

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) adalah sarana digital yang merevolusi cara desain, konstruksi, dan pengelolaan bangunan. Dengan membuat simulasi digital dari bangunan di dunia nyata, BIM memungkinkan arsitek, insinyur, kontraktor, dan pemilik untuk berkolaborasi dengan lebih efisien dan membuat keputusan berdasarkan data selama seluruh keberjalanan proyek (Haron et al., 2017). Pendekatan kolaboratif ini memperkuat komunikasi, mengurangi kesalahan, dan memperlancar proses konstruksi, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih baik, penghematan biaya, dan kualitas yang lebih tinggi. Semakin pentingnya BIM dalam industri konstruksi berasal dari kemampuannya untuk memperbaiki pelaksanaan proyek, mengurangi risiko, dan mendukung keberlanjutan (Bui et al., 2016)

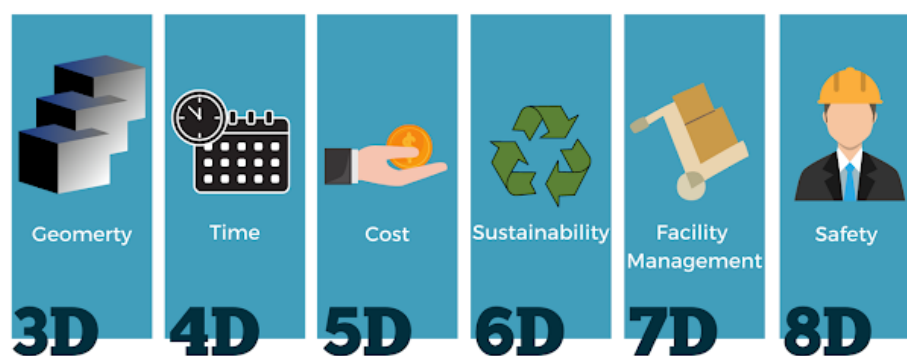
Di era perkembangan digital yang semakin masif, permintaan penggunaan *Building Information Modeling* (BIM) menaik secara signifikan, karena potensinya dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi proyek konstruksi, dengan topik-topik seperti interoperabilitas, konstruksi berkelanjutan, serta adopsi dan standarisasi tingkatan BIM yang mengalami pertumbuhan signifikan (Santos et al., 2017). Di Indonesia, kebutuhan terhadap BIM merujuk pada Permen PUPR RI Nomor 22/PRT/M/2018 tentang Pembangunan Bangunan Gedung Negara, Pasal 13 mengatur bahwa, BIM diwajibkan untuk pembangunan gedung tidak sederhana, yang mencakup bangunan dengan luas tanah lebih dari 2.000 m² dan yang lebih dari dua lantai.

2.1.1 Klasifikasi *Building Information Modeling* (BIM)

Dimensi dalam *Building Information Modeling* (BIM) adalah parameter yang dirancang sebelumnya untuk menambahkan berbagai jenis data ke dalam model BIM. Setiap dimensi ini meningkatkan tingkat kompleksitas dan detail, menjadikan model lebih informatif dan berguna selama siklus hidup bangunan. Dengan begitu, model BIM berfungsi bukan hanya sebagai media visual, namun juga sebagai

sumber informasi penting untuk pengelolaan dan pemeliharaan struktur. Menurut (Hamil, 2021), klasifikasi BIM mencakup hal berikut:

1. BIM 2D menghubungkan sumbu X dan Y dengan informasi tambahan, tetapi sebagian besar industri tidak menganggapnya sebagai BIM.
2. BIM 3D menggunakan model geometris digital 3D menggabungkan sumbu X, Y, dan Z dengan informasi tambahan, meningkatkan akurasi dan efisiensi dalam proyek.
3. BIM 4D menambahkan informasi penjadwalan ke model, memungkinkan visualisasi urutan konstruksi yang lebih baik dan meningkatkan kolaborasi antara tim desain dan konstruksi.
4. BIM 5D menambahkan informasi biaya ke dalam model, dengan penjelasan jelas mengenai kebutuhan biaya modal atau operasional serta tanggung jawab penambahannya.
5. BIM 6D menambahkan manajemen fasilitas ke dalam informasi, meskipun masih terdapat perdebatan mengenai definisinya dalam industri.
6. BIM 7D menambahkan informasi keberlanjutan ke dalam kumpulan data, dengan penekanan pada definisi informasi spesifik yang diperlukan.
7. BIM 8D menambahkan informasi kesehatan dan keselamatan ke dalam kumpulan informasi.



Gambar 2. 1 Klasifikasi BIM

Sumber: <https://mccm.org.mt/bim-introduction/>

2.1.2 Software Perencanaan dengan Konsep BIM

Dalam penerapan *Building Information Modeling* (BIM), keberadaan *software* yang sesuai sangat penting untuk menjamin efisiensi dan efektivitas kolaborasi di antara berbagai pemangku kepentingan. Dengan berbagai pilihan *software* yang tersedia, pemangku kepentingan dapat melakukan pemodelan yang lebih akurat dan terintegrasi, memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih baik selama siklus hidup proyek. (Bellido-Montesinos et al., 2019). Beberapa *software* perencanaan berbasis BIM yang dapat digunakan antara lain:

1. Autodesk - Robot Structural Analysis Professional (RSAP) 2025

Robot Structural Analysis Professional (RSAP) merupakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Analysis / FEA*) tingkat lanjut yang diformulasikan secara khusus untuk pemodelan, simulasi, dan optimasi perilaku struktur bangunan. Perangkat lunak ini dirancang untuk menangani analisis struktur multi-material, seperti beton bertulang, baja, komposit, hingga kayu—yang terkalibrasi secara otomatis dengan berbagai standar kode perencanaan (*design codes*) internasional. Berbeda dengan software analisis lainnya (ETABS, SAP2000), kapabilitas RSAP mencakup spektrum komputasi yang luas, mulai dari analisis statik linear dasar hingga analisis non-linear, dinamis, dan seismik tingkat tinggi, yang bertujuan untuk memverifikasi integritas, stabilitas, serta keamanan suatu desain rekayasa di bawah berbagai skenario pembebanan (Puspa & Wibowo, 2022).



Gambar 2. 2 Autodesk Robot Structural Analysis Professional

(Sumber: Autodesk.com)

Keunggulan teknis tersebut dipadukan dengan tautan dua arah (*bidirectional link*) yang mulus menuju Revit. Fitur ini mampu menerjemahkan model arsitektural secara instan menjadi model analitikal tanpa perlu melakukan

pemodelan ulang dari nol. Hal ini secara drastis mengeliminasi risiko kehilangan data (*data loss*) dan pengerjaan ulang (*rework*). Dengan alur kerja yang terintegrasi ini, penulis dapat lebih berfokus dalam mengevaluasi aspek kelayakan pelaksanaan konstruksi (*constructability*). Hal demikian juga yang menjadi alasan utama penulis memilih penggunaan software RSAP tersebut.

2. Autodesk – Revit

Autodesk Revit adalah perangkat lunak yang dirancang untuk mendukung *Building Information Modeling* (BIM), yang membebaskan pengguna untuk merancang bangunan dalam format 3D. Revit menawarkan kemampuan untuk membuat model yang detail dan terintegrasi, serta memfasilitasi proses perhitungan volume dan estimasi biaya secara otomatis. Penggunaan Revit dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam perhitungan quantity take-off dibandingkan dengan metode konvensional (Marizan, 2019)



Gambar 2. 3 Autodesk Revit

(Sumber: Autodesk.com)

3. Microsoft Project

Microsoft Project adalah alat manajemen proyek yang dipakai untuk merancang, mengatur, dan memantau kemajuan proyek. Meskipun tidak secara langsung terkait dengan BIM, Microsoft Project sering digunakan untuk membantu dalam konteks manajemen proyek konstruksi untuk mengatur timeline, alokasi sumber daya, dan tugas-tugas yang terintegrasi dengan model BIM. Dalam perencanaan, Microsoft Project berfungsi sebagai alat untuk menciptakan jadwal yang dapat dihubungkan dengan model Revit dalam Navisworks untuk analisis lebih lanjut (Adian, 2022).



Gambar 2. 4 Microsoft Project

(Sumber: Microsoft.com)

4. Autodesk – Naviswork Manage

Navisworks adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mengintegrasikan model dari berbagai sumber, termasuk Revit dan Microsoft Project. Dengan Navisworks, pengguna dapat melakukan simulasi 4D, yang menggabungkan data waktu dari Microsoft Project dengan model 3D dari Revit. Ini memungkinkan visualisasi proses konstruksi secara lebih efektif dan membantu dalam mendeteksi *clash* desain sebelum pelaksanaan proyek. Integrasi antara Revit dan Navisworks melalui Microsoft Project dapat meningkatkan pengelolaan proyek secara keseluruhan (Harun, 2020).



Gambar 2. 5 Autodesk Naviswork Manage

(Sumber: Autodesk.com)

Proses seperti persiapan model struktural, analisis, desain, verifikasi, pembuatan detail konstruksi, dan deteksi tabrakan dibantu oleh BIM, dimana mengambil model struktural dari model arsitektur terbukti lebih efisien dan lebih cepat daripada membuatnya dari nol, serta mampu menangkap esensi dan kompleksitas model arsitektur dengan akurat, hal yang juga berlaku untuk pembuatan gambar detail konstruksi (Dewayanti et al., 2024).

2.2 Pembebanan Gravitasi

Dalam merencanakan gedung bertingkat, perlu memperhatikan strukturnya agar kuat menanggung beban dari semua bagian struktur. Pembebanan dalam perencanaan ini didasarkan pada SNI 1727-2020 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Penjelasan pembebanan yaitu sebagai berikut:

2.2.1 Beban Mati

Beban mati adalah beban yang dihasilkan dari berat struktur itu sendiri. Berat sendiri ini mencakup struktur dan arsitektural. Menurut SNI 1727-2020 pasal 3.1.2 perhitungan rencana harus menggunakan berat bahan bangunan yang asli dalam menentukan beban mati. Berikut adalah beban mati yang digunakan pada perencanaan ulang ini:

Tabel 2. 1 Daftar Beban Mati

No	Material	Beban (kN/m ²)
1	Beton	24
2	Pas. Dinding Bata Ringan	1,415
3	Finishing Lantai	1,06
4	Beban MEP	0,25
5	Beban Plafond	0,18
6	Water Proofing	0,05

Sumber: SNI1727:2020

2.2.2 Beban Hidup

Beban hidup (*live load*) didefinisikan sebagai beban yang ditimbulkan oleh penggunaan serta tingkat penghunian (*occupancy*) suatu bangunan gedung. Beban ini merepresentasikan gaya gravitasional dari aktivitas penghuni, perabotan, peralatan yang dapat dipindahkan, serta seluruh elemen yang tidak tergolong sebagai berat struktur permanen. Besaran intensitas beban hidup rencana diklasifikasikan secara spesifik berdasarkan fungsi atau peruntukan tiap ruang, dengan merujuk pada pedoman SNI 1727:2020 tentang Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur, dengan daftar yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Daftar Beban Hidup

No.	Ruangan	Beban (kN/m ²)
1	Perpustakaan	3,83
2	Koridor	4,79
3	Ruang Kelas	3,83
4	Ruang Serbaguna	4,79
5	Ruang Rapat dan Ruang Pejabat	2,4
6	Laboratorium	2,87
7	Roof Garden & Dak Atap	2,4
8	Tangga & landing	4,8
9	Toilet / washroom	2,4
10	Pantry kecil / tea room	2,4
11	Ruang AHU (lantai tipikal)	4,8
12	Ruang mesin lift / machine room	4,8

Sumber: SNI1727:2020

2.2.3 Beban Angin

Beban angin merupakan beban lateral dengan arah horizontal yang disebabkan oleh gaya angin yang mengenai struktur bangunan. Parameter angin dasar yang dipakai untuk merencanakan dan melaksanakan bangunan gedung sudah di atur dalam SNI 1727-2020 pasal 26 hingga 31. Untuk menahan beban angin parameter tersebut harus terpenuhi termasuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) dan seluruh Komponen dan Klading (K&K) gedung. Beban angin untuk SPGAU bangunan gedung pada semua ketinggian ditentukan oleh persamaan berikut :

$$p = q GC_p - q_i (GC_{pi})$$

Keterangan :

p = tekanan angin desain pada permukaan (kN/m²)

q = tekanan kecepatan (velocity pressure) pada ketinggian z (kN/m²)

GC_p = koefisien tekanan eksternal (sudah termasuk faktor gust)

q_i = tekanan kecepatan pada tinggi referensi untuk tekanan internal

GC_{pi} = koefisien tekanan internal

Berikut ini adalah tabel penentuan koefisien tekanan internal:

Tabel 2. 3 Koefisien Tekanan Internal

No	Klasifikasi Bangunan	GC_{pi}
1	Bangunan Tertutup (<i>Enclosed Building</i>)	$\pm 0,18$
2	Bangunan Tertutup Sebagian (<i>Partially Enclosed Building</i>)	$\pm 0,55$
3	Bangunan Terbuka (<i>Open Building</i>)	0,00

Sumber: SNI1727:2020

2.2.3 Beban Hujan

Beban hujan (R) merupakan beban luar pada struktur atap yang diakibatkan oleh akumulasi air hujan akibat intensitas curah hujan yang tinggi atau kegagalan pada sistem drainase. Berdasarkan SNI 1727:2020, penentuan beban hujan tidak hanya didasarkan pada volume air yang jatuh, tetapi juga memperhitungkan risiko terjadinya genangan air (*ponding*) pada atap, terutama pada atap yang memiliki kemiringan kecil atau atap datar (dak beton). Analisis beban ini menjadi krusial dalam perencanaan struktur untuk memastikan bahwa elemen penahan atap mampu memikul beban air tambahan apabila terjadi sumbatan pada saluran pembuangan utama.

Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 8.3, beban hujan dihitung dengan rumus:

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

dengan:

R: Beban hujan pada atap yang tidak melandai ((kN/m^2)).

d_s : Kedalaman air pada saluran masuk (drainase) hingga ke bibir aliran luapan (*scupper*) jika sistem drainase utama mampet (meter).

d_h : Tambahan kedalaman air di atas aliran luapan pada aliran desain (meter).

2.3 Analisis Beban Gempa

Beban gempa yaitu beban seismik yang terdefinisi dalam struktur bangunan yang dihasilkan dari analisis beban statik ekuivalen dan beban respon spektrum. Tiga hal yang harus dinilai dari beban gempa adalah probabilitas beban pada periode tertentu, kemampuan struktur untuk daktilitas, dan kapasitas kekuatannya yang melebihi beban desain. Berikut adalah penjabaran dari SNI 1726:2019 mengenai tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung:

2.3.1 Penentuan Kelas Situs

Penentuan ini dilakukan dari hasil penyelidikan dan pengujian tanah di lapangan. Untuk perhitungan beban gempa digunakan data tanah SPT kemudian dilakukan perhitungan nilai SPT rata – rata (NSPT) sesuai yang tercantum pada SNI 1726:2019 pasal 5.3.

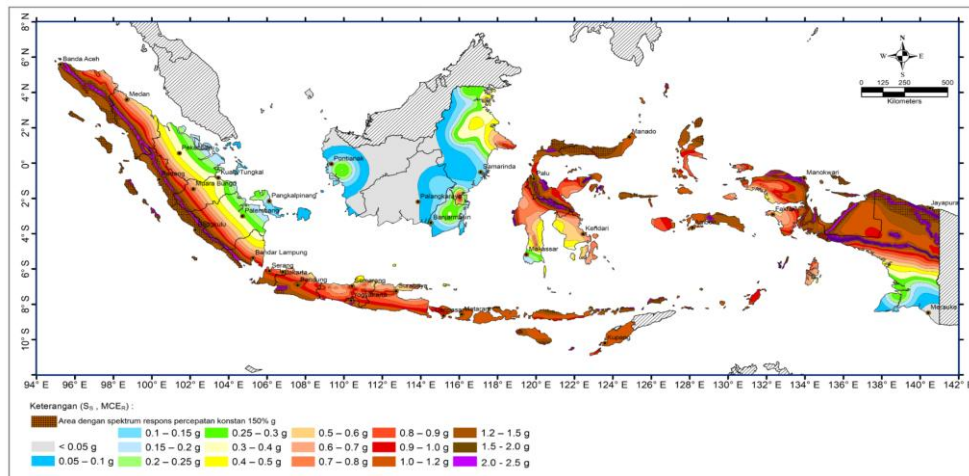
Tabel 2. 4 Tabel Kelas Situs Tanah

Kelas Situs	V_s (m/detik)	N atau N_{ch}	Su (kPa)
SA (Batuan Keras)	>1500	N/A	N/A
SB (Batuan)	750-1500	N/A	N/A
SD (Tanah Sedang)	175-350	15-50	50-100
SE (Tanah Lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : a. Indeks plastisitas, $PI > 20$, b. Kadar air, $w \geq 40\%$ c. Kuat geser niral $su < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: a. Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah. b. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m). c. Lempung berplastis sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$). d. Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa.		

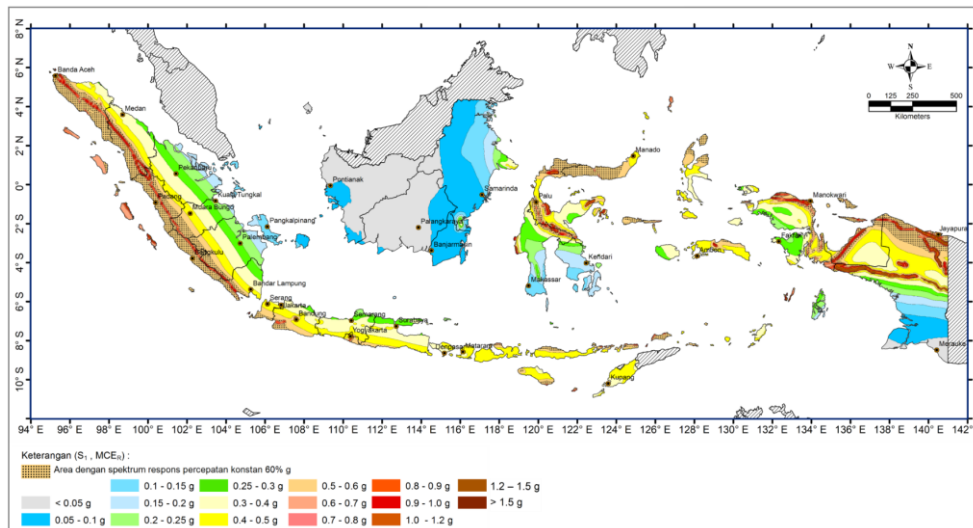
Sumber: SNI 1729-2019 tabel 5

2.3.2 Spektrum Respon Desain

Percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCE_R) seperti parameter S_s dan S_1 ditentukan berdasarkan peta percepatan gempa yang tercantum dalam SNI 1726:2019. Nilai tersebut diperoleh dari peta *hazard* gempa Indonesia yang menunjukkan percepatan spektral maksimum untuk periode pendek (SS) dan periode 1 detik (S_1) pada kondisi batuan dasar, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan parameter respons spektrum desain suatu bangunan.

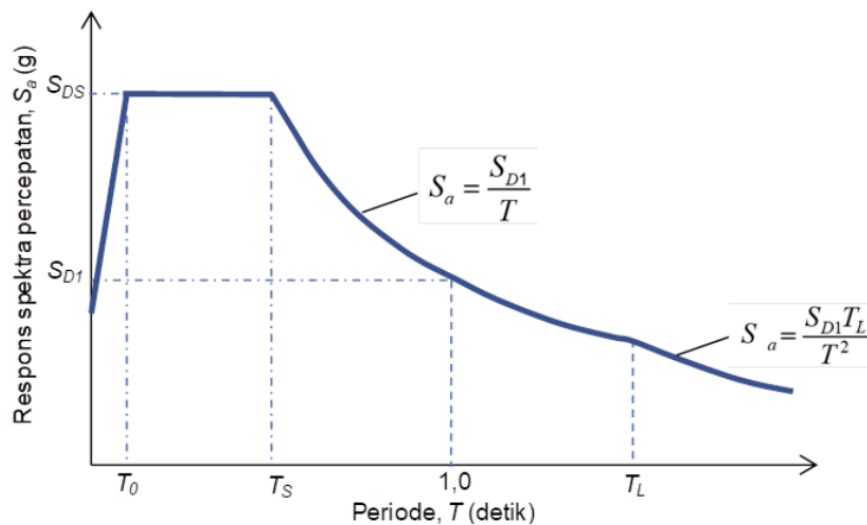


Gambar 2. 6 Parameter Gerak Tanah S_s Di Wilayah Indonesia
Sumber: SNI 1726:2019



Gambar 2. 7 Parameter Gerak Tanah, S_1 Di Wilayah Indonesia
Sumber: SNI 1726:2019

Selain menggunakan peta pada standar tersebut, nilai S_s dan S_1 juga dapat diperoleh secara lebih akurat melalui situs rsa.ciptakarya.pu.go.id. Situs ini menyediakan layanan penentuan parameter gempa berdasarkan koordinat lokasi bangunan, sehingga nilai percepatan spektral yang diperoleh lebih spesifik terhadap lokasi perencanaan struktur.



Gambar 2. 8 Spektrum Respons Percepatan

Sumber: SNI 1726:2019

Berdasarkan SNI 1726:2019, Pembuatan spektrum respon desain seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 mengikuti ketentuan di bawah ini:

- a. Untuk periode, $T < T_0$, Spektrum respons percepatan desain S_a harus menggunakan persamaan (3-1)

$$S_a = SDS(0,4 + 0,6 T T_0) \quad (3-1)$$

- b. Untuk periode, $T_0 \leq T \leq T_s$, spektrum respons percepatan desain $S_a = SDS$.

- c. Untuk periode $> T_s$, spektrum respons percepatan desain, S_a menggunakan persamaan (3-2)

$$S_a = \frac{SD1}{T} \quad (3-2)$$

Keterangan :

S_{DS} = Parameter respons spektral percepatan desain pada perioda pendek

S_{D1} = Parameter respons spektral percepatan desain pada perioda 1 detik

T = Perioda getar fundamental struktur

$$T_0 = 0,2 \frac{SD1}{SDS}$$

$$T_s = \frac{SD1}{SDS}$$

- d. Parameter percepatan spektral desain ditentukan dengan perumusan sebagai berikut :

$$SDS = 2/3.SMS \quad (3-3)$$

$$SD1 = 2/3.SM1 \quad (3-4)$$

Sedangkan nilai SMS dan SM1 ditentukan dengan perumusan sebagai berikut:

$$SMS = Fa \cdot Ss \quad (3-5)$$

$$SD1 = Fv \cdot S1 \quad (3-6)$$

Keterangan:

S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpetakan untuk periode pendek

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCER terpasang untuk periode 1,0 detik

- e. Menentukan faktor amplifikasi getaran F_a dan F_v

Faktor amplifikasi getaran F_a dan F_v pada periode pendek $T = 0,2$ detik atau S_s dan periode 1 detik atau S_1 berdasarkan tabel di bawah ini

Tabel 2. 5 Tabel Koefisien Situs, F_a

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0.2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,1$	$S_s \leq 0,2$	$S_s \leq 0,3$	$S_s \leq 0,4$	$S_s \leq 0,5$	$S_s \leq 0,6$
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. 6 Tabel Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek 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

Catatan :

$SS^{(a)}$ = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik secara spesifik serta analisis respon situs secara detail

2.3.3 Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik merupakan klasifikasi tingkat kerawanan bangunan terhadap pengaruh gempa yang digunakan sebagai dasar dalam perencanaan struktur tahan gempa. Kategori ini menunjukkan tingkat tuntutan perencanaan dan detailing struktur yang harus dipenuhi agar bangunan mampu berperilaku aman ketika terjadi gempa bumi.

a. Kategori risiko bangunan

Struktur bangunan memiliki tingkat risiko yang berbeda-beda sesuai dengan jenis pemanfaatan bangunan tersebut. Tingkat risiko ini memengaruhi besarnya gempa rencana yang harus diperhitungkan dalam perencanaan struktur.

Nilai faktor keutamaan ini ditentukan berdasarkan kategori risiko bangunan sesuai ketentuan dalam SNI 1726:2019, sehingga bangunan dengan fungsi yang lebih penting atau memiliki risiko lebih tinggi dirancang dengan tingkat keamanan yang lebih besar.

Tabel 2. 7 Kategori risiko bangunan gedung untuk beban gempa

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

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
<p>d. Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat</p> <p>e. Fasilitas penitipan anak</p> <p>f. Penjara</p> <p>g. Bangunan untuk orang jompo Gedung dan non gedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <p>h. Pusat pembangkit listrik biasa</p> <p>i. Fasilitas penanganan air</p> <p>j. Fasilitas penanganan limbah</p> <p>k. Pusat telekomunikasi</p> <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <p>a. Bangunan – bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan</p> <p>b. Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat</p> <p>c. Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat</p> <p>d. Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya</p> <p>e. Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat</p> <p>f. Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat</p> <p>Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV

Sumber: SNI 1726:2019

b. Faktor keutamaan gempa

Kategori risiko bangunan yang telah ditentukan kemudian digunakan sebagai dasar dalam penentuan faktor keutamaan gempa (Ie). Faktor ini digunakan untuk menyesuaikan tingkat keamanan struktur terhadap pengaruh gempa

rencana, sehingga bangunan dengan tingkat kepentingan lebih tinggi direncanakan dengan tingkat keandalan yang lebih besar.

Tabel 2. 8 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Resiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

Sumber: SNI 1726:2019

- c. Berdasarkan nilai S_{DS} dan S_{D1} yang telah ditentukan, struktur bangunan dapat diklasifikasikan ke dalam salah satu kategori desain seismik (KDS), sesuai dengan ketentuan dalam Tabel 2.9 dan Tabel 2.10.

Tabel 2. 9 KDS Berdasarkan Parameter S_{DS}

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

Sumber: SNI 1726:2019

Tabel 2. 10 KDS Berdasarkan Parameter S_{D1}

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,167 \leq S_{D1} \leq 0,133$	B	C
$0,33 \leq S_{D1} \leq 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber: SNI 1726:2019

2.3.4 Sistem Struktur Penahan Gaya Seismik

Sistem struktur penahan gaya seismik merupakan sistem struktur yang dirancang untuk menahan dan menyalurkan gaya gempa yang bekerja pada bangunan hingga ke pondasi secara aman. Dalam perencanaan struktur tahan gempa, sistem ini berperan penting dalam menentukan bagaimana energi gempa didistribusikan dan diserap oleh elemen-elemen struktur.

Menurut SNI 1726:2019, sistem struktur penahan gaya seismik diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis, antara lain sistem rangka pemikul momen, sistem dinding geser, sistem rangka berpengaku (*braced frame*), serta

sistem ganda yang merupakan kombinasi dari rangka pemikul momen dan dinding geser. Setiap sistem memiliki karakteristik perilaku yang berbeda terhadap gempa serta nilai parameter desain seperti faktor reduksi gempa (R), faktor kuat lebih (Ω_0), dan faktor pembesaran simpangan (C_d) yang digunakan dalam perencanaan struktur.

Kategori desain seismik yang telah ditentukan, bersama dengan tinggi sistem struktur (h_n), digunakan sebagai batasan dalam pemilihan sistem struktur penahan gaya seismik yang diperbolehkan seperti yang terdapat pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Faktor R , Ω_0 , dan C_d untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem Pemikul Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem Ω_0	Faktor Pembesaran Defleksi C_d	Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
C. Sistem Rangka Pemikul Momen								
Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10	TI	TI
Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan	3½	3	3½	10	10	10	10	10

Sumber SNI 1726:2019 Tabel 12

Keterangan:

TI : Tidak diizinkan

TB : Tidak ada batasan ketinggian

2.3.5 Periode Fundamental Struktur

Periode fundamental struktur merupakan waktu yang dibutuhkan suatu bangunan untuk beresilasi satu siklus penuh akibat pengaruh beban gempa. Nilai periode ini sangat penting karena mempengaruhi besar gaya gempa rencana yang akan diterima oleh struktur.

Semakin besar nilai periode struktur, maka gaya gempa yang bekerja umumnya akan semakin kecil, namun simpangan yang terjadi akan semakin besar. Mengacu pada SNI 1726:2019 pasal 7.8.2.1 dalam menentukan besar periode fundamental pendekatan (T_a) digunakan persamaan sebagai berikut:

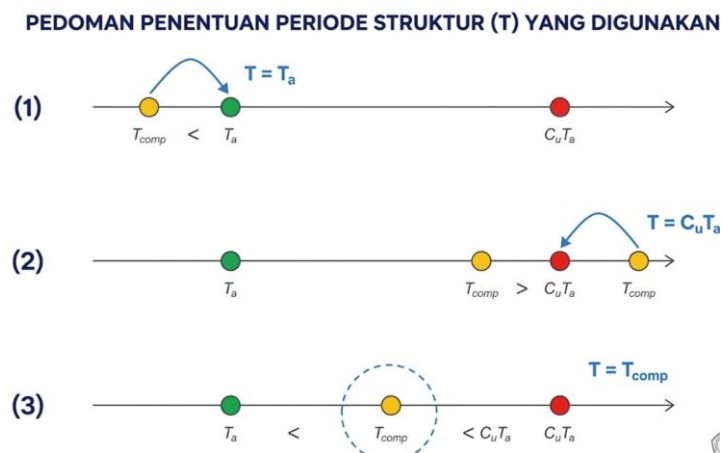
1. Periode Minimum ($T_{a \min}$)

$$T_{a \min} = C_t \times h_n^x$$

2. Periode Maksimum ($T_{a \max}$)

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

3. Periode hasil software RSAP (T_{comp})
4. Periode (T) yang digunakan menyesuaikan kondisi yang diatur pada SNI 1726:2019 yang dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2. 8 Penentuan Periode Struktur yang digunakan

Keterangan :

h_n = ketinggian struktur (m)

Untuk melakukan perhitungan persamaan periode fundamental di atas, maka diperlukan penentuan parameter seperti yang terlihat pada Tabel 2.12 dan Tabel 2.13.

Tabel 2. 12 Parameter percepatan respons spektral desain pada 1 detik, SD1

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 detik, SD1	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

Sumber SNI 1726:2019

Tabel 2. 13 Tipe Struktur pada sistem rangka pemikul momen

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

Sumber SNI 1726:2019

2.3.6 Ketidakberaturan Struktur

Evaluasi terhadap ketidakberaturan horizontal merupakan prosedur fundamental dalam perencanaan struktur bangunan, khususnya pada konfigurasi denah asimetris yang menyerupai huruf U. Karakteristik geometri tersebut secara inheren memiliki kerentanan tinggi terhadap ketidakberaturan sudut dalam (*re-entrant corner*) dan memicu risiko ketidakberaturan torsi. Hal ini dipengaruhi oleh timbulnya jarak eksentrisitas yang signifikan antara titik pusat massa (*center of mass*) dan titik pusat kekakuan (*center of rigidity*). Apabila struktur menerima beban gaya lateral akibat eksitasi seismik, eksentrisitas tersebut akan mentransmisikan momen puntir yang berakibat pada akumulasi tegangan (*stress concentration*) secara ekstrem di area pertemuan sudut-sudut denah. Oleh karena itu, peninjauan ini diwajibkan berdasarkan SNI 1726: 2019 guna menentukan tingkat kompleksitas metode analisis yang diizinkan. Berikut adalah tabel tipe ketidakberaturan horizontal:

Tabel 2. 14 Tipe Ketidakberaturan Horizontal

No.	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakberaturan torsi didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum, yang dihitung termasuk torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,2 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.4 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 2.16 11.3.4	D, E, dan F B, C, D, E, dan F C, D, E, dan F C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
1b.	Ketidakberaturan torsi berlebihan didefinisikan ada jika simpangan antar tingkat maksimum yang dihitung termasuk akibat torsi tak terduga dengan $A_x = 1,0$, di salah satu ujung struktur melintang terhadap suatu sumbu adalah lebih dari 1,4 kali simpangan antar tingkat rata-rata di kedua ujung struktur. Persyaratan ketidakberaturan torsi berlebihan dalam pasal-pasal referensi berlaku hanya untuk struktur di mana diafragmanya kaku atau setengah kaku.	7.3.3.1 7.3.3.4 7.3.4.2 7.7.3 7.8.4.3 7.12.1 Tabel 2.16 11.3.4	E dan F D B, C, dan D C dan D C dan D D B, C, dan D
2.	Ketidakberaturan sudut dalam didefinisikan ada jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15 % dimensi denah struktur dalam arah yang ditinjau.	7.3.3.4 Tabel 2.16	D, E, dan F D, E, dan F
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma didefinisikan ada jika terdapat suatu diafragma yang memiliki diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk yang mempunyai daerah terpotong atau terbuka lebih besar dari 50 % daerah diafragma bruto yang tertutup, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50 % dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.	7.3.3.4 (SNI 1726:2019, Tabel 16)	D, E, dan F D, E, dan F
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang didefinisikan ada jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang pada setidaknya satu elemen vertikal pemikul gaya lateral.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 2.16	B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel didefinisikan ada jika elemen vertikal pemikul gaya lateral tidak paralel terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem pemikul gaya seismik.	7.5.3 7.7.3 Tabel 2.16 11.3.4	C, D, E, dan F B, C, D, E, dan F D, E, dan F B, C, D, E, dan F

Sumber: SNI 1726:2019, Tabel 13

Di sisi lain, pemeriksaan ketidakberaturan vertikal merupakan parameter krusial untuk mengonfirmasi kelancaran dan kesinambungan lintasan distribusi gaya seismik (*load path*), mulai dari elevasi tertinggi struktur hingga elemen fondasi. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengidentifikasi indikasi diskontinuitas pada profil vertikal bangunan, seperti reduksi kekakuan lateral yang drastis pada tingkat tertentu (*soft story*). Berdasarkan SNI 1726:2019, kegagalan dalam mengakomodasi indikasi ketidakberaturan vertikal ke dalam desain kapasitas

penampang dapat mengakibatkan konsentrasi energi gempa dan deformasi plastis yang terpusat hanya pada tingkat bangunan yang paling rentan. Berikut adalah tabel parameter pengecekan ketidakberaturan vertikal:

Tabel 2. 15 Tipe Ketidakberaturan Vertikal

	Tipe dan penjelasan ketidakberaturan	Pasal referensi	Penerapan KDS
1a.	Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 70 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	Tabel 16	D, E, dan F
1b.	Ketidakteraturan Kekakuan Tingkat Lunak Berlebihan didefinisikan ada jika terdapat suatu tingkat yang kekakuan lateralnya kurang dari 60 % kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 70 % kekakuan rata-rata tiga tingkat di atasnya.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
2.	Ketidakteraturan Berat (Massa) didefinisikan ada jika massa efektif di sebarang tingkat lebih dari 150 % massa efektif tingkat di dekatnya. Atap yang lebih ringan dari lantai di bawahnya tidak perlu ditinjau.	Tabel 16	D, E, dan F
3.	Ketidakteraturan Geometri Vertikal didefinisikan ada jika dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik di sebarang tingkat lebih dari 130 % dimensi horizontal sistem pemikul gaya seismik tingkat didekatnya.	Tabel 16	D, E, dan F
4.	Ketidakteraturan Akibat Diskontinuitas Bidang pada Elemen Vertikal Pemikul Gaya Lateral didefinisikan ada jika pergeseran arah bidang elemen pemikul gaya lateral lebih besar dari panjang elemen itu atau terdapat reduksi kekakuan elemen pemikul di tingkat di bawahnya.	7.3.3.3 7.3.3.4 7.7.3 Tabel 16	B, C, D, E, dan F D, E, dan F D, E, dan F
5a.	Ketidakteraturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 80 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	7.3.3.1 Tabel 16	E dan F D, E, dan F
5b.	Ketidakteraturan Tingkat Lemah Berlebihan Akibat Diskontinuitas pada Kekuatan Lateral Tingkat didefinisikan ada jika kekuatan lateral suatu tingkat kurang dari 65 % kekuatan lateral tingkat di atasnya. Kekuatan lateral tingkat adalah kekuatan total semua elemen pemikul seismik yang berbagi geser tingkat pada arah yang ditinjau.	7.3.3.1 7.3.3.2 Tabel 16	D, E, dan F B dan C D, E, dan F

Sumber: SNI 1726:2019, Tabel 14

Setelah dilakukan pengecekan pada parameter parameter di atas, metode analisis struktur yang diizinkan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 16 Prosedur Analisis yang Diizinkan

Kategori desain seismik	Karakteristik struktur	Analisis ELF	Analisis MRSA
B, C	Semua struktur	I	I
D, E, F	Bangunan dengan kategori risiko I atau II yang tidak melebihi 2 tingkat diatas dasar	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dan ketinggiannya tidak melebihi 48,8 m	I	I
	Struktur tanpa ketidakberaturan struktural dengan ketinggian melebihi 48,8 m dan $T < 3,5T_s$	I	I
	Struktur dengan ketinggian tidak melebihi 48,8 m dan hanya memiliki ketidakberaturan horizontal tipe 2, 3, 4 atau 5 atau ketidakberaturan vertikal tipe 4, 5a atau 5b	I	I
	Semua struktur lainnya	TI	I
Keterangan: I : Diizinkan TI : Tidak Diizinkan			

Sumber: SNI 1726:2019, Tabel 16

2.4 Kombinasi Pembebanan

Struktur gedung tidak hanya memikul satu jenis beban secara mandiri, melainkan kombinasi dari berbagai gaya yang bekerja secara simultan. Penentuan kombinasi pembebanan bertujuan untuk memastikan keamanan struktur dalam menghadapi kondisi paling ekstrem selama masa layan bangunan. Berdasarkan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019, terdapat dua metode utama dalam penentuan kombinasi beban, yaitu Metode Beban Terfaktor (LRFD) dan Metode Tegangan Ijin (ASD).

2.4.1 Metode Beban Terfaktor (LFRD)

Dalam analisis struktur menggunakan perangkat lunak Autodesk Robot Structural Analysis, pengelompokan kombinasi pembebanan didasarkan pada dua kondisi batas utama yang merepresentasikan kriteria desain pada standar nasional. Kondisi batas ULS (*Ultimate Limit State*) memiliki konsep yang selaras dengan metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*), di mana beban dikalikan dengan faktor pengali tertentu untuk mengantisipasi ketidakpastian beban yang bekerja. Pada penelitian ini, kombinasi ULS digunakan secara khusus dalam perancangan struktur atas (*superstructure*) untuk menjamin keamanan elemen balok, kolom, dan

pelat terhadap risiko kegagalan struktur serta sebagai dasar dalam penentuan kapasitas penulangan beton bertulang. Berikut adalah kombinasi pembebanan sesuai LFRD:

A. Kombinasi Dasar (SNI 1727:2020) Pasal 2.3.1

1. 1.4 DL
2. DL + 1.6 (LL + 0.5 atau R)
3. 1.2 DL + 1.6 (Lr atau R) + (LL atau 0.5 W)
4. 1.2 DL + 1.0 W + 0.5 (Lr atau R)
5. 0.9 DL + 1.0 W

B. Kombinasi Akibat Gempa (SNI 1726:2019) Pasal 4.2.2.3

6. 1.2 DL + Ev + Eh + LL

Kemudian persamaan tersebut dijabarkan menjadi :

- a) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{x+TT} + 0.3E_{\gamma} + L$
- b) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{x+TT} + 0.3E_{\gamma} + L$
- c) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{x+TT} - 0.3E_{\gamma} + L$
- d) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{x+TT} - 0.3E_{\gamma} + L$
- e) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{x-TT} + 0.3E_{\gamma} + L$
- f) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{x-TT} + 0.3E_{\gamma} + L$
- g) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{x-TT} - 0.3E_{\gamma} + L$
- h) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{x-TT} - 0.3E_{\gamma} + L$
- i) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma+TT} + 0.3E_x + L$
- j) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma+TT} + 0.3E_x + L$
- k) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma+TT} - 0.3E_x + L$
- l) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma+TT} - 0.3E_x + L$
- m) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma-TT} + 0.3E_x + L$
- n) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma-TT} + 0.3E_x + L$
- o) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma-TT} - 0.3E_x + L$
- p) $(1.2 + 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma-TT} - 0.3E_x + L$

7. 0.9 DL - Ev + Eh

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

- a) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{x+TT} + 0.3E_{\gamma}$

- b) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{x+TT} + 0.3E_{\gamma}$
- c) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{x+TT} - 0.3E_{\gamma}$
- d) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{x+TT} - 0.3E_{\gamma}$
- e) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{x-TT} + 0.3E_{\gamma}$
- f) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{x-TT} + 0.3E_{\gamma}$
- g) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{x-TT} - 0.3E_{\gamma}$
- h) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{x-TT} - 0.3E_{\gamma}$
- i) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma+TT} + 0.3E_x$
- j) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma+TT} + 0.3E_x$
- k) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma+TT} - 0.3E_x$
- l) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma+TT} - 0.3E_x$
- m) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma-TT} + 0.3E_x$
- n) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma-TT} + 0.3E_x$
- o) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D + E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$
- p) $(0.9 - 0.2S_{DS}) D - E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$

Keterangan :

D = Beban mati (*dead load*)

L = Beban hidup (*live load*)

Lr = Beban hidup pada atap (*roof live load*)

R = Beban air hujan (*rain load*)

W = Beban angin (*wind load*)

E = Beban gempa (*earthquake load*)

SDS = Parameter percepatan spektrum respons desain pada periode pendek

2.4.2 Metode Tegangan Izin (ASD)

Sementara itu, kondisi batas SLS (*Serviceability Limit State*) memiliki korelasi dengan metode ASD (*Allowable Stress Design*) yang menerapkan beban aktual tanpa faktor pengali guna mengevaluasi kelayakan fungsi bangunan selama masa layan. Penggunaan kombinasi SLS ini diprioritaskan pada perencanaan struktur bawah (*substructure*) untuk menentukan dimensi fondasi berdasarkan perbandingan beban servis terhadap kapasitas dukung izin tanah (*allowable bearing capacity*). Berikut adalah kombinasi pembebanan sesuai metode tegangan izin:

1. D
2. D + L
3. D + (Lr atau R)
4. D + 0,75L + 0,75(Lr atau R)
5. D + 0,6W
6. D + 0,75(0,6W) + 0,75L + 0,75(Lr atau R)
7. 0,6D + 0,6W
8. 1,0D + 0,7Ev + 0,7Eh
9. 1,0D + 0,525Ev + 0,525Eh + 0,75L
10. 0,6D – 0,7Ev + 0,7Eh

Keterangan:

- D = Beban mati (dead load)
 L = Beban hidup (live load)
 Lr = Beban hidup pada atap (roof live load)
 R = Beban air hujan (rain load)
 W = Beban angin (wind load)
 E = Beban gempa (earthquake load)

2.5 Perencanaan Struktur Atas

Untuk analisis gaya dalam struktur (momen lentur, gaya geser, gaya normal, dan torsi) pada Gedung SDN Tebet Timur 07 akibat pengaruh beban gempa, digunakan nilai kekakuan efektif elemen beton sesuai ketentuan Tabel 6.6.3.1.1(a) SNI 1726:2019. Penggunaan kekakuan efektif ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi elemen beton bertulang yang telah mengalami retak sehingga kekakuannya berkurang dibandingkan dengan penampang utuh. Nilai kekakuan efektif yang digunakan untuk elemen struktur adalah sebagai berikut:

- Balok : 0,35 Ig
 Kolom : 0,70 Ig
 Pelat : 0,35 Ig

Untuk merepresentasikan kekakuan aktual elemen struktural, balok dimodelkan sebagai balok-T (*T-beam*). Faktor reduksi momen inersia penampang retak (*cracked section modifier*) yang digunakan pada pemodelan elemen balok tersebut direduksi menjadi 0,7 I_g . Selanjutnya merujuk pada persyaratan SNI 2847 Pasal 22.7.3(a), modifikasi kekakuan pada sumbu torsional balok direduksi secara signifikan dengan faktor pengali sebesar 0,01. Reduksi ini diterapkan karena torsi yang bekerja pada elemen balok tersebut diasumsikan sebagai torsi kompatibilitas. Dengan menurunkan kekakuan torsional, gaya dalam diizinkan mengalami redistribusi ke elemen struktur lain yang bersilangan tanpa mengurangi stabilitas keseimbangan struktur secara keseluruhan

Nilai-nilai tersebut digunakan dalam pemodelan struktur agar respons struktur terhadap beban gempa dapat direpresentasikan secara lebih realistis sesuai perilaku aktual elemen beton bertulang.

2.5.1 Balok

Balok yaitu komponen struktur pada bangunan yang memiliki fungsi untuk menerima beban lentur, geser, maupun torsi. Menurut SNI 2847-2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung menjelaskan perencanaan, perhitungan, dan pelaksanaan konstruksi beton bertulang, termasuk perencanaan balok beton bertulang. Balok juga memiliki fungsi menerima beban dari pelat lantai, berat mati balok, berat dinding di atasnya, beban gempa, dan beban angin. (Octavia & Roesdiana, 2022)

1. Dimensi Balok

Tabel 2. 17 Tinggi minimum balok nonprategang

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

Sumber: SNI 2847:2019 Tabel 9.3.1.1

Berdasarkan tabel di atas, tinggi minimum balok nonprategang (h_{min}) untuk kondisi tumpuan menerus satu arah atau dua arah bervariasi dari $\frac{L}{18,5}$ hingga $\frac{L}{21}$, di mana L adalah panjang bentang balok.

Meskipun Standar Nasional Indonesia (SNI) mengizinkan penggunaan dimensi yang relatif tipis, penerapan dimensi minimum tersebut umumnya kurang optimal dalam praktik perencanaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Keterbatasan ini terjadi karena balok SRPMK disyaratkan untuk mampu menahan gaya geser gempa yang tinggi, sehingga memerlukan ruang penampang yang memadai guna mengakomodasi kepadatan tulangan longitudinal serta sengkang pengekang.

Oleh karena itu, sebagai langkah antisipasi dan pendekatan ekonomis, tinggi balok pada tahap pradesain diperbesar dari syarat minimum SNI. Menurut Dipohusodo (1994), estimasi awal tinggi balok (h) yang aman terhadap lendutan dan proporsional untuk perencanaan tahan gempa umumnya diambil berkisar antara $\frac{1}{10}$ hingga $\frac{1}{12}$ dari panjang bentangnya (L), yang dirumuskan sebagai:

$$h = \frac{1}{12}L$$

Sedangkan untuk menentukan lebar balok (b), diambil nilai proporsional sebesar $\frac{1}{2}h$ hingga $\frac{2}{3}h$ untuk mencegah terjadinya bahaya tekuk lateral pada elemen lentur balok.

Pada bangunan menggunakan SRPMK, dilakukan pemeriksaan batasan dimensi pada yang ditetapkan dalam Pasal 18.6.2.1 SNI 2847:2019 dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Bentang bersih balok harus memenuhi ketentuan, $L_n \geq 4d$, dengan:

$$L_n = L - \frac{c_1}{2} - \frac{c_2}{2}$$

$$d = h \text{ balok} - t_s - \emptyset \text{ sengkang} - 1/2 \emptyset \text{ tul utama}$$
2. Lebar penampang balok ditetapkan (0,3h dan 250 mm)
3. 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.

Keterangan:

L : Bentang balok

L_n : Bentang bersih balok

d : Jarak efektif beton

- ts : Tebal selimut beton
 h : Tinggi balok
 b : Lebar balok
 c1 : Dimensi kolom searah bentang balok
 c2 : Lebar kolom penyangga

2. Penulangan Balok

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

$$a. A_{smin} = \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} b_w \times d$$

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

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

1. Penulangan Lentur Balok

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

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

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

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

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

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

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

2. Tulangan transversal balok

a. Menentukan nilai V_c dan V_s

$$V_n = V_c + V_s$$

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

Gaya geser minimum yang harus dimiliki tulangan geser adalah

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

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

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times d}{s}$$

Luasan tulangan geser minimum yang harus terpasang :

$$A_{v_{min}} = \frac{bw \times s}{3 \times f_y}$$

b. Perhitungan tulangan geser berdasarkan kondisi

$$1. V_u \leq 0,5 \times \phi \times V_c$$

Maka, tidak memerlukan tulangan geser

$$2. 0,5 \times \phi \times V_c \leq V_u \leq \phi \times V_c$$

Maka diperlukan tulangan geser sebagai berikut

$$A_{v_{min}} = \frac{bw \times s}{3 \times f_y} \quad V_{s_{min}} = 13 \times bw \times d$$

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

$$3. \phi \times V_c < V_u \leq \phi(V_c + V_{s_{min}})$$

Maka diperlukan tulangan geser sebagai berikut

$$A_{v_{min}} = \frac{bw \times s}{3 \times f_y} \quad V_{s_{min}} = 13 \times bw \times d$$

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

$$4. \phi(V_c + V_{s_{min}}) < V_u$$

Maka diperlukan tulangan geser sebagai berikut

$$\phi \times V_{s_{perlu}} = V_u - \phi \times V_c$$

$$V_s = \frac{A_v \times f_y \times f}{S}$$

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

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

Maka diperlukan tulangan geser sebagai berikut

$$\phi \times V_{s_{perlu}} = V_u - \phi \times V_c$$

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

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

2.5.2 Kolom

Kolom digunakan sebagai penyalur beban dari seluruh struktur bangunan ke pondasi. Kolom diperhitungkan agar dapat menerima beban aksial yang berjalan pada seluruh bagian lantai atau atap dan momen maksimal yang dihasilkan oleh beban dari lantai atau atap yang dihitung (Rumondor, 2021.)

1. Dimensi Kolom

Estimasi luas penampang bruto kolom diperhitungkan untuk mendapatkan dimensi kolom yang diperlukan untuk menahan beban aksial.

$$A_g = \frac{P_u}{0,8 \phi (0,85 * f'c)}$$

$$A_g = h^2 = b \times h$$

Keterangan :

A_g : luas penampang bruto kolom

P_u : beban aksial

h : panjang kolom

b : lebar kolom

Strong Column - Weak Beam diwujudkan melalui persyaratan kekuatan lentur kolom harus memenuhi SNI 2847:2019 pasal 18.7.3.2 :

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

Keterangan:

$\sum M_{nc}$: Momen Nominal Kolom

$\sum M_{nb}$: Momen Nominal Tumpuan Balok

Kapasitas momen kolom di sebuah titik kumpul (joint) mutlak harus lebih besar minimal 20% dari kapasitas momen balok-balok yang menumpunya. Hal ini bertujuan agar jika terjadi gempa kuat, sendi plastis (kerusakan) terjadi pada balok terlebih dahulu, bukan pada kolom yang bisa menyebabkan bangunan runtuh total (collapse).

Untuk mempermudah pemenuhan kriteria kapasitas lentur tersebut pada tahap analisis akhir, maka pada tahap *preliminary design*, kolom harus dikonfigurasi agar memiliki kekakuan yang lebih dominan dibandingkan balok.

Berdasarkan prinsip mekanika teknik dasar menurut Dipohusodo (1994), kekakuan lentur elemen struktur berbanding lurus dengan momen inersia penampang (I) dan berbanding terbalik dengan panjang bentang (L). Oleh karena itu, penurunan pemahaman mekanika teknik memberikan pendekatan peradesain di mana rasio kekakuan geometris kolom harus lebih besar atau sama dengan balok, yang direpresentasikan melalui persamaan berikut:

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

Dengan menggunakan pendekatan awal ini, distribusi momen lentur pada titik kumpul akan secara natural menuntut dimensi dan penulangan kolom yang lebih masif, sehingga persyaratan desain kapasitas 1,2 pada SNI dapat tercapai secara efektif tanpa memerlukan banyak revisi dimensi struktural.

2. Penulangan Kolom

A. Tulangan lentur kolom

Berikut adalah syarat penulangan lentur kolom SRPMK sesuai SNI 2847:2019:

- a. Luas tulangan longitudinal (A_{st}) tidak boleh kurang dari $0,01A_g$ dan tidak lebih dari $0,06A_g$ (SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4.1).
- b. Sambungan lewatan (lap splices) tulangan longitudinal hanya diizinkan pada daerah tengah tinggi kolom, yaitu di luar daerah panjang sendi plastis ujung kolom atau l_o (SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4.3)
- c. Sambungan lewatan tersebut harus didesain sebagai sambungan lewatan tarik dan harus dilingkupi seluruhnya oleh tulangan transversal pengekang.

B. Tulangan transversal (geser dan pengekangan) kolom

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

- a. Tinggi kolom pada muka joint atau pada penampang dimana pelelehan lentur dimungkinkan terjadi.
- b. Seperenam tinggi bersih kolom ($\frac{1}{6}l_n$)
- c. 450 mm

Spasi tulangan transversal pada daerah l_o (SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.3). Spasi sengkang tertutup atau spiral (s) di sepanjang daerah pengekangan l_o tidak boleh melebihi nilai terkecil dari kriteria berikut:

- a. Seperempat dimensi penampang penahan gempa kolom terkecil.
- b. Enam kali diameter tulangan longitudinal terkecil ($6d_b$).
- c. Nilai s_o , yang dihitung dengan rumus $s_o = 100 + \left(\frac{350-h_x}{3}\right)$. Nilai s_o ini tidak boleh melebihi 150 mm dan tidak perlu diambil kurang dari 100 mm.

Spasi tulangan transversal di luar daerah l_o (SNI 2847:2019 Pasal 18.7.5.5). Pada sisa tinggi bersih kolom (di luar daerah l_o), spasi tulangan transversal pengekang tidak boleh melebihi nilai terkecil dari:

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

Kuat Geser Kolom (SNI 2847:2019 Pasal 18.7.6). Tulangan transversal harus didesain untuk menahan gaya geser desain (V_e) yang didasarkan pada kapasitas momen probabel (M_{pr}) elemen kolom pada setiap ujungnya, dengan memperhitungkan beban aksial terfaktor yang menghasilkan momen probabel terbesar.

2.5.3 Pelat Lantai

Pelat merupakan struktur bangunan yang mencangkup beton bertulang berbentuk bidang horizontal. Pelat lantai memiliki fungsi yaitu sebagai pembatas antar lantai dan menyalurkan beban pada lantai ke balok dan kolom, hingga pondasi. Pelat

lantai harus diperhitungkan kaku, lurus dan rata dengan arah horizontal (Kriswanto, 2015).

1. Dimensi Pelat Lantai

Menurut SNI 2847-2019 pelat lantai yang didukung oleh balok di semua sisi harus memenuhi ketentuan yang sudah ditetapkan, sebagai berikut:

- a. Mencari nilai L_n untuk menentukan pelat 1 arah atau 2 arah. Jika $L_n \leq 2$ dan $L_x > 0,4L_y$, maka digunakan pelat 2 arah dan kebalikannya maka 1 arah, dengan:

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

Keterangan :

L_n = Jarak bersih memanjang diukur antar muka tumpuan.

L_y = Bentang Panjang

L_x = Bentang Pendek

- b. Menentukan ketebalan pelat lantai

Berikut adalah tabel penentuan ketebalan minimum untuk pelat satu arah:

Tabel 2. 18 Ketebalan Minimum Pelat Solid Satu Arah Non Prategang

Kondisi Perletakan	Minimum h
Perletakan sederhana	$l/20$
Menerus satu sisi	$l/24$
Menerus dua sisi	$l/28$
Kantilever	$l/10$

Sumber: SNI 2847:2019, Tabel 7.3.1.1

Untuk ketebalan minimum pelat nonprategang dua arah tercantum pada tabel berikut

Tabel 2. 19 Ketebalan Minimum Dua Arah Nonprategang

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

Sumber: SNI 2847:2019, Tabel 8.3.1.1

Keterangan:

L_n : Panjang bentang arah panjang

f_y : Tegangan leleh baja tulangan

β : Rasio bentang panjang terhadap bentang pendek

α_{fm} : Rasio kekakuan lentur balok terhadap kekakuan lentur pelat

α_{fm} dihitung dengan persamaan:

$$\alpha_{fm} = \frac{\alpha_{f1} + \alpha_{f2} + \alpha_{f3} + \alpha_{f4}}{4}$$

$$\alpha_f = \frac{E_{cb} I_b}{E_{cs} I_s}$$

Dengan:

E_{cb} : Modulus elastisitas beton balok.

E_{cs} : Modulus elastisitas beton pelat.

I_b : Momen inersia penampang balok kotor (termasuk flens).

I_s : Momen inersia penampang pelat kotor.

2. Penulangan Pelat Lantai

Perhitungan penulangan pelat berdasarkan peraturan SNI 2847-2019, yaitu :

a. $\rho = \frac{1,4}{f_y}$

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

c. $\rho = 0,75 \times \rho b$

d. $m = \frac{f_y}{0,85 \times f'c}$

e. $\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times R_n}{f_y}} \right)$

Kontrol $\rho_{min} < \rho_{perlu} < \rho_{max}$

Jika $\rho_{perlu} < \rho_{min}$, maka ρ_{perlu} dinaikan 30 %

Sehingga $\rho_{pakai} = 1,3 \times \rho_{perlu}$:

$$A_s = \rho_{pakai} \times b \times d$$

$$A_v = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2$$

Syarat : Nilai A_s pasang $> A_s$ perlu dan A_s min

2.6 Perencanaan Struktur Bawah

Struktur bawah merupakan bagian dari sistem struktur bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah dan berfungsi untuk menyalurkan seluruh beban yang berasal dari struktur atas ke tanah pendukung secara aman. Beban-beban tersebut meliputi beban mati, beban hidup, serta beban lateral seperti beban gempa dan angin yang bekerja pada bangunan. Oleh karena itu, struktur bawah harus dirancang agar mampu memikul dan meneruskan beban tersebut tanpa menyebabkan kegagalan struktur maupun kegagalan tanah pendukung.

Perencanaan struktur bawah meliputi pemilihan jenis pondasi yang sesuai dengan kondisi tanah, analisis kapasitas dukung tanah, serta perancangan elemen-elemen struktur seperti pondasi, *pile cap*, dan pedestal. Tujuan dari perencanaan ini adalah untuk memastikan bahwa beban yang diterima struktur dapat diteruskan ke tanah secara aman serta mencegah terjadinya penurunan tanah (*settlement*) yang berlebihan yang dapat mempengaruhi kinerja bangunan.

2.6.1 Pondasi

Pondasi adalah salah satu komponen dari struktur bangunan yang terletak di bawah. Pondasi memiliki fungsi untuk menerima beban dari struktur atas, mencangkup pelat lantai, balok, dan kolom. Pondasi yang direncanakan harus memenuhi syarat kesetimbangan bangunan pada beban di atasnya, yakni beban mati, beban hidup, beban angin, gempa bumi dan beban lain (Panjaitan et al., 2024).

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Keterangan (ton) :

Q_u : Daya dukung *ultimate* tiang

Q_p : Daya dukung *ultimate* ujung tiang

Q_s : Daya dukung *ultimate* selimut tiang

2.6.1 Kapasitas Kelompok dan Efisiensi Tiang

Apabila jarak antar tiang dalam satu kelompok (*group pile*) tidak memenuhi jarak minimum yang disyaratkan, maka daya dukung kelompok tiang tidak dapat dihitung sebagai hasil perkalian antara daya dukung satu tiang dengan jumlah tiang dalam kelompok tersebut. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antar tiang yang

mengakibatkan penurunan efisiensi daya dukung kelompok tiang. Oleh karena itu, diperlukan suatu faktor koreksi yang disebut efisiensi kelompok tiang (E_g) yang nilainya umumnya lebih kecil dari satu. Dengan mempertimbangkan faktor efisiensi tersebut, daya dukung kelompok tiang dapat dihitung menggunakan persamaan efisiensi kelompok tiang sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \right] \tan^{-1} \left(\frac{D}{s} \right)$$

dengan:

E_g = efisiensi kelompok tiang

m = jumlah tiang dalam satu deret baris

n = jumlah tiang dalam satu deret kolom

s = jarak antar as tiang

D = diameter atau dimensi tiang

2.6.2 *Pile Cap*

Pile cap merupakan elemen struktur beton bertulang yang berfungsi untuk mengikat beberapa tiang pondasi menjadi satu kesatuan sistem pondasi. Elemen ini berperan dalam mendistribusikan beban dari kolom atau struktur atas ke beberapa tiang pondasi sehingga beban tersebut dapat diteruskan ke tanah secara lebih merata. Selain itu, *pile cap* juga berfungsi menjaga kestabilan posisi tiang dalam kelompok tiang agar bekerja secara bersama-sama dalam menahan beban struktur.

2.7 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) dalam adalah arsip yang menjelaskan estimasi biaya yang diperlukan untuk menjalankan suatu proyek, termasuk biaya bahan baku, pekerja, dan biaya operasional lainnya, yang berfungsi sebagai panduan dalam pengelolaan keuangan proyek (Pitaloka et al., 2022).

RAB berfungsi sebagai acuan utama dalam mengestimasi total biaya yang diperlukan selama pelaksanaan proyek konstruksi. RAB membantu kontraktor memperhitungkan biaya berdasarkan analisis harga satuan per meter persegi serta komponen lainnya yang ada di lapangan. Dengan adanya RAB, manajemen proyek dapat mengendalikan risiko *overrun* biaya dan memitigasi potensi kejadian tak

terduga yang bisa menyebabkan deviasi anggaran dari rencana awal hingga proyek selesai (Lintang Kinasih et al., 2023).

2.7.1 Volume Pekerjaan

Volume pekerjaan atau *Bill of Quantity* (BoQ) adalah total ukuran elemen-elemen yang harus dikerjakan dalam suatu proyek, yang dihitung berdasarkan gambar kerja dan spesifikasi teknis. Penghitungan ini penting untuk memperkirakan kebutuhan material, tenaga kerja, dan biaya keseluruhan proyek. Volume pekerjaan pada umumnya dinyatakan dalam satuan seperti meter kubik (m^3) untuk material seperti beton dan tanah, serta meter persegi (m^2) untuk area permukaan seperti dinding dan atap (Wiranti et al., 2022).

Dalam praktiknya, volume pekerjaan sering dihitung menggunakan metode konvensional dengan bantuan perangkat lunak *spreadsheet* atau secara manual berdasarkan gambar kerja dua dimensi. Namun, metode ini terkadang dapat mengakibatkan ketidakakuratan, terutama jika tidak mempertimbangkan semua variabel yang ada. Oleh karena itu, penggunaan teknologi seperti *Building Information Modeling* (BIM) mulai diadopsi untuk meningkatkan akurasi perhitungan volume pekerjaan, memungkinkan perbandingan yang lebih baik antara estimasi biaya dan realisasi di lapangan (Khan et al., 2021).

2.7.2 *Quantity Takeoff* (QTO)

Quantity Takeoff (QTO) adalah proses mengestimasi volume yang umumnya berupa daftar item yang diidentifikasi dari gambar, perolehan dimensi, serta meninjau satuan pengukuran seperti panjang, luas, dan volume (Khan et al., 2021). Dengan menggunakan model BIM, QTO dapat dilakukan secara otomatis dengan mengekstraksi data geometris dan informasi dari setiap elemen bangunan.

QTO dapat berupa pengukuran skema bangunan atau pekerjaan, dan informasi ini dikumpulkan dalam dokumen yang biasanya disebut *Bill of Quantity* (BoQ). QTO membantu meminimalkan kesalahan dalam menghitung volume dan material, serta mengurangi pemborosan biaya dan material yang tidak diperlukan (Zakaria Rugas et al., 2024).

2.7.3 Analisis Harga Satuan Pekerjaan

Analisis Harga Satuan Produk (AHSP) adalah metode yang digunakan untuk menentukan harga satuan dari setiap jenis pekerjaan dalam proyek konstruksi. Proses ini melibatkan identifikasi, perhitungan, dan penentuan biaya yang diperlukan untuk seluruh unit pekerjaan, mencakup biaya pekerja, bahan, peralatan, dan biaya lainnya. Tujuan utama dari AHSP adalah untuk menghasilkan harga yang akurat dan realistis yang dapat dipakai sebagai landasan dalam perancangan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan usulan proyek (Prasetyo, 2022)

AHSP berfungsi sebagai pedoman penting untuk memastikan bahwa estimasi biaya dilakukan secara efisien dan berdasarkan dengan spesifikasi teknis yang sudah ditentukan. Dengan menggunakan AHSP, para profesional konstruksi dapat menghindari pemborosan sumber daya dan memastikan bahwa semua elemen biaya telah diperhitungkan dengan baik. Selain itu, AHSP juga membantu dalam evaluasi kewajaran harga selama proses negosiasi kontrak dan pengendalian biaya selama pelaksanaan proyek (Kementerian PUPR, 2023).

2.8 Penjadwalan Proyek

Penjadwalan proyek adalah bagian perencanaan yang menentukan jadwal untuk menjalankan berbagai kegiatan dalam kegiatan konstruksi, mencakup pengalokasian material, pekerja, dan waktu yang diperlukan untuk semua kegiatan. Proses ini adalah bagian yang harus dilakukan dari perencanaan proyek yang terdapat informasi jadwal rencana proyek dan perkembangan proyek dalam hal penggunaan biaya dan bahan baku. Penjadwalan dilakukan secara sistematis untuk memastikan bahwa setiap aktivitas dapat dilaksanakan dengan efisien, serta mempertimbangkan keterbatasan yang ada (Alfiah Dzakiroh et al., 2023)

Penjadwalan proyek adalah proses krusial dalam manajemen konstruksi yang merencanakan dan mengatur waktu pelaksanaan aktivitas. Dengan pendekatan *Building Information Modeling* (BIM), penjadwalan proyek menjadi lebih efisien melalui penggunaan BIM 4D, yang menggabungkan model 3D dengan dimensi waktu, memungkinkan manajer proyek untuk memvisualisasikan urutan kegiatan dan mendeteksi potensi *clash* sebelumnya (Saputra & Abma, 2023).

Penjadwalan berbasis BIM tidak hanya menetapkan durasi aktivitas, tetapi juga mengizinkan penyesuaian otomatis terhadap perubahan desain atau volume pekerjaan, meminimalkan risiko keterlambatan dan biaya tambahan. Dengan demikian, penggunaan BIM dalam penjadwalan proyek memberikan keuntungan signifikan dalam efisiensi dan akurasi pelaksanaan proyek konstruksi (Wibowo et al., 2023).

2.9 Integrasi BIM 5D di Naviswork

Integrasi pemodelan informasi bangunan dimensi kelima (BIM 5D) pada perangkat lunak Autodesk Navisworks beroperasi sebagai platform agregasi yang mengonsolidasikan model geometris parametrik dengan data penjadwalan serta estimasi biaya secara komprehensif (Hardin & McCool, 2015). Secara fundamental, arsitektur operasional perangkat lunak ini memfasilitasi sinkronisasi antara fitur *Quantification Workbook* dan *TimeLiner* untuk menciptakan ekosistem data proyek yang saling berinteroperabilitas.

Secara operasional, proses komputasi diawali dengan ekstraksi volume material secara otomatis (*Quantity Takeoff*) dari elemen-elemen model 3D lintas disiplin, yang kemudian dikalkulasikan dengan basis data harga satuan (Stanley & Thurnell, 2014). Elemen-elemen spasial dan finansial tersebut selanjutnya didistribusikan ke dalam linimasa pekerjaan konstruksi. Melalui mekanisme ini, Navisworks mentransformasi metodologi estimasi tradisional yang bersifat statis menjadi simulasi proyeksi aliran kas (*cash flow*) yang dinamis dan berfluktuasi secara *real-time* selaras dengan progres sekuensial pelaksanaan konstruksi.