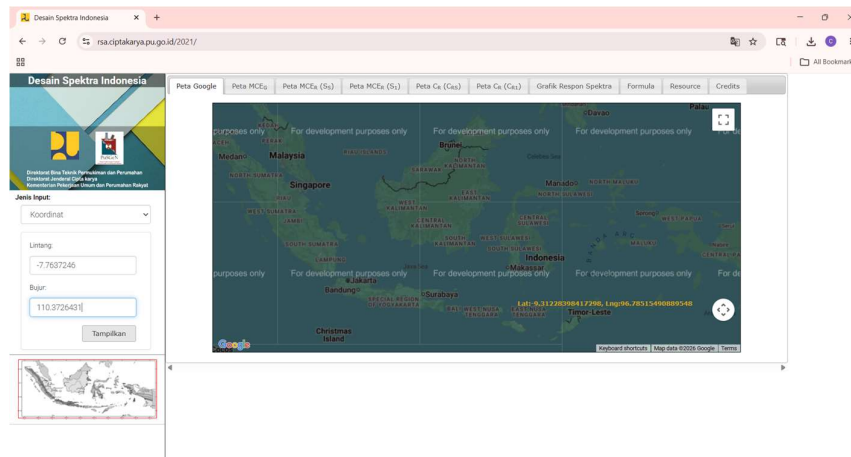
- Membuka laman RSA Cipta Karya (<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>).

Gambar 2.7 dibawah ini menampilkan langkah membuka laman RSA Cipta Karya.



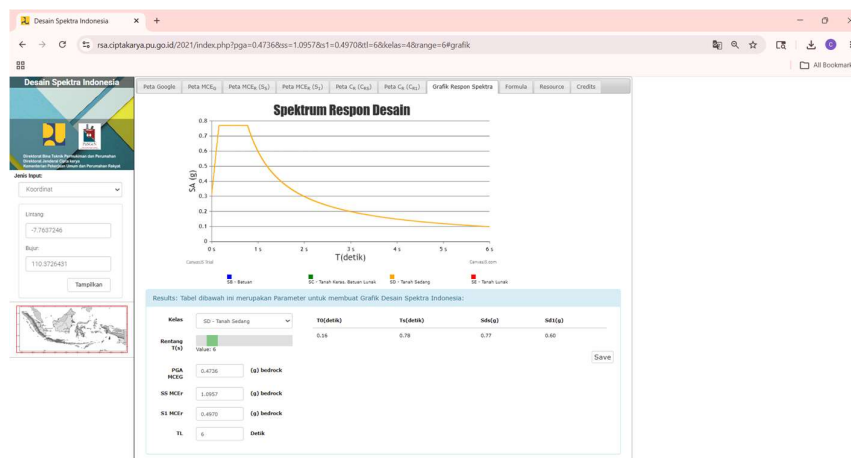
Gambar 2.7 Laman RSA Cipta Karya

- Memasukkan nama kota atau titik koordinat, lalu klik tampilkan. **Gambar 2.8** berikut ini menampilkan langkah memasukkan nama kota atau titik koordinat.



Gambar 2.8 Input Koordinat Pada Laman RSA Cipta Karya

- c. Mengganti kelas sesuai dengan data tanah, lalu klik *print* untuk menyimpan *file* dengan format pdf. **Gambar 2.9** dibawah ini menampilkan penginputan kelas sesuai dengan data tanah.



Gambar 2.9 Input Kelas Sesuai Keadaan Tanah

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan aplikasi RSA2019 - Program Respons Spektra Peta Gempa Indonesia 2019 (C) Copyright Puskim-PusGeN-ESRC, 2019-2020 diperoleh kurva dan data respon spektral pada lokasi bangunan yang ditinjau.

2.2.5 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan terbagi menjadi 2 jenis, yaitu kombinasi beban ultimit dan kombinasi beban tegangan izin.

a. Kombinasi beban ultimit

Kombinasi beban ultimit digunakan untuk desain struktur atas dan dasar kombinasi pembebanan diambil dari (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726-2019. Berikut dasar kombinasi beban ultimit yang digunakan dalam analisis ini:

- a. $1,4D$
- b. $1,2D + 1,6L + 0,5L_R$
- c. $1,2D + 1,0L + 1,6 L_R$
- d. $1,2D + 0,5W + 1,6 L_R$
- e. $1,2D + 1,0L + 1,0W + 0,5 L_R$
- f. $0,9D + 1,0W$
- g. $1,2D + 1,0L + 1,0(E_H + E_V)$
- h. $0,9D + 1,0(E_H - E_V)$

Keterangan:

D : *Dead load* mencakup berat sendiri dan beban mati tambahan

L : *Live load* mencakup beban hidup lantai sesuai fungsi ruangan

L_R : *Live load* mencakup beban hidup atap

W : *Wind load*, beban angin

E_H : *Horizontal Earthquake load*, pengaruh gempa horizontal

E_V : *Vertical Earthquake load*, pengaruh gempa vertikal

b. Kombinasi beban tegangan izin

Kombinasi beban tegangan izin digunakan untuk desain struktur bawah (fondasi) yang diambil dari (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 1726-2019 yaitu sebagai berikut:

- a. D
- b. $D + L$
- c. $D + (L_r \text{ atau } R)$
- d. $D + 0,75L + 0,75 (L_r \text{ atau } R)$

- e. $D + 0,6 W$
- f. $D + 0,75L + 0,75 (L_r \text{ atau } R) + 0,75 (0,6 W)$
- g. $0,6D + 0,6 W$
- h. $1,0D + 0,7E_V + 0,7E_H$
- i. $1,0D + 0,75L + 0,525E_H + 0,525E_V$
- j. $0,6D - 0,7E_V + 0,7E_H$

Keterangan:

D : *Dead load* mencakup berat sendiri dan beban mati tambahan

L : *Live load* mencakup beban hidup lantai sesuai fungsi ruangan

L_R : *Live load* mencakup beban hidup atap

W : *Wind load*, beban angin

E_H : *Horizontal Earthquake load*, pengaruh gempa horizontal

E_V : *Vertical Earthquake load*, pengaruh gempa vertikal

2.3 ETABS

Berdasarkan *website* resmi (Computers and Structures, 2026) *web.wiki.csiamerica.com*, *ETABS (Extended Three-dimensional Analysis of Building Systems)* adalah perangkat lunak terintegrasi untuk pemodelan, analisis, desain, dan pelaporan struktur gedung bertingkat dalam satu antarmuka tunggal. Program ini mendukung analisis statis dan dinamis tingkat lanjut, termasuk penilaian seismik menggunakan metode *time-history* dan efek P-Delta. Kemampuannya menangkap nonlinieritas material melalui engsel nonlinier memungkinkan evaluasi akurat untuk berbagai skala struktur, dari rangka sederhana hingga gedung pencakar langit.

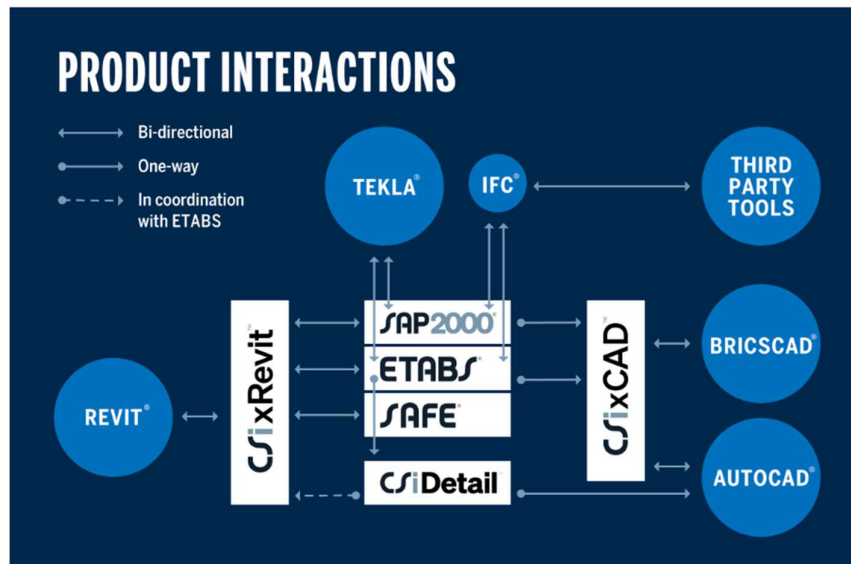


Gambar 2.10 Logo *ETABS*

Sumber: Google (2026)

Efisiensi desain didukung oleh fitur *Interactive Database Editing* yang mempercepat modifikasi model melalui tabel data secara langsung. *ETABS* menyediakan kapabilitas desain otomatis untuk rangka baja, beton, pelat, dinding geser, hingga balok komposit berdasarkan berbagai standar kode internasional (ASCE, ACI, dll.). Sistem ini memastikan optimasi dimensi elemen dan penulangan dilakukan secara presisi sesuai dengan kriteria kinerja yang diinginkan.

Untuk kebutuhan dokumentasi, *ETABS* menyajikan *output* visual berupa diagram gaya dalam dan animasi respons struktur yang dapat diatur ke dalam laporan teknis. Selain itu, aspek interoperabilitas BIM memungkinkan kolaborasi yang efisien antar tim teknis melalui pertukaran data dengan perangkat lunak lain seperti *SAFE* atau platform BIM lainnya. Hal ini menjadikannya alat yang produktif untuk menghasilkan desain yang terkoordinasi dan menyeluruh.



Gambar 2.11 Interoperabilitas BIM dengan CSI
Sumber: csiamerica.com (2026)

Sebagai implementasi dalam proyek, analisis model struktur pertama kali dilakukan melalui perangkat lunak *ETABS* untuk mensimulasikan kondisi struktur sebenarnya secara 3D. Tahap ini mencakup analisis pembebanan yang meliputi beban mati, beban hidup, beban angin, hingga beban gempa untuk merencanakan elemen struktur seperti balok, kolom, dan dinding geser. Melalui proses ini, perencanaan bangunan dapat dipastikan aman, kuat, dan efisien sesuai dengan SNI (Standar Nasional Indonesia).



Gambar 2.12 Tampilan Awal Software *ETABS*

2.4 Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus atau SRPMK

Menurut (Ageta dkk., 2018), Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) merupakan susunan elemen struktural yang didesain secara spesifik untuk menahan beban lateral akibat gempa dengan mengandalkan kapasitas penampang terhadap kombinasi aksi lentur, geser, serta gaya aksial secara terintegrasi. Struktur ini disiapkan secara khusus untuk menghadapi guncangan gempa yang ekstrem dengan cara mempertahankan fleksibilitasnya meskipun telah melewati batas elastisnya (respons inelastis) (Hirel dkk., 2018).

Konsep operasional yang digunakan dalam SRPMK adalah *strong column-weak beam*, yang mensyaratkan bahwa kolom harus didesain lebih kuat dibandingkan balok, tujuannya adalah agar simpangan antar lantai tersebar merata dan mencegah gedung runtuh secara mendadak pada satu lantai tertentu (Hirel dkk., 2018). Penerapan SRPMK pada suatu struktur gedung bertujuan untuk meminimalisir kegagalan konstruksi yang ditimbulkan oleh gaya gempa serta bertujuan agar elemen kolom dan balok dapat mendisipasi energi yang terjadi pada saat gempa berlangsung melalui pembentukan sendi-sendi plastis (Magfiroh dkk., 2025).

Berdasarkan **Tabel 2.10**, beberapa sistem pemikul gaya seismik diizinkan untuk KDS D. Sistem ganda menggabungkan rangka pemikul momen khusus dengan dinding geser beton bertulang khusus ($R = 7$; $\Omega_0 = 2,5$; $C_d = 5,5$), dengan syarat rangka mampu memikul paling sedikit 25% gaya seismik desain. SRPMK tanpa dinding geser ($R = 8$; $\Omega_0 = 3$; $C_d = 5,5$) memikul seluruh gaya seismik melalui aksi lentur rangka, sehingga struktur lebih lentur. Sistem rangka pemikul momen beton bertulang biasa (SRPMB) dan menengah (SRPMM) tidak diizinkan pada KDS D. Penelitian ini mengevaluasi alternatif SRPMK tanpa dinding geser ($R = 8$; $\Omega_0 = 3$; $C_d = 5,5$) (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

2.5 Sambungan Baja dan Penulangan Struktur Atas

2.5.1 Sambungan Baja Menggunakan Idea StatiCa

Sambungan merupakan bagian struktur baja yang menyalurkan gaya dalam antarkomponen, sehingga kekuatan dan kekakuannya menentukan apakah asumsi

perletakan pada model analisis struktur dapat terwujud. Di Indonesia, perencanaan sambungan baja mengacu pada SNI 1729:2020 yang mengadopsi AISC 360-16 dengan metode Desain Faktor Beban dan Ketahanan (DFBK), yaitu kekuatan desain ϕR_n tidak boleh kurang dari kekuatan perlu R_u (American Institute of Steel Construction, 2016; Badan Standardisasi Nasional, 2020). Berdasarkan perilaku momen–rotasinya, sambungan diklasifikasikan menjadi sambungan sederhana (geser), sambungan momen tertahan penuh (*fully restrained*, FR), dan sambungan momen tertahan sebagian (*partially restrained*, PR). Klasifikasi ini ditentukan oleh kekakuan sekan sambungan (K_s) relatif terhadap kekakuan lentur komponen yang disambung; sambungan dapat dianggap FR apabila $K_s L/EI \geq 20$ dan dapat dianggap sederhana apabila $K_s L/EI \leq 2$ (American Institute of Steel Construction, 2016; Salmon dkk., 2009).

Metode analitis konvensional memeriksa setiap komponen sambungan secara terpisah menggunakan persamaan yang diturunkan dari konfigurasi standar, sehingga sulit diterapkan pada geometri yang tidak baku dan tidak menangkap interaksi antarkomponen. Metode elemen hingga berbasis komponen (*Component-Based Finite Element Method*, CBFEM) mengatasi keterbatasan tersebut dengan memodelkan pelat sebagai elemen cangkang elastoplastis, sedangkan baut, las, dan angkur dimodelkan sebagai komponen pegas nonlinear yang kekuatannya diperiksa menurut standar desain. Pelat dinyatakan memenuhi apabila regangan plastis yang terjadi tidak melampaui batas 5%, sehingga sambungan dengan geometri kompleks dapat dianalisis secara konsisten dengan prosedur standar desain (Šabatka dkk., 2015). Kasus validasi dan verifikasi CBFEM untuk sambungan las, sambungan baut, dan pelat dasar kolom terhadap standar desain, hasil uji laboratorium, dan model numerik penelitian telah dihimpun oleh (Wald dkk., 2021). Metode inilah yang diimplementasikan dalam perangkat lunak *IDEA StatiCa* yang digunakan pada penelitian ini.

Berdasarkan *website* resmi dari (Idea Statica, 2026) *ideastatica.com*, *IDEA StatiCa* adalah perangkat lunak desain struktur yang digunakan untuk menganalisis dan memeriksa kekuatan sambungan baja serta elemen beton sesuai standar peraturan yang berlaku. Perangkat lunak ini sangat diandalkan karena mampu

menangani bentuk-bentuk sambungan yang sangat rumit, yang biasanya sulit diselesaikan dengan perhitungan manual atau aplikasi standar lainnya. Dengan menggunakan metode analisis elemen hingga (CBFEM), program ini dapat memberikan gambaran akurat mengenai kekuatan tiap komponen sambungan, namun pengguna tetap memerlukan pemahaman teknik yang baik untuk memasukkan data dan membaca hasil analisisnya dengan benar.



Gambar 2.13 Logo *idea StatiCa*

Sumber: ideastatica.com (2026)

Dalam desain sambungan baja, *IDEA StatiCa* memungkinkan pengguna untuk merancang berbagai bentuk sambungan, mulai dari baut, las, pelat dasar (*base plate*), hingga sistem penjangkaran baut pada fondasi. Program ini dapat menghitung distribusi tegangan dan regangan secara mendalam, serta memeriksa risiko tekuk (*buckling*) dan kekakuan sambungan untuk memastikan kapasitas beban desain sudah aman. Selain itu, pengguna dapat mengatur titik pembebanan pada elemen struktur sesuai dengan kebutuhan atau aturan standar tertentu seperti *AISC* atau *Eurocode*.



Gambar 2.14 Tampilan Awal *Software idea StatiCa*

Selain untuk baja, *IDEA StatiCa* juga menyediakan solusi untuk merancang elemen beton bertulang, terutama pada area-area kritis yang bentuknya tidak seragam seperti dinding panel, balok berlubang, atau kepala tiang fondasi (*pile caps*). Perangkat lunak ini akan menghasilkan laporan lengkap mengenai pengecekan kekuatan struktur serta tingkat kelayakan, termasuk pemantauan terhadap lendutan dan lebar retak pada beton agar sesuai dengan SNI (Standar Nasional Indonesia).

Keunggulan utama lainnya adalah kemampuan *IDEA StatiCa* untuk terhubung dengan perangkat lunak lain seperti *ETABS*, dan *Revit*. Interoperabilitas antar aplikasi ini memudahkan pemindahan data hasil analisis gedung langsung ke desain sambungan, sehingga mengurangi risiko kesalahan input data manual dan mempercepat waktu pengerjaan desain secara signifikan. Hal ini menjadikan *IDEA StatiCa* sebagai alat yang sangat membantu dalam menyelesaikan desain struktur yang kompleks secara lebih produktif, aman, dan efisien.

2.5.2 Penulangan Pelat

Perancangan penulangan pada pelat dilakukan untuk memastikan kapasitas lentur penampang mampu memikul beban desain dengan tetap memperhatikan batasan layan dan daktilitas.

1. Batasan geometris dan minimum penulangan

Berdasarkan SNI 2847:2019, pendistribusian tulangan pada pelat harus memenuhi kriteria berikut:

- a. Pada pasal 8.7.2.2, jarak antar tulangan ($s_{\max}$) tidak boleh melampaui nilai terkecil antara dua kali tebal pelat ($2h$) atau 450 mm.
- b. Untuk mengendalikan retak akibat susut dan suhu, luas penulangan minimum disyaratkan sesuai dengan mutu baja (f_y) yang digunakan (sebagaimana tercantum pada Tabel 7.6.1.1 SNI 2847:2019).

2. Analisis dimensi efektif dan kebutuhan tulangan

Pemenuhan luas penampang tulangan lentur minimum ($A_{s\min}$) wajib merujuk pada kriteria dalam Tabel 7.6.1.1, yang mempertimbangkan nilai tegangan

leleh baja (f_y) untuk menentukan rasio tulangan terhadap luas bruto penampang beton (A_g).

Tabel 2.15 $A_{s_{min}}$ untuk Pelat Satu Arah dan Dua Arah Nonprategang

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

Sumber: SNI 2847:2019

3. Kalkulasi tinggi efektif penampang

Penentuan tinggi efektif (d) dihitung dengan mereduksi tebal total pelat (h) terhadap selimut beton (c_c), diameter tulangan utama (d_b), serta setengah dari diameter tulangan yang digunakan guna mendapatkan jarak dari serat tekan terluar ke pusat berat tulangan tarik.

$$d = h - C_c - d_b - \frac{d_b}{2} \quad (2.20)$$

Keterangan:

d = tinggi efektif penampang pelat

cc = selimut beton

h = tebal pelat

db = diameter tulangan

4. Perhitungan kebutuhan jumlah tulangan

Jumlah batang tulangan dalam satuan satu meter lebar pelat (n) ditentukan dengan membagi lebar tinjauan (b) terhadap jarak antar tulangan (s) yang diimplementasikan dalam perencanaan.

$$n = \frac{b}{s} \quad (2.21)$$

Keterangan:

n = jumlah tulangan dalam 1 meter

s = jarak tulangan yang dipakai

5. Kalkulasi luas tulangan terpasang ($A_{s_{pasang}}$)

Luas total tulangan yang diimplementasikan dihitung berdasarkan jumlah batang tulangan (n) dikalikan dengan luas penampang per satu batang tulangan.

Nilai As_{pasang} yang diperoleh wajib divalidasi agar memenuhi kriteria luas tulangan minimum yang dipersyaratkan guna menjamin keamanan kapasitas lentur struktur.

$$As_{pasang} = n \times \frac{\pi}{4} \times d_b^2 \quad (2.22)$$

6. Penentuan kedalaman blok tekan beton (a)

Tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen ditentukan melalui prinsip keseimbangan gaya antara tarik pada baja tulangan dan tekan pada beton. Parameter ini dihitung dengan membagi gaya tarik total ($As \times f_y$) terhadap kapasitas tekan nominal beton yang mempertimbangkan lebar penampang serta mutu tekan beton (f'_c).

$$a = \frac{As \times f_y}{(0,85 \times f'_c \times b)} \quad (2.23)$$

7. Analisis kapasitas lentur nominal (M_n)

Kekuatan lentur nominal penampang terpasang ditetapkan dengan mengalikan gaya tarik baja tulangan terhadap lengan momen internal, yang merupakan selisih antara tinggi efektif penampang (d) dengan setengah dari kedalaman blok tekan (a/2).

$$M_n = \frac{As \times f_y}{\left(d - \frac{a}{2}\right)} \quad (2.24)$$

8. Penentuan kapasitas lentur rencana (ϕM_n)

Kekuatan lentur nominal yang telah dihitung sebelumnya harus dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan (ϕ) guna mengakomodasi ketidakpastian material dan pelaksanaan di lapangan. Besaran koefisien ϕ ditentukan berdasarkan kondisi regangan tarik netto (ϵ_t) pada tulangan terluar, dengan merujuk pada **Tabel 2.16**. Tabel berikut menunjukkan nilai faktor reduksi kekuatan untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial untuk mengklasifikasikan apakah penampang bersifat tension-controlled, transisi, atau *compression-controlled*.

Tabel 2.16 Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ) untuk Momen, Gaya Aksial, atau Kombinasi Momen dan Gaya Aksial

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

Sumber: SNI 2847:2019

$$\phi \times Mn \quad (2.25)$$

9. Identifikasi beban momen ultimit (M_u)

Nilai beban momen terfaktor atau momen ultimit diperoleh melalui hasil analisis struktur menggunakan perangkat lunak *ETABS*. Parameter ini merepresentasikan gaya dalam maksimum yang bekerja pada pelat akibat kombinasi pembebanan rencana yang telah ditetapkan.

10. Verifikasi keamanan struktur

Tahap akhir evaluasi dilakukan dengan membandingkan kapasitas lentur tereduksi terhadap momen ultimit untuk memastikan bahwa $\phi Mn \geq M_u$. Terpenuhinya kriteria ini menunjukkan bahwa desain penampang pelat telah memiliki cadangan kekuatan yang memadai untuk memikul beban kerja yang direncanakan sesuai standar keamanan gedung. Nilainya diperoleh dari *output ETABS*.

2.5.3 Penulangan Balok

Luas tulangan lentur minimum ($A_{s, \min}$) pada komponen struktur balok ditetapkan untuk mencegah kegagalan getas saat beton mencapai kapasitas tarik maksimumnya. Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2, nilai $A_{s, \min}$ harus diambil dari nilai terbesar antara dua persamaan berikut:

$$a. \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} bw \times d \quad (2.26)$$

$$b. \frac{1,4}{f_y} bw \times d \quad (2.27)$$

Selain batasan minimum, terdapat regulasi mengenai rasio penulangan (ρ) di mana nilai maksimum tidak diperkenankan melampaui 0,025. Secara praktis, sekurang-kurangnya harus disediakan dua batang tulangan kontinu pada sisi atas dan bawah penampang balok.

2. Analisis perhitungan penulangan lentur

Penentuan kebutuhan tulangan pada daerah tumpuan maupun lapangan didasarkan pada kekuatan momen nominal (M_n) yang diperlukan, dengan mempertimbangkan faktor reduksi kekuatan (ϕ) melalui persamaan:

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} \quad (2.28)$$

$$R_n = \frac{M_u}{b \times d^2} \quad (2.29)$$

$$\rho = \frac{1}{mn} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mn \times R_n}{f_y}} \right) \quad (2.30)$$

$$\rho b \frac{0,85 \times \beta_1 \times f'c}{f_y} = \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (2.31)$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.32)$$

Untuk menjamin perilaku daktail pada struktur Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), pendistribusian luas tulangan (A_s) wajib memenuhi regulasi (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 2847:2019 Pasal 18.6.3.2, sebagai berikut:

a. Kapasitas momen positif tumpuan

Luas tulangan lentur positif pada muka tumpuan pada muka tumpuan tidak boleh kurang dari setengah ($1/2$) luas tulangan negatif yang disediakan pada muka tumpuan yang sama.

b. Kapasitas momen minimum sepanjang bentang

Luas tulangan positif maupun negatif pada setiap penampang di sepanjang bentang komponen struktur tidak boleh kurang dari seperempat (1/4) luas tulangan maksimum yang terdapat pada kedua muka tumpuan.

3. Analisis perhitungan penulangan transversal balok

Dalam menentukan kebutuhan tulangan transversal atau sengkang bertujuan untuk memikul gaya geser yang tidak dapat ditahan sepenuhnya oleh penampang beton. Dalam analisis ini, gaya geser ultimit (V_u) pada daerah tumpuan maupun lapangan diperoleh melalui hasil pemodelan menggunakan perangkat lunak *ETABS*.

a. Analisis Kapasitas Geser Nominal (V_n)

Kekuatan geser nominal penampang merupakan akumulasi dari kontribusi material beton (V_c) dan kontribusi baja tulangan transversal (V_s), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.33)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \times bw \times d \quad (2.34)$$

Adapun kapasitas geser yang disumbangkan oleh beton (V_c) dihitung berdasarkan persamaan:

$$V_{s, \min} = \frac{1}{3} \times bw \times d \quad (2.35)$$

$$V_{s, \max} = \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} \times bw \times d \quad (2.36)$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \quad (2.37)$$

Kebutuhan tulangan geser (V_s) dan luas tulangan geser minimum ($A_{v, \min}$) diformulasikan melalui hubungan:

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s} \quad (2.38)$$

$$A_{v, \min} = \frac{bw \times s}{3 \times f_y} \quad (2.39)$$

b. Evaluasi Kondisi Penulangan Geser

Penentuan kebutuhan sengkang dilakukan dengan mengevaluasi gaya geser ultimat (V_u) terhadap kapasitas reduksi beton (ϕV_c) melalui beberapa kategori kondisi:

1) Kondisi I ($V_u \leq 0,5 \times \phi \times V_c$)

Pada kondisi ini, secara teoritis tidak diperlukan tulangan geser tambahan karena beton dianggap mampu memikul beban geser secara mandiri.

2) Kondisi II ($0,5 \times \phi \times V_c \leq V_u \leq \phi \times V_c$)

Meskipun gaya geser belum melampaui kapasitas beton, penggunaan tulangan geser minimum tetap diwajibkan sebagai syarat praktis penulangan.

$$Av_{min} = \frac{bw \times s}{3 \times fy} \quad (2.40)$$

$$Vs_{min} = \frac{1}{3} \times bw \times d \quad (2.41)$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm} \quad (2.42)$$

3) Kondisi III ($\phi \times V_c < V_u \leq \phi (V_c + Vs_{min})$)

Apabila beban geser terfaktor melampaui kapasitas reduksi beton namun masih di bawah ambang batas kontribusi minimum baja, maka struktur wajib dilengkapi dengan tulangan geser minimum.

$$Av_{min} = \frac{bw \times s}{3 \times fy} \quad (2.43)$$

$$Vs_{min} = \frac{1}{3} \times bw \times d \quad (2.44)$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm} \quad (2.45)$$

4) Kondisi IV ($\phi(V_c + Vs_{min}) < V_u$)

Pada kondisi di mana beban geser melebihi kapasitas kombinasi beton dan tulangan minimum, maka diperlukan perhitungan tulangan geser sengkang (V_{sperlu}) secara spesifik.

$$\phi \times Vs_{perlu} = V_u - \phi \times V_c \quad (2.46)$$

$$V_s = \frac{Av \times fy \times f}{s} \quad (2.47)$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm} \quad (2.48)$$

$$5) \text{ Kondisi } V \left(\phi \left(V_c + \frac{1}{3} \sqrt{f'c} \times bw \times d \right) \right) < V_u \leq \phi \left(V_c + \frac{2}{3} \sqrt{f'c} \times bw \times d \right)$$

Apabila kebutuhan kuat geser sengkang (V_s) berada dalam rentang intensitas tinggi sesuai batas atas yang diizinkan, maka komponen struktur tetap dikategorikan memerlukan tulangan geser desain.

$$\phi \times V_{s_{pertu}} = V_u - \phi \times V_c \quad (2.49)$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times f}{s} \quad (2.50)$$

$$S_{max} \leq \frac{d}{2} \text{ dan } S_{max} \leq 600 \text{ mm} \quad (2.51)$$

2.5.4 Penulangan Kolom

Penulangan kolom pada struktur beton bertulang harus memenuhi kriteria kekuatan dan daktilitas sesuai dengan (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 2847:2019. Persyaratan tersebut meliputi penulangan lentur (longitudinal) dan penulangan transversal (sengkang):

1. Penentuan tulangan lentur (longitudinal) kolom

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4.1, luas total penampang tulangan longitudinal (A_{st}) dibatasi dalam rentang rasio penulangan sebagai berikut:

A_{st} tidak boleh $< 0,01 A_g$ dan tidak boleh $> 0,06 A_g$

Sementara itu, kekuatan lentur kolom wajib memenuhi prinsip kapasitas beban yang lebih tinggi dibandingkan balok yang bertemu pada titik buhul (*joint*).

Mengacu pada (Badan Standardisasi Nasional, 2019) SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2, kriteria kekuatan harus memenuhi persamaan:

$$\sum M_{nc} \geq (1,2) \sum M_{nb} \quad (2.52)$$

Keterangan:

$\sum M_{nc}$ = akumulasi kekuatan lentur nominal dari kolom-kolom yang terintegrasi ke dalam hubungan balok-kolom (*joint*),

$\sum M_{nb}$ = akumulasi kekuatan lentur nominal dari seluruh balok yang merangka ke dalam *joint*.

2. Penentuan tulangan transversal kolom

Penggunaan tulangan transversal yang rapat pada area kritis bertujuan untuk memberikan pengekangan (*confinement*) pada inti beton dan mencegah tekuk pada tulangan longitudinal saat terjadi leleh lentur. Panjang penyaluran pengekang (l_0) pada kedua ujung kolom harus diambil berdasarkan nilai terbesar dari:

- a. Dimensi penampang kolom pada muka hubungan balok-kolom (*joint*).
- b. $1/6$ dari tinggi bersih kolom.
- c. 450 mm.

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.2, tulangan transversal kolom harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:

- a. Setiap sudut sengkang pengekang persegi maupun ikat silang wajib mengait pada batang tulangan longitudinal terluar secara efektif.
- b. Pengaturan tulangan harus dipastikan sedemikian rupa sehingga jarak horizontal antara batang tulangan longitudinal yang ditopang secara lateral oleh sudut pengikat silang atau kaki sengkang tidak melampaui ambang batas 350 mm.
- c. Jarak horizontal (h_x) antar tulangan yang terkekang secara lateral tidak diperkenankan melampaui 200 mm.
- d. Evaluasi gaya tekan aksial (P_u) wajib didasarkan pada kombinasi beban terfaktor yang memperhitungkan pengaruh beban gempa (E).

Selain penentuan panjang daerah pengekangan (l_0) sesuai regulasi Pasal 18.7.5.1, komponen kolom diwajibkan menggunakan tulangan transversal berupa sengkang atau spiral yang memenuhi kriteria Pasal 25.7.2 hingga 25.7.4. Penetapan spasi sengkang (s) disyaratkan tidak boleh melebihi nilai minimum dari parameter berikut:

- a. Enam kali diameter batang tulangan longitudinal terkecil ($6(d_b)$).
- b. 150 mm.

Ketentuan spasi tersebut dapat mengalami penyesuaian (eksepsi) apabila analisis kebutuhan tulangan transversal berdasarkan Pasal 18.7.4.3 atau Pasal

18.7.6 mensyaratkan jumlah tulangan yang lebih besar guna menjamin stabilitas struktur.

2.6 Fondasi dan *Tie Beam*

Sebagai penyokong utama bangunan, fondasi atau struktur bawah (*sub-structure*) berperan penting dalam menyalurkan beban dari struktur atas menuju lapisan tanah di bawahnya. Menurut (Candra dkk., 2018), penyaluran beban ini harus dilakukan sedemikian rupa untuk mencegah terjadinya keruntuhan akibat pergeseran tanah serta menghindari penurunan fondasi yang ekstrem. Berdasarkan tingkat kedalamannya, fondasi terbagi menjadi fondasi dangkal dan fondasi dalam. Dalam perancangan ulang ini, alternatif yang dipilih adalah fondasi dalam menggunakan fondasi *borepile*.

Pemilihan fondasi *borepile* untuk proyek redesain gedung *Cadaster and Geoinformatics Engineering* UGM didasarkan pada kondisi spesifik lokasi dan fungsi bangunan. Mengingat lokasi pembangunan berada di kawasan Bulaksumur yang merupakan lingkungan kampus padat infrastruktur dan aktif, penggunaan *borepile* menjadi pilihan ideal karena sifatnya yang rendah getaran sehingga meminimalisir risiko kerusakan pada gedung-gedung universitas di sekitarnya. Selain itu, dengan karakteristik tanah di wilayah Sleman serta tuntutan beban gedung laboratorium yang signifikan, metode ini memungkinkan penetrasi yang lebih presisi ke lapisan tanah keras guna menjamin stabilitas bangunan terhadap beban vertikal maupun beban lateral akibat aktivitas seismik.

2.6.1 Fondasi *Borepile*

Menurut penelitian oleh (I Wayan Jawat dkk., 2020), fondasi *borepile* diklasifikasikan sebagai fondasi dalam yang pada metode pelaksanaannya dimulai dengan melakukan pengeboran tanah hingga mencapai kedalaman yang direncanakan, kemudian dilanjutkan dengan pemasangan rangkaian baja tulangan dan pengecoran beton secara langsung di tempat (*cast-in-situ*). Secara fungsional,

sistem fondasi ini dirancang untuk menyalurkan beban dari struktur atas menuju lapisan tanah keras atau batuan dasar yang letaknya relatif jauh dari permukaan tanah. Pemilihan jenis fondasi ini umumnya didasarkan pada besaran beban yang harus didukung, kondisi geoteknik di lokasi proyek, serta pertimbangan efisiensi biaya konstruksi.

Menurut (I Wayan Jawat dkk., 2020), pemanfaatan fondasi ini dalam proyek konstruksi menawarkan sejumlah keunggulan strategis dibandingkan dengan sistem fondasi tiang pancang, antara lain:

1. Proses pemasangan tidak menimbulkan getaran ekstrem maupun kebisingan tinggi yang dapat membahayakan atau mengganggu stabilitas bangunan di sekitarnya.
2. Kedalaman dan diameter tiang dapat divariasikan secara fleksibel, bahkan memungkinkan pembuatan tiang berdiameter besar dengan ujung bawah yang diperlebar untuk meningkatkan kapasitas dukung structural.
3. Sistem ini mampu menembus lapisan batuan keras yang sering kali menjadi hambatan pada metode pemancangan konvensional.
4. Selama proses pengeboran, karakteristik tanah yang terangkat dapat diperiksa secara langsung untuk divalidasi dengan data laboratorium, sehingga menjamin akurasi perencanaan struktur bawah.
5. Penggunaan metode ini tidak menimbulkan risiko kenaikan muka tanah (*ground heave*) yang biasanya terjadi akibat desakan tanah pada pemasangan tiang pancang.

2.6.2 Menentukan *P-Y Curve* Menggunakan *Lpile*

Konsep *p-y curve* (kurva *p-y*) merupakan metode analitis yang merepresentasikan interaksi antara tanah dan fondasi tiang akibat gaya lateral. Dalam pendekatan ini, tahanan tanah lateral disimulasikan sebagai serangkaian pegas non-linier independen (*Winkler springs*), di mana persamaan diferensial balok-kolom diselesaikan untuk mendapatkan respons tiang (Lin dkk., 2016). Perangkat lunak seperti *Lpile* memanfaatkan formulasi kurva *p-y* empiris seperti kurva Matlock

untuk tanah lempung lunak guna memprediksi secara numerik defleksi lateral, gaya geser, dan momen lentur maksimum pada fondasi tiang (Lin dkk., 2016; Shahriar dkk., 2023).



Gambar 2.15 Logo Software *LPile*

Sumber: Google (2026)

Dalam analisis pembebanan lateral, ketidakpastian parameter tanah di sekitar tiang sangat memengaruhi keandalan desain fondasi. Metode kurva p - y ini kini secara luas diintegrasikan dengan analisis probabilistik pada kerangka *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) untuk mengevaluasi probabilitas pelampauan batas kapasitas (Shahriar dkk., 2023). Penggunaan kurva p - y dalam evaluasi gaya lateral terbukti esensial dalam memprediksi defleksi kepala tiang yang dapat meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan target indeks keandalan pada analisis struktur (Shahriar dkk., 2023).

Akurasi pemodelan p - y curve juga sangat bergantung pada kondisi batas di sekitar tiang. Sebagai contoh, modifikasi kurva p - y perlu dilakukan untuk memperhitungkan hilangnya lapisan tanah pendukung secara parsial, di mana pengabaian dimensi geometri kehilangan tanah ini dalam analisis dapat menghasilkan prediksi defleksi lateral kepala tiang 10-19% lebih besar dari kondisi aktual (Lin dkk., 2016). Pada skala sistem fondasi yang lebih kompleks seperti *piled-raft*, ketahanan terhadap kombinasi beban vertikal, lateral, dan momen lentur dapat dioptimalkan melalui prosedur desain yang probabilistik guna mengontrol batas penurunan diferensial secara ketat (Ravichandran dkk., 2018).

2.6.3 Analisis Penurunan Fondasi Menggunakan *Plaxis*

Evaluasi penurunan fondasi merupakan aspek fundamental dalam desain geoteknik, mencakup penurunan segera (*immediate settlement*), konsolidasi primer, dan rangkai (*creep*). *Plaxis* merupakan perangkat lunak metode elemen hingga (*Finite Element Method*) yang dikembangkan khusus untuk aplikasi geoteknik, memungkinkan simulasi deformasi kompleks baik dalam pemodelan 2D maupun 3D (Bahloul, 2022; Filipović dkk., 2026; Hussain Bhutto dkk., 2019). Perangkat lunak ini memfasilitasi analisis aliran air tanah dan deformasi yang tergabung secara penuh (*fully coupled flow-deformation*), sehingga perilaku penurunan tanah akibat beban struktural dapat diprediksi secara kronologis (Bahloul, 2022; Intui dkk., 2025).



Gambar 2.16 Logo Software *Plaxis 3D*

Sumber: Google (2026)

Keakuratan prediksi penurunan di dalam *Plaxis* sangat bergantung pada ketepatan pemilihan model konstitutif tanah. Model linier elastis plastis sempurna seperti *Mohr-Coulomb* (MCM) sering digunakan untuk analisis awal karena kesederhanaan parameternya, namun model ini terbukti dapat menghasilkan overestimasi penurunan pada material fondasi tertentu (Hussain Bhutto dkk., 2019) dan sering kali menunjukkan perilaku pantulan (*rebound*) yang tidak realistis pada kondisi tanah lunak di bawah fluktuasi air tanah (Intui dkk., 2025). Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, *Plaxis* menyediakan model lanjutan seperti *Hardening Soil* (HSM), *Soft Soil* (SS), dan *Soft Soil Creep* (SSC) (Hussain Bhutto dkk., 2019; Intui dkk., 2025; Jallow dkk., 2019). Model HSM mampu menangkap perilaku kekakuan yang bergantung pada tegangan (*stress-dependent stiffness*) dan sejarah tegangan (OCR) secara otomatis, sehingga menghasilkan kurva penurunan yang jauh lebih realistis dibandingkan MCM (Intui dkk., 2025). Sementara itu,

model SSC sangat krusial digunakan pada lapisan tanah berbutir halus yang tebal, karena mampu menyimulasikan kompresi sekunder di mana deformasi rangkakan (*creep*) dapat menyumbang persentase penurunan yang jauh lebih besar daripada konsolidasi primer (Jallow dkk., 2019).

Selain pemilihan model konstitutif, akurasi pemodelan *Plaxis* harus selalu divalidasi dengan observasi aktual di lapangan, seperti data instrumen maupun pengukuran geodetik (Bahloul, 2022; Filipović dkk., 2026). Proses homogenisasi tanah dan idealisasi material dalam perangkat lunak secara inheren dapat memicu penyimpangan nilai prediksi terhadap deformasi aktual (Filipović dkk., 2026). Oleh karena itu, pembaruan model numerik secara dinamis (*dynamic updating*) berdasarkan rekaman deformasi lapangan sangat diperlukan untuk memastikan keandalan prediksi deformasi interaksi tanah-struktur, dibantu dengan fitur perbaikan kalkulasi *updated mesh* yang disediakan oleh *Plaxis* untuk mengakomodasi deformasi berlebih (Bahloul, 2022; Filipović dkk., 2026).

2.6.4 Menentukan Kapasitas *Punching Shear Pile Cap* Menggunakan *SAFE*

Kapasitas geser pons (*punching shear*) merupakan fenomena keruntuhan struktural getas (*brittle*) yang memicu hilangnya kapasitas geser secara total pada sambungan, yang dapat berujung pada keruntuhan progresif struktur (Akinpelu dkk., 2023; Wahab dkk., 2024). Dalam desain struktur *pile cap*, keruntuhan ini rentan terjadi di sekitar perimeter pilar utama maupun di area kontak tiang pancang. Berdasarkan pedoman empiris SNI 2847:2013 (yang merujuk pada standar ACI 318), kuat geser nominal beton (V_c) dalam menahan geser dua arah ditentukan dengan mengambil nilai terkecil dari tiga persamaan (Reformasi Gea & Leo, 2019):

$$V_c = 0.33\lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_0 d \quad (2.53)$$

$$V_c = 0.083 \times \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} \times b_0 d \quad (2.54)$$

$$V_c = 0.17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \sqrt{f'_c} \times b_0 d \quad (2.55)$$

Keterangan:

- V_c = Kuat geser nominal beton
 λ = Faktor modifikasi beton ringan
 b_0 = Keliling penampang kritis sejauh $0.5d$ dari muka tumpuan
 d = Tebal efektif pelat
 α_s = Konstanta letak kolom
 β = Rasio dimensi area beban



Gambar 2.17 Logo Software CSI SAFE

Sumber: Google (2026)

Meskipun pedoman kode desain konvensional (seperti ACI 318) sering digunakan karena kemudahannya, persamaan empiris tersebut memiliki keterbatasan karena didasarkan pada *data fitting* yang terkadang meremehkan (*underestimate*) atau melebih-lebihkan (*overestimate*) nilai kapasitas geser pons aktual di lapangan (Wahab dkk., 2024). Fenomena geser pons sangat kompleks dan perilakunya sangat dipengaruhi oleh kedalaman efektif pelat, bentuk atau geometri tumpuan, serta mutu beton. Oleh karena itu, untuk menangkap perilaku non-linier beton yang kompleks secara akurat, pendekatan berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis* / FEA) menjadi sangat esensial dan terbukti memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik terhadap hasil eksperimental (Akinpelu dkk., 2023; Wahab dkk., 2024).

Perangkat lunak CSI SAFE mengotomatisasi evaluasi geser pons ini dengan menerapkan prinsip elemen hingga untuk menghitung tegangan aktual (σ_U) akibat kombinasi gaya geser terfaktor dan transfer momen tak seimbang (Reformasi Gea & Leo, 2019). SAFE membandingkan tegangan ini terhadap kapasitas nominal beton untuk menghasilkan rasio geser pons. Jika rasio menunjukkan nilai lebih dari 1, perencana perlu memodifikasi dimensi penampang seperti menambah ketebalan pile cap lokal (analog dengan drop panel) karena modifikasi bentuk dan dimensi

tumpuan terbukti secara signifikan meningkatkan ketahanan kapasitas geser pons pelat beton (Akinpelu dkk., 2023; Reformasi Gea & Leo, 2019).

2.6.5 Penurunan Fondasi (*Settlement*)

Berdasarkan penelitian Pratama (2023), secara umum penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam tiga kelompok besar. Pertama adalah penurunan segera (*immediate settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Kedua yaitu penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume pada tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah. Ketiga adalah penurunan sekunder (*secondary settlement*), yang merupakan pemampatan yang diakibatkan oleh adanya penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah. SNI 8460:2017 menjelaskan bahwa evaluasi terhadap deformasi ini ditinjau melalui dua parameter utama, yaitu penurunan total (*total settlement*) dan beda penurunan (*differential settlement*).

Penurunan total adalah besaran pergerakan vertikal absolut yang dialami oleh fondasi secara seragam. Meskipun seluruh bagian bangunan mengalami penurunan bersamaan, besaran ini harus dibatasi agar tidak mengganggu sistem utilitas dan fungsi operasional bangunan. Merujuk pada SNI 8460:2017 Pasal 9.2.4.3, penurunan total yang diizinkan untuk bangunan tinggi dibatasi dengan ketentuan seperti pada rumus (2.56) dengan syarat mutlak bahwa struktur atas harus dibuktikan masih dalam kondisi aman.

$$S_{terjadi} < S_{max} = 15cm + \frac{b}{600} \quad (2.56)$$

Keterangan:

$S_{terjadi}$ = Nilai penurunan total
 S_{max} = Penurunan Maksimum
 b = Lebar pondasi

Sementara itu, beda penurunan (*differential settlement*) merupakan kondisi yang lebih kritis, terjadi ketika terdapat selisih besaran penurunan antara satu titik pondasi dengan titik pondasi lainnya yang berdekatan. Selisih deformasi ini sangat berbahaya karena dapat memicu tegangan lentur dan geser tambahan pada elemen struktur atas, menghasilkan distorsi sudut, menyebabkan keretakan, hingga memicu kegagalan struktur. Sesuai dengan SNI 8460:2017 Pasal 9.2.4.3, estimasi beda penurunan harus ditentukan secara saksama dan konservatif. Pengaruh distorsi ini wajib diperhitungkan terhadap bangunan gedung tinggi di atasnya guna menjamin pemenuhan kriteria kekuatan dan kemampuan, dengan batas toleransi maksimal sesuai rumus (2.57).

$$\Delta S = \frac{Ln}{300} \quad (2.57)$$

Keterangan:

ΔS = Perbedaan penurunan

Ln = Bentang bersih antar pondasi sesuai penempatan *Tie Beam*

2.6.6 Tie Beam

Berdasarkan ketentuan standar perancangan pada Pasal 18.13.3, balok yang didesain untuk bekerja sebagai pengikat horizontal wajib memiliki tulangan longitudinal yang menerus. Tulangan tersebut harus disalurkan dengan baik ke dalam atau melewati kolom yang ditumpu, serta diangkur secara memadai di dalam *poer* atau fondasi telapak pada semua titik diskontinuitas. Dalam penentuan proporsi ukurannya, dimensi penampang terkecil dari balok pengikat ini harus diproporsikan sama dengan atau lebih besar dari nilai spasi bersih antar kolom yang disambung dibagi dengan dua puluh. Meskipun demikian, batasan dimensi penampang terkecil tersebut tidak diwajibkan untuk melebihi 450 mm agar tetap memberikan proporsi desain yang wajar dan efisien.

Guna menjamin tingkat kekangan yang memadai pada penampang beton, sengkang pengekan tertutup harus dipasang secara konsisten pada balok pengikat. Jarak spasi pemasangan sengkang ini dibatasi agar tidak melebihi nilai terkecil

antara setengah dimensi penampang ortogonal terkecil balok atau 300 mm. Lebih lanjut, apabila *tie beam* tersebut juga menahan tegangan lentur akibat momen dari kolom yang merupakan bagian dari sistem pemikul gaya seismik, maka balok tersebut harus memiliki detail penulangan yang sama ketatnya dengan balok-balok pada sistem rangka di atas fondasi. Pemenuhan kriteria pendetailan ini sangat penting dalam analisis perancangan struktur gedung bertingkat untuk memastikan bahwa elemen bawah mampu beradaptasi dan mendisipasikan gaya seismik tanpa mengalami kegagalan.

2.7 Autodesk Revit

Berdasarkan situs web (Autodesk, 2026) *autodesk.com*, *Autodesk Revit* merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk membantu para profesional menghasilkan bangunan yang lebih baik melalui integrasi alat analisis dan kemampuan menyatukan berbagai dataset dalam satu platform. Fungsi utama perangkat lunak ini adalah memungkinkan arsitek, insinyur, dan profesional konstruksi untuk memodelkan bentuk, struktur, dan sistem dalam format 3D dengan akurasi parametrik, presisi, dan kemudahan yang tinggi.



Gambar 2.18 Logo Autodesk Revit
Sumber: Google (2026)

Keunggulan teknis *Revit* terletak pada kemampuannya merampingkan manajemen proyek melalui fitur revisi instan. Setiap perubahan yang dilakukan pada satu tampilan akan secara otomatis memperbarui rencana, elevasi, jadwal, potongan, lembar kerja, hingga visualisasi 3D secara real-time. Selain itu, *Revit* dilengkapi dengan perangkat komprehensif untuk membuat sketsa, penjadwalan,

berbagi data, anotasi, dan visualisasi yang membantu pengguna mengembangkan dan mengomunikasikan maksud desain (*design intent*) secara efektif.



Gambar 2.19 Tampilan Awal Software Autodesk Revit

Dari aspek kolaborasi, *Autodesk* merancang *Revit* untuk menjaga seluruh tim proyek tetap selaras (*keep teams on the same page*). Dukungan fitur seperti *cloud worksharing* memfasilitasi lingkungan data bersama yang menyatukan tim multidisiplin untuk mencapai efisiensi dan dampak kerja yang lebih tinggi, baik saat berada di kantor maupun di lokasi proyek.

Dengan basis BIM yang dimiliki *Revit*, koordinasi antara gambar denah, potongan, dan detail penulangan dapat dilakukan secara presisi, meminimalisir kesalahan interpretasi, dan memastikan spesifikasi teknis yang direncanakan dapat diaplikasikan dengan akurat di lapangan.

Keunggulan *Revit* dalam ekstraksi volume pekerjaan telah dikaji oleh sejumlah penelitian terdahulu. Dwi Novita & Pangestuti (2021) menggunakan *Autodesk Revit 2019* untuk menghitung volume beton struktur Gedung LP3 Universitas Negeri Semarang, mulai dari *bore pile*, *pile cap*, *tie beam*, kolom, balok, hingga pelat, dengan total 1.647,99 m³ sebagai dasar penyusunan RAB. Rugas dkk.. (2024) memperoleh selisih rata-rata 11,38% antara *quantity take-off* berbasis BIM dan metode konvensional pada pekerjaan struktur, yang menunjukkan kemampuan BIM mengurangi kesalahan perhitungan manual. Johari dan Hakim (2026) melaporkan deviasi volume rata-rata di bawah 5% untuk sebagian besar komponen

struktur, tetapi mencapai –15,32% pada fondasi galeri, sehingga akurasi QTO *Revit* sangat bergantung pada kualitas dan tingkat detail pemodelan.

2.8 Microsoft Excel

Microsoft Excel merupakan perangkat lunak lembar kerja (*spreadsheet*) yang dirancang untuk membantu pengguna dalam mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data secara efisien. *Microsoft Excel* memungkinkan pengguna untuk membuat tabel, melakukan perhitungan kompleks menggunakan rumus dan fungsi teknis, serta menyusun grafik yang profesional untuk mempermudah interpretasi data. Dengan fitur-fitur canggih seperti *PivotTables* untuk ringkasan data, *Power Query* untuk pengambilan data dari berbagai sumber, serta alat analisis statistik, *Microsoft Excel* menjadi standar industri bagi profesional di berbagai bidang untuk mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data.



Gambar 2.20 Logo *Microsoft Excel*
Sumber: Google (2026)

Dalam mendukung alur kerja yang modern, Excel kini dilengkapi dengan fitur kolaborasi *real-time* yang memungkinkan beberapa pengguna bekerja pada dokumen yang sama secara bersamaan melalui platform *cloud*. Perangkat lunak ini juga memiliki tingkat interoperabilitas yang tinggi, di mana data dari Excel dapat dengan mudah diimpor atau diekspor ke berbagai perangkat lunak teknik dan analisis lainnya.

Microsoft Excel berperan penting sebagai alat bantu utama untuk mengolah data hasil analisis dari berbagai perangkat lunak teknik seperti *ETABS*. *Microsoft Excel* digunakan untuk menyusun daftar kebutuhan material (*bill of quantities*),

melakukan perhitungan penulangan manual sebagai pembanding (*check*), serta merapikan data gaya dalam untuk keperluan laporan teknis dan perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Kemampuan *Microsoft Excel* dalam mengotomatisasi perhitungan matematis sangat membantu dalam memastikan ketelitian data sebelum diterjemahkan ke dalam gambar kerja di *Autodesk Revit*.

2.9 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan estimasi biaya yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proyek konstruksi. Perhitungan RAB secara konvensional sering kali menghasilkan ketidakefisienan akibat fragmentasi data dan ketergantungan pada dokumentasi berbasis kertas yang memicu pembengkakan biaya (Pantiga & Soekiman, 2021).

Implementasi BIM 5D mengatasi kendala tersebut dengan mengintegrasikan elemen biaya ke dalam model informasi bangunan sehingga proses ekstraksi volume (*quantity take-off*) menjadi lebih akurat (Mahardika & Windari, 2025). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perhitungan volume material, seperti beton dan tulangan, menggunakan metode BIM menghasilkan nilai yang lebih efisien dengan tingkat ketepatan lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Fitriyono dkk., 2023). Akurasi ini pada akhirnya mampu mengoptimalkan anggaran proyek, meminimalkan pemborosan material, dan meningkatkan efisiensi biaya secara signifikan (Fitriyono dkk., 2023); (Hanifah, 2024).

2.10 Penjadwalan

Penjadwalan merupakan proses pengalokasian waktu untuk setiap aktivitas konstruksi guna memastikan target penyelesaian proyek tercapai tepat waktu (Pantiga & Soekiman, 2021). Dalam ekosistem Building Information Modeling, penjadwalan direpresentasikan melalui dimensi BIM 4D yang mengintegrasikan elemen waktu ke dalam model geometris 3D (Hammes dkk., 2026); (Pantiga & Soekiman, 2021).

Penerapan BIM 4D memungkinkan visualisasi simulasi konstruksi sehingga manajer proyek dapat mengidentifikasi potensi keterlambatan lebih dini dan mengendalikan progres lapangan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi (Hanifah, 2024); (Pantiga & Soekiman, 2021). Integrasi dimensi waktu ini secara signifikan meningkatkan efisiensi manajemen proyek dan memberikan kepastian waktu yang lebih baik dibandingkan metode penjadwalan konvensional (Mahardika & Windari, 2025).

2.11 *Microsoft Project*

Microsoft Project merupakan perangkat lunak manajemen proyek yang dirancang untuk membantu manajer proyek dalam menyusun rencana, menetapkan sumber daya untuk tugas-tugas, melacak kemajuan, mengelola anggaran, dan menganalisis beban kerja. Selain berfungsi dalam penjadwalan, aplikasi ini mampu menghasilkan jaring kerja (*Network Planning*) serta mengidentifikasi jalur kritis. Secara fungsional, program ini menerapkan metodologi *Critical Path Method* (CPM) untuk memetakan rangkaian aktivitas krusial yang menentukan durasi total proyek, sehingga risiko keterlambatan dapat dimitigasi secara dini.



Gambar 2.21 Logo *Microsoft Project*
Sumber: Google (2026)

2.12 *Autodesk Navisworks*

Berdasarkan informasi resmi dari *autodesk.com*, *Navisworks* merupakan perangkat lunak peninjauan dan koordinasi proyek yang dirancang untuk meningkatkan

penyampaian proyek berbasis BIM (*Building Information Modeling*). Secara fungsional, perangkat lunak ini memungkinkan para profesional konstruksi untuk memvisualisasikan dan menyatukan data desain serta konstruksi ke dalam satu model federasi tunggal (Autodesk, 2026).



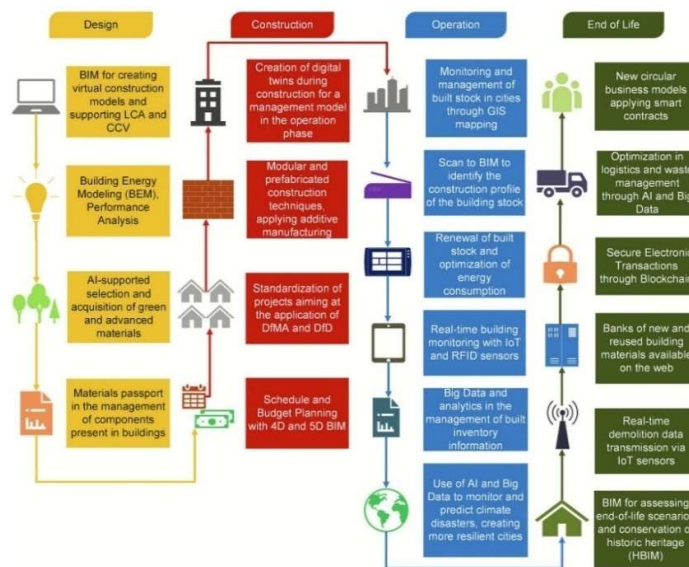
Gambar 2.22 Logo *Navisworks*
Sumber: Google (2026)

Perangkat lunak ini mendukung simulasi 4D dan 5D melalui fitur *TimeLiner* untuk membuat jadwal konstruksi langsung dari model proyek serta mengimpor item biaya dari aplikasi manajemen proyek eksternal. Pengguna juga dapat melakukan kuantifikasi material secara efisien dengan mengukur garis, area, dan jumlah dari lembar kerja 2D maupun model 3D, lalu mengeksport data *takeoff* tersebut ke *Microsoft Excel* untuk analisis lebih lanjut.

Dalam hal interoperabilitas dan kolaborasi, *Navisworks* menawarkan dukungan terhadap lebih dari 60 format file, memungkinkan integrasi berbagai format CAD ke dalam satu aplikasi komprehensif. Perangkat lunak ini juga memiliki integrasi erat dengan ekosistem Autodesk lainnya, seperti *AutoCAD*, *Revit*, dan *ReCap Pro*, serta pembaca file IFC yang telah diperbarui untuk penanganan data yang lebih baik. Melalui integrasi dengan *Autodesk Construction Cloud*, tim lapangan dan studio dapat tetap terhubung guna mengidentifikasi serta menyelesaikan tantangan kemampuan bangun (*constructability*) secara *real-time*, memastikan koordinasi proyek berjalan secara mulus dan transparan.

2.13 BIM (Building Information Modelling)

Building Information Modeling (BIM) adalah teknologi berbasis informasi yang mengintegrasikan sistem desain dan konstruksi secara digital mulai dari fase prakonstruksi hingga konstruksi (Hanifah, 2024). Secara konseptual, BIM merupakan representasi digital dari karakteristik fisik dan fungsional suatu bangunan (Pantiga & Soekiman, 2021). Model ini berfungsi sebagai sumber informasi terpercaya sekaligus landasan pengambilan keputusan sepanjang siklus hidup bangunan, bukan sekadar representasi visual (Pantiga & Soekiman, 2021).



Gambar 2.23 Kerangka Kerja Model Bangunan Sebagai Bank Material dengan Implementasi Teknologi BIM dan Industri 4.0.

Sumber: (J. de Oliveira dkk., 2026)

Menurut penelitian oleh (J. de Oliveira dkk., 2026), Implementasi *Building Information Modeling* (BIM) dalam industri konstruksi modern telah bertransformasi dari sekadar alat pemodelan visual menjadi pusat integrasi data sepanjang siklus hidup proyek. Merujuk pada konsep *Building Model as Material Banks* (BAMB) yang diintegrasikan dengan teknologi Industri 4.0, BIM berperan sebagai basis data digital yang menyimpan informasi material dan komponen bangunan secara detail. Hal ini memungkinkan bangunan berfungsi sebagai "bank material", di mana setiap elemen yang terpasang dapat diidentifikasi, dikelola, dan

direncanakan untuk digunakan kembali di masa depan guna mendukung ekonomi sirkular.

Lebih lanjut, penggunaan BIM memfasilitasi metode *Automated Compliance Checking* (ACC). Melalui metode ini, pemeriksaan kepatuhan desain terhadap regulasi teknis (seperti standar keamanan struktur atau aturan tata kota) dilakukan secara otomatis dengan mengekstraksi data geometri dan atribut dari model BIM. Integrasi ini meminimalisir kesalahan manusia (*human error*), mempercepat proses tinjauan desain, serta memastikan akurasi data yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (J. de Oliveira dkk., 2026).

Inovasi teknologi ini mengaitkan berbagai proses untuk menghasilkan, mengomunikasikan, dan menganalisis model bangunan (Pantiga & Soekiman, 2021). Penerapan BIM mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu ke dalam satu wadah digital kolaboratif, sehingga efektif meminimalkan risiko kesalahan akibat miskomunikasi antarpihak terkait (Mahardika & Windari, 2025).

Menurut (Sangadji dkk., 2019), BIM diklasifikasikan ke dalam beberapa bagian berdasarkan fungsinya:

1. 2D: Model didesain dalam bentuk sketsa yang berisi ukuran panjang dan lebar pada sebuah kertas.
2. 3D: Desain 2D dibentuk menjadi model bangunan utuh yang dapat dilihat secara keseluruhan. Model 3D ini bermanfaat untuk koordinasi di dalam pelaksanaan.
3. 4D: Model 3D dihubungkan dengan jadwal pembangunan. Proses penambahan parameter waktu pada model 3D ini disebut simulasi 4D. Model ini umumnya digunakan untuk perencanaan (*planning*) dan pelacakan (*tracking*) kegiatan proyek.
4. 5D: Model 5D merupakan hasil integrasi desain 3D dan 4D dengan data biaya yang terkait dengan komponen-komponen model. Model ini digunakan secara khusus untuk estimasi biaya.

Seiring perkembangan teknologi yang pesat, sistem ini sangat memungkinkan untuk terus berkembang dan memunculkan model 6D, 7D, dan seterusnya pada masa depan (Sangadji dkk., 2019).

2.13.1 BIM 3D

Penerapan dasar BIM menghasilkan pemodelan tiga dimensi (3D) parametrik yang mencakup panjang, lebar, dan tinggi (Pantiga & Soekiman, 2021). Pemodelan kolaboratif ini memberikan manfaat mendasar dalam manajemen konstruksi, khususnya dalam memberikan kepastian perencanaan dan memudahkan dokumentasi proyek (Hanifah, 2024). Selain itu, BIM 3D esensial untuk meningkatkan kualitas visualisasi serta menyederhanakan koordinasi tim (Hanifah, 2024).

2.13.2 BIM 4 D dan 5D

Dimensi BIM terus diperluas untuk mengakomodasi variabel proyek yang lebih kompleks. Penambahan elemen waktu pada model geometris 3D melahirkan BIM 4D, yang berfungsi untuk penjadwalan (*scheduling*) dan simulasi waktu konstruksi (Hammes dkk., 2026; Pantiga & Soekiman, 2021). Selanjutnya, penambahan elemen biaya menghasilkan BIM 5D yang memfasilitasi estimasi anggaran proyek secara lebih terukur (Hammes dkk., 2026; Pantiga & Soekiman, 2021).

Integrasi BIM 4D dan 5D terbukti krusial dalam mencapai efisiensi manajemen proyek. Peningkatan efisiensi waktu dan biaya adalah manfaat terukur yang paling sering ditemukan dari integrasi ini (Hanifah, 2024). Secara analitis, BIM mempermudah perhitungan dan estimasi kebutuhan material dengan akurasi tinggi (Mahardika & Windari, 2025). Akurasi ini mampu menekan pemborosan material di lapangan dan mengurangi limbah konstruksi secara signifikan, sehingga sangat mendukung terwujudnya prinsip keberlanjutan (Mahardika & Windari, 2025).

2.14 Penelitian terdahulu

Tabel berikut berisi beberapa jurnal yang telah melakukan *redesign* pada *Building Information Modelling* (BIM):

Tabel 2.17 Penelitian Terdahulu

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Putra Castrawan dkk., 2025.	Perencanaan Ulang Struktur Gedung Rumah Sakit Universitas Padjadjaran Menggunakan Metode BIM 5D.	Melakukan perancangan ulang struktur gedung rumah sakit dengan mengintegrasikan aspek biaya, mutu, dan waktu menggunakan metode BIM 5D.	Tahapan meliputi analisis struktur atas dengan SAP2000 , pemodelan 3D dan <i>Quantity Take Off</i> (QTO) dengan Autodesk <i>Revit</i> , penyusunan RAB dengan Microsoft Excel , penjadwalan dengan Microsoft Project , serta integrasi 4D & 5D dengan Navisworks.	Diperoleh perubahan dimensi pada elemen struktur atas dan bawah akibat faktor pembebanan. Integrasi BIM 5D pada Navisworks menghasilkan visualisasi progres dengan durasi pekerjaan selama 31 minggu dan total nilai RAB sebesar Rp 22.258.164.000,00.
2.	Dewi & Sinarta, 2025.	Analisa Desain Fondasi Tiang Bor Menggunakan Aplikasi Plaxis 2D dan Geo5 pada Tanah Lunak.	Menganalisis kekuatan fondasi tiang bor pada tanah lunak dengan membandingkan nilai daya dukung serta penurunan fondasi antar metode.	Tahapan meliputi pengumpulan data uji CPT , perhitungan kapasitas secara manual , serta pemodelan numerik menggunakan <i>software</i> GEO5 dan PLAXIS 2D.	Penurunan secara manual diperoleh sebesar 4.468 mm , simulasi GEO5 sebesar 4.530 mm , dan PLAXIS 2D sebesar 6.762 mm. Ketiga metode dinyatakan konsisten dan aman di bawah batas izin sebesar 23.333 mm.
3.	Fajar dkk., 2025.	Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang pada Pembangunan Asrama Putri	Menganalisis kapasitas daya dukung aksial, lateral, serta penurunan pondasi tiang	Tahapan meliputi pengumpulan data sondir (CPT) , analisis teoritis	Daya dukung aksial izin terbesar pada sondir S1 diperoleh sebesar 40 ton (D30), 68 ton (D40), dan 147 ton (D60). Konfigurasi

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
		MTA Karanganyar	pancang pada proyek pembangunan Asrama Putri MTA Karanganyar.	menggunakan metode Meyerhof (1976) dan Broms (1964) , perhitungan penurunan secara semi-empiris , serta simulasi numerik dengan <i>software</i> Geo5 PILEGROUP.	kelompok 2 tiang dinyatakan aman menahan beban struktur. Penurunan kelompok tiang terbesar diperoleh sebesar 0,043 m secara manual dan 4,3 cm menggunakan FINE , di mana seluruh hasil memenuhi syarat batas izin SNI 8460:2017.
4.	Rizky Christiandava dkk., 2023.	<i>Re-Design Struktur Gedung Head Office Awann Group</i> Berdasarkan Integrasi BIM Autodesk melalui Revit, Navisworks, dan SAP2000	Menganalisis struktur objek penelitian, lalu memodelkan nya kembali melalui metode BIM.	Tahapan meliputi pengumpulan data, studi literatur, perencanaan sistem struktur, <i>preliminary design</i> , pemodelan struktur dan pembebanan menggunakan SAP2000, analisis struktur, serta pemodelan BIM 5D.	<i>Detail Engineering Design</i> , BIM 5D, dan hasil analisa struktur. Perbedaan perencanaan ini dengan perencanaan ini dengan perencanaan penulis yaitu penggunaan <i>software</i> analisa struktur yang digunakan adalah SAP2000.
5.	Christian & Kushartomo , 2023.	Analisis Perbandingan Efektifitas Beton Pelat Lantai dengan Metode Bondek Dan Konvensional	Membandingkan seberapa efektif dan efisien penggunaan bondek pada konstruksi pelat lantai beton dari segi waktu dan biaya pelaksanaan	Studi kasus pada proyek gedung bertingkat di Jakarta Pusat dengan metode kualitatif dan kuantitatif. Pengumpulan data melibatkan	Pekerjaan pelat lantai bondek terbukti lebih efisien dari segi durasi waktu pelaksanaan (68 hari) dibandingkan metode konvensional (95 hari), dengan persentase penghematan waktu sebesar 17%. Namun dari segi biaya

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
			nya dibandingkan dengan metode konvensional .	daftar harga bahan dan gambar kerja, disusul analisis perbandingan kebutuhan volume, durasi, serta biaya pengerjaan menggunakan <i>Microsoft Excel</i> .	pelaksanaan, pelat lantai bondek (Rp 8.717.212.500) relatif lebih mahal dibandingkan metode konvensional (Rp 3.995.987.500), dengan persentase perbedaan sebesar 37%.
6.	Simatupang dkk., 2023.	Analisa Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa Untuk Berbagai Variasi Tinggi Bangunan	Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis pengaruh variasi ketinggian bangunan terhadap beban gempa.	Metode penelitian meliputi pengumpulan data serta pemodelan struktur menggunakan <i>ETABS v.17.0</i> dan <i>spColumn v.6.0</i> .	Hasil penelitian berupa dokumentasi gambar serta spesifikasi teknis struktur bangunan tahan gempa.
7.	Khatimi & Pardosi, 2022.	Implementasi Building Information Modeling 4D (Studi Kasus: Proyek Lanjutan Pembangunan Gedung Kantor Sekretariat Daerah Kabupaten Tapin)	Tujuan penelitian adalah penerapan BIM 4D pada objek penelitian yang sebelumnya menggunakan metode konvensional .	Metode penelitian meliputi pengumpulan data berupa <i>as-built drawing</i> , kurva-S, dan RAB, untuk kemudian dikaji serta dimodelkan ulang berbasis BIM.	Hasil penelitian berupa pemodelan bangunan BIM 3D, penjadwalan proyek melalui Tekla Task Manager, visualisasi 4D, serta integrasi volume pekerjaan berbasis BIM.
8.	Weli dkk., 2021.	Analisis Penggunaan Pelat Beton Bondek Pada Struktur Lantai Gedung	Mengecek kekuatan pelat lantai jika menggunakan pelat bondek	Analisis dilakukan menggunakan data sekunder yang terdiri dari gambar kerja,	Kapasitas momen pada pelat 12 cm dan 10 cm yang menggunakan bondek tipe W-1000 (tebal 0,65 mm, 0,70 mm, dan 1,00 mm)

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
		Puskesmas Kota Ende	sebagai pengganti pelat konvensional dengan beban kerja yang sama	Rencana Anggaran Biaya (RAB), dan Rencana Kerja dan Syarat (RKS)	lebih besar dari kapasitas momen pelat beton konvensional yang terpasang. Sebanyak 22 pelat dinyatakan dalam kondisi aman dan memenuhi syarat batas lendutan, sedangkan 2 pelat dinyatakan tidak aman karena tidak memenuhi syarat batas lendutan yang diizinkan saat ketebalan pelat direduksi menjadi 9 cm.
9.	Fadillah, 2020.	Metode Analisis Perhitungan Struktur Bangunan Tahan Gempa (Studi Kasus Gedung E, F Universitas Muhammadiyah Sukabumi)	Penyusunan tahapan pengolahan data analisis bangunan tahan gempa berdasarkan SNI 1726:2019 dengan probabilitas 2% dalam kurun waktu 50 tahun (kala ulang 2500 tahun).	Metode penelitian meliputi studi pustaka (SNI 1726:2012 dan SNI 2847:2013), pengumpulan data, pemodelan struktur, serta analisis struktur.	Hasil penelitian berupa basis data perhitungan struktur bangunan tahan gempa.
10.	Usmat I dkk., 2019.	Analisa Letak Dinding Geser (Shear Wall) Terhadap Perilaku Struktur Gedung Akibat Beban Gempa	Menganalisis posisi optimum penempatan <i>shear wall</i> pada struktur gedung bertingkat yang menerima beban gempa	Tahapan meliputi pemodelan geometrik gedung 6 lantai rangka beton bertulang, penerapan 4 variasi layout penempatan <i>shear wall</i> ,	Layout-2 (simetris sumbu-XY mendekati pusat massa) dinyatakan sebagai penempatan paling optimum. Struktur tanpa <i>shear wall</i> (SRPMK) serta layout-3 dinilai kurang kaku dalam menahan beban lateral arah sumbu-Y.

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
			statik dan dinamik.	simulasi pembebanan gempa statik ekuivalen dan dinamik respons spektrum, serta analisis parameter kontrol struktur menggunakan program komputer.	Pemodelan layout-2 terbukti efektif meningkatkan kekakuan serta memenuhi syarat proporsi distribusi gaya geser sistem ganda.
11.	Amelia & Widyaningsih, 2026	<i>Structural Behaviour of a 6-Storey Reinforced Concrete Building with Various Types of Shear-Walls</i>	Menganalisis perilaku struktur gedung beton bertulang 6 lantai dengan berbagai tipe dinding geser.	Analisis respons spektrum dengan <i>ETABS</i> berdasarkan SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 2847:2019 pada model tanpa dinding geser, <i>frame wall</i> , <i>bearing wall</i> , dan <i>core wall</i> .	Model tanpa dinding geser memiliki periode terpanjang (1,263 detik) dan simpangan arah X terbesar (44,14 mm); <i>frame wall</i> memberikan kinerja paling optimal (periode 0,903 detik; simpangan 32,24 mm).
12.	Hirel dkk., 2018.	Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus	Perencanaan komponen struktur gedung sesuai ketentuan SRPMK untuk mencapai struktur daktil berdasarkan acuan SNI 1726:2012	Tahapan meliputi studi literatur, perencanaan data teknis objek penelitian, <i>preliminary design</i> , pemodelan serta pembebanan struktur menggunakan	Hasil penelitian berupa desain gedung beton bertulang yang bersifat daktil dan sesuai dengan prinsip SRPMK.

No	Sitasi	Judul	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
			dan SNI 2847:2013.	ETABS 2016, analisis struktur, dan kontrol keamanan struktur.	

Penelitian terdahulu mengkaji aspek-aspek perencanaan ini secara terpisah. Usmat I dkk., (2019) menunjukkan bahwa gedung 6 lantai tanpa dinding geser (SRPMK) kurang kaku terhadap beban lateral arah Y dibandingkan sistem ganda, dan Amelia Widyaningsih (2026) mencatat periode getar terpanjang (1,263 detik) serta simpangan arah X terbesar (44,14 mm) pada model gedung 6 lantai tanpa dinding geser. Christian dan Kushartomo, (2023) menemukan pelat bondek mempercepat pelaksanaan (68 hari dibanding 95 hari) tetapi lebih mahal dibanding pelat konvensional, sedangkan Weli dkk., (2021) menunjukkan pelat bondek memenuhi kapasitas lentur namun dapat gagal lendutan bila ditipiskan. Putra Castrawan dkk., (2025) dan Rizky Christiandava dkk., (2023) menerapkan BIM 5D pada redesign tanpa mengubah sistem penahan gaya lateral. Belum ada kajian yang, pada satu gedung pendidikan Kategori Risiko IV di Kategori Desain Seismik D, mengevaluasi secara bersamaan penggantian sistem ganda menjadi SRPMK dan penggantian pelat konvensional menjadi pelat bondek terhadap pemenuhan persyaratan seismik, kebutuhan dimensi elemen, dan biaya struktur, lalu menyusun jadwal pelaksanaan desain terpilih dalam satu alur kerja BIM 5D. Penelitian ini disusun untuk mengisi celah tersebut.