

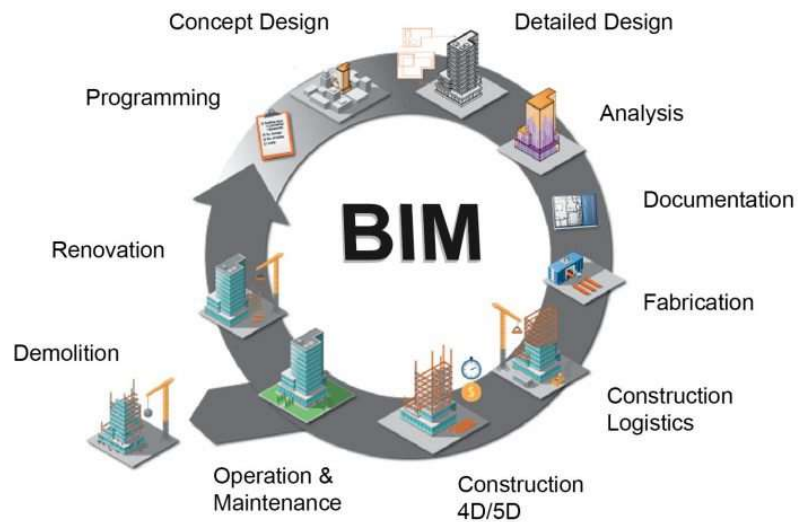
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Building Information Modelling (BIM)*

2.1.1 Pengenalan *Building Information Modelling (BIM)*

BIM merupakan teknologi *AEC (Architecture, Engineering, and Construction)* yang efektif untuk menstimulasikan informasi sebuah bangunan secara digital. Informasi ini mencakup karakteristik fisik dan fungsional, serta semua detail mengenai elemen elemen bangunan itu sendiri sebagai landasan untuk setiap keputusan yang dibuat pada awal perancangan (Parung et al., n.d., 2019).



Gambar 2. 1 Ruang Lingkup BIM

Sumber: Kajian Tingkat Implementasi BIM, 2022

Berdasarkan **gambar 2.1** mencakup metode *Building Information Modelling (BIM)* dalam sektor konstruksi yang memiliki peran krusial terhadap keberhasilan suatu proyek. Melalui BIM, proses pelaksanaan proyek dapat disimulasikan secara virtual, sehingga komunikasi antar *stakeholder* lebih efektif dan terarah (Noviani et al., n.d., 2021).

2.1.2 Tingkatan Dimensi BIM

BIM tidak sekedar mengubah gambar 2D menjadi 3D, melainkan juga menyematkan berbagai informasi pada setiap komponen dalam model. BIM (*Building Information Modelling*) menghasilkan serta mengolah data yang mencakup siklus bangunan dari tahap perencanaan hingga pemeliharaan (Widiasanti et al., 2023). Pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres IKN mengkolaborasikan level 2 BIM dengan integrasi model 3D, dengan penjadwalan waktu menjadi 4D, sekaligus penambahan model kolaboratif informasi biaya dengan software Naviswork menjadi BIM 5D.



Gambar 2. 2 Dimensi BIM mulai dari 3D hingga 7D

Sumber: Prinsip Dasar Teknologi BIM dan Implementasinya di Indonesia, 2018

Berdasar **gambar 2.2** dijelaskan terkait uraian tingkatan dimensi BIM. Berikut uraian dimensi BIM 2D hingga 7D (Suhadi et al., n.d, 2022):

A. BIM 2D

Merupakan tahap awal dalam proses perencanaan konstruksi, yang biasa dikenal sebagai desain dua dimensi, dengan penggambaran berdasarkan sumbu X dan Y. menggunakan perangkat lunak seperti CAD, Pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres penggunaan 2D digunakan sebagai tahap awal dalam melakukan *preliminary design* menggunakan *software Autocad* untuk mendapatkan efisiensi dimensi yang diharapkan saat analisis struktur.

B. BIM 3D

Tahapan ini mencakup permodelan tiga dimensi dengan penambahan sumbu Z pada penggambaran. *Output* model 3D digunakan untuk visualisasi sehingga memudahkan identifikasi dan koreksi kesalahan dalam gambar. Pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres penggunaan 3D pada *software Revit* menunjukkan keselarasan interpretasi terhadap model gabungan tiga tampak ini membantu membayangkan bentuk ruang secara utuh, bukan hanya dari satu sisi.

C. BIM 4D

Menambahkan informasi terkait waktu atau penjadwalan ke dalam model 3D. Setiap urutan pekerjaan pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres dihubungkan dengan waktu pelaksanaannya, sehingga proses monitoring jadwal pelaksanaan, pekerjaan bersamaan, serta waktu mulai dan selesai dapat dilakukan dengan efektif dan terstruktur.

D. BIM 5D

Pada tahap perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres ini dimensi biaya diintegrasikan ke dalam model 3D, sehingga biaya konstruksi dapat dihitung secara otomatis berdasarkan model yang ada. Bila terjadi perubahan desain, estimasi waktu dan biaya juga akan langsung menyesuaikan, sehingga biaya tak terduga dapat ditekan seminimal mungkin dalam bentuk simulasi video.

E. BIM 6D

Tahap ini mencakup integrasi analisis energi. Keunggulan BIM 6D terletak pada kemampuannya untuk mengoptimalkan efisiensi energi bangunan berdasarkan informasi yang dimasukkan ke dalam model 3D, sehingga konsumsi energi total dapat dikurangi.

F. BIM 7D

Digunakan dalam fase pengoperasian dan pemeliharaan aset bangunan. Seluruh aktivitas operasional, pemeliharaan rutin, dan perawatan bangunan dapat dimonitor dan dikendalikan secara efisien melalui pemanfaatan model 7D.

G. BIM 8D

Digunakan dalam tahap lanjut dari penerapan *Building Information Modeling* yang mengintegrasikan seluruh aspek utama proyek mulai dari visualisasi desain, perencanaan waktu, pengendalian biaya, analisis keberlanjutan, dan manajemen fasilitas dengan tambahan dimensi keselamatan kerja sebagai fokus utama. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akurasi perencanaan, tetapi juga meminimalkan risiko kecelakaan dan memastikan keberlangsungan operasional bangunan yang aman menciptakan proyek konstruksi yang produktif, aman, dan berkelanjutan sepanjang siklus hidupnya.

2.1.2 Kelebihan dan Kekurangan BIM

Menurut (Nugroho et al., 2016), *Building Information Modeling (BIM)* telah merevolusi industri konstruksi dengan kemampuannya untuk mengintegrasikan berbagai aspek proyek dalam satu model digital. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan pengaplikasian BIM, sebagai berikut:

A. Kelebihan BIM

- 1) BIM mengintegrasikan berbagai kebutuhan perangkat lunak seperti analisis struktur penggunaan *software ETABS* sebagai langkah awal, dengan melakukan desain gambar baik 2D dan model 3D menggunakan *Revit*, perhitungan volume yang didapatkan dari hasil *QTO*, dan penjadwalan secara efisien menggunakan *Microsoft Project*.
- 2) BIM memiliki fitur deteksi tabrakan (*clash detection*) yang dapat mengidentifikasi ketidaksesuaian antara desain arsitektur, struktur, dan MEP sejak awal fitur ini terdapat pada *software Revit* sebagai langkah awal mendeteksi adanya tabrakan desain penulangan struktur atau arsitektur yang dipakai.
- 3) Penggunaan BIM mempercepat proses perencanaan dan konstruksi pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres apabila satu bagian desain diubah, semua gambar kerja dan data terkait bisa otomatis menyesuaikan, sehingga menghemat waktu revisi.

- 4) BIM mengurangi kebutuhan sumber daya dengan adanya integrasi dan otomatisasi proses.
- 5) Penghematan biaya karena adanya efisiensi waktu dan pengurangan tenaga kerja BIM mendukung *4D scheduling* (menambahkan dimensi waktu) dan *5D costing* (estimasi biaya), sehingga jadwal dan biaya bisa direncanakan lebih cepat dan akurat pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres.

B. Kekurangan BIM

- 1) Lisensi harga *software BIM* yang tidak murah meskipun harga lisensi software BIM tinggi, dalam konteks perencanaan, investasi ini justru dapat meningkatkan akurasi, efisiensi, dan kualitas desain sejak awal, yang pada akhirnya mempercepat dan mengefisienkan keseluruhan.
- 2) Spesifikasi perangkat *hardware* yang dibutuhkan tergolong tinggi. Spesifikasi hardware tinggi memang membutuhkan biaya tambahan, tapi ini investasi penting agar proses perencanaan BIM berjalan lancar, menghindari hambatan teknis, dan memungkinkan visualisasi yang lebih akurat sejak tahap desain.
- 3) Keterbatasan dalam mendetailkan gambar dengan skala kecil, sehingga masih diperlukan perangkat lunak lain, seperti *AutoCAD*.

BIM menawarkan banyak keunggulan yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi, akurasi, dan kolaborasi proyek konstruksi, sehingga sangat membantu dalam proses perencanaan konstruksi yang modern.

2.2 Pembebanan Struktur

Dalam melakukan perencanaan beban struktur harus memastikan struktur yang direncanakan memiliki kemampuan untuk menahan beban statis dan dinamis. Pedoman Perencanaan Pembebanan Rumah dan Gedung, SNI 1727:2020, digunakan untuk menghitung beban kerja struktur. sebagai peninjau faktor keamanan dalam kemandapan kontruksi pembangunan.

2.2.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Menurut SNI 1727:2020, beban mati adalah berat seluruh bahan konstruksi bangunan gedung yang terpasang, termasuk dinding, lantai, atap, plafond, tangga, dinding partisi tetap, *finishing*, klading gedung, dan komponen arsitektural dan struktural lainnya serta peralatan layan terpasang lain termasuk berat derek dan sistem pengangkat material. Nilai berat sendiri bahan bangunan dapat dilihat pada **tabel 2.1** berikut:

Tabel 2. 1 Berat Sendiri Bahan Bangunan

Berat Sendiri Bahan Bangunan	Berat
Baja	7.850 kg/m ³
Batu alam	2.600 kg/m ³
Batu belah, batu bulat, batu gunung (berat tumpuk)	1.500 kg/m ³
Batu karang (berat tumpuk)	700 kg/m ³
Batu pecah	1.450 kg/m ³
Besi tuang	7.250 kg/m ³
Beton ⁽¹⁾	2.200 kg/m ³
Beton bertulang ⁽²⁾	2.400 kg/m ³
Kayu (Kelas 1) ⁽³⁾	1.000 kg/m ³
Kerikil, koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1.650 kg/m ³
Pasangan bata merah	1.700 kg/m ³
Pasangan batu belah, batu bulat, batu gunung	2.200 kg/m ³
Pasangan batu cetak	2.200 kg/m ³
Pasangan batu karang	1.450 kg/m ³
Pasir (kering udara sampai lembab)	1.600 kg/m ³
Pasir (jenuh air)	1.800 kg/m ³
Pasir kerikil, koral (kering udara sampai lembab)	1.850 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (kering udara sampai lembab)	1.700 kg/m ³
Tanah, lempung dan lanau (basah)	2.000 kg/m ³
Timah hitam (timbel)	11.400 kg/m ³

Sumber: SNI 1727:2020

2.2.1 Beban Hidup (*Live Load*)

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

Presentase beban hidup horizontal yang dihasilkan oleh desakan sejumlah besar orang yang bergerak pada struktur tertentu, harus ditinjau pada struktur pemikulnya dalam dua arah yang saling tegak lurus. Pedoman ini didasarkan pada jenis struktur yang digunakan di gedung. Ketentuan dari beban hidup bangunan gedung menggunakan standar SNI yang berlaku berdasar pada (PPIUG, 1983) (PPIUG, 1983). Untuk memperhitungkan kemungkinan terjadinya nilai-nilai beban hidup yang berubah-ubah seperti yang disebutkan dalam ayat (1), ketika balok-balok induk dan portal-portal sistem pemikul beban gedung dirancang, beban hidup dibagi rata yang ditentukan pada pasal 1.2 a dan b. Nilai nilai pedoman ini dapat dikalikan dengan koefisien reduksi yang nilainya ditentukan oleh penggunaan bangunan gedung yang ditinjau dan tercantum pada **tabel 2.2** berikut:

Tabel 2. 2 Tabel Koefisien Reduksi Beban Hidup PPIUG 1983

Penggunaan Gedung	Koefisien Reduksi Beban Hidup	
	Untuk perencanaan balok induk dan portal	Untuk peninjauan gempa
Perumahan/Penghunian: Rumah tinggal, asrama, hotel, rumah sakit	0,75	0,30
Pendidikan: Sekolah, ruang kuliah	0,90	0,50
Pertemuan umum: Masjid, gereja, bioskop, restoran, ruang dansa, ruang pagelaran	0,90	0,50
Kantor: Kantor, bank	0,60	0,30
Perdagangan: Toko, toserba, pasar	0,80	0,80
Penyimpanan: Gedung, perpustakaan, ruang arsip	0,80	0,80
Industri: Pabrik, bengkel	1,00	0,90
Tempat kendaraan: Garasi, gedung parkir	0,90	0,50
Gang dan Tangga:		
- Perumahan/penghunian	0,75	0,30
- Pendidikan, kantor	0,75	0,50
- Pertemuan umum, perdagangan Penyimpangan, industry, tempat kendaraan	0,90	0,50

Sumber: PPIUG 1983

Selain itu, nilai koefisien reduksi yang dikalikan kepada beban hidup kumulatif nilainya ditentukan berdasarkan jumlah lantainya yang dipikul, seperti pada **tabel 2.3**, dibawah ini:

Tabel 2. 3 Koefisien Reduksi Beban Hidup Kumulatif

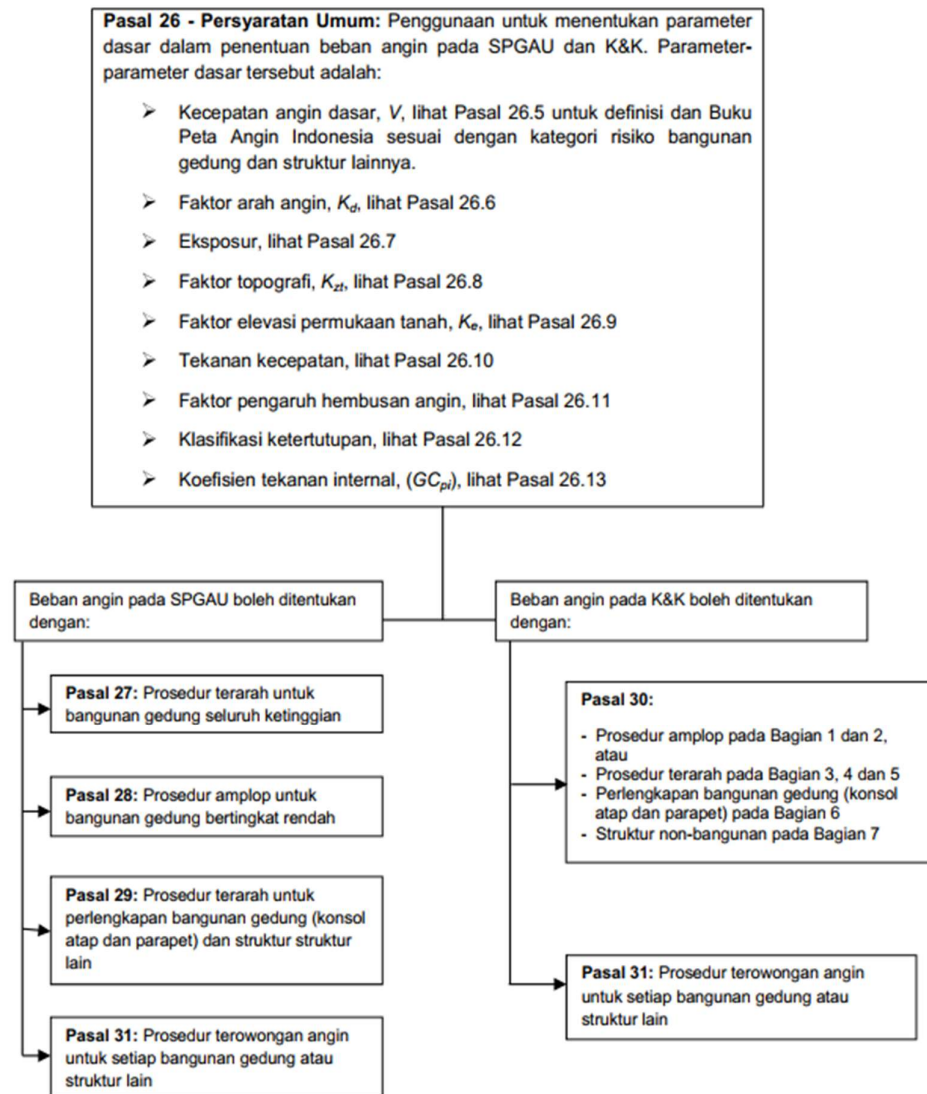
Jumlah lantai yang dipikul	Koefisien reduksi yang dikalikan kepada beban hidup kumulatif
1	1,0
2	1,0
3	0,9
4	0,8
5	0,7
6	0,6
7	0,5
8 dan lebih	0,4

Sumber: PPIUG 1983

2.2.2 Beban Angin (*Wind Load*)

Beban angin diakibatkan karena tekanan udara pada struktur bangunan yang berada pada jalur lintasan angin yang menyebabkan angin berbelok sehingga mengakibatkan perubahan energi kinetik menjadi energi potensial angin yang berpengaruh pada tekanan dan ketinggian bangunannya.

Berdasarkan SNI 1727:2020, bangunan gedung dan struktur lain, termasuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) dan seluruh Komponen dan Klading (K&K), harus dirancang dan dilaksanakan untuk menahan beban angin seperti yang ditetapkan menurut pasal 26 sampai pasal 31. Garis besar penentuan beban angin dapat dilihat pada **gambar 2.3** dibawah ini.



Gambar 2.3 Garis Besar Proses Penentuan Beban Angin

Sumber: SNI 1727:2020

2.2.3 Beban Gempa (*Earthquake Load*)

Berdasarkan SNI 1726:2019, gempa rencana harus ditinjau dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung dan non gedung serta berbagai bagian dan peralatannya secara umum. Menurut (Widyawati, et all, 2021) terdapat dua metode secara umum yang digunakan dalam analisis beban gempa, yaitu:

1. Analisis Statik Ekuivalen, memodelkan getaran gempa sebagai beban horizontal statik yang bekerja pada pusat massa bangunan. Prinsip ini didasarkan pada asumsi bahwa semua mode getar dapat terjadi secara bersamaan, sehingga terjadi interferensi antar pengaruh dari semua mode getar tersebut. Analisis statik memberikan gambaran respons struktur dalam kondisi beban yang disederhanakan, seringkali digunakan untuk *preliminary design* atau untuk struktur dengan karakteristik tertentu.
2. Analisis Dinamik, memperhitungkan pengaruh dinamis gerakan tanah terhadap struktur untuk mendapatkan distribusi gaya geser gempa di setiap tingkat. Dibagai menjadi dua jenis utama yaitu analisis riwayat waktu dan analisis ragam respons spektrum.

Sesuai dengan standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Rumah dan Gedung (SNI 1726:2019) metode analisis Ragam Respon Spektrum (*Spectral Modal Analysis*) dan analisis Respon Dinamik Riwayat Waktu digunakan sebagai evaluasi yang lebih akurat pada struktur terhadap gaya gempa pada perencanaan struktur tahan gempa.

Perencanaan struktur gedung beraturan dengan metode statik ekuivalen dilakukan dengan menganggap beban gempa sebagai beban horizontal statik yang bekerja terpusat pada pusat massa lantai tiap tingkat. Berikut adalah beberapa langkah dalam melakukan analisis beban gempa struktur bangunan:

A. Kategori Resiko Bangunan

Menurut SNI 1726:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, berbagai kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung sesuai **tabel 2.4** pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan gempa *I_e* menurut **tabel 2.5**.

Tabel 2. 4 Tabel Kategori Resiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
Gedung dan non gedung yang memiliki resiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk antara lain: <ul style="list-style-type: none"> • Fasilitas pertanian, perternakan, perkebunan dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan • Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori resiko I, II, III, IV termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan gedung apartemen atau rumah susun • Rumah toko dan Rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Bangunan Industri • Fasilitas manufaktur • Pabrik 	II
Gedung dan non gedung yang memiliki resiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan termasuk tetapi tidak dibatasi untuk: <ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan non gedung tidak termasuk dalam kategori resiko IV yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan termasuk tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk kategori IV, termasuk tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpangan, penggunaan, atau tempat pembuangan bahan bahan bakar berbahaya, bahan kimia, linah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak. Yang mengandung bahan beracun atau peledak dengan jumlah kandungan melebihi batas yang ditetapkan oleh instansi berwenang yang menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika mengalami kebocoran.</p>	III
Operasi dan fasilitas tanggap darurat pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat, struktur tambahan termasuk, menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran, atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur lain yang masuk dalam kategori resiko IV.	IV

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2. 5 Tabel Faktor Keutamaan Gempa

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

Sumber: SNI 1726:2019

B. Klasifikasi Situs

Penentuan jenis tanah yang ada pada daerah perencanaan proyek gedung Rusun Paspampres IKN mengacu pada pasal 5.3 SNI 1726:2019 diklasifikasikan menjadi kelas kursi SA, SB, SC, SD, SE, dan SF sesuai pada **tabel 2.6** berikut:

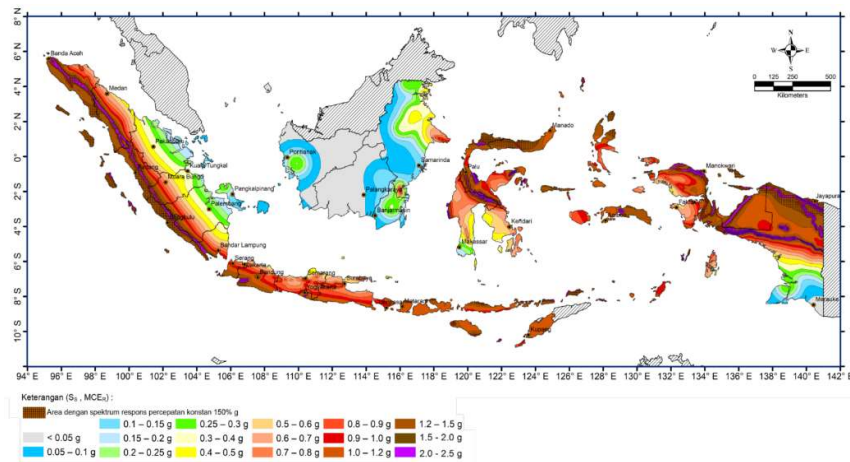
Tabel 2. 6 Tabel Klasifikasi Situs

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	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 tanah >3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: <ul style="list-style-type: none"> • Indeks plastisnya, $PI > 20$, • Kadar air, $w \geq 40\%$, • Kuat geser niralir $s_u < 25$ kPa 		
SF (Tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respon spesifik – situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ol style="list-style-type: none"> 1. Rawan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah 2. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) 3. Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan $s_u < 50$ kPa 		

Sumber: SNI 1726:2019

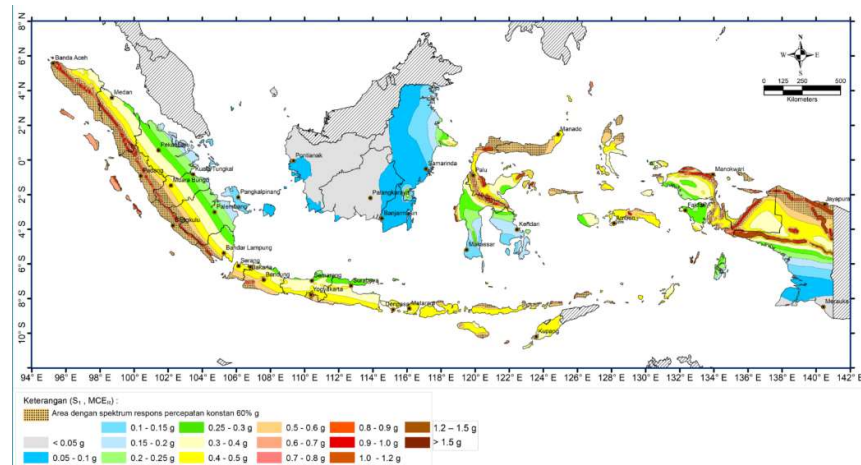
C. Koefisien Spektrum Desain

S_s (percepatan batuan dasar periode pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada periode 1 detik), dapat diperoleh langsung dari aplikasi atau data Desain Spektra yang disediakan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) melalui Puskim PU seperti pada **gambar 2.4** dan **gambar 2.5** Nilai S_s dan S_1 ini biasanya diberikan dalam bentuk desimal dan merupakan parameter penting dalam perhitungan spektrum respons gempa untuk desain struktur bangunan.



Gambar 2. 4 Respon Spektra Percepatan 0,2 Detik (S_0)

Sumber: SNI 1726:2019



Gambar 2. 5 Respon Spektra Percepatan 1 Detik (S_1)

Sumber: SNI 1726:2019

D. Faktor Amplifikasi Getaran F_a dan F_v

Faktor amplifikasi seismik digunakan dalam 0,2 detik dan 1 detik untuk menentukan respons spektral dari akselerasi gempa bumi MCE_R pada tingkat tanah, dengan faktor amplifikasi dibagi menjadi dua jenis berupa faktor amplifikasi getaran periode singkat (F_a) dan faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v) yang dapat dilihat pada **tabel 2.7** dan **tabel 2.8** berikut.

Tabel 2. 7 Tabel 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 2. 8 Tabel 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

Selain itu dengan parameter respons spektral akselerasi periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}) harus disesuaikan dengan koefisien situs dengan rumus berikut berdasar tabel diatas:

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

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \qquad S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1}$$

Perhitungan Periode Transisi

Periode transisi adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu sistem getar (seperti struktur bangunan) untuk menyelesaikan satu siklus getaran setelah mengalami gangguan, hingga akhirnya kembali ke posisi statis atau keadaan keseimbangan awal.

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

E. Kategori Desain Seismik

Kategori Desain Seismik (KDS) digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat ancaman gempa pada suatu lokasi dan memberikan panduan desain yang sesuai agar struktur yang dibangun dapat bertahan terhadap gempa yang diprediksi. Kategori Desain Seismik dapat ditentukan berdasar nilai parameter respon spektral percepatan desain S_{DS} , S_{D1} , dan kategori resiko seperti pada **tabel 2.9** dan **tabel 2.10** berikut.

Tabel 2. 9 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

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

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2. 10 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

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

Sumber: SNI 1726:2019

F. Sistem Pemikul Gaya Seismik

Setiap sistem struktur memiliki nilai R (modifikasi respon), C_d (Faktor kuat lebih cepat), dan Ω (faktor pembesaran defleksi) yang dikenakan setiap sistem strukturnya termasuk batasan sistem struktur yang terdapat pada SNI 1726:2019 disajikan pada **tabel 2.11**. Analisis dinamika termasuk jenis analisis struktur yang memperhitungkan efek pergerakan tanah terhadap struktur dengan membagi gaya geser gempa pengaruh dinamis.

Tabel 2. 11 Faktor Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
A. Sistem dinding penumpu								
1. Dinding geser beton bertulang khusus ^{g,h}	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
2. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
3. Dinding geser beton polos didetail ^g	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
4. Dinding geser beton polos biasa ^g	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
5. Dinding geser pracetak menengah ^g	4	2½	4	TB	TB	12'	12'	12'
6. Dinding geser pracetak biasa ^g	3	2½	3	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5	2½	3½	TB	TB	48	48	30
8. Dinding geser batu bata bertulang menengah	3½	2½	2¼	TB	TB	TI	TI	TI
9. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	1¾	TB	48	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
11. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
12. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
13. Dinding geser batu bata ringan (AAC) bertulang biasa	2	2½	2	TB	10	TI	TI	TI
14. Dinding geser batu bata ringan (AAC) polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
15. Dinding rangka ringan (kayu) dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	6½	3	4	TB	TB	20	20	20
16. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang ditujukan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	6½	3	4	TB	TB	20	20	20
17. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2	2½	2	TB	TB	10	TI	TI
18. Sistem dinding rangka ringan (baja canai dingin) menggunakan bresing strip datar	4	2	3½	TB	TB	20	20	20
B. Sistem rangka bangunan								
1. Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	6	2	5	TB	TB	48	48	30
3. Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3¼	2	3¼	TB	TB	10'	10'	TI'
4. Dinding geser beton bertulang khusus ^{g,h}	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
5. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
6. Dinding geser beton polos detail ^g	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
7. Dinding geser beton polos biasa ^g	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Dinding geser pracetak menengah ^g	5	2½	4½	TB	TB	12'	12'	12'
9. Dinding geser pracetak biasa ^g	4	2½	4	TB	TI	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
11. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5	2	4½	TB	TB	48	48	30
12. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing biasa	3	2	3	TB	TB	TI	TI	TI
13. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	6½	2½	5½	TB	TB	48	48	30
14. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
15. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
16. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	2½	4	TB	TB	48	48	30
17. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
18. Dinding geser batu bata bertulang biasa	2	2½	2	TB	48	TI	TI	TI

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons, R^a	Faktor kuat lebih sistem, Ω_{00}^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	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
20. Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
21. Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
22. Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
23. Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
24. Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB
25. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
26. Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^e	TI ^e	TI ^e
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI ^e	TI ^e	TI ^e
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ^g	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
12. Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan ^h	3½	3 ^e	3½	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	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
3. Dinding geser beton bertulang khusus ^h	7	2½	5½	TB	TB	TB	TB	TB
4. Dinding geser beton bertulang biasa ^g	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
5. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing eksentris	8	2½	4	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka baja dan beton komposit dengan bresing konsentris khusus	6	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
7. Dinding geser pelat baja dan beton komposit	7½	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
8. Dinding geser baja dan beton komposit khusus	7	2½	6	TB	TB	TB	TB	TB
9. Dinding geser baja dan beton komposit biasa	6	2½	5	TB	TB	TI	TI	TI
10. Dinding geser batu bata bertulang khusus	5½	3	5	TB	TB	TB	TB	TB
11. Dinding geser batu bata bertulang menengah	4	3	3½	TB	TB	TI	TI	TI
12. Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	TB	TB	TB
13. Dinding geser pelat baja khusus	8	2½	6½	TB	TB	TB	TB	TB

Sumber: SNI 1726:2019

G. Periode Getar “T” Gedung

Menurut SNI 1726:2019, periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan sifat struktur dan karakteristik deformasi elemen pemikul dalam analisis yang teruji. Periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi koefisien C_u . Nilai koefisien C_u berdasarkan nilai

parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, S_{D1} dapat dilihat seperti pada **tabel 2.12** dibawah ini.

Tabel 2. 12 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

Jika $T_c > C_u \times T_a$, maka digunakan $T = C_u \times T_a$

Jika $T_a < T_c < C_u$, maka digunakan $T = T_c$

Jika $T_c < T_a$, maka digunakan $T = T_a$

Keterangan:

T_a : Periode fundamental pendekatan

T_c : Periode fundamental struktur diperoleh dari analisa struktur.

Periode fundamental pendekatan, T_a , ditentukan dengan persamaan berikut:

$$T_{a \min} = C_t h n^x$$

$$T_{a \max} = C_u T_{a \min}$$

Keterangan:

hn : Ketinggian struktur (m)

koefisien C_t dan x ditentukan dari **tabel 2.13** dibawah ini.

Tabel 2. 13 Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

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

Sumber: SNI 1726:2019

2.3 Kombinasi Pembebanan

Pada perencanaan sistem struktur diperlukan perhitungan kombinasi pembebanan (*Load Combination*) yang disebabkan karena adanya beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa yang secara keseluruhan bekerja bersamaan selama umur rencana. Pada seluruh komponen struktur yang direncanakan, nilai kuat rencana yang dimiliki harus sama atau lebih besar dari beban terfaktornya. Kombinasi pembebanan yang digunakan berdasar SNI 1726:2019 dapat dilihat pada **tabel 2.14** berikut.

Tabel 2. 14 Kombinasi Beban Untuk Metode Ultimit

Beban	Metode Ultimit
Beban Mati	1,4 D
Beban Hidup	1,2 D + 1,6 L + 0,5 (Lr atau R)
Beban Angin	1,2 D + 1,6 L (Lr atau R) + (Lr atau 0,5 W) 1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (Lr atau R) 0,9 D + 1,0 W
Beban Gempa	1,2 D + 1,0 E + L 0,9 D + 1,0 E

Sumber: SNI 1726:2019

Keterangan:

- D (Beban mati) merupakan beban yang disebabkan oleh berat konstruksi yang bersifat tetap, meliputi kolom, balok, dinding, tangga, atap, lantai, plafon, serta bagian yang tidak terpisah dari struktur utama.
- L (Beban hidup) merupakan beban yang bersifat tidak menetap/berubah-ubah sesuai fungsi penggunaan ruang (bangunan) dan bukan merupakan bagian dari konstruksi bangunan, meliputi furniture, manusia, kendaraan, dan lainnya.
- Lr (Beban hidup di atap) merupakan beban hidup yang ada di atap karena pekerja, alat, dan material selama perawatan baik orang maupun objek bergerak selama masa penggunaan normal.
- R (Beban hujan) merupakan beban pada perencanaan atap atau bagian lain yang rentan karena pengaruh beban air hujan.
- W (Beban angin) merupakan beban yang disebabkan oleh tekanan angin.

- E (Beban gempa) merupakan beban yang diakibatkan karena gempa bumi.

2.4 Perencanaan Struktur *Dual System*

Sistem ganda (*dual system*) adalah sistem struktur bangunan yang memanfaatkan kombinasi antara Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM) dan Dinding Geser (*Shear Wall*) atau elemen vertikal lainnya yang kaku. Menurut SNI 1726:2019 pasal 7.2, sistem ganda dirancang sedemikian rupa sehingga rangka mampu memikul setidaknya 25% gaya geser dasar akibat gempa, sedangkan sisanya dapat dipikul oleh dinding geser atau sistem vertikal lainnya. Kombinasi ini dimaksudkan untuk memperoleh kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang optimal.

Dalam sistem ganda, SRPMM berperan sebagai elemen daktil yang mampu menahan deformasi besar tanpa kehilangan kekuatan secara signifikan, sementara dinding geser bertugas memberikan kekakuan lateral yang besar untuk mengurangi simpangan (*drift*). Interaksi keduanya menghasilkan perilaku struktur yang lebih seimbang antara kekuatan, kekakuan, dan daktilitas.

2.5 Perencanaan Struktur Bangunan Gedung

Perencanaan struktur bangunan dibutuhkan ketelitian dan ketepatan supaya suatu bangunan memenuhi standar kekuatan (*strength*), kenyamanan (*serviceability*), keselamatan (*safety*), dan ketahanan rencana bangunan (*durability*). Struktur konstruksi sebagai faktor pendukung berdirinya elemen konstruksi lainnya, salah satunya arsitektural. Struktur bangunan biasanya terbagi menjadi dua kategori, yaitu struktur bawah (*Lower Structure*) dan struktur atas (*Upper Structure*) (Prima & Rumbyarso, 2021).

2.5.1 Struktur Atas (*Upper Structure*)

Struktur atas merujuk pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas muka tanah. Bagian ini mencakup berbagai elemen penting seperti struktur atap, plat lantai, balok, kolom, dinding geser, dan tangga. Masing masing komponen ini

memiliki peran krusial dalam menopang beban, menahan gaya lateral, dan memberntuk ruang fungsional gedung (David Soumokil, 2022).

2.5.1.1 Kolom

Kolom adalah komponen struktur vertikal pada bangunan yang tugas utamanya adalah menyangga beban aksial tekan vertikal dari elemen struktur di atasnya, seperti balok, pelat, dan atap, serta meneruskan beban tersebut ke pondasi atau struktur bawah (Rendi & Kurniawan, 2021). Sebagai elemen struktur yang menahan beban lentur dan tekan sekaligus, keruntuhan pada satu kolom saja dapat menjadi lokasi kritis dan berpotensi menyebabkan keruntuhan pada lantai yang bersangkutan hingga keruntuhan total (*ultimate total collapse*) dari seluruh struktur bangunan (Suwanto & Nuryati, 2019).

2.5.1.1.1 Perencanaan Dimensi Kolom

Dalam perencanaan struktur atas pada dimensi kolom, penampang kolom harus diperhitungkan secara menyeluruh. Penampang kolom harus dapat menahan beban lentur (M) dan beban normal (gaya aksial), yaitu P . Akibatnya, distribusi tegangan internal semakin kompleks dari tegangan yang ditimbulkan gaya normal. Dalam perencanaan dimensi kolom dengan beban yang bekerja, perhatikan jumlah lantai yang ditahan oleh kolom. Semakin banyak jumlah lantai, beban yang bekerja semakin besar.

Perencanaan batasan dimensi kolom sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.7.2.1 dimensi pada penampang kolom tidak boleh kurang dari 300 mm dan perbandingan antara ukuran terkecil kolom dan ukuran vertikal tidak boleh kurang dari 0,4. Dimensi kolom dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\frac{I_{kolom}}{H_{kolom}} \geq \frac{I_{balok}}{L_{balok}}$$

Keterangan:

H_{kolom} : Tinggi bersih kolom h

L_{balok} : Bentang bersih balok

I_{kolom} : Inersia kolom ($1/12.b.h^3$)

I balok : Inersia balok ($1/12.b.h^3$)

Dengan syarat perencanaan dimensi kolom mengacu pada SNI pasal 2847:2019 pasal 18 harus memenuhi kriteria kolom-kolom sistem rangka pemikul momen khusus yang merupakan bagian sistem pemikul gaya seismik dan utamanya didesain untuk menahan gaya lentur, geser dan aksial serta menerima beban aksial

berfaktor $\geq \frac{Ag \times f'c'}{10}$

2.5.1.1.2 Perencanaan Tulangan Kolom

Menghitung penulangan lentur kolom SN1 2847:2019 Pasal 18:

1. Tentukan F_c dan F_y dan diameter sengkangnya
2. Hitung momen tumpuan atas dan bawah;

$$\text{Momen tumpuan atas} = A_s \times 1,25 \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\text{Menentukan momen tumpuan bawah} = A_s \times 1,25 \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{(A_s \times f_y)}{(0,85 \times f'c' \times b)}$$

3. Hitung reaksi di ujung kolom.

$$V_e = \frac{(\text{Momen Tumpuan Atas} + \text{Momen Tumpuan Bawah})}{l_u \text{ (panjang bentang bersih kolom)}}$$

4. Hitung kuat geser rencana untuk mengetahui gaya aksial terfaktor pada kolom.

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c$$

($V_c = 0$ jika V_c sebagai akibat gempa lebih besar dari V_u dan gaya aksial terfaktor pada kolom tidak melampaui).

5. Memasang kebutuhan tulangan geser sesuai luas kolom.

$$S = \frac{(A_v \times f_y \times d)}{V_s < S_{max}}$$

Keterangan:

A_v : Luas tulangan sengkang (mm^2)

6. Lakukan *checking* pada tulangan sengkang persegi (*Ash*)

Nilai *Ash* yang paling kecil diambil dengan persamaan:

$$Ash = \frac{0,3 \times (s \times b \times f'c)}{(fy \times t)} \times \left[\frac{Ag}{Ach} - 1 \right]$$

$$Ash = 0,09 \times \frac{(s \times b \times c \times f'c)}{fy}$$

Keterangan:

s : Jarak antar tulangan geser

bc : Lebar penampang inti beton terkekang

Ag : Luas bersih kolom

Ach : Luas penampang inti beton, dihitung dari serat terluar sengkang ke serat terluar sengkang sisi lainnya.

Penulangan geser kolom berdasarkan pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5 tentang penulangan geser kolom harus memenuhi kriteria. Menghitung kekuatan lentur kolom dihitung untuk gaya aksial terfaktor konsisten dengan arah gaya-gaya lateral yang ditinjau yang menghasilkan kuat lentur terendah harus memenuhi:

$$\Sigma Mnc \geq (1.2) \Sigma nb$$

Keterangan:

ΣMnc : Jumlah kekuatan lentur nominal kolom yang merangka ke dalam joint, yang dievaluasi di muka-muka joint.

Σnb : Jumlah kekuatan lentur nominal balok yang merangka ke dalam joint.

Menghitung tulangan transversal untuk kolom sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.7.5 yang berkaitan dengan pengekan beton dan penyediaan dukungan lateral untuk tulangan longitudinal.

- Panjang l_o tidak boleh \leq nilai terbesar antara tinggi kolom pada muka joint atau penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
- $1/6$ dengan tinggi bersih kolom
- 450 mm
- Tulangan geser terdiri dari spiral tunggal atau spiral overlap, sengkang pengekan bundar atau persegi dengan atau tanpa ikat silang untuk tumpuan lateral.

- Tulangan harus diatur sehingga spasi antara tulangan longitudinal di sepanjang perimeter penampang kolom yang tertumpu secara lateral oleh sudut ikat silang tidak boleh melebihi 350 mm.
- Spasi tulangan transversal tidak melebihi nilai terkecil dengan seperempat dimensi terkecil penampang kolom, enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil, $S_o = 100 + \left(\frac{350 - h_x}{s}\right)$ dengan S_o tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak perlu kurang dari 100 mm.

2.5.1.1.3 Hubungan Balok Kolom (*Joint*)

Dalam struktur bangunan, pertemuan balok dan kolom harus diperhatikan dengan sebaik-baiknya pada saat perencanaan. Perlu diperhatikan pada sambungan yang mengalami tegangan tinggi akibat dari gaya gempa.

Di satu sisi kolom pada tulangan atas balok terdapat tegangan tarik dan tegangan tekan secara bersamaan. Di sisi lain, pada tulangan bawah balok terjadi tegangan yang sebaliknya. (Robert Park & Thomas Pauly, 1983) dalam buku "*Reinforced Concrete Structure*" menjelaskan pertemuan balok dan kolom di struktur beton bertulang harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Dapat memperlihatkan kualitas penampilan balok dan kolom.
2. Mempunyai kuat minimal seperti dengan pembebanan kombinasi paling berbahaya.
3. Kekuatannya tidak boleh mempengaruhi pada kekuatan struktur karena digredasi kekuatan.
4. Mudah dilakukan baik selama proses pengecoran maupun saat pematatannya.

2.5.1.1.4 Penulangan Geser Pada Hubungan Balok Kolom

Pedoman Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung (SNI 2847, 2013) menyatakan bahwa gaya geser desain, V_e harus ditentukan melalui penilaian gaya statis pada komponen struktur antar muka joint. Harus diasumsikan bahwa komponen struktur dibebani dengan beban gravitasi terfaktor sepanjang batangnya

dan bahwa momen dengan tanda berlawanan yang berhubungan dengan kekuatan momen lentur yang mungkin, M_{pr} , bekerja pada muka-muka joint.

Gaya geser terfaktor yang bekerja pada hubungan balok-kolom, V_u , dihitung sebagai berikut:

- Untuk joint *interior*

$$V_u = 1,25 (A_s + A_s) f_y - V_{kol}$$

- Untuk joint *eksterior* dengan mengambil nilai terbesar

$$V_u = 1,25 x A_s x f_y - V_{kol}$$

- Gaya geser pada kolom,

$$V_{kol} = \frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2}}$$

- Menghitung tegangan geser nominal dalam joint

$$V_n = \frac{V_u}{b_j x h_c}$$

Keterangan:

V_n : Tegangan geser nominal *joint*

V_u : Gaya geser terfaktor

b_j : Lebar efektif hubungan balok kolom

h_c : Tinggi efektif kolom pada hubungan balok kolom

- Lebar efektif dapat dihitung berdasar persamaan

$$b_j = b + h_j$$

$$b_j \leq b + 2x$$

Keterangan:

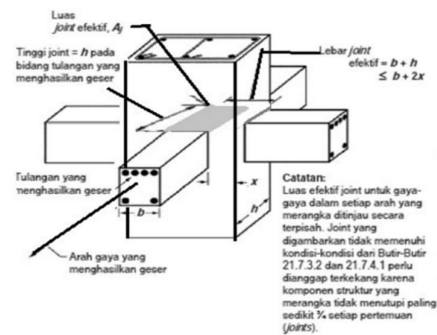
b_j : Lebar efektif hubungan balok kolom

h_j : Tinggi joint

b : Lebar balok

x : Selisih antara sisi terluar balok ke sisi terluar kolom

Sambungan balok dan kolom memperlihatkan hubungan struktural antara dua elemen utama bangunan untuk mentransfer beban secara efisien dari balok ke kolom, serta memastikan kekakuan dan kestabilan struktur, ilustrasi sambungan balok dan kolom dapat dilihat pada **gambar 2.6** dibawah ini.

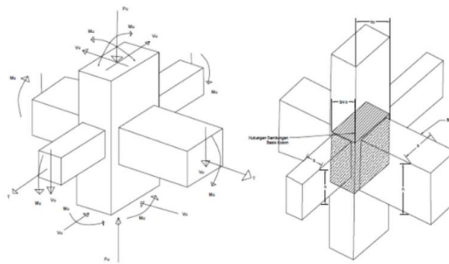


Gambar 2. 6 Ilustrasi Sambungan Balok Kolom

Sumber: SNI 2847:2013

Berdasarkan ilustrasi gambar diatas, menunjukkan penentuan luas joint efektif pada pertemuan balok dan kolom sistem rangka beton bertulang. Luas joint ini sangat penting dalam perhitungan gaya geser yang terjadi pada sambungan (joint), terutama dalam struktur tahan gempa. Sesuai dengan ketentuan dalam SNI 2847:2019, luas joint dihitung berdasarkan dimensi kolom dan balok yang berinteraksi, serta arah gaya geser yang bekerja. Kondisi sambungan yang tidak memenuhi kriteria tertutup penuh oleh elemen struktur, sehingga perlu dipertimbangkan pengaruh ketidakpenuhan tersebut terhadap kapasitas sambungan.

Pada balok kolom terdapat tulangan transversal yang diperlukan memberi cukup tekanan pada beton, sehingga akan terlihat kedetailan perilaku dan masih mampu menahan beban gravitasi vertikal walaupun selimut betonnya telah terkelupas seperti yang dapat dilihat pada ilustrasi **gambar 2.7** dibawah ini (American Concrete Institute 352R, 2002).



Gambar 2. 7 Ilustrasi Sambungan Balok Kolom ACI 352-2002

Sumber: ACI 352-2002

Komite 318 (*American Concrete Institute, 2002*) ACI-ASCE memutuskan perencanaan balok kolom dalam *joint and connection in monolithic reinforced concrete structure*. Dengan 2 tipe rapat sambungan balok kolom:

Type 1: Diharapkan tidak terjadi deformasi dengan menekankan kekuatan sebagai kriteria utama untuk pembebanan statis.

Type 2: Daerah inelastis digunakan untuk membebani gempa atau ledakan Ketika tegangan dipertahankan.

2.5.1.2 Balok

Balok merupakan elemen struktural yang dapat menanggung beban gaya transversal yang menyebabkan terjadinya momen lentur dan gaya geser pada bentangnya. Pada SNI 2847:2019 pasal 18.6 menjelaskan komponen frame yang ada tekanan aksial pada $\frac{A_g f'_c}{10}$ untuk kombinasi beban memerlukan standar yang berlaku.

2.5.1.2.1 Perencanaan Dimensi Balok

Perencanaan dimensi balok mengikut dengan SNI 2847:2019 berdasar peraturan pasal 9.5.3.2.2. Untuk menghitung lendutan, metode lendutan elastis tercantum dalam pasal 9.5.2.2 SNI 2847:2013 tabel 2.12. Penjelasan balok yang menahan beban lateral yang diinduksi oleh pergerakan gempa sesuai pasal 18.6.2.1 SNI 2847:2019 balok harus memenuhi:

- a. Bentang bersih, ℓ_n harus minimal $4d$.
- b. Lebar penampang b_w , harus sekurang-kurangnya nilai terkecil dari $0,3h$ dan 250mm .

Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75c_1$ pada masing-masing sisi kolom.

Tebal minimum balok non prategang atau pelat satu arah bila lendutan tidak dihitung dapat dilihat pada **tabel 2.15** sesuai SNI 2847:2013 berikut:

Tabel 2. 15 Tebal Minimum Balok Non - Prategang atau Pelat Satu Arah Bila Lendutan Tidak Dihitung

Tabel Minimum, h				
	Dua Tumpuan Sederhana	Satu Ujung Menerus	Kedua Ujung Menerus	Kantilever
Komponen Struktur	Komponen yang tidak dapat menahan atau tidak disalurkan dengan partisi atau struktur lain yang rentan terhadap kerusakan akibat lendutan yang besar			
Pelat masih satu arah	$L/20$	$L/24$	$L/28$	$L/10$
Balok atau pelat rusuk satu arah	$L/16$	$L/18,5$	$L/21$	$L/8$
Catatan: Untuk komponen struktur dengan panjang bentang dalam mm dan tulangan mutu 420 MPa, nilai yang diberikan harus digunakan secara langsung. Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis (<i>equilibrium density</i>) w_c diantara 1440 sampai 1840 kg/m ³ , nilai ini harus dikalikan dengan $(1,65-0,0003 w_c)$ tetapi tidak kurang dari 1,09.				

2.5.1.2.2 Perencanaan Tulangan Balok

Sumber: SNI 2847:2013

Bentang balok bersih komponen struktur tidak boleh <4 kali tinggi efektifnya (d') L_n/d maka dinyatakan aman. Perbandingan lebar balok kepada tinggi balok tidak boleh $< 0,3 B/h$ maka aman. Lebar balok tidak boleh kurang dari 250 mm dan melebihi 0,75 lebar kolom maka aman. Nilai tahanan geser (V_c) harus bernilai 0 apabila $V_e < V_u$ maka gaya geser pada tumpuan digunakan nilai V_u terbesar. Dengan pedoman SNI 2847-2013 jarak sengkang maksimum ($d/4$) dan jarak sengkang minimum ($6D$).

2.5.1.2.3 Penulangan Lentur Balok

Berdasar pada SNI 2847: 2019 pasal 18.6.3 tentang peraturan dan tata cara untuk perencanaan penulangan tulangan lentur balok, pada setiap sisi bagian struktur lentur pada tulangan atas atau bawah, dengan luas tulangan (A_s) harus memenuhi

syarat berikut $A_s \geq 0,025 \times b_w \times d$ dengan rasio tulangan $\rho < 0,025$ setidaknya dua batang tulangan harus tersedia secara konsisten di sisi atas dan bawah komponen dan diteruskan di kedua sisi.

Kolom balok atau muka joint harus memiliki kekuatan momen positif lebih dari sama dengan setengah kekuatan momen negatif dari muka joint. Kekuatan momen positif dari penampang apa pun pada panjang bentang komponen struktur harus minimal setengah dari kekuatan momen maksimum dari kolom balok atau muka joint. Melakukan desain tulangan balok dengan menentukan nilai μ yang didapat dari momen tumpuan dan lapangan balok menggunakan *ETABS*, kemudian menentukan momen nominal M_n , dan kemudian menentukan garis netralnya dalam kondisi seimbang.

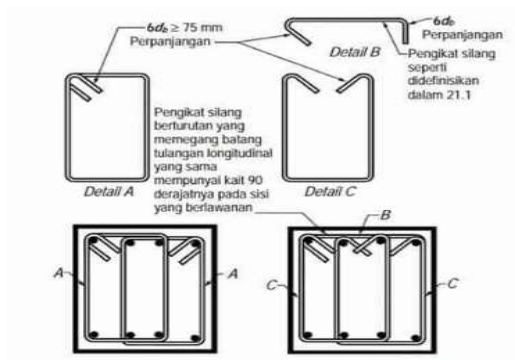
2.5.1.2.4 Penulangan Geser Balok

Perencanaan penulangan geser pada balok berperan penting menjaga pendukung lateral untuk batang tulangan yang alami kelelahan pikul. Adapun peranan penting tulangan geser sebagai penahan adanya gaya geser pada bagian yang retak, mempertahankan kekuatan struktur berdasar SNI 2847:2019 pasal 18.6.4 tulangan transversal.

Ketentuan perencanaan tulangan geser balok bertulang dapat dilihat pada **gambar 2.8** dibawah sesuai SNI 2847: 2019 pasal 18 (18.6.4) sebagai berikut:

1. Sengkang pengekang harus dipasang pada balok dengan jarak yang sama dengan 2 kali balok tingginya, diukur dari muka kolom penumpu ke arah tengah bentang di kedua ujung balok. Sedangkan jarak yang sama dengan tinggi dua kali tinggi balok di kedua sisi penampangnya, dengan kelelahan lentur mungkin bisa terjadi adanya deformasi lateral melampaui perilaku elastiknya.
2. Sengkang pengekang pertama harus berada $< 50\text{mm}$ dari kolom penumpu dengan d (tinggi balok) dibagi 4, spasi pengekang enam kali terkecil batang lentur utama tidak termasuk tulangan longitudinal dan spasi sengkang 150 mm
3. Sengkang pengekang balok terdiri dari dua batang tulangan, dengan ikat silang untuk penutup dan kait gempa pada kedua ujungnya. Pengikat silang pada

batang longitudinal yang sama harus memiliki kait lengkung 90 derajat dipasang selang seling di sisi yang berlawanan dengan komponen struktur lentur.



Gambar 2. 8 Sengkang Tertutup Saling Tumpuk dan Ilustrasi Batasan pada Spasi Horizontal Maximum Batang Tulangan Longitudinal yang Ditumpu

Sumber: 2847:2013

2.5.1.2.5 Gaya Desain

Gaya geser desain V_e dihitung dari tinjauan gaya-gaya pada bagian balok diantara kedua muka *joint*. M_{pr} diasumsikan bekerja pada muka-muka *joint* dan balok dibebani beban gravitasi tributary terfaktor disepanjang bentangnya, penguat perencanaan geser balok dengan SNI 2847:2019 pasal 18.6.5.1 dengan langkah perhitungan perencanaan tulangan geser sebagai berikut:

1. Menentukan nilai f_c' , f_y , diameter sengkang, dan V_g .
2. Menghitung momen tumpuan sisi-sisi pada balok

$$\text{Momen tumpuan kiri} = A_s \times 0,25 \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\text{Momen tumpuan kanan} = A_s \times 1,25 \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Dengan $\alpha = (A_s \times f_y) / (0,85 \times f_c' \times b)$ dan M_{pr} adalah momen tumpuan

$$W_u = 1,2D + 1,6L$$

3. Hitung reaksi diujung balok (V_e)

$$V_e = V_{\text{gempa}} + V_g$$

$$V_e = (M_{pr1} + M_{pr2}) / l_n \pm (W_u \times l_n) / 2$$

4. Hitung kuat geser rencana (V_s)

$$V_s = V_u / \phi - V_c$$

Dengan faktor reduksi pelat diambil nilai 0.8

5. Pasang kebutuhan tulangan geser

$$S = (A_v \times f_y \times d) / V_s \leq S_{max}$$

Dengan A_v merupakan luas tulangan sengkang (mm^2) S_{max} kurang dari sama dengan $\frac{1}{2} d$.

2.5.1.2.6 Tulangan Transversal

Tulangan transversal sepanjang daerah yang direncanakan pada desain diidentifikasi dalam pasal 18.6.5.2 SNI 2847:2019 dengan mengansumsikan $V_c = 0$ dan harus memenuhi:

- Gaya geser akibat gempa yang dihitung mewakili setidaknya setengah kekuatan geser perlu maksimum dalam bentang tersebut.
- Gaya tekan aksial terfaktor P_u termasuk pengaruh gempa kurang dari $A_g f_c / 20$.
- Dengan besaran $V_c = 0.17 \lambda \sqrt{f_c' b x} \cdot d$ untuk elemen gaya geser dan lentur serta besaran V_s minimum yang disyaratkan tulangan geser $V_s (min) = 1/3 b_w \cdot D$.

2.5.1.3 Pelat

Pelat lantai adalah elemen struktur datar yang tidak terletak langsung di atas tanah, melainkan menjadi lantai tingkat yang berfungsi sebagai pembatas antara satu tingkat dengan tingkat lainnya pada sebuah bangunan (Afnaldi & Dewi, 2022). Pada struktur pelat dengan komponen struktur beton bertulang perlu direncanakan dengan memperhatikan faktor pembebanan, ukuran, dan syarat-syarat agar tidak terjadi defleksi dengan merencanakan tebal dan tulangan pada pelat sesuai peraturan SNI 2847:2019.

2.5.1.3.1 Perencanaan Dimensi Pelat

Pelat dibagi menjadi dua, yaitu pelat satu arah (*one way slab*) dan pelat dua arah (*two way slab*). Pelat dua arah (*two way slab*) adalah pelat dengan tumpuan sederhana pada keempat sisinya oleh balok yang saling berseberangan dengan perbandingan bentang panjang dan bentang pendeknya kurang dari 2. Sedangkan pelat satu arah (*one way slab*) adalah pelat dengan tumpuan sederhana dengan 2 (dua) balok sejajar pada sisi sisi panjangnya yang saling berseberangan sehingga dengan analisa perhitungannya balok dianggap dengan asumsi lebar plat / balok per 1 meter dan tebal pelat dianggap sebagai tinggi balok. Pelat yang ditumpu sederhana dengan balok pada keempat sisinya juga bisa diasumsikan sebagai pelat satu arah jika nilai perbandingan bentang panjang dan pendeknya lebih dari 2 dengan mengikuti aturan konstruksi satu arah sesuai SNI 2847:2019 pasal 8.3.1.2. Tebal (h) minimum dari pelat satu arah seperti pada **tabel 2.16** dibawah

Tabel 2. 16 Ketebalan Minimum Pelat Solid Satu Arah Non Prategang

Kondisi Perlekatan	Minimum $h^{[1]}$
Perlekatan Sederhana	$l / 20$
Menerus satu sisi	$l / 24$
Menerus dua sisi	$l / 28$
Kantilever	$l / 10$

Sumber: SNI 2847:2019

Rasio perbandingan sisi panjang dengan sisi pendek yang saling tegak lurus tidak lebih dari 2 diperlukan penulangan utama di kedua arah, dengan jumlah

α_{fm}	h minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	8.3.1.1 berlaku	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln (0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)}$
		Tidak boleh < 125 mm
$\alpha_{fm} > 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln (0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 9\beta}$
		Tidak boleh < 90 mm
<ul style="list-style-type: none"> - Untuk pelat tepi tidak menerus, balok tepi dengan $\alpha_f \geq 0,80$ atau ketebalan minimal yang ditunjukkan pada tabel diatas. Panel tepi tidak menerus harus diperbesar setidaknya 10% sesuai SNI 2847:2019 - Jika dapat ditunjukkan dengan perhitungan bahwa lendutan yang terjadi tidak melebihi batas lendutan, pelat dengan tebal kurang dari tebal minimum yang ditetapkan dapat digunakan. 		

tulangan disesuaikan dengan besarnya momen yang terjadi pada masing masing arah (Kembuan et al., 2018). Ketebalan minimal pelat dua arah harus dapat mencegah lendutan menurut SNI 2847:2019, Pasal 8.3.1.2. Karena, menghitung lendutan dari pelat dua arah cukup sulit, rumus yang digunakan seperti pada **tabel 2.17** sebagai berikut:

Tabel 2. 17 Tabel Ketebalan Minimum Pelat Dua Arah Non Prategang Dengan Balok Diantara Tumpuan Pada Semua Sisinya

Keterangan:

l_n : Panjang bentang bersih dari konstruksi dua arah, diukur dari muka ke muka tumpuan pada pelat tanpa balok, dan dari muka ke muka tumpuan dalam situasi lain (mm).

β : Rasio bentang bersih antara arah panjang dan arah pendek dari pelat dua arah.

α_{fm} : Nilai rata rata α_f semua balok pada tepi dari suatu pelat.

α_f : Rasio kekakuan lentur penampang balok ($E_{cb}I_{cb}$) pada kekakuan lentur pelat ($E_{cs}I_s$), dibatasi secara lateral terhadap garis sumbu tengah pelat yang bersebelahan pada tiap sisi balok.

$$\alpha_f : \frac{E_{cb}I_c}{E_{cs}I_s}$$

I_b : Momen inersia brutto dari penampang balok terhadap sumbu berat, penampang balok mencakup bagian pelat pada setiap sisi balok sebesar proyeksi balok yang berada di atas atau di bawah pelat, namun tidak lebih dari empat kali tebal pelat.

I_s : Momen inersia brutto dari penampang pelat.

2.5.1.3.2 Perencanaan Tulangan Pelat

Perencanaan tulangan pelat digunakan untuk menyempurnakan dari struktur pelat sendiri sebagai penambah kekuatan tarik dalam menahan beban mati dan beban hidup pada pelat. Dalam menentukan luas tulangan yang diperlukan pelat penting untuk mengecek rasio penulangan dengan persamaan $p_{min} < p < p_{max}$.

Luas tulangan dengan asumsi bahwa rasio luas tulangan terhadap luas bruto penampang beton minimal 0,0014 momen yang terjadi pada penampang kritis menentukan luas tulangan yang diperlukan untuk pelat dua arah. Sesuai SNI 2847:2019 pada pelat satu arah minimum, tulangan lentur harus dekat dengan permukaan tarik beton karena beban, sedangkan tulangan utama tidak boleh melebihi 2x dari ketebalan pelat (3h). Pelat dua arah karena beban dari pelat yang disalurkan keempat balok sebagai penopang maka dibutuhkan tulangan. Lentutan yang dihasilkan pun relatif kecil akibat adanya kekakuan dari pelat yang meningkat. Langkah perhitungan mendesain penulangan lentur pelat lantai:

1. Menghitung momen nominal (M_n)

$$M_n = \frac{\text{Momen Ultimate dari Pelat yang Ditinjau}}{\text{Faktor Reduksi Pelat } (\phi)}$$

Nilai $\phi = 0,8$

2. Menghitung koefisien tahanan momen (R_n)

$$R_n = \frac{M_n}{(b \cdot d^2)}$$

Keterangan:

b : lebar elemen

d : tinggi efektif elemen

3. Menghitung rasio tulangan (ρ)

$$M = \frac{f_y}{(0,85 \times f_c)}$$

Keterangan:

f_y : tegangan leleh tulangan

f_c : kuat tekan beton

$$\rho_b = (0,85 \cdot f_c \cdot \beta_1) / f_y \times 600 / (600 + f_y)$$

Keterangan:

β_1 : faktor tinggi balok tegangan tekan persegi ekuivalen beban.

$\rho_{min} = 1,4 / f_y$ dan $\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b$ sebagai batasan rasio tulangan

Jika $f_c' \leq 30$ Mpa, $\beta_1 = 0,85$

Jika $f_c' > 30$ Mpa, $\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f_c' - 30)$

4. Menghitung rasio tulangan yang diperlukan (ρ_{perlu})

$$\rho_{perlu} = 1 / m (1 - \sqrt{(1 - 2m \cdot Rn) / f_y})$$

Jika $\rho_{perlu} < \rho_{min}$, maka ρ_{perlu} dinaikkan 30% jadi $\rho_{pakai} = 1,3 \times \rho_{perlu}$

5. Menghitung kebutuhan tulangan (A_s)

$$A_s \text{ perlu} = \rho_{perlu} \times b \times d$$

6. Cek kapasitas penampang

$$\alpha = \frac{A_s \times F_y}{0,85 \times f_c \times b} \text{ dan } \phi M_n = A_s \times f_y (d - a/2)$$

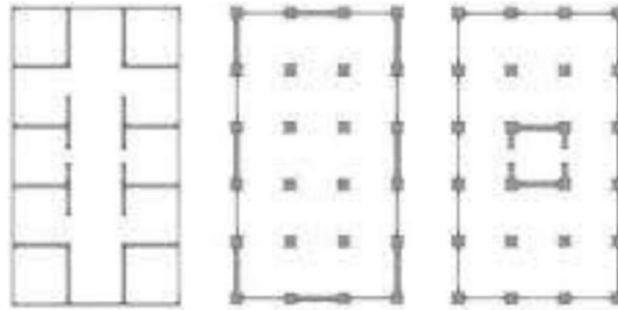
untuk memastikan kapasitas penampang terpenuhi harus lebih besar dari M_u .

2.5.1.4 Dinding Geser

Salah satu solusi alternatif untuk meningkatkan kinerja struktur dan meningkatkan ketahanan terhadap gempa adalah dinding geser atau dikenal juga sebagai dinding struktural (Tanoto Kalangi et al., 2021). Menurut *Smith Coull* (1991) dinding geser memiliki dua fungsi, yaitu kekakuan dan kekuatan. Sebagai elemen dinding yang berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur terhadap gaya lateral akibat gempa, dinding geser memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi dibanding elemen rangka biasa serta mampu membatasi pergerakan atau simpangan antar lantai (Setia et al., n.d, 2021). Menurut (Wiryadi Gegiranang, 2019) berdasar dengan letak dan fungsinya dinding geser diklasifikasikan menjadi 3 jenis elemen struktur antara lain:

1. *Bearing walls* dinding geser dengan menggunakan pemisah dinding antara bangunan yang berdekatan sebagai penahan dan pemikul sebagian besar gaya gravitasi.
2. *Frame walls* sering disebut juga sebagai dinding rangka geser yang tahan terhadap beban lateral, dimana rangka beton bertulang menghasilkan gaya gravitasi. Dinding ini diletakkan di baris kolom dijepit secara kaku oleh pondasinya.
3. *Core walls* dinding geser di tengah bangunan biasanya dapat digunakan pada tangga atau elevator dengan fungsi ganda pilihan paling ekonomis.

Ketiga jenis *shearwall* berdasarkan letak dan fungsinya tersebut dapat dilihat pada **gambar 2.9** dibawah ini.



Gambar 2.9 *Bearing Walls, Frame Walls, Core Walls*
Sumber: Nugroho 2017

Dinding geser merupakan model efektif dalam model struktur bangunan tahan gempa karena gaya dalam struktur yang relatif lebih kecil dibanding struktur *open frame*, dengan adanya dinding geser maka gaya gempa akan terserap oleh dinding. Perencanaan struktur elemen dinding geser harus didesain sebaik mungkin dalam ketahanan menahan gaya lateral akibat beban gempa, hal tersebut berdasar pada SNI 03-2847-2013 pasal 14.5.3.1 yang menjelaskan bahwa dinding geser tidak boleh memiliki ketebalan kurang dari $1/25$ tinggi atau panjang bentang tertumpu, atau kurang dari 100mm. Jenis jenis dinding geser yang banyak digunakan pada bangunan-bangunan tinggi yaitu dinding geser kantilever, dinding geser berangkai, dan sistem rangka – dinding geser (*dual system*).

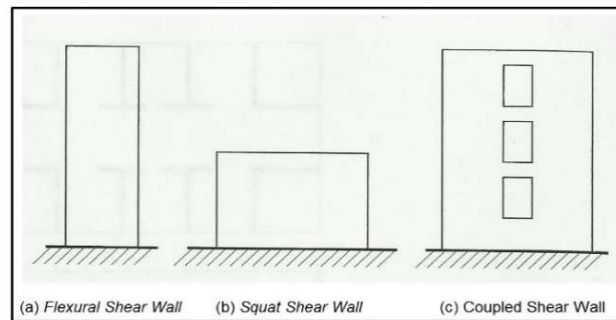
2.5.1.4.1 Elemen Struktur Dinding Geser

Dinding geser dapat dikategorikan berdasar letak geometrinya antara lain sebagai berikut:

- a. *Flexural wall* (dinding langsing) dinding geser dengan rasio $\frac{h_w}{l_w} \geq 2$ desainnya dikontrol perilaku lentur.
- b. *Squat wall* (dinding pendek) dinding geser berasio $\frac{h_w}{l_w} \leq 2$ yang desainnya dikontrol terhadap perilaku lentur.

- c. *Coupled shear wall* (dinding berangkai) dinding geser sebagai penahan momen guling yang diakibatkan beban gempa dengan penghubung antara dinding geser dengan balok penghubung dengan fungsi sebagai gaya tarik dan tekan yang bekerja pada dasar dinding.

Ketiga jenis *shearwall* berdasarkan letak geometrinya tersebut dapat dilihat pada **gambar 2.10** dibawah ini.



Gambar 2. 10 Jenis *Shear Wall* Berdasar Geometrinya

Sumber: Santi dan Aswandy, 2016

2.5.1.4.2 Perencanaan Dimensi Dinding Geser

1. Menghitung kebutuhan tulangan minimum dinding geser

$$V_n = V_u / \phi$$

$$A_{cv} = L_w \times t_w$$

$$P = 2 \times A_s / t_w \times s$$

Dengan syarat apabila $V_u / \phi < 0,083 A_{cv} \sqrt{f_c'}$ maka rasio tulangan longitudinal

$$P_l \geq 0,12 \% \text{ untuk diameter tulangan longitudinal } < 16$$

$$P_l \geq 0,15 \% \text{ untuk diameter tulangan longitudinal } > 19$$

Sedangkan untuk perhitungan tulangan transversal

$$P_t \geq 0,2 \% \text{ untuk } dt < 16$$

$$P_t \geq 0,25 \% \text{ untuk } dt > 19$$

Apabila $0,083 A_{cv} \sqrt{f_c'} < V_u / \phi \leq 0,17 A_{cv} \sqrt{f_c'}$

Rasio tulangan longitudinal dan tulangan transversalnya harus

$$P_l \text{ dan } P_t \geq 0,25 \%$$

Jika $V_n > 0,17 \cdot A_{cv} \sqrt{f'c'}$ maka harus dibuat 2 lapis tulangan, disarankan.

2. Menghitung kapasitas geser SNI 03-2847-2013

$$\frac{V_u}{\phi} \leq V_n$$

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'c'} + P_t \cdot F_y)$$

$$V_n \leq 0,667 A_{cv} \sqrt{f'c'}$$

3. Menghitung penulangan transversal

Desain penampang yang dikenai geser harus didasarkan SNI 2847:2013 pasal

$$11.1 \frac{V_u}{\phi} \leq V_n.$$

Keterangan:

V_u : gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau

V_n : kekuatan geser nominal

$V_n = V_c + V_s$ (kuat geser nominal oleh beton + kuat geser dari tulangan geser)

$V_c = 0,17 \gamma \sqrt{f'c' b_w d}$ untuk komponen struktur yang dikenai geser dan lentur saja (SNI 2847:2013)

$V_c = 0,17 (1 + N_u/14 A_g) \gamma \sqrt{f'c' b_w d}$ untuk komponen struktur yang dikenai tekan aksial (SNI 2847:2013 pasal 11.2)

4. Lakukan *check* Elemen Batas Khusus

Metode *Displacement Based*, Elemen batas khusus diperlukan jika,

$$C \geq \frac{L_w}{600 \left(\frac{1,5 \Delta u}{h_w} \right)} \text{ dengan } \frac{\Delta u}{h_w} \geq 0,005 \text{ SNI 2847:2019}$$

Menghitung tinggi, ($h_{be} = \text{Max dari } \frac{M_u}{4v_u}$)

2.4.1.5 Atap

Atap merupakan struktur atas yang memiliki fungsi sebagai penopang atau penahan dan menyambungkan aliran beban dari atap struktur atap terdiri dari rangka atap dan penopang rangka atap (Imroatuzzakiyah et al., n.d.). Yang berfungsi untuk menahan beban dari bahan penutup atap adalah rangka atap. Struktur atap

juga sebagai penutup seluruh ruang bangunan dibawahnya untuk memberikan perlindungan dan menghindari pengaruh angin, hujan, panas, ataupun debu.

2.4.2 Struktur Bawah (*Lower Structure*)

Setiap bagian bangunan yang ada di bawah permukaan tanah disebut struktur bawah (*Lower Structure*), sebagai contohnya antara lain pondasi, sloof, dan pile cap. Struktur bawah ini harus kuat dalam memikul beban dari struktur atas seperti beban mati (DL), beban hidup (LL), beban gempa (E), dan lain sebagainya, Perencanaan struktur bawah yang kurang teliti dapat menyebabkan keruntuhan pada bangunan tersebut (Silaen et al., 2022).

2.4.2.1 Pondasi *Bore Pile*

Pondasi *bore pile* adalah jenis pondasi dalam yang menyerupai tabung atau silinder, yang dibuat dengan campuran beton bertulang dan dimensi diameter tertentu yang bervariasi sesuai kebutuhan desain. Proses pemasangan dengan metode pengeboran hingga mencapai kedalaman tertentu dimana lapisan tanah memiliki tingkat kekerasan dan daya dukung yang memadai (Silaen et al., 2022).

2.4.2.1.1 Analisis Daya Dukung Tiang (N-SPT)

Perhitungan daya dukung pondasi tiang didasarkan pada data hasil uji lapangan seperti SPT (*Standard Penetration Test*) atau CPT (*Cone Penetration Test*). Metode yang dapat digunakan untuk perhitungan daya dukung pondasi adalah metode *Mayerhoff* (1956) dan *Schmertmann* (1967).

1. Metode *Mayerhoff* (1956)

- a) Mencari daya dukung ujung tiang bor (Q_p)

$$Q_p = 40 \times N_b \times A_p$$

Keterangan:

A_p : Luas permukaan ujung tiang bor (m^2)

N_b : Nilai rata rata N-SPT pada zona 10D bagian atas dan 4D bagian bawah ujung tiang bor = $\frac{N_1+N_2}{2}$

N_1 : N-SPT rata rata (10xD) meter diatas ujung tiang bor

N_2 : N-SPT rata rata (4xD) meter di bawah ujung tiang bor

b) Mencari daya dukung selimut atau friksi tiang bor (Q_s)

$$Q_s = 0,1 \times N \times A_s$$

Keterangan:

N : Nilai N-SPT rata rata

A_s : Luas selimut tiang (m^2)

c) Mencari nilai daya dukung ultimit (Q_{ult}) dan daya dukung izin (Q_{all})

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{F_s}$$

Keterangan:

Q_{ult} : Kapasitas daya dukung ultimit (kN)

Q_{all} : Daya dukung izin tiang (kN)

Q_p : Daya dukung ujung tiang bor (kN)

Q_s : Daya dukung selimut atau friksi (kN)

F_s : *safety factor* ($FS = 1,5 - 2,5$)

2. Metode *Schmertmann* (1967)

a) Mencari daya dukung ujung tiang bor (Q_p)

$$Q_p = 4 \times A_p \text{ tiang} \times N_p$$

Keterangan:

A_p : Luas permukaan ujung tiang bor (m^2)

Q_p tiang : Daya dukung ujung tiang (ton)

A_p tiang : Luas penampang ujung *Bored Pile* (ft^2)

N_p : Nilai rata-rata N-SPT di sekitar ujung *bored pile*

b) Mencari nilai daya dukung ultimit (Q_{ult}) dan daya dukung izin (Q_{all})

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s$$

$$Q_{all} = \frac{Q_{ult}}{F_s}$$

Keterangan:

Q_{ult} : Kapasitas daya dukung ultimit (kN)

Q_{all} : Daya dukung izin tiang (kN)

Q_p : Daya dukung ujung tiang bor (kN)

Q_s : Daya dukung selimut atau friksi (kN)

FS : *safety factor* (FS = 1,5 – 2,5)

c) Mencari nilai daya dukung bersih *bore pile*

$$Q_{netto} = Q_{izin} - \text{Berat sendiri tiang}$$

$$\text{Berat sendiri tiang} = A \times L \times w$$

Keterangan:

A : Luas penampang tiang (cm²)

L : Kedalaman tiang (cm)

W : Masa jenis material tiang (kg/cm³)

Metode Meyerhof (1956) dan Schmertmann (1967) memiliki fokus dan pendekatan yang berbeda dalam analisis pondasi tiang. Metode Meyerhof digunakan untuk memperkirakan daya dukung ultimit tiang berdasarkan data N-SPT, dengan membagi perhitungan menjadi dua komponen, yaitu daya dukung ujung (*end bearing*, Q_p) dan daya dukung gesek selimut (*shaft friction*, Q_s). Rumusnya bersifat empiris, hasil korelasi uji lapangan, dan memberikan gambaran berapa besar kapasitas beban yang dapat ditahan tiang. Sementara itu, metode Schmertmann (1967) digunakan untuk memperkirakan penurunan elastis (*immediate settlement*) pondasi, baik tiang maupun pondasi dangkal, dengan memanfaatkan data CPT yang dikonversi menjadi modulus elastisitas tanah (E_s) dan menerapkan faktor pengaruh regangan (*strain influence factor*). Schmertmann tidak menghitung kapasitas ultimit, melainkan memprediksi seberapa besar deformasi yang terjadi pada beban kerja tertentu. Dengan demikian, Perencanaan pondasi Rusun Paspampres menggunakan **Metode Meyerhof** dalam memastikan pondasi cukup kuat menahan beban.

2.4.2.1.2 Kebutuhan Jumlah Tiang dan Konfigurasinya

Luasan denah tiang dipengaruhi oleh jumlah tiang dan jarak tiang. Berdasarkan SNI 8460:2017 pasal 9.7.1.2, jarak antara as ke as tiang lain tidak diperbolehkan kurang dari keliling tiang untuk pondasi tiang, dan tidak diperbolehkan kurang dari 2,5 kali diameter tiang jika berbentuk lingkaran.

$$n = \frac{P_u}{Q_{all}}$$

Keterangan:

P_u : Gaya aksial maksimum yang diperoleh analisis struktur (kN)

Q_{all} : Daya dukung izin tiang (Kn)

2.4.2.1.3 Nilai Efisiensi Grup Tiang Pondasi

Nilai daya dukung grup tiang perlu dihitung terhadap nilai efisiensi grup tiang pondasinya menggunakan persamaan *Converse – Labarre*.

$$E_g = 1 - \phi \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \times m \times n}$$

Keterangan:

E_g : Efisiensi grup tiang pondasi

n : Jumlah tiang pondasi dalam satu baris

m : Jumlah baris tiang pondasi

ϕ : arc tan (d/s) dalam derajat

s : jarak antar pusat ke pusat tiang (m)

d : diameter tiang (m)

2.4.2.1.4 Nilai Penurunan Elastis Tiang Pondasi

1. Penurunan Lapisan Tanah Pada Ujung Tiang

Penurunan elastis tiang pondasi diakibatkan adanya pengaruh beban vertikal ditahan oleh pondasi.

$$S_e = S_{e1} + S_{e2} + S_{e3}$$

Keterangan:

S_{e1} : Penurunan langsung tiang

S_{e2} : Penurunan yang diakibatkan beban pada ujung tiang

S_{e3} : Penurunan yang diakibatkan beban di sepanjang selimut tiang

Perhitungan penurunan elastis tiang dengan beberapa kondisi dihitung dengan persamaan metode *Vesic* (1977) dalam *Das dan Sivakugan* (2019).

a) Penurunan langsung tiang (S_e)

$$S_e = \frac{(Q_{wp} + Q_{ws}) \times L}{(A_p \times E_p)}$$

Keterangan:

Q_{wp} : Beban pada ujung tiang (kN)

Q_{ws} : Beban yang ditahan pada sepanjang selimut tiang (kN)

L : Kedalaman tanah (m)

A_p : Luas tiang (m²)

E_p : Modulus elastis tiang (kN/m²)

b) Penurunan yang diakibatkan beban pada ujung tiang (S_e)

$$S_e = \left(\frac{q_{wp} \times D}{E_s} \right) \times (1 - \mu_s^2) \times l_{wp}$$

$$S_e = \left(\frac{Q_{wp} \times C_p}{D \times q_p} \right)$$

Tabel 2. 18 Nilai Koefisien Empiris

Jenis Tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
Pasir	0,02 - 0,04	0,09 - 0,18
Lempung	0,02 - 0,03	0,03 - 0,06
Lanau	0,03 - 0,05	0,09 - 0,12

Sumber: *Bowles*, (2010)

Keterangan:

Q_{wp} : Beban pada ujung tiang (kN)

q_{wp} : $\frac{Q_{wp}}{A_p}$ (kN)

q_p : Ketahanan ultimit pada ujung tiang bor = 90 C_u

C_u : 2 x N-SPT X 10

A_p : Luas tiang (m^2)

D : Diameter bore pile (m)

E_s : Modulus elastisitas tanah (kN/m^2)

μ_s : Angka poisson tanah

I_{wp} : Faktor pengaruh, berdasarkan *influence factor*

c) Penurunan yang diakibatkan beban di sepanjang selimut tiang (S_e)

$$S_e = \left(\frac{Q_{ws}}{O \times L}\right) \times \left(\frac{D}{E_s}\right) \times ((1 - \mu_s^2) \times I_{ws}), \quad I_{ws} = 2 + 0,35 \times \sqrt{\frac{L}{D}}$$

$$S_e = \left(\frac{Q_{ws} C_s}{L q_p}\right) \quad , \quad C_s = (0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}}) C_p$$

Keterangan:

Q_{ws} : Beban yang ditahan pada sepanjang selimut tiang (kN)

C_s : Konstanta empiris

O : Keliling bore pile (m)

L : Kedalaman tanah (m)

D : Diameter bore pile (m)

E_s : Modulus elastisitas tanah (kN/m^2)

μ_s : Angka poisson tanah

d) Penurunan izin tiang (S_e min)

$$S_{e \text{ izin}} = \left(15 \text{ cm} + \frac{B}{600}\right) \text{ cm}$$

Keterangan:

B : Panjang pile cap (cm)

2. Penurunan Kelompok Tiang Bor

Penurunan kelompok tiang bor dapat ditentukan berdasarkan *Vesic* (1969).

$$B_g = \text{spasi tiang} + \left(2 \times \frac{1}{2} D\right)$$

$$S_g = S_e \times \sqrt{\frac{B_g}{D}}$$

Keterangan:

D : Diameter bore pile (m)

- S_g : Penurunan elastis kelompok tiang (m)
 B_g : Lebar kelompok tiang (m)
 S_e : Penurunan elastis tiang total (m)

2.4.2.1.5 Nilai Analisis Daya Dukung Horizontal

Tiang pondasi tidak hanya menerima beban vertikal, tetapi juga beban horizontal dari tanah. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan agar tiang pondasi tidak mengalami defleksi yang menyebabkan kegagalan struktur. Beberapa langkah dalam analisis daya dukung horizontal sebagai berikut:

1. Menentukan jenis tanah

Menentukan jenis tanah (kohesif dan non kohesif) pada kedalaman kritis dibawah permukaan tanah pada lokasi yang ditinjau sehingga didapat nilai C_u (*Undrained Cohession*) untuk menentukan kekakuan tiang (k).

2. Menghitung kapasitas tiang pondasi

Peninjauan kapasitas tiang pondasi perlu dilakukan untuk mengantisipasi terjadinya gaya lateral tanah.

$$\beta = \left(\frac{k \times d}{4 \times E_p \times I_p} \right)^{1/4}$$

Keterangan:

β : Faktor non dimensi

d : Diameter *bore pile* (m)

E_p : Modulus elastisitas tiang (MPa)

I_p : Momen inersia tiang (m^4)

k : Modulus reaksi subgrade (*Das dan Sivakugan, 2019*)

$$k = 0,65 \times \sqrt[12]{\frac{E_s \times D^4}{E_p \times I_p}} \times \frac{E_s}{1 - \mu_s^2}$$

Keterangan:

E_s : Modulus elastisitas tanah (kN/m^2)

μ_s : Angka poisson tanah

Berdasarkan (Murthy, 2002), parameter penentuan tiang panjang dan tiang pendek sebagai berikut:

- Tiang panjang, $\beta L \geq 1,5$ m
- Tiang pendek, $\beta L < 1,5$ m

2.4.2.1.6 Perencanaan Tulangan Tiang Bor

1. Tulangan Longitudinal

Tulangan longitudinal berdasar kebutuhan rasio tulangan berdasarkan pasal 18.7.4.1 SNI 2847:2019. Luas tulangan longitudinal (A_{st}) tidak boleh kurang dari $0,01 A_g$ dan tidak lebih dari $0,06 A_g$.

2. Tulangan Transversal

Tulangan transversal direncanakan sebagai tulangan spiral.

$$A_{v1} = \frac{V_s \times S}{f_y \times d}$$

$$A_{v2} = 0,35 \times \frac{D \times S}{f_y}$$

$$A_{v3} = 0,062 \times \sqrt{f_c'} \times \frac{D \times S}{f_y}$$

Keterangan:

$$V_s : \frac{V_u - \phi V_c}{\phi}$$

S : Jarak 1 m = 1000 mm

D : Diameter tiang

d : Tinggi efektif penampang

Syarat perencanaan tulangan transversal spiral sebagai berikut $D_s > 10$ mm

$$\frac{n \times 0,25 \times \pi \times D_s^2 \times S}{s} > A_{vmin}$$

Keterangan:

n : Jumlah tulangan transversal

D_s : Diameter tulangan transversal

S : Jarak tulangan transversal

2.4.2.2 Pile Cap

Perencanaan pile cap yang baik dan efisien adalah komponen vital dalam desain pondasi tiang. Pile cap berfungsi sebagai “jembatan” yang menyatukan beberapa tiang pancang atau bore pile dan mendistribusikan beban dari struktur atas secara merata ke tiang tiang tersebut (Susanto et al, 2019). Tujuan adanya pile cap supaya lokasi kolom benar-benar tepat pada titik pusat pondasi dan menghindari eksentrisitas yang meningkatkan beban pondasi. Perencanaan pile cap sesuai (SNI-1726-2019) pasal. 13.4.2 adalah sebagai berikut:

- Ketebalan pile cap harus di rancang sedemikian rupa sehingga tinggi efektif selimut bawah tidak kurang dari 300 mm.
- Menghitung momen dan gaya geser terfaktor dari reaksi setiap tiang yang dianggap terkonsentrasi pada titik pusat penampang tiang.
- Pile cap harus dirancang sehingga dapat dipenuhi untuk pondasi satu arah (a) dan pondasi 2 arah (b) dimana:
 - (a) $\phi V_n \geq V_u$, dimana V_n harus dihitung sesuai pasal 22.5 untuk geser satu arah, V_n harus dihitung sesuai pasal 13.4.2.5, dan ϕ harus sesuai pasal 21.2
 - (b) $\phi V_n \geq V_u$, dimana V_n harus dihitung sesuai pasal 22.6 untuk geser dua arah, V_n harus dihitung sesuai pasal 13.4.2.5, dan ϕ harus sesuai pasal 21.2

Pengecekan geser satu arah maupun dua arah harus diperhitungan agar pile cap aman dan menghindari terjadinya keruntuhan geser pada pile cap.

$$V_s = \frac{\sum Fz}{n} + \frac{M_x y_i}{\sum y_i} + \frac{M_y x_i}{\sum x_i}$$

Keterangan:

- P : Reaksi tiang pondasi
- Fz : Gaya vertikal struktur
- n : Jumlah tiang pondasi
- M_x : Momen arah sumbu x
- M_y : Momen arah sumbu y
- x_i : Jarak tiang pondasi terhadap sumbu x
- y_i : Jarak tiang pondasi terhadap sumbu y

Menghitung kapasitas geser satu arah menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_{c1} = 0,17 x \sqrt{f'c'} x b x d$$

Keterangan:

b : Lebar pile cap (m)

d : Tinggi efektif pile cap (m)

Perhitungan kapasitas geser dua arah pada daerah kritis kolom menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$b_o = 4 (c + d)$$

$$V_{c1} = 0,17 x \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) x \lambda x \sqrt{f'c'} x b_o x d$$

$$V_{c2} = 0,083 x \left(2 + \frac{\alpha_s x d}{b_o}\right) x \lambda x \sqrt{f'c'} x b_o x d$$

$$V_{c3} = 0,33 x \sqrt{f'c'} x b_o x d$$

Keterangan:

b_o : Perimeter bidang kritis (m)

β : Rasio sisi panjang dan sisi pendek kolom

d : Tinggi efektif pile cap (m)

c : Panjang sisi kolom (m)

α : 40 untuk kolom interior, 30 untuk kolom tepi, 20 untuk kolom sudut.

Berdasarkan tiga persamaan diatas, maka nantinya diambil nilai terkecil untuk menghitung kapasitas geser terfaktor. Besarnya nilai kapasitas geser terfaktor tidak boleh lebih besar dari gaya geser ultimit dengan $\phi = 0,75$. Sama halnya dengan nilai momen nominal tereduksi tidak boleh kurang dari nilai momen ultimit.

$$\phi V_n \geq V_u \quad \phi M_n \geq M_u$$

2.4.2.3 Tie Beam

Tie beam berperan penting dalam menjaga stabilitas posisi gedung. Ini dilakukan dengan meratakan distribusi beban dari kolom ke pile cap, membantu menyamakan penurunan pondasi, dan mengikat kolom dengan pile cap menjadi satu kesatuan. Dengan demikian, *tie beam* secara efektif meningkatkan kekakuan keseluruhan

struktur dan mencegah rotasi kolom, terutama saat terjadi gempa (Amalia et al., n.d., 2021).

- Berdasarkan SNI 2847:2019, nilai dimensi penampang paling kecil harus lebih besar atau sama dengan spasi bersih antara kolom yang disambung, dibagi dengan 20. Namun, dimensi ini tidak perlu melebihi 450 mm.
- Berdasarkan SNI 1726:2019, kekuatan tarik atau tekan yang harus dimiliki pengikat (*tie beam*) harus memenuhi kriteria minimum tertentu. Kuat tarik atau tekan yang direncanakan untuk pengikat (*tie beam*) tidak boleh kurang dari gaya sebesar 10% dari S_{DS} (Percepatan Spektral Desain Periode Pendek) dikalikan dengan nilai terbesar dari jumlah beban mati terfaktor ditambah beban hidup terfaktor yang bekerja pada pile cap atau kolom yang lebih besar.
- Berdasarkan SNI 8460:2017, *tie beam* direncanakan untuk tidak mengalami penurunan signifikan, besarnya *tie beam* yang diizinkan $< 15 \text{ cm} + \frac{b \text{ (cm)}}{600}$.

2.5 Software ETABS

Penggunaan *software ETABS* dalam perencanaan BIM 5D bermanfaat untuk menganalisis dan mendesain struktur bangunan secara akurat, sehingga data perhitungan gaya dalam, kapasitas elemen, serta respons struktur terhadap gempa dapat diintegrasikan ke dalam model BIM untuk menghasilkan estimasi biaya dan jadwal yang lebih realistis dan terkoordinasi, mampu menangani berbagai permasalahan struktural yang kompleks dengan fitur analisis statik dan dinamik yang canggih, termasuk analisis beban gempa dan angin. Program ini juga dirancang khusus untuk menganalisis dan merencanakan lima jenis struktur utama, yaitu frame baja, frame beton, balok komposit, rangka batang baja, dan dinding geser (Dewi & Pratama, 2018). Analisa struktur yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk mendapatkan gaya gaya dalam dan kekuatan setiap elemen struktur berdasarkan berbagai kombinasi beban yang diterapkan (Rahmat, 2018). *Fitur run analysis* dan *check design* di ETABS melakukan pengecekan desain struktur baik kolom, balok, maupun dinding geser tidak mengalami kondisi *overstressed* yang artinya rasio permintaan terhadap kapasitas (*Demand/Capacity*)

masih ≤ 1.0 , sehingga struktur tidak berada dalam kondisi *overstress* dan memenuhi persyaratan desain yang aman.

2.6 Autodesk Revit 2023

Autodesk Revit 2023 adalah program grafis tiga dimensi yang berbasis *Building Information Modeling* (BIM) yang menghasilkan gambar sketsa tiga dimensi, tetapi juga dapat mensimulasikan berbagai kebutuhan informasi proyek dalam bentuk permodelan gambar tiga dimensi. Program ini sangat tepat dalam membuat atau merencanakan objek tiga dimensi dan proses pengeditan lebih mudah dibanding dengan aplikasi lain (Saputra et al., 2022). Sebagai seorang *engineering* sipil, *Revit* sangat membantu proses permodelan struktur yang akan direncanakan seperti pondasi, sloof, kolom, dan balok. Menurut (Marizan, 2019), keuntungan penggunaan *Autodesk Revit* pada perencanaan BIM 5D antara lain:

- a) *Revit* menggabungkan semua kebutuhan ini ke dalam satu perangkat lunak yang dapat digunakan oleh satu orang.
- b) *Revit* memungkinkan satu orang untuk menyelesaikan banyak tugas sehingga mengurangi kebutuhan sumber daya.
- c) Perencanaan proyek yang menggunakan *Revit* dapat mengurangi biaya dengan menghemat waktu dan sumber daya manusia.

Pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres IKN tidak menggunakan software seperti *SketchUp*, *ArchiCAD*, dan *3ds Max* memang berguna di tahap tertentu, tapi *Revit* unggul dalam integrasi lintas disiplin, otomatisasi dokumentasi, dan kolaborasi BIM, sehingga lebih efisien untuk perencanaan dan konstruksi skala besar.

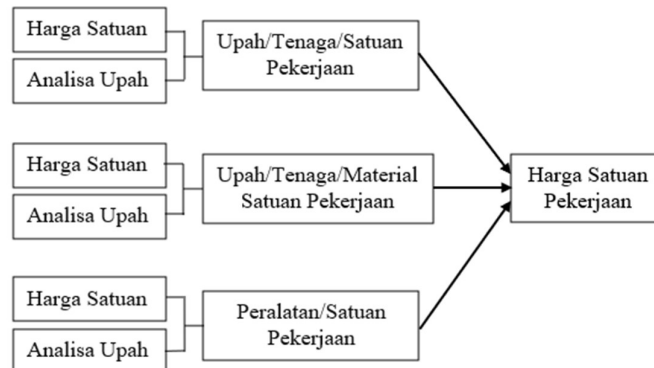
2.7 Quantity Material Take Off

Dalam perencanaan suatu proyek konstruksi memerlukan volume atau *quantity take-off* yang hingga kini Indonesia masih berdasarkan pada gambar dari *Autocad* dan dibantu *software Microsoft Excel* (Pongai M et al., 2023). *Quantity take-off* disebut sebagai pekerjaan untuk menghitung volume item pekerjaan yang

dibutuhkan selama masa konstruksi secara detail, akurat, dan konsisten dengan menggunakan metode BIM (*Building Information Modeling*) maupun konvensional (Sadad et al., 2023). Perhitungan volume dapat dilakukan dengan bantuan *software Autodesk Revit* karena dapat menghasilkan output berupa *quantity take-off* yang dibutuhkan oleh suatu proyek konstruksi (Dwi Novita & Pangestuti, n.d., 2021). Pada perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres IKN tidak menggunakan Revit unggul dalam *QTO* karena otomatis, terintegrasi, akurat, dan real-time update. Dibanding software grafis 3D lain yang fokus pada pemodelan visual, Revit memadukan desain dengan manajemen data material, sehingga *QTO* menjadi bagian dari alur kerja, bukan pekerjaan terpisah.

2.8 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Selama proses menghitung estimasi biaya proyek konstruksi, terkhusus pada perhitungan estimasi detail, diperlukan ketelitian dan waktu yang relatif lama tergantung pada besarnya proyek, jumlah estimator yang terlibat, serta tingkat keahlian juga pengalaman dari estimator (Suardika, 2019). Konsep penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) proyek berdasar analisis komponen penyusun (material, upah, dan peralatan) untuk setiap item pekerjaan yang termasuk dalam proyek secara keseluruhan yang nantinya akan menghasilkan. Harga Satuan Pekerjaan (HSP) per item sebagai dasar mengestimasi nilai biaya pelaksanaan proyek secara keseluruhan dengan mengkonversikannya ke dalam total biaya proyek (Sulaeman Fietri, 2021). Beberapa tahapan dalam perencanaan perhitungan RAB (Rencana Anggaran Biaya) dapat dilihat pada **gambar 2.11** dibawah ini.



Gambar 2. 11 Alur Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Sumber: Taufik Rido, 2023

2.9 Time Schedule

Time schedule adalah bagian penting dari pengendalian proyek. Proyek besar tidak dapat dijadwalkan dan direncanakan secara manual, sehingga pengelola membutuhkan perangkat lunak yang membantu (Oktaga et al., 2022). *Time schedule* mencakup tenaga kerja, material, peralatan, keuangan, dan waktu. Jika dilakukan dengan benar, dapat menghindari kerugian seperti keterlambatan, biaya yang lebih tinggi, dan perselisihan atau klaim (Rachmawati & Abma, 2022).

Jadwal aktual proyek akan diilustrasikan menggunakan *Gantt Chart* untuk memberikan gambaran visual mengenai alur dan urutan pelaksanaan kegiatan dalam proyek berupa diagram skematik yang menampilkan daftar tugas secara vertikal dan waktu pelaksanaan horizontal, sehingga memudahkan pemantauan durasi, ketergantungan antar tugas, dan kemajuan proyek secara real time (Larasati & Sutopo, 2020).

2.10 Microsoft Project 2021

Penggunaan *Microsoft Project 2021* dalam perencanaan BIM 5D bermanfaat untuk mengintegrasikan jadwal pelaksanaan proyek secara detail ke dalam model. Dengan menggunakan program *Microsoft Project* dapat membuat rencana penjadwalan, item pekerjaan, hubungan antar aktivitas pekerjaan, dan alokasi ketenagakerjaan (Rachmawati & Abma, 2022). Perangkat lunak komputer sekarang

terlibat dalam setiap kegiatan yang berkaitan dengan manajemen proyek dan dapat membantu menyelesaikan proyek lebih cepat dengan mengurangi biaya dan meningkatkan produktivitas dan akurasi pekerjaan (Oktaga et al., 2022).

Fitur Predecessor dalam *Microsoft Project* adalah alat penting untuk menentukan hubungan keterkaitan antara aktivitas atau tugas dalam proyek. Memahami bagaimana kegiatan berhubungan satu sama lain dan logika hubungan yang terjadi di antara mereka, contohnya mendahului (*predecessors*), mengikuti (*successor*), dan bersamaan (*concurrent*) (Resta, 2023).

2.11 Autodesk Navisworks 2023

Penggunaan *software Navisworks 2023* dalam perencanaan BIM 5D membantu dalam mengintegrasikan model 3D dengan jadwal dan estimasi biaya proyek, visualisasi pelaksanaan konstruksi secara real time, serta koordinasi antar disiplin yang lebih efektif. *Autodesk Navisworks* adalah perangkat lunak kolaborasi dan manajemen proyek yang dikembangkan oleh *Autodesk*, khususnya untuk industri konstruksi dan rekayasa dimana memungkinkan pengguna untuk menggabungkan model 3D dari berbagai disiplin seperti arsitektur, struktur, dan MEP (mekanikal, elektrikal, dan pipa) menjadi satu model koordinasi terpadu yang dapat divisualisasikan secara interaktif (Prasetyo et al., n.d., 2024).

Keunggulan utama dari *Navisworks* adalah kemampuan untuk membuat model gabungan tunggal yang memudahkan visualisasi dan integrasi data desain konstruksi, adanya deteksi benturan sehingga dapat mengidentifikasi dan menyelesaikan konflik sebelum konstruksi dimulai, serta pengendalian jadwal dan biaya proyek melalui simulasi 4D dan 5D (Wisdianti et al., 2024). *Autodesk Navisworks* memiliki peran penting dalam perencanaan struktur tahan gempa Rusun Paspampres IKN sebagai penghubung antara desain, penjadwalan, dan estimasi biaya dalam manajemen proyek berbasis BIM. Model 3D yang dibuat di Revit dapat diimpor ke *Navisworks* untuk dilakukan analisis lebih lanjut seperti *clash detection* dan simulasi konstruksi menggunakan bentuk file NWD. Jadwal proyek yang disusun di *Microsoft Project* dapat diintegrasikan ke *Navisworks* untuk

menghasilkan simulasi 4D dengan melakukan *import file* , sehingga proses pembangunan dapat divisualisasikan sesuai urutan waktu yang direncanakan. Selain itu, data *QTO* yang dihasilkan dari Revit dapat dikombinasikan dengan harga satuan dalam RAB, lalu diolah di *Navisworks* untuk memproyeksikan biaya proyek seiring progres waktu (5D BIM). Dengan integrasi ini, *Navisworks* menjadi platform koordinasi yang menghubungkan data teknis, jadwal, dan biaya, sehingga mempermudah pengambilan keputusan, meminimalkan kesalahan, dan meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek.

2.12 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah lampiran beberapa jurnal terkait perencanaan yang memiliki hubungan terhadap perencanaan berjudul “Perencanaan Struktur Tahan Gempa Gedung Rusun Paspampres IKN Berbasis BIM 5D” seperti pada **tabel 2.19** dibawah ini.

Tabel 2. 19 Tabel Penelitian Terdahulu

No	Sitasi	Tujuan	Metode	Hasil
1.	Nabila A., Rendi D., Asri N., Bambang S. (2023). <i>Perencanaan Ulang Struktur Portal Utama Gedung PT. Ferron Pharmaceuticals Cikarang Integrasi BIM (Building</i>	Untuk meninjau ulang struktur atas dan struktur bawah Gedung PT. Ferron Pharmaceuticals Cikarang.	Metode perencanaan deskriptif kuantitatif dengan literatur primer perencanaan struktur gedung dan penerapan integrasi BIM.	Hasil desain integrasi BIM dalam perencanaan struktur bangunan SRPMK dengan mempertimbangkan tingkat keamanan dan ketahanan yang tinggi terhadap risiko gempa.

	<i>Information Modelling)</i>			
2.	Adam A., Adelia A., Asri N., Bambang S. (2023). <i>Redesign Struktur Gedung Head Office Awann Group Berdasarkan Integrasi BIM Autodesk Melalui Revit, Naviswork, dan SAP 2000</i>	Untuk mengetahui keunggulan pengaplikasian BIM pada proyek yang belum menerapkan BIM.	Perhitungan struktur atas dengan SAP 2000, perencanaan struktur bawah, permodelan 3D, DED, perhitungan RAB, penjadwalan, dan RKS.	Dalam perencanaan struktur Gedung <i>Head Office Awann Group</i> Semarang ini terdapat perubahan jumlah lantai, dimensi penampang, biaya, dan jadwal dengan penerapan BIM untuk efisiensi mutu, biaya, waktu.
3.	Nanda K., Rezka F., M. Rusli A. (2020). <i>Redesain Struktur Atas Bangunan Tahan Gempa Gedung Dekanat Universitas Wahid Hasyim Semarang</i>	Merancang desain struktur tahan gempa dengan memperhatikan keamanan struktural dan geoteknis.	Metode pengumpulan data, permodelan, dan analisis.	Didapatkan desain kolom berdimensi 600 x 600 mampu menjamin bahwa kolom lebih kuat dari balok dengan desain berdimensi 350 x 600 menggunakan desain portal SRPMK.
4.	Andi K., Funky A., M. Isnaeni., Ratna. (2022). <i>Evaluasi Kinerja Struktur</i>	Untuk mengetahui level kinerja struktur bangunan dan	Metode analisis data kuantitatif kemudian dianalisis menggunakan	Berdasarkan hasil analisis respon spektrum nilai simpangan antar tingkat berada di

	<i>Bangunan Bertingkat Akibat Gempa Berdasarkan Simpangan dengan Analisis Respon Spektrum</i>	simpangan antar tingkat.	bantuan <i>software</i> .	bawah simpangan antar tingkat izin, dengan sedikit kerusakan struktural, kapasitas sistem penahan gaya vertikal dan lateral pada struktur masih sama dengan pasca gempa, sehingga bangunan aman.
5.	Nasrullah., Dewi A., Leary P. (2022). <i>Perencanaan Struktur Gedung 5 Lantai Kombinasi Antara Pusat Perbelanjaan dan Rumah Susun Dengan Sistem Pemikul Gaya Lateral Dinding Geser Beton Bertulang Khusus di Doyo Baru Kabupaten Jayapura</i>	Memodifikasi Gedung Rumah Susun Papua 3 dengan 3 lantai menjadi 5 lantai, yang bisa berfungsi sebagai tempat tinggal dan pusat perbelanjaan.	Metode pengumpulan data, studi literatur, permodelan, dan analisis.	Perbandingan struktur gedung 5 lantai kombinasi fungsi sebagai pusat perbelanjaan dan tempat tinggal dengan dinding geser yang dianalisis di <i>ETABS</i> menunjukkan sistem geser memenuhi SNI 1726:2019, menahan 100% beban lateral, rangka hanya menahan beban gravitasi.

6.	<p>Andani C., Nawir R., dan Sugiharti. (2022). <i>Perencanaan Struktur Gedung Virtual Office Soekarno Hatta Kota Malang Berbasis BIM</i></p>	<p>Mengetahui hasil analisis dan desain elemen struktur balok, kolom, pelat lantai, tangga, <i>shear wall</i>, <i>bored pile</i>, dan pile cap pada Gedung <i>Virtual Office</i> Soekarno Hatta Kota Malang.</p>	<p>Metode pengumpulan data primer dan sekunder, permodelan, dan analisis pengolahan data.</p>	<p>Diperoleh dimensi hasil <i>preliminary design</i> elemen struktur balok, kolom, pelat lantai, tangga, <i>shear wall</i>, <i>bored pile</i>, dan pile cap pada Gedung <i>Virtual Office</i> Soekarno Hatta Kota Malang dengan mengacu SNI 2847:2019.</p>
7.	<p>Banu D., Juan B., Marthin D.J. (2023). <i>Perencanaan Ulang Struktur Bangunan Gedung Kelas 5 Lantai di Politeknik Pelayaran Sulawesi Utara</i></p>	<p>Mendesain elemen struktur beton bertulang yang tahan gempa sesuai dengan peraturan SNI 2847-2019, SNI 1726-2019, dan SNI 1727-2020 dengan bantuan aplikasi ETABS.</p>	<p>Studi literatur (teknik pengumpulan data), permodelan, dan analisis.</p>	<p>Bangunan tanpa dinding geser memiliki gaya geser besar, membutuhkan penampang, dan tulangan lebih besar, penulangan sesuai persyaratan SRPMK.</p>
8.	<p>A. Didik S., M. Nur F., Vinsen H., Wilis S. (2023). <i>Analisis Perbandingan</i></p>	<p>Mendapatkan seberapa besar simpangan yang terjadi pada struktur saat</p>	<p>Melakukan pengamatan pada lokasi penelitian, pengumpulan</p>	<p>Perbandingan SNI 2847:2013 dengan SNI 2847:2019 untuk penulangan dinding geser</p>

	<i>Penulangan Dinding Geser Berdasarkan Tata Cara SNI 2847:2013 dengan SNI 2847:2019, Studi Kasus: Hotel Vega Kota Sorong</i>	terjadinya beban gempa dan mendapatkan perbandingan simpangan yang terjadi berdasarkan SNI 2847:2013 dengan SNI 2847:2019.	data-data terkait penelitian, studi literatur yang sesuai dengan penelitian, dan permodelan struktur dengan bantuan SAP 2000 sebagai program analisis simpangan.	bahwa simpangan yang terjadi pada struktur lebih besar nilainya berdasar analisis SNI 2847:2019, penggunaan dinding geser efektif mengurangi simpangan
9.	Anis R., Azis W. (2021). <i>Pembandingan Perancangan Bangunan Tahan Gempa Menggunakan SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019</i>	Membandingkan spektrum respons dan perilaku struktur antara SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019	Metode studi literatur (teknik pengumpulan data), permodelan, dan analisis.	SA meningkat 11 – 26 % pada kelas tanah tertentu, gaya geser meningkat \pm 19,9 %, detailing kolom pada SNI terbaru lebih ketat.
10.	Moch. Rizal Fadillah. (2020). <i>Metode Analisis Perhitungan Struktur Bangunan Tahan Gempa (Studi Kasus Gedung E, F Universitas</i>	Menyusun tahapan asesmen bangunan tahan gempa sesuai SNI 1726:2012 dan SNI 1726:2019.	Pengamatan visual, pengumpulan data desain dan tanah, permodelan ETABS, analisis.	Dalam tahapan asesmen bangunan tahan gempa dengan studi kasus pada Gedung E dan F UMMI berdasarkan SNI 1726:2012 harus memperhatikan

	<i>Muhammadiyah Sukabumi)</i>			data visual, data desain, mutu bahan, dan data tanah untuk permodelan sesuai SNI.
11.	Ardya R. P., Vendie Abma. (2022). <i>Implementasi Konsep BIM 4D Tahap Perencanaan Dalam Percepatan Waktu Pada Pekerjaan Struktural Gedung 3 Lantai</i>	Mengaplikasikan BIM 4D untuk mempercepat pekerjaan struktural.	Metode pengumpulan data, analisis, dan eksperimen.	Didapatkan 4 pekerjaan struktural yang berpotensi dilakukan percepatan 12 hari tanpa adanya konflik pekerjaan.
12.	Ade K., Agus S., dan Ester P. (2020). <i>Perencanaan Struktur Tahan Gempa Beton Pada Gedung Rusunawa Universitas Teknologi Sumbawa</i>	Untuk mengetahui dimensi dan penulangan pada elemen struktur gedung.	Metode pengumpulan data, permodelan, dan analisis.	Tulangan memenuhi konsep <i>strong column weak beam</i> , pengekangan hubungan balok kolom, dan penulangan pile cap sesuai SNI.
13.	Endah K. P dan Hizqi R. (2022).	Mendesain ulang struktur agar	Metode studi literatur (teknik	Perubahan desain pada tulangan

	<i>Redesain Bangunan Tahan Gempa Hotel 5 Lantai dengan Kolam Renang Pada Rooftop</i>	aman dari gempa, studi kasus hotel dengan kolam di atap.	pengumpulan data), permodelan, dan analisis.	transversal kolom dan jarak sengkang, menghilangkan kolom tidak menerus sesuai kaidah desain tahan gempa.
14.	Nova P. dan Rini P. U. (2023). <i>Implementasi Sistem Building Information Modelling (BIM) Untuk Analisis Waktu dan Biaya (Studi Kasus Pembangunan Gedung Rumah Sakit Universitas Islam Malang).</i>	Menghitung volume pekerjaan untuk estimasi biaya dan penjadwalan konstruksi.	Metode penelitian simulasi (<i>simulation research</i>).	BIM efektif mensimulasikan volume pekerjaan secara detail, memvisualisasikan 3D, dan mendeteksi kesalahan perencanaan sejak awal.

Sumber: Tinjauan Pustaka

Berdasarkan literature review pada **tabel 2.19**, dijelaskan perencanaan sebelumnya dapat dikelompokkan menjadi dua tema besar, yaitu terkait perencanaan dan evaluasi struktur bangunan tahan gempa serta penerapan teknologi *Building Information Modelling (BIM)* pada proyek konstruksi.

Pada tema pertama menunjukkan bahwa bangunan gedung bertingkat tinggi memiliki resiko bencana gempa bumi dan dibutuhkan desain perencanaan struktur tahan gempa, penelitian yang dilakukan oleh Nanda et al. (2020), Banu et al. (2023), Ade et al. (2020), dan Endah & Hizqi (2022) menitikberatkan pada penerapan ketentuan SNI 1726:2012 dan SNI 2847:2019 dalam merancang bangunan tahan

gempa, termasuk optimasi dimensi elemen struktur dan penulangan sesuai konsep *strong column weak beam*. Studi oleh Andi et al. (2022), Didik et al. (2023), Anis & Azis (2021), dan Nasrullah (2022) membahas strategi pengendalian simpangan antar tingkat dan distribusi beban gempa melalui pemilihan sistem pemikul gaya lateral yang tepat. Nasrullah (2022) menyoroti evaluasi kinerja struktur gedung bertingkat terhadap beban gempa dan mengusulkan perbaikan desain untuk meningkatkan kapasitas dukung lateral. Moch. Rizal Fadillah (2020) menekankan pentingnya tahap asesmen struktur eksisting sebelum dilakukan desain ulang, dengan mempertimbangkan data visual, mutu bahan, dan data tanah.

Pada tema kedua menunjukkan bahwa penerapan BIM dalam proses desain perencanaan lebih mudah dan efisien terhadap waktu untuk mengurangi kesalahan akibat *human error*, penelitian oleh Nabila et al. (2023), Adam et al. (2023), Andani et al. (2022), Ardy & Vendie (2022), serta Nova & Rini (2023) membuktikan bahwa BIM dapat meningkatkan efisiensi perencanaan dengan memberikan visualisasi 3D, integrasi data desain, dan penjadwalan proyek. Ardy & Vendie (2022) secara khusus menggunakan BIM 4D untuk percepatan pekerjaan struktural, sedangkan Nova & Rini (2023) menambahkan dimensi biaya (5D) namun fokus pada aspek estimasi biaya dan pengendalian kesalahan perencanaan, bukan pada analisis struktur tahan gempa.

Jika dibandingkan dengan beberapa perencanaan perencanaan terkait sebelumnya, perencanaan ini memiliki kebaruan (*novelty*) pada kombinasi analisis struktur tahan gempa sesuai SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019 dengan penerapan BIM 5D yang mengintegrasikan pemodelan 3D, penjadwalan proyek (4D), serta estimasi biaya (5D) dalam satu alur perencanaan. Pendekatan ini tidak hanya menghasilkan desain struktur yang aman terhadap gempa untuk bangunan Rusun Paspampres IKN, tetapi juga memberikan efisiensi biaya dan waktu sejak tahap perencanaan, sesuatu yang belum sepenuhnya dibahas pada penelitian terdahulu.