

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Building Information Modelling (BIM)*

Dalam penelitiannya mengemukakan bahwa pesatnya perkembangan proyek bangunan menyebabkan metode konvensional dalam estimasi biaya, perencanaan, penjadwalan, serta manajemen proyek menjadi kurang relevan (Suraj dan Katke, 2025). *Building Information Modeling (BIM)* merupakan suatu sistem yang berperan dalam meningkatkan efisiensi serta mempercepat proses pelaksanaan konstruksi. Melalui BIM, perencanaan proyek dapat dilakukan secara digital sejak tahap awal dengan memanfaatkan model tiga dimensi (3D) yang dilengkapi dengan simulasi penjadwalan dan Rencana Anggaran Biaya pekerjaan. Dengan perencanaan yang lebih terstruktur tersebut, pelaksanaan konstruksi diharapkan dapat berjalan lebih terkendali dan minim kesalahan. Selain itu, kematangan desain yang dihasilkan melalui BIM juga berkontribusi dalam mengurangi potensi pekerjaan ulang selama proses konstruksi berlangsung (Sabil & Erizal, 2023).

Namun demikian, masih banyak pihak yang belum sepenuhnya memahami manfaat komprehensif yang ditawarkan oleh BIM. Industri arsitektur, teknik, dan konstruksi dihadapkan pada berbagai tantangan spesifik dalam pelaksanaan proyek, sehingga kolaborasi antar pemangku kepentingan menjadi hal yang krusial. Melalui pendekatan desain kolaboratif berbasis BIM, pelaksanaan proyek dapat dilakukan secara lebih terkoordinasi dengan estimasi kuantitas material yang lebih akurat.

2.1.1 Klasifikasi *Building Information Modelling (BIM)*

BIM berkembang dari gambar 2D konvensional menjadi model digital terintegrasi. BIM 2D terbatas pada denah, tampak, dan potongan, sedangkan 3D menambahkan atribut geometrik dan non geometrik untuk koordinasi dan visualisasi. BIM 4D mengintegrasikan waktu untuk simulasi jadwal konstruksi, dan 5D menambahkan

biaya sehingga memungkinkan kuantitas otomatis serta pengendalian anggaran proyek (Basir, Ujang, dan Majid, 2023).

1. BIM 2D

BIM 2D merupakan bentuk awal BIM yang menampilkan informasi dalam dua dimensi, seperti denah, tampak, dan potongan. Model ini bersifat statis, berfokus pada geometri dan tata letak dasar, serta berfungsi sebagai dasar dokumentasi awal sebelum dikembangkan ke BIM 3D dan dimensi lebih lanjut.

2. BIM 3D

BIM 3D adalah pengembangan dari BIM 2D yang menampilkan model digital tiga dimensi dari bangunan, mencakup panjang, lebar, dan tinggi objek. Dengan BIM 3D, informasi geometris bangunan dapat divisualisasikan secara realistis, memudahkan koordinasi antar disiplin (arsitektur, struktur, MEP), deteksi benturan (*clash detection*), dan perencanaan desain lebih akurat.

3. BIM 4D

BIM 4D merupakan pengembangan dari BIM 3D dengan menambahkan dimensi waktu, sehingga memungkinkan pemodelan jadwal konstruksi secara digital. Melalui BIM 4D, urutan pekerjaan, durasi, dan interaksi antar aktivitas dapat divisualisasikan, mempermudah perencanaan, koordinasi, dan identifikasi potensi keterlambatan sebelum pekerjaan lapangan dimulai.

4. BIM 5D

BIM 5D merupakan pengembangan dari BIM 3D dan BIM 4D dengan menambahkan dimensi biaya, sehingga model digital tidak hanya menampilkan geometri dan jadwal, tetapi juga informasi estimasi dan pengendalian biaya proyek. Penerapan BIM 5D memungkinkan perhitungan biaya lebih akurat, simulasi dampak perubahan desain terhadap anggaran, dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif selama perencanaan dan konstruksi. Dengan demikian, BIM 5D mengintegrasikan aspek visual, waktu, dan biaya untuk meningkatkan kontrol manajemen proyek.

5. BIM 6D

BIM 6D merupakan pengembangan BIM yang menambahkan dimensi keberlanjutan dan manajemen energi ke dalam model digital. Selain

menampilkan geometri, jadwal (BIM 4D), dan biaya (BIM 5D), BIM 6D juga memuat data terkait performa energi, efisiensi sumber daya, dan strategi bangunan hijau. Penerapan BIM 6D memungkinkan analisis konsumsi energi, estimasi emisi karbon, serta pengambilan keputusan desain yang lebih ramah lingkungan sepanjang siklus hidup bangunan.

6. BIM 7D

BIM 7D merupakan pengembangan BIM yang menambahkan dimensi manajemen fasilitas (*facility management*) pada model digital. Selain mencakup geometri, jadwal (BIM 4D), biaya (BIM 5D), dan keberlanjutan (BIM 6D), BIM 7D juga memuat informasi terkait pemeliharaan, perawatan, inventaris, serta siklus hidup aset bangunan..

7. BIM 8D

BIM 8D adalah pengembangan BIM yang menambahkan dimensi keselamatan dan kesehatan kerja (K3) ke dalam model digital. Selain mencakup geometri, jadwal (BIM 4D), biaya (BIM 5D), keberlanjutan (BIM 6D), dan manajemen fasilitas (BIM 7D), BIM 8D juga memuat data tentang identifikasi risiko, analisis bahaya, dan perencanaan prosedur kerja yang aman. Berikut merupakan gambar klasifikasi BIM.



Gambar 2. 1 Klasifikasi BIM

2.1.2 *Software* Perencanaan dengan Konsep BIM

Yadi dkk. (2023) menjelaskan bahwa keakuratan dalam penentuan volume pekerjaan serta kebutuhan material merupakan komponen utama yang

memengaruhi perencanaan biaya konstruksi dan proses pengadaan material. Kurangnya ketelitian pada tahap estimasi yang dilakukan oleh *estimator* maupun *quantity surveyor* dapat menyebabkan ketidaksesuaian anggaran sehingga berdampak pada meningkatnya biaya proyek.

Oleh karena itu, diperlukan metode perencanaan yang mampu menekan potensi kesalahan sejak tahap awal. Integrasi antar perangkat lunak tersebut memungkinkan proses perencanaan dan pelaksanaan konstruksi dilakukan secara lebih sistematis, membantu mengidentifikasi potensi benturan antar elemen sebelum pelaksanaan konstruksi, serta meningkatkan ketepatan dalam perencanaan biaya dan waktu proyek.

1. *Autodesk Revit*

Autodesk Revit merupakan perangkat lunak *Building Information Modeling* (BIM) yang digunakan untuk perancangan, pemodelan, dan dokumentasi proyek konstruksi secara digital. *Revit* mampu menghasilkan model 3D yang detail dan terintegrasi dengan berbagai informasi proyek dalam satu aplikasi. Selain itu, *Revit* dapat menghasilkan *Quantity Take Off* (QTO) secara otomatis serta mendukung integrasi penjadwalan dan estimasi biaya dalam penerapan BIM 5D, sehingga proses perencanaan menjadi lebih terkoordinasi, akurat, dan efisien. Dibandingkan dengan perangkat lunak sejenisnya, *Revit* memiliki keunggulan dalam mengintegrasikan pemodelan, dokumentasi, kuantifikasi pekerjaan, serta pembaruan data secara otomatis dalam satu lingkungan kerja yang terhubung. Penelitian menunjukkan bahwa *Revit* lebih efisien dan akurat dalam proses *quantity take off* dibandingkan metode konvensional (Fernando et al., 2025). Tampilan aplikasi *Autodesk Revit* dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 2 *Autodesk Revit*

2. *Autodesk AutoCAD*

Autodesk AutoCAD merupakan perangkat lunak *Computer Aided Design* (CAD) yang digunakan untuk membuat gambar teknik dua dimensi (2D)

maupun model tiga dimensi (3D) dengan tingkat akurasi yang tinggi. *AutoCAD* memungkinkan proses pembuatan, pengeditan, dan dokumentasi gambar dilakukan secara lebih cepat dan presisi dibandingkan metode manual. Keunggulan utama *AutoCAD* dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah kemampuannya dalam menghasilkan gambar kerja 2D secara detail serta kompatibilitas format file yang luas sehingga memudahkan pertukaran data dan koordinasi antar pihak yang terlibat dalam proyek. Penggunaan *AutoCAD* terbukti meningkatkan efisiensi waktu dalam penyusunan denah dan elevasi, serta memperjelas pemahaman dimensi ruang yang penting untuk perencanaan dan visualisasi sebelum konstruksi atau produksi (Nurlaili & Dani, 2021). Tampilan aplikasi *Autodesk AutoCAD* dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.3 *Autodesk AutoCAD*

3. *Autodesk Naviswork Manage*

Autodesk Navisworks Manage merupakan perangkat lunak *Building Information Modeling* (BIM) yang digunakan untuk koordinasi model dan manajemen proyek konstruksi. *Navisworks* mampu menggabungkan model 3D dari berbagai disiplin dan perangkat lunak ke dalam satu lingkungan kerja terintegrasi sehingga memudahkan koordinasi antar pihak yang terlibat dalam proyek. Keunggulan utama *Navisworks* dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah kemampuannya dalam melakukan deteksi benturan (*clash detection*) secara efektif sebelum tahap konstruksi, sehingga dapat mengurangi potensi kesalahan desain dan pekerjaan ulang di lapangan. Selain itu, *Navisworks* mendukung integrasi data waktu dan biaya untuk penerapan BIM 4D dan BIM 5D, sehingga mempermudah visualisasi jadwal, estimasi biaya, serta pemantauan progres proyek secara terpadu. Kemampuan tersebut terbukti meningkatkan akurasi penjadwalan, efisiensi pengelolaan model, dan

koordinasi proyek (Putri et al., 2023). Tampilan aplikasi *Navisworks* dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2. 4 Autodesk Naviswork Manager

4. ETABS

ETABS (*Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems*) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk analisis dan perancangan struktur gedung secara tiga dimensi. ETABS mampu menganalisis respons struktur terhadap berbagai jenis pembebanan, seperti beban gravitasi, beban lateral, dan beban gempa, sehingga membantu menghasilkan desain yang aman dan efisien. Keunggulan utama ETABS dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah kemampuannya yang dirancang khusus untuk analisis dan desain gedung bertingkat, termasuk penyediaan fitur otomatis seperti perhitungan massa bangunan, pusat massa dan pusat kekakuan, *story drift*, respons spektrum, serta evaluasi ketidakberaturan struktur sesuai peraturan desain gempa. Selain itu, ETABS mendukung perencanaan berbagai sistem struktur, seperti rangka beton bertulang, dinding geser, dan struktur komposit, serta mampu mengevaluasi perilaku struktur secara cepat dan efektif. Kemampuan tersebut menjadikan ETABS sebagai salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan bertingkat (Pechorskaya, Galishnikova, Gebreslassie, & Damir, 2021). Tampilan aplikasi ETABS dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 CSI ETABS

5. *Microsoft Project*

Microsoft Project merupakan perangkat lunak manajemen proyek yang digunakan untuk merencanakan, menjadwalkan, dan memantau pelaksanaan proyek secara terstruktur. Perangkat lunak ini memungkinkan penyusunan *Work Breakdown Structure* (WBS), penentuan durasi aktivitas, alokasi sumber daya, serta pengendalian jadwal proyek secara sistematis. Keunggulan utama *Microsoft Project* dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah kemampuannya dalam melakukan analisis jalur kritis (*Critical Path Method/CPM*) dan penjadwalan otomatis berdasarkan hubungan ketergantungan antar aktivitas, sehingga perubahan pada suatu pekerjaan dapat diperbarui secara otomatis pada keseluruhan jadwal proyek. Selain itu, *Microsoft Project* mendukung integrasi dengan *Autodesk Revit* dan *Autodesk Navisworks* untuk penerapan BIM 4D dan BIM 5D, sehingga memudahkan visualisasi urutan konstruksi dan pengendalian proyek. Kemampuan tersebut menjadikan *Microsoft Project* sebagai perangkat lunak yang efektif dalam mengelola proyek yang kompleks serta mendukung pengambilan keputusan melalui laporan dan monitoring progres secara terintegrasi (Yahya & Handayani, 2022). Tampilan aplikasi *Microsoft Project* dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2. 6 *Microsoft Project*

6. *SPColumn*

SPColumn merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis dan merancang kolom beton bertulang dengan mempertimbangkan pengaruh gaya aksial dan momen lentur secara simultan. Program ini bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan gaya dan kompatibilitas regangan untuk menentukan kapasitas penampang kolom pada berbagai kondisi pembebanan. Keunggulan utama *SPColumn* dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah

kemampuannya menghasilkan diagram interaksi aksial–momen (*P–M Interaction Diagram*) secara otomatis dan detail, sehingga memudahkan evaluasi kapasitas, keamanan, dan efisiensi desain kolom. Selain itu, *SPColumn* dapat menganalisis berbagai bentuk penampang serta konfigurasi tulangan dengan cepat dan akurat. Dengan demikian, penggunaan *SPColumn* dapat meningkatkan ketelitian dan efisiensi dalam proses perencanaan kolom beton bertulang (Wight & MacGregor, 2021). Tampilan aplikasi *SPColumn* dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2. 7 *SPColoumn*

7. *Microsoft Excel*

Microsoft Excel merupakan perangkat lunak pengolah angka berbasis spreadsheet yang digunakan untuk mengelola data, melakukan perhitungan, serta menyusun dan menganalisis informasi secara sistematis melalui tabel dan rumus. Dalam bidang konstruksi, *Excel* banyak digunakan untuk mendukung perencanaan proyek, seperti penyusunan anggaran biaya, penjadwalan pekerjaan, dan analisis data proyek karena mampu mempercepat proses perhitungan serta memudahkan pengolahan data secara terstruktur. Keunggulan utama *Microsoft Excel* dibandingkan perangkat lunak sejenis adalah kemampuannya dalam mengolah data menggunakan berbagai fungsi dan rumus yang fleksibel, serta mendukung pembuatan tabel, grafik, dan analisis data secara otomatis dalam satu lembar kerja. Kemampuan tersebut membantu meningkatkan efisiensi, akurasi, dan produktivitas dalam proses perencanaan proyek dibandingkan dengan perhitungan yang dilakukan secara manual (Nugraha, 2022). Tampilan aplikasi *Microsoft Excel* dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 *Microsoft Excel*

2.2 Pembebanan Struktur

Dalam proses perencanaan elemen struktur bangunan, penerapan peraturan pembebanan yang berlaku merupakan hal yang wajib dilakukan guna menjamin tingkat keamanan struktur. Struktur yang dirancang harus mempunyai kapasitas yang memadai untuk memikul seluruh beban yang bekerja selama umur layan bangunan. Pada bangunan gedung, terdapat berbagai jenis beban yang perlu diperhitungkan dalam proses perencanaan. Adapun jenis beban yang dianalisis pada Tugas Akhir ini mengacu pada ketentuan beban minimum untuk perancangan bangunan gedung sesuai dengan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019 yang meliputi sebagai berikut.

2.2.1 Beban Mati

Beban mati (D) merupakan beban permanen yang bekerja secara terus menerus pada suatu bangunan dan nilainya relatif sama sepanjang umur struktur. Beban ini mencakup berat sendiri elemen bangunan seperti dinding, pelat lantai, dan tangga, serta berat komponen tetap lainnya, termasuk instalasi mekanikal dan elektrikal seperti sistem perpipaan dan kelistrikan. Berikut table daftar beban mati.

Tabel 2. 1 Daftar Beban Mati Bangunan

No	Material	Beban (kN/m ²)
1	Plesteran	0,48
2	Bata ringan	1,87
3	Partisi	0,72
4	Pasir (0,05)	0,785
5	Spesi (0,03)	0,618
6	Keramik	0,167
7	Beban MEP	0,3

8	Plafond	0,088
9	Rangka Plafond	0,049
10	<i>Waterproofing</i>	0,412

(Sumber : SNI 1727:2020)

2.2.2 Beban Hidup

Beban hidup (L) merupakan beban yang timbul akibat aktivitas dan pergerakan di dalam suatu bangunan, sehingga besarnya bersifat tidak tetap dan dapat berubah posisi dari waktu ke waktu. Beban ini umumnya berkaitan dengan fungsi penggunaan bangunan, seperti beban yang ditimbulkan oleh manusia dan peralatan, serta dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti angin, genangan air, maupun kondisi operasional lainnya. Berikut table daftar beban hidup.

Tabel 2. 2 Daftar Beban Hidup Bangunan

No.	Fungsi	Beban (kN/m ²)
1	Koridor lantai pertama	4,8
2	Koridor diatas lantai pertama	3,83
3	Kantor	2,4
4	Ruang arsip	4,8
5	Ruang rapat	4,8
6	Ruang brankas/Vault bank	4,8
7	Pelat tangga	4,8
8	Pelat bordes	4,8
9	Ruang olahraga	4,8
10	Dak atap	2,4
11	Atap	0,96
12	Area parkir	4,8
13	Ruang panel dan genset	4,8
14	Toilet	2,727
15	Ruang makan	4,8
16	Assembly/ruang serbaguna (HALL)	4,8
17	Gudang	4,8
18	Ruang pompa	4,8
19	Ruang GWT	2,4

(Sumber : SNI 1727:2020)

2.2.3 Beban Angin

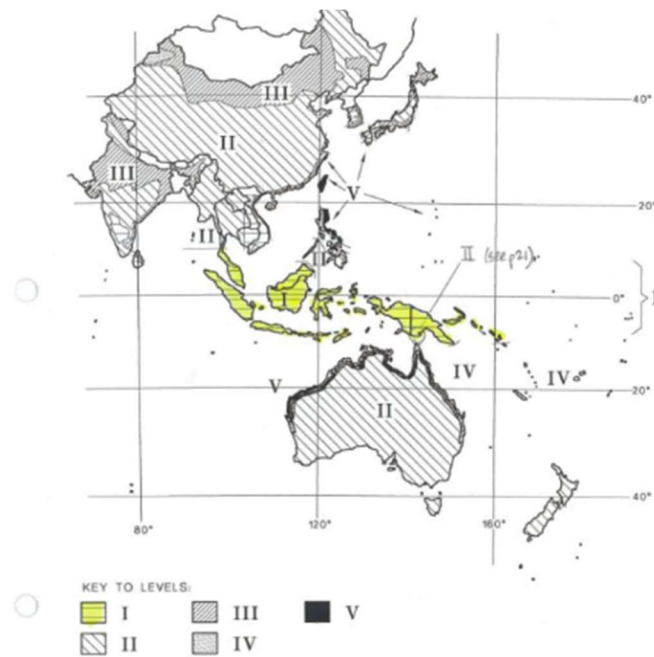
Beban angin adalah gaya yang bekerja pada bangunan akibat tekanan udara yang bergerak, yang dapat menimbulkan tekanan atau hisapan pada permukaan struktur. Besarnya beban ini dipengaruhi oleh kecepatan angin, bentuk bangunan, serta kondisi lingkungan di sekitarnya, sehingga perlu diperhitungkan untuk menjaga kestabilan dan keamanan struktur (SNI, 2021)

1. Sistem Penahan Gaya Angin

Metode sistem penahan gaya angin merupakan suatu pendekatan dalam perancangan struktur untuk mengatasi beban lateral yang disebabkan oleh tekanan angin. Sistem ini melibatkan penggunaan elemen-elemen struktur tertentu, seperti rangka pemikul momen, dinding geser, maupun sistem bracing, yang berfungsi untuk menyalurkan gaya angin secara bertahap dari struktur atas hingga ke pondasi. Pemilihan sistem penahan gaya angin dipengaruhi oleh karakteristik bangunan, termasuk tinggi, bentuk, serta kondisi lingkungan di sekitarnya. Dengan perencanaan yang tepat, sistem ini dapat meningkatkan kestabilan struktur dan mencegah terjadinya kerusakan akibat pengaruh beban angin (SNI, 2021).

2. Parameter Beban Angin

Parameter beban angin adalah sekumpulan faktor yang digunakan untuk menentukan besarnya gaya angin yang bekerja pada suatu bangunan. Faktor-faktor tersebut mencakup kecepatan dasar angin, kategori eksposur, faktor arah, pengaruh topografi, serta koefisien tekanan yang bergantung pada bentuk dan ketinggian struktur. Setiap parameter memiliki peran penting dalam menghasilkan nilai tekanan angin yang akurat pada permukaan bangunan. Oleh karena itu, penetapan parameter ini harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan karakteristik bangunan agar perencanaan struktur dapat menjamin kestabilan dan keamanan terhadap pengaruh angin (SNI, 2021). Berikut Merupakan gambar peta angin pada **Gambar 2.9** dan tabel parameter beban angin pada **Tabel 2.3**.



Gambar 2.9 Peta Angin

(Sumber : Peta Angin HB 212:2002)

Tabel 2.3 Parameter Beban Angin

<i>Handbook Level</i>	<i>Description</i>	<i>Equation for Vr</i>	V_{60}	V_{600}
I	<i>Strong thunderstorms and monsoon winds</i>	$(70 - 56R^{-0.1})$	32	40
II	<i>Moderately severe thunderstorms and extra-tropical gales</i>	$(67 - 41R^{-0.1})$	39	45
III	<i>Severe thunderstorms and moderate or weakening typhoons/tropical cyclones</i>	$(106 - 92R^{-0.1})$	44	57
IV	<i>Strong typhoons/tropical cyclones</i>	$(122 - 104R^{-0.1})$	52	66
V	<i>Very strong typhoons/tropical cyclones</i>	$(156 - 142R^{-0.1})$	60	80

(Sumber : HB 212-2002)

3. Faktor Arah Angin

Faktor arah angin adalah koefisien yang dipakai untuk memperhitungkan variasi arah datangnya angin terhadap bangunan dalam analisis beban angin. Faktor ini digunakan agar perhitungan beban lebih realistis karena angin tidak selalu bekerja dari arah yang paling kritis secara terus-menerus. Untuk tabel faktor arah angin dapat dilihat pada **Tabel 2.4** dibawah ini.

Tabel 2. 4 Faktor Arah Angin

Tipe Struktur	Faktor arah angin (K_d)
Bangunan gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah berbentuk bundar	1,0 ^a
Cerobong, tangki, dan struktur serupa	
Persegi	0,90
Segi enam	0,95
Segi delapan	1,0 ^a
Bundar	1,0 ^a
Dinding solid yang berdiri bebas, peralatan bagian atap, dan panel petunjuk solid yang berdiri bebas serta panel petunjuk terikat	0,85
Panel petunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	0,85
Rangka batang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

(Sumber : SNI 1727:2020)

4. Kategori Eksposur

Kategori eksposur merupakan pengelompokan kondisi lingkungan di sekitar bangunan berdasarkan tingkat kekasaran permukaan tanah yang mempengaruhi aliran angin. Klasifikasi ini menggambarkan ada tidaknya hambatan, seperti bangunan atau vegetasi, yang berperan dalam menentukan distribusi kecepatan dan tekanan angin pada struktur

- a. Eksposur B berlaku untuk bangunan gedung atau struktur yang berada pada area dengan kondisi kekasaran permukaan tanah kategori B pada arah datangnya angin. Untuk bangunan dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m), kategori ini diterapkan apabila kondisi tersebut terdapat pada jarak lebih dari 1.500 ft (457 m). Sementara itu, untuk bangunan dengan tinggi atap rata-rata lebih dari 30 ft (9,1 m), Eksposur B berlaku jika kekasaran permukaan tanah kategori B berada pada jarak lebih dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan, dengan menggunakan nilai yang terbesar. Eksposur C: Eksposur C berlaku untuk semua kasus di mana Eksposur B atau Eksposur D tidak berlaku.
- b. Eksposur C digunakan pada seluruh kondisi yang tidak memenuhi kriteria Eksposur B maupun Eksposur D.
- c. Eksposur D digunakan apabila kekasaran permukaan tanah kategori D terdapat pada arah datangnya angin dengan jarak lebih dari 5.000 ft (1.524 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, dengan menggunakan nilai yang terbesar. Selain itu, Eksposur D juga berlaku apabila kondisi permukaan tanah di sekitar lokasi termasuk kategori B atau C, tetapi berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, dengan menggunakan nilai yang terbesar, dari wilayah yang memenuhi kriteria Eksposur D.

5. Faktor Topografi

Faktor topografi adalah koefisien yang digunakan dalam perhitungan beban angin untuk memperhitungkan pengaruh bentuk permukaan tanah, seperti bukit, lereng, atau tebing, terhadap peningkatan kecepatan angin. Kondisi topografi tertentu dapat menyebabkan percepatan aliran angin sehingga meningkatkan tekanan yang bekerja pada struktur. Oleh karena itu, faktor ini digunakan agar perhitungan beban angin lebih mencerminkan kondisi lapangan yang sebenarnya. Nilai faktor topografi ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 1727:2020 Pasal 26.8.2 dengan mempertimbangkan pengaruh kondisi topografi terhadap peningkatan kecepatan angin melalui faktor K_{zt} .

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

6. Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Pengaruh ketinggian lokasi terhadap perubahan densitas udara dalam perhitungan beban angin diperhitungkan melalui faktor elevasi permukaan tanah. Parameter ini dinyatakan sebagai K_e , dengan nilai yang ditentukan berdasarkan elevasi terhadap muka laut sesuai SNI 1727:2020 Pasal 26.9. Meskipun tersedia acuan nilai pada Tabel 26.9-1, dalam perencanaan umumnya digunakan nilai K_e senilai 1,0 untuk berbagai kondisi elevasi. Berikut merupakan tabel faktor elevasi permukaan tanah.

Tabel 2. 3 Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Elevasi tanah di atas permukaan laut (Sea Level)		Faktor elevasi permukaan tanah (K_e)
Ft	m	
< 0	< 0	Lihat catatan 2
0	0	1,00
1.000	305	0,96
2.000	610	0,93
3.000	914	0,90
4.000	1.219	0,86
5.000	1.524	0,83
6.000	1.829	0,80
> 6.000	> 1.829	Lihat catatan 2

(Sumber : SNI 1727:2020)

7. Tekanan Kecepatan

Koefisien eksposur tekanan kecepatan digunakan untuk menunjukkan pengaruh ketinggian terhadap besarnya tekanan angin yang bekerja pada bangunan. Nilai koefisien ini ditentukan berdasarkan kategori eksposur dan elevasi titik yang ditinjau dari permukaan tanah. Penetapannya mengacu pada SNI 1727:2020 Tabel 26.10-1 yang menyajikan hubungan antara ketinggian dan nilai koefisien untuk masing-masing kategori eksposur.

Tabel 2. 4 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan, K_h dan K_z

Ketinggian di atas permukaan tanah		Eksposur B	Eksposur C	Eksposur D
ft	m			
0–15	0–4,6	0,57 (0,70) ^a	0,85	1,03

Ketinggian di atas permukaan tanah		Eksposur B	Eksposur C	Eksposur D
20	6,1	0,62 (0,70) ^a	0,90	1,08
25	7,6	0,66 (0,70) ^a	0,94	1,12
30	9,1	0,70	0,98	1,16
40	12,2	0,76	1,04	1,12
50	15,2	0,81	1,09	1,27
60	18,0	0,85	1,13	1,31
70	21,3	0,89	1,17	1,34
80	24,4	0,93	1,21	1,38
90	27,4	0,96	1,24	1,40
100	30,5	0,99	1,26	1,43
120	36,6	1,04	1,31	1,48
140	42,7	1,09	1,36	1,52
160	48,8	1,13	1,39	1,55
180	54,9	1,17	1,43	1,58
200	61,0	1,20	1,46	1,61
250	76,2	1,28	1,53	1,68
300	91,4	1,35	1,59	1,73
350	106,7	1,41	1,64	1,78
400	121,9	1,47	1,69	1,82
450	137,2	1,52	1,73	1,86
500	152,4	1,56	1,77	1,89

(Sumber : SNI 1727:2020)

8. Tekanan Kecepatan Velositas (q_z)

Besarnya tekanan kecepatan (*velocity pressure*) dihitung mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.10.2, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$q_z = 0,613 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2$$

Nilai q_z yang diperoleh dari perhitungan wajib memenuhi batas minimum yang ditetapkan, yaitu tidak kurang dari 0,77 kN/m². Jika hasil perhitungan menunjukkan nilai di bawah batas tersebut, maka nilai yang digunakan dalam perencanaan harus disesuaikan menjadi sebesar 0,77 kN/m² sebagai nilai minimum yang diizinkan.

9. Faktor Pengaruh Hembusan Angin

Faktor hembusan angin (G) digunakan untuk memperhitungkan pengaruh fluktuasi kecepatan angin terhadap respons struktur. Nilainya ditentukan berdasarkan karakteristik bangunan, khususnya tingkat kekakuan sistem

struktur. Sesuai SNI 1727:2020 Pasal 26.11.1, bangunan gedung dan struktur lain yang memiliki kekakuan tinggi dapat menggunakan nilai faktor hembusan angin sebesar 0,85.

10. Koefisien Tekanan Internal

Penentuan nilai koefisien tekanan internal (GC_{pi}) mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Tabel 26.13-1, yang didasarkan pada klasifikasi tingkat ketertutupan bangunan, yaitu tertutup, sebagian terbuka, atau terbuka. Koefisien ini digunakan untuk menggambarkan pengaruh tekanan angin di dalam bangunan yang terjadi akibat adanya bukaan pada selubung bangunan. Berikut merupakan table koefisien tekanan internal.

Tabel 2. 5 Koefisien Tekanan Internal

Klasifikasi ketertutupan	Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan	Tekanan internal	Koefisien tekanan internal (GC_{pi})
Bangunan tertutup	Ao kurang dari terkecil 0,01Ag atau 4 ft ² (0,37 m ²) dan $Aoi/Agi \leq 0,2$	Sedang	-0,18
			-0,18
Bangunan tertutup sebagian	Ao > 1,1Aoi dan Ao > terkecil dari 0,01Ag atau 4 ft ² (0,37 m ²) dan $Aoi/Agi \leq 0,2$	Tinggi	-0,55
			-0,55
Bangunan terbuka sebagian	Bangunan yang tidak sesuai dengan klasifikasi tertutup, tertutup sebagian, atau klasifikasi terbuka	Sedang	-0,18
			-0,18
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	0,00

(Sumber : SNI 1727:2020)

11. Koefisien Tekanan Eksternal

Koefisien tekanan eksternal merupakan besaran yang digunakan untuk menyatakan intensitas tekanan maupun gaya hisap angin yang bekerja pada sisi luar bangunan. Nilainya dipengaruhi oleh konfigurasi bentuk bangunan, arah aliran angin, serta letak elemen yang dianalisis. Dalam proses perancangan, parameter ini berperan dalam menentukan sebaran beban angin pada permukaan luar struktur sesuai pedoman dalam SNI 1727:2020. Berikut merupakan table koefisien tekanan eksternal (C_p).

Tabel 2. 6 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

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

(Sumber : SNI 1727:2020)

12. Tekanan Angin (p) pada Gedung

Mengacu pada SNI 1727:2020 Pasal 27.3.1, besarnya tekanan angin rencana (p) pada permukaan bangunan dihitung dengan persamaan berikut:

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

Dengan penjelasan sebagai berikut:

p merupakan tekanan angin rencana yang bekerja pada permukaan struktur (kN/m^2). Nilai q menyatakan tekanan kecepatan angin pada elevasi tertentu z (kN/m^2). Koefisien GC_p adalah koefisien tekanan eksternal yang telah memperhitungkan efek hembusan (gust). Sementara itu, q_i menunjukkan tekanan kecepatan pada ketinggian acuan untuk tekanan internal, dan GC_{pi} adalah koefisien tekanan internal yang digunakan dalam analisis.

2.2.4 Beban Gempa

Beban gempa dapat dijelaskan sebagai pengaruh gaya yang muncul akibat pergerakan tanah saat gempa, yang kemudian diterima oleh struktur bangunan. Penentuan besarnya gaya tersebut dilakukan melalui pendekatan analisis tertentu, seperti metode respons spektrum atau metode analisis lainnya yang sesuai dengan karakteristik struktur. (SNI 1726:2019)

1. Klasifikasi jenis tanah

Klasifikasi jenis tanah adalah tahapan pengelompokan kondisi tanah berdasarkan sifat fisik dan mekanisnya, seperti tingkat kekakuan, kepadatan,

serta perilakunya terhadap beban maupun getaran. Dalam perencanaan struktur, terutama terkait analisis gempa, klasifikasi ini digunakan untuk memahami bagaimana tanah merespons rambatan gelombang seismik.

Sesuai ketentuan SNI 1726:2019, kondisi tanah dibedakan dalam beberapa kelas situs yaitu tanah keras, tanah sedang, tanah lunak, serta tanah dengan karakteristik khusus. Klasifikasi situs ini menjadi parameter penting dalam perencanaan struktur tahan gempa karena memengaruhi besarnya parameter respons spektrum desain dan perilaku struktur terhadap beban gempa. Berikut merupakan tabel klasifikasi situs tanah berdasarkan SNI 1726:2019.

Tabel 2. 7 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 3m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : <ul style="list-style-type: none"> . Indeks plastisitas, $PI > 20$, . Kadar air, $w \geq 40\%$, . Kuat geser nirial $su < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifikasi dan analisis respons spesifik situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensiti, tanah tersementasi lemah. Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m). Lempung berplastis sangan tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$). Lapisan lempung lunak?setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$ kPa.		

(Sumber : SNI 1726:2019)

2. Kategori risiko gempa

Kategori risiko gempa merupakan sistem pengelompokan bangunan yang didasarkan pada besarnya dampak yang dapat terjadi apabila struktur mengalami kegagalan akibat gempa. Penilaian kategori ini mempertimbangkan fungsi bangunan, tingkat hunian, serta potensi kerugian yang ditimbulkan, baik terhadap keselamatan manusia maupun terhadap aspek ekonomi dan operasional.

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1726:2019, bangunan diklasifikasikan ke dalam beberapa tingkat risiko, mulai dari rendah hingga sangat tinggi. Perbedaan kategori ini akan memengaruhi parameter perencanaan, termasuk faktor keutamaan dan besaran beban gempa yang digunakan dalam perancangan struktur. Berikut merupakan table Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa.

Tabel 2. 8 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain: <ul style="list-style-type: none"> • Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan 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: <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan • Rumah toko dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Gedung apartemen/ rumah susun • Pusat perbelanjaan/ mall • Bangunan industri • Fasilitas manufaktur Pabrik	II
Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Resiko
<ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas masyarakat yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	
<p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk 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 	IV

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

3. Penentuan faktor keutamaan gempa

Faktor keutamaan gempa ditetapkan untuk menyesuaikan besarnya pengaruh gempa dalam perencanaan struktur sesuai dengan tingkat kepentingan suatu bangunan. Penentuan nilainya didasarkan pada kategori risiko, dengan mempertimbangkan fungsi bangunan, kapasitas penghuni, serta perannya terutama saat kondisi darurat.

Sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1726:2019, setiap klasifikasi risiko memiliki nilai faktor keutamaan yang berbeda. Bangunan dengan fungsi vital atau risiko tinggi akan menggunakan nilai yang lebih besar dibandingkan bangunan biasa, sehingga tingkat keandalannya terhadap beban gempa dapat lebih terjamin. Berikut merupakan table faktor keutamaan gempa.

Tabel 2. 9 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori Risiko	Faktor Keutamaan Gempa, <i>I_e</i>
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,5

(Sumber : SNI 1726:2019)

4. Penentuan parameter respons spektrum percepatan gempa maksimum dilakukan berdasarkan kurva spektrum respons desain yang ditampilkan pada Gambar berikut pada SNI 1726:2019, dengan mengikuti ketentuan berikut:

- a. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , nilai percepatan spektrum desain (S_a) dihitung menggunakan Persamaan (3-1):
- b. $S_a = SDS (0,4 + 0,6 T/T_0)$
- c. Pada rentang periode antara T_0 hingga T_s , nilai percepatan spektrum desain (S_a) dianggap konstan, yaitu sebesar SDS.

d. Untuk periode yang melebihi T_s , nilai S_a ditentukan dengan menggunakan Persamaan (3-2):

e. $S_a = SD1 / T$.

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

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

Keterangan:

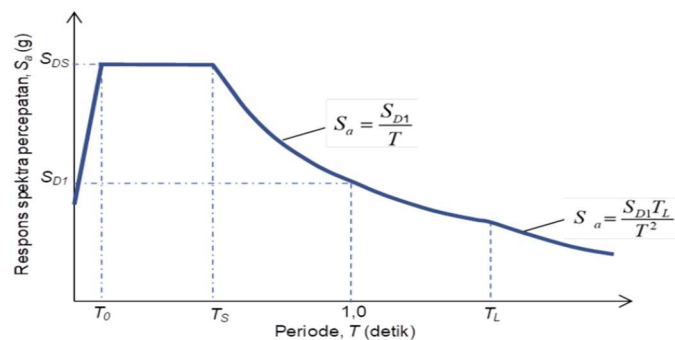
SDS = parameter percepatan spektrum desain periode pendek.

SD1 = parameter percepatan spektrum desain pada periode 1 detik.

T = periode getar fundamental struktur.

T_0 = dihitung sebagai $0,2 \times SD1/SDS$.

T_s = diperoleh dari perbandingan SD1 terhadap SDS.



Gambar 2. 9 Spektrum Respons Percepatan

(Sumber : SNI 1726:2019)

Parameter percepatan spektral desain dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

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

Sementara itu, nilai SMS dan SM1 diperoleh dari hubungan sebagai berikut:

$$SMS = F_a \times S_s \quad (3-5)$$

$$SM1 = F_v \times S1 \quad (3-6)$$

Keterangan:

S_s adalah parameter percepatan spektral respons gempa MCER yang telah dipetakan untuk periode pendek.

S1 merupakan parameter percepatan spektral respons gempa MCER terpetakan pada periode 1,0 detik.

5. Penentuan faktor amplifikasi getaran F_a dan F_v dilakukan berdasarkan nilai percepatan spektral pada periode pendek ($T = 0,2$ detik atau S_s) serta pada periode 1 detik (S_1), dengan mengacu pada ketentuan standar yang berlaku. Berikut merupakan tabel koefisien situs, F_v dan F_a .

Tabel 2. 10 Tabel Koefisien Situs, F_v

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

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

6. Penentuan kategori desain seismik (KDS)

Penetapan Kategori Desain Seismik (KDS) didasarkan pada nilai percepatan spektral desain SDS dan SD1 yang sudah dihitung sebelumnya, dengan turut memperhatikan kategori risiko bangunan. Klasifikasi ini bertujuan untuk menentukan tingkat ketahanan struktur terhadap beban gempa serta menetapkan persyaratan perencanaan yang harus dipenuhi sesuai dengan standar yang berlaku. Berikut merupakan tabel KDS Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek dan Periode 1 Detik.

Tabel 2. 12 KDS Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

Tabel 2. 13 KDS Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

Nilai SD1	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$SD1 < 0,067$	A	A
$0,167 \leq SD1 \leq 0,133$	B	C
$0,33 \leq SDS \leq 0,20$	C	D
$0,20 \leq SDS$	D	D

(Sumber : SNI 1726:2019)

7. Penentuan struktur penahan gaya seismik

Sistem struktur penahan gaya gempa ditetapkan berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu faktor modifikasi respons (R), faktor kuat lebih pada sistem (Ω_0), faktor pembesaran defleksi (Cd), serta batas maksimum tinggi struktur (h_n). Nilai dari masing-masing parameter tersebut ditentukan sesuai dengan jenis sistem penahan gaya seismik yang dipilih, sebagaimana tercantum dalam tabel berikut. Berikut merupakan tabel Faktor Koefisien Modifikasi Respons, Faktor Kuat Lebih Sistem, Faktor Pembesaran Defleksi, dan Batasan Tinggi Sistem Struktur.

Tabel 2. 14 Faktor Koefisien Modifikasi Respons, Faktor Kuat Lebih Sistem, Faktor Pembesaran Defleksi, dan Batasan Tinggi Sistem Struktur

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								
Dinding geser beton bertulang khusus	5	2½	5	TB	TB	48	48	30
Dinding geser beton bertulang biasa	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser beton polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser beton polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser pracetak menengah	4	2½	4	TB	TB	12	12	12
Dinding geser pracetak biasa	3	2½	3	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser bata bertulang khusus	5	2½	3½	TB	TB	48	48	30
Dinding geser bata bertulang menengah	3½	2½	2¼	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser bata bertulang biasa	2	2½	1¾	TB	48	TI	TI	TI
Dinding geser bata polos didetail	2	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser bata polos biasa	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser bata prategang	1½	2½	1¾	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser bata ringan (AAC) bertulang	2	2½	2	TB	10	TI	TI	TI
Dinding geser bata ringan (AAC) polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding rangka ringan kayu berpanel	6½	3	4	TB	TB	20	20	20
Dinding rangka ringan baja canai dingin	6½	3	4	TB	TB	20	20	20

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
Dinding rangka ringan panel geser	2	2½	2	TB	TB	10	TI	TI
Sistem dinding rangka ringan (baja canai dingin) dengan bresing strip datar	4	2	3½	TB	TB	20	20	20
B. Sistem rangka bangunan								
Rangka baja dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
Rangka baja dengan bresing konsentris khusus	6	2	5	TB	TB	48	48	30
Rangka baja dengan bresing konsentris biasa	3¾	2	3¾	TB	TB	10	10	TI
Dinding geser beton bertulang khusus	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
Dinding geser beton bertulang biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser beton polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser beton polos biasa	1½	2½	1½	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser pracetak menengah	5	2½	4½	TB	TB	12	12	12
Dinding geser pracetak biasa	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
Rangka baja beton komposit dengan bresing eksentris	8	2	4	TB	TB	48	48	30
Rangka baja beton komposit dengan bresing konsentris khusus	5	2	4½	TB	TB	48	48	30
Rangka baja beton komposit dengan bresing biasa	3	2	3	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser pelat baja dan beton komposit	6½	2½	5½	TB	TB	48	48	30

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, hn (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
Dinding geser baja dan beton komposit khusus	6	2½	5	TB	TB	48	48	30
Dinding geser baja dan beton komposit biasa	5	2½	4½	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser bata bertulang khusus	5½	2½	4	TB	TB	48	48	30
Dinding geser bata bertulang menengah	4	2½	4	TB	TB	TI	TI	TI
Dinding geser bata bertulang biasa	2	2½	2	TB	48	TI	TI	TI
Dinding geser batu bata polos didetail	2	2½	2	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser batu bata polos biasa	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding geser batu bata prategang	1½	2½	1¼	TB	TI	TI	TI	TI
Dinding rangka ringan (kayu) yang dilapisi panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser	7	2½	4½	TB	TB	22	22	22
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
Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya	2½	2½	2½	TB	TB	10	TB	TB

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, hn (m) ^d				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	8	2½	5	TB	TB	48	48	30
Dinding geser pelat baja khusus	7	2	6	TB	TB	48	48	30
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	3½	3	3½	10	10	10	10	10

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
dengan pembautan								

(Sumber : SNI 1726:2019)

8. Penentuan periode fundamental

Penentuan periode fundamental struktur dilakukan dengan mengacu pada ketentuan dalam SNI 1726:2019. Nilai periode fundamental pendekatan (T_a) diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan yang telah ditetapkan dalam standar tersebut.

$$T_a = C_t h_n^x$$

Keterangan :

 h_n = ketinggian struktur (m)

Berikut merupakan table Parameter Percepatan Respons Sprektal Desain Pada 1 Detik, SD1 dan Tipe Struktur Pada Sistem Rangka Pemikul Momen.

Tabel 2. 15 Parameter Percepatan Respons Sprektal 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. 16 Tipe Struktur Pada Sistem Rangka Pemikul Momen

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

Tipe Struktur	Ct	x
2. 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)

2.2.5 Kombinasi Pembebanan

Dalam perencanaan struktur, kombinasi pembebanan digunakan untuk menggabungkan berbagai jenis beban yang dapat bekerja secara bersamaan, seperti beban mati dan beban hidup, guna memperoleh kondisi paling kritis. Pendekatan ini diperlukan karena struktur pada kenyataannya mengalami beberapa jenis beban secara simultan, sehingga evaluasi respon struktur harus mempertimbangkan efek gabungan tersebut agar hasil desain lebih andal dan aman (Arifin & Husaini, 2025).

1. Kombinasi Dasar (SNI 1727:2020 Pasal 2.3.1)
 - a. 1.4 DL
 - b. 1.2 DL + 1.6LL + 0,5(LR atau R)
 - c. 1.2 DL + 1.6 (Lr atau R) + (LL atau 0.5 W)
 - d. 1.2 DL + 1.0 W + L + 0.5 (Lr atau R)
 - e. 0.9 DL + 1.0 W
2. Kombinasi Akibat Gempa (SNI 1726:2019 Pasal 4.2.3.3)

1) $1.2 DL + E_v + E_h + LL$

Lalu pada persamaan diatas dipecah lagi menjadi :

- a. $1.328D + E_x + t_t + 0.3E_y + 1L$
- b. $1.328D - E_x + t_t + 0.3E_y + 1L$
- c. $1.328D - E_x + t_t - 0.3E_y + 1L$
- d. $1.328D + E_x + t_t - 0.3E_y + 1L$
- e. $1.328D + E_x - t_t + 0.3E_y + 1L$
- f. $1.328D - E_x - t_t + 0.3E_y + 1L$
- g. $1.328D + E_x - t_t - 0.3E_y + 1L$
- h. $1.328D - E_x - t_t - 0.3E_y + 1L$

- i. $1,328D+0,3E_x+E_y+tt+1L$
- j. $1,328D+0,3E_x-E_y+tt+1L$
- k. $1,328D-0,3E_x+E_y+tt+1L$
- l. $1,328D-0,3E_x-E_y+tt+1L$
- m. $1,328D+0,3E_x+E_y-tt+1L$
- n. $1,328D+0,3E_x-E_y-tt+1L$
- o. $1,328D-0,3E_x+E_y-tt+1L$
- p. $1,328D-0,3E_x-E_y-tt+1L$

2) $0.9 DL - E_v + E_h$

Lalu pada persamaan diatas dipecah lagi menjadi :

- a. $0,772D+E_x+tt+0,3E_y$
- b. $0,772D+E_x+tt-0,3E_y$
- c. $0,772D-E_x+tt+0,3E_y$
- d. $0,772D-E_x+tt-0,3E_y$
- e. $0,772D+E_x-tt+0,3E_y$
- f. $0,772D+E_x-tt-0,3E_y$
- g. $0,77D-E_x-tt+0,3E_y$
- h. $0,772D-E_x-tt-0,3E_y$
- i. $0,772D+0,3E_x+E_y+tt$
- j. $0,772D+0,3E_x-E_y+tt$
- k. $0,772D-0,3E_x+E_y+tt$
- l. $0,772D-0,3E_x-E_y+tt$
- m. $0,772D+0,3E_x+E_y-tt$
- n. $0,772D+0,3E_x-E_y-tt$
- o. $0,772D-0,3E_x+E_y-tt$
- p. $0,772D-0,3E_x-E_y-tt$

Keterangan :

- D = Beban mati (*dead load*)
- L = Beban hidup (*live load*)
- Lr = Beban hidup pada atap (*live roof load*)
- R = Beban hujan (*rain load*)

W	= Beban angin (<i>wind load</i>)
E	= Beban gempa (<i>earthquake load</i>)
SDS	= Parameter percepatan desain respons spektrum dalam periode pendek

2.3 Struktur Elemen Gedung

Elemen struktur gedung adalah komponen utama yang membentuk sistem bangunan dan berfungsi untuk menerima serta meneruskan beban sehingga bangunan tetap kokoh dan stabil. Komponen tersebut meliputi pondasi, kolom, balok, dan pelat lantai. Dalam proses perancangan, setiap elemen memiliki fungsi spesifik dalam mendukung kinerja struktur secara menyeluruh, baik untuk menahan beban vertikal maupun beban horizontal seperti angin dan gempa. Oleh karena itu, perencanaan tiap elemen harus mengacu pada ketentuan yang berlaku agar aspek kekuatan, kekakuan, dan kestabilan struktur dapat terpenuhi secara optimal.

2.3.1 Struktur Atas

Struktur atas merupakan bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah dan berfungsi menahan serta menyalurkan beban-beban yang bekerja, baik beban mati maupun beban hidup, ke struktur bawah. Elemen struktur atas umumnya terdiri atas pelat, balok, dan kolom yang direncanakan untuk menjamin kekuatan, kekakuan, dan kestabilan bangunan secara keseluruhan.

1. Kolom

Kolom merupakan elemen struktur vertikal yang berfungsi menopang beban dari elemen struktur di atasnya, seperti balok dan pelat, kemudian menyalurkannya ke struktur bawah. Kolom dirancang agar mampu menahan beban aksial serta gaya tambahan akibat momen dan geser guna menjaga kestabilan dan keamanan bangunan.

a. Menentukan Dimensi Kolom

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

$$b \times h = A_g$$

Keterangan :

A_g = luas penampang bruto kolom

P_u = beban aksial

H = panjang kolom

B = lebar kolom

b. Penulangan Kolom

Perencanaan tulangan kolom dilakukan untuk menjamin bahwa elemen kolom mampu menahan kombinasi beban aksial dan momen yang bekerja, sekaligus memenuhi tuntutan daktilitas struktur. Ketentuan terkait tulangan kolom, baik *Longitudinal* maupun *transversal*, berdasarkan SNI 2847:2019, dengan rincian sebagai berikut:

1) Syarat Geometri dan Gaya

a) Persyaratan Gaya Aksial

$$P_u > 0.1 A_g \times F_c'$$

Keterangan :

P_u = Gaya aksial terfaktor

A_g = Luas penampang bruto beton

F_c' = Kuat tekan beton

b) Persyaratan Sisi Terpendek

$$b \geq 300 \text{ mm}$$

c) Persyaratan Rasio Dimensi Penampang

$$\frac{b}{h} \geq 0.4$$

Keterangan :

b = Sisi pendek kolom

h = Sisi panjang kolom

d) Analisa Gaya Dalam dengan SP Column

Dengan menggunakan perangkat lunak *SP Column*, analisis gaya internal dilakukan untuk menghitung dan menerapkan kapasitas kolom beton bertulang untuk menahan gaya aksial dan momen

lentur. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memastikan bahwa dimensi dan tulangan kolom dapat menahan kombinasi beban yang bekerja pada diagram interaksi aksial-momen (P-M), sehingga struktur dapat ditunjukkan aman dan sesuai dengan standar desain.

- 1) Luas Tulangan *Longitudinal*, A_g

$$\frac{n \times \pi}{4 \times db^2}$$

- 2) Rasio Tulangan, ρ

$$\frac{A_s}{b \times h}$$

- 3) Cek ρ min dan ρ max

$$1\% \leq \rho \leq 6\%$$

- e) Pengecekan Syarat *Strong Column Weak Beam* (SCWB)

Pengecekan persyaratan *Strong Column Weak Beam* (SCWB) dilakukan untuk memastikan agar balok runtuh terlebih dahulu dalam gempa bumi, menjaga kapasitas daya dukung kolom dan melindungi bangunan dari keruntuhan total. Dalam desain struktur tahan gempa, prinsip ini diterapkan. Tahap pengecekan syarat pada SCWB dihitung dengan persamaan berikut.

$$2 \times M_{nc} \geq 1.2 \times (M_n^+ + M_n^-)$$

Keterangan :

M_{nc} = Momen nominal kolom

M_n = Momen nominal balok

- f) Penentuan Zona Sendi Plastis

Penentuan zona sendi plastis pada kolom adalah cara untuk menentukan area di ujung kolom yang rentan terhadap deformasi plastis akibat beban gempa atau momen lentur yang besar. Area-area ini biasanya terletak di dekat sambungan kolom-balok dan dimaksudkan untuk menahan pendinginan tanpa menyebabkan keruntuhan cepat. Zona sendi plastis digunakan untuk desain tulangan yang tepat dan meningkatkan daktilitas struktur tahan gempa. Berikut persamaan yang digunakan.

$$l_o \geq \max\left(\frac{hn}{6}, 450 \text{ mm}\right)$$

Keterangan :

l_o = Panjang zona sendi plastis

hn = Tinggi bersih elemen struktur

2) Desain tulangan *transversal*

Desain tulangan lateral pada kolom adalah proses menentukan bentuk, diameter, jarak, dan jumlah sengkang atau batang tulangan heliks pada kolom beton bertulang untuk menahan gaya geser, mengikat batang tulangan *Longitudinal*, dan menahan inti beton. Tujuan desain ini adalah untuk meningkatkan kekuatan, stabilitas, dan daktilitas kolom, terutama di area sendi plastis dan struktur tahan gempa.

a) Luas Penampang Tulangan *Transversal* (A_{sh})

Luas penampang tulangan lateral mengacu pada total luas penampang batang atau tulangan spiral yang dipasang pada beton bertulang untuk menahan gaya geser dan menahan inti beton. Nilai ini ditentukan oleh diameter dan jumlah tulangan lateral yang digunakan, sesuai dengan aturan desain untuk beton bertulang. Dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$A_{sh} = n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$$

Keterangan :

n = Jumlah kaki sengkang

d_s = Diameter tulangan sengkang

b) Kekangan Zona Tumpuan dan Lapangan

Untuk meningkatkan kekuatan, stabilitas, dan daktilitas elemen struktur, jarak tulangan geser pada zona tumpuan dan bentang digunakan. Pada zona tumpuan, jarak tulangan geser dipasang lebih rapat karena gaya geser dan momen lentur yang lebih besar, sedangkan pada zona bentang dapat ditingkatkan jika diperlukan. Dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$A_{sh} / s \text{ min } l = 0.3 \left(bc \times \frac{f_c'}{f_{yv}} \times \left(\frac{Ag}{A_{ch-1}} \right) \right)$$

$$A_{sh} / s \text{ min } 2 = 0.09 \times bc \times \frac{f_c'}{f_{yv}}$$

$$\text{Cek } A_{sh} / s = \frac{A_{sh}}{s1} \geq \frac{A_{sh}}{s} \text{ min}$$

Keterangan :

bc = Lebar inti beton terkekang

Ag = Luas penampang bruto kolom

A_{ch} = Luas inti beton terkekang

c) Desain Kuat Geser Tumpuan dan Lapangan

Perencanaan kapasitas daya dukung elemen struktur terhadap gaya geser di dalam dan di sekitar penampang tumpuan dikenal sebagai desain penampang tumpuan dan kekuatan geser. Meskipun penampang tumpuan biasanya memiliki gaya geser yang lebih besar, jumlah tulangan geser yang diperlukan disesuaikan dengan gaya geser yang bekerja pada penampang tumpuan untuk memastikan keamanan elemen dan memenuhi persyaratan kekuatan struktural. Dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$V_{u1} = 2 \times \frac{M_{pr} \text{ Kolom}}{L_n}$$

Nilai gaya geser ultimit yang digunakan dalam perencanaan diambil sebagai nilai terbesar antara V_{u1} dan V_{u2} .

$$V_c = 0.17 \left(1 + \left(\frac{N_u}{14 A_g} \right) \right) (f_c)^{0.5} h d$$

$$d = b - c - cc - ds - \frac{db}{2}$$

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

$$A_s/s \text{ Perlu} = \frac{V_s}{(F_{yv} \times d)}; d = b - cc - ds - \frac{db}{2}$$

$$A_s/s \text{ Min} = 0.062 (f_c')^{0.5} \frac{h}{f_{yv}}$$

$$\text{Cek } A_s/s = \frac{A_{sh}}{s} \geq \text{Max} \left(\frac{A_s}{s} \text{ Perlu}, \frac{A_s}{s} \text{ Min} \right)$$

Keterangan :

V_c = Kontribusi tulangan geser terhadap kuat geser

N_u = Gaya aksial terfaktor

V_s = Kontribusi tulangan geser terhadap kuat geser

d_s = Diameter tulangan sengkang

C_c = Selimut bersih

2. Balok

Balok merupakan elemen struktur horizontal yang berfungsi menahan beban pelat lantai atau atap dan meneruskannya pada kolom atau dinding penyangga. Balok dirancang untuk menahan gaya lentur, geser, serta torsi yang bekerja sehingga mampu menjaga kekakuan dan kestabilan struktur bangunan.

a. Menentukan Dimensi Balok

Tabel 2. 17 Syarat tinggi minimum balok non prategang

Kondisi Perletakan	Tinggi Minimum (h)
Perletakan sederhana	$l/16$
Menerus satu sisi	$l/18.5$
Menerus dua sisi	$l/21$
kantilever	$l/8$

(Sumber : SNI 2847:2019)

Mengacu pada ketentuan dalam tabel tersebut, tinggi minimum balok dengan mutu tulangan $f_y = 420$ dapat ditentukan menggunakan hubungan berikut:

$$h_{min} = l/16 \text{ dan } h_{min} = l/8$$

Lebar balok ditetapkan sekurang-kurangnya sebesar 0,5 kali tinggi balok. Ketentuan ini tidak hanya berlaku untuk perencanaan dimensi balok, tetapi juga dapat digunakan dalam menentukan dimensi *Tie Beam*. Pada bangunan yang menerapkan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), perlu dilakukan pengecekan terhadap batasan dimensi elemen struktur sesuai dengan ketentuan dalam Pasal 18.6.2.1 SNI 2847:2019, dengan persyaratan sebagai berikut:

- 1) Bentang bersih balok harus memenuhi ketentuan $L_n \geq 4d$

Keterangan:

$$\text{Bentang bersih balok (} L_n \text{)} = L - \frac{1}{2}c_1 - \frac{1}{2}c_2$$

- Jarak efektif beton (d) = tinggi balok (h) – selimut beton – diameter sengkang – ½ diameter tulangan utama
- 2) Lebar penampang balok ditetapkan minimal sebesar nilai terbesar antara 0,3h dan 250 mm.
 - 3) Proyeksi lebar balok yang melebihi lebar kolom penumpu pada masing-masing sisi tidak boleh melampaui nilai terkecil antara c_2 dan $0,75c_1$.

b. Penulangan Balok

Luas tulangan lentur minimum pada balok ($A_s \text{ min}$) harus memenuhi ketentuan yang diatur dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2, di mana nilainya tidak boleh lebih kecil dari hasil perhitungan berdasarkan persamaan berikut:

$$A_{s_{min}} = \frac{0,25\sqrt{f'c}}{f_y} b_w \times d$$

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

Rasio tulangan (ρ) dibatasi tidak lebih dari 0,025, serta penulangan minimum harus terdiri atas sedikitnya dua batang tulangan pada masing-masing sisi atas dan bawah.

1) Desain Tulangan Lentur Balok

Perhitungan kebutuhan tulangan balok, baik pada daerah tumpuan maupun lapangan, dilakukan menggunakan persamaan berikut:

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

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

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

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

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

Sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 18.6.3.2, luas tulangan minimum pada daerah tumpuan positif tidak boleh kurang dari 0.5 kali luas tulangan pada tumpuan negatif. Selain itu, luas tulangan minimum pada daerah lapangan negatif harus sekurang-kurangnya sebesar 0.25 kali dari luas tulangan pada kondisi momen maksimum di lapangan positif.

- a) Pengecekan Jarak Bersih

$$\text{Jarak bersih} \geq db \text{ dan } 25\text{mm}$$

- b) As Pasang Balok

$$n \times \frac{\pi}{4} \times db^2$$

- c) $A_{Smin 1}$

$$\frac{(F_c')^{0.5}}{(4 \times f_y)} \times b \times d$$

- d) $A_{Smin 2}$

$$\frac{1.4}{(4 \times f_y)} \times b \times d$$

- e) Pengecekan As Min

$$A_s \text{ Pasang} \geq A_{s \text{ min}}$$

- f) Rasio Tulangan, ρ

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d}$$

- g) Rasio Tulangan Maksimum, $\rho \text{ Max}$

$$0.75\rho_b = 0.75 \cdot 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right)$$

- h) Pengecekan As Max

$$\rho \leq \rho_{max}$$

- i) Tinggi Blok Tegangan Beton Ekuivalen, a

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b}$$

- j) Kapasitas Lentur Nominal, M_n

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

k) Lokasi Garis Netral, c

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

l) Regangan Tulangan Tarik, ε_s

$$\varepsilon_s = \frac{(d - c)}{c} \cdot 0.003$$

m) Faktor Reduksi Kekuatan, ϕ

$$0.65 \leq \phi = 0.65 + \left(\frac{\varepsilon_s - 0.002}{0.003} \right) \cdot 0.25 \leq 0.9$$

n) Kapasitas Lentur Tereduksi, ϕM_n

$$\phi M_n$$

o) Pengecekan Kapasitas

$$\phi M_n > M_u$$

p) As Perlu

$$\frac{M_u}{f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)}$$

Keterangan :

As	= luas tulangan tarik
n	= jumlah batang tulangan
db	= diameter tulangan <i>Longitudinal</i>
As min	= luas tulangan minimum
b	= lebar penampang balok
d	= tinggi efektif balok
ρ	= rasio tulangan
ρ_b	= rasio tulangan seimbang
β_1	= faktor blok tegangan beton

2) Desain Tulangan *Transversal* Balok

Untuk menentukan kebutuhan tulangan *transversal* balok dalam menahan gaya geser, digunakan persamaan sebagai berikut. Desain Tulangan Geser Pada Tumpuan dan Lapangan

a) Blok Tegangan Probable Positif, Apr+

$$1,25 a \text{ (tumpuan positif)}$$

b) Blok Tegangan Probable Positif, A_{pr}^-

$$1,25 a \text{ (tumpuan negatif)}$$

c) Momen Probable Positif, M_{pr}^+

$$A_s^+ (1,25 f_y) \left(d - \frac{a_{pr}^+}{2} \right)$$

d) Momen Probable Positif, M_{pr}^-

$$A_s^+ (1,25 f_y) \left(d - \frac{a_{pr}^-}{2} \right)$$

e) Gaya Geser Probable, V_{pr}

$$\frac{M_{pr}^+ + M_{pr}^-}{L_n}$$

f) Gaya Geser Gempa, V_e

$$V_g + V_{pr}$$

g) Tahanan Geser Beton

$$\frac{1}{2} V_e, \text{ jika } V_{pr} \geq 0,5 V_e \text{ dan } P_u < A_g F_c' / 20, \text{ maka } V_c \text{ diperhitungkan}$$

h) Luas Tulangan Geser, A_v

$$n \times \frac{\pi}{4} \times d_s^2$$

i) Spasi Maksimum 1, $S_{max 1}$

$$d/4$$

j) Spasi Maksimum 2, $S_{max 2}$

$$6db$$

k) Kontribusi Tulangan Geser

$$0,66 \sqrt{f_c'} b d$$

l) Rasio Kapasitas Geser

$$\phi V_n / V_u$$

m) Pengecekan Kapasitas

$$\frac{\phi V_n}{V_u} \geq 1 \quad \text{OK}$$

Keterangan :

ap_r^+	= Tinggi blok tegangan beton kondisi probable moment tumpuan positif
ap_r^-	= Tinggi blok tegangan beton kondisi probable moment tumpuan negatif
M_{pr}^+	= Momen probable arah positif
M_{pr}^-	= Momen probable arah negative
V_{pr}	= Gaya geser akibat probable moment
V_e	= Gaya geser gempa total
V_c	= Kontribusi beton terhadap kapasitas geser

3) Desain Tulangan Torsi Balok

a) Geometri dan Penampang Torsi

1) Luas Peampang Luar, A_{cp}

$$b \times h$$

2) Keliling Penampang Luar, P_{cp}

$$2 \times (b + h)$$

3) Lebar Inti Efektif, x_0

$$b - 2c_c - d_s$$

4) Tinggi Inti Efektif, y_0

$$h - 2c_c - d_s$$

5) Luas Inti Efektif, A_{oh}

$$x_0 \cdot y_0$$

6) Luas Efektif Torsi, A_o

$$0.85 A_{oh}$$

7) Keliling Inti Efektif, P_h

$$2(x_0 + y_0)$$

Keterangan :

A_{cp} = Luas peampang luar beton

P_{cp} = keliling luar penampang beton

x_0 = Lebar inti sengkang efektif

y_0 = Tinggi inti sengkang beton

A_{oh} = Luas area inti sengkang efektif

- A_o = Luas area efektif torsi
 Ph = Keliling inti Sengkang efektif
 b = Lebar penampang balok
 h = Tinggi penampang balok
 c = Tebal selimut beton
 ds = Diameter sengkang

b) Cek Kebutuhan Tulangan Torsi

1) Torsi Retak

$$0.33\sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}}$$

2) Desain Gaya Geser

$$\frac{\phi T_{cr}}{4}$$

3) Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

$$T_u > \frac{\phi T_{cr}}{4}$$

Jika memenuhi persamaan ini, maka tulangan torsi perlu diperhitungkan, lanjut pada persamaan dibawah ini,

Keterangan :

T_{cr} = Torsi retak beton

c) Cek Kecukupan Dimensi Penampang

1) Kontribusi Beton Terhadap Geser, V_c

$$0.17\sqrt{f'_c} b d$$

2) Tegangan Ultimate Geser dan Torsi

$$\sqrt{\left\{\left(\frac{V_u}{b d}\right)^2 + \left(\frac{T_u P_h}{1.7 A_{oh}^2}\right)^2\right.}$$

3) Kapasitas Tegangan Beton

$$\phi \times \left(\frac{V_c}{b d}\right)^2 + 0.66\sqrt{f'_c}$$

4) Cek Dimensi Penampang

$$Ruas\ kiri \leq Ruas\ kanan$$

Keterangan :

V_c = Kontribusi beton terhadap kapasitas geser

5) Desain Tulangan *Transversal* Torsi

i. S_{max}

$$Ph/8$$

ii. Pengecekan Spasi Tumpuan

$$S_{tumpuan} \geq s_{max}$$

iii. Pengecekan Spasi Lapangan

$$S_{lapangan} \geq s_{max}$$

iv. Rasio Tulangan Geser dan Torsi Pasang, A_{v+t} / s

$$\frac{n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2}{s}$$

v. Rasio Tulangan Torsi *Transversal*, A_t / s

$$\frac{T_u}{2 \cdot \phi \cdot A_o \cdot f_{yv}}$$

vi. Rasio Tulangan Geser Tumpuan Perlu, A_v / s

$$(V_u \text{ tumpuan} / \phi - V_c) / (f_{yv} \times d)$$

vii. Rasio Tulangan Geser Lapangan Perlu, A_v / s

$$(V_u \text{ lapangan} / \phi - V_c) / (f_{yv} \times d)$$

viii. Rasio Tulangan Geser Torsi Perlu Tumpuan Lapangan, A_{v+t} / s

$$2 \frac{A_t}{s} + \frac{A_v}{s}$$

ix. Rasio Minimum Tulangan Torsi dan Geser, A_{v+t} / s min 1

$$0.062 \sqrt{f'_c} \frac{b}{f_{yv}}$$

x. Rasio Minimum Tulangan Torsi dan Geser, A_{v+t} / s min 2

$$0.35 \frac{b}{f_{yv}}$$

xi. Pengecekan Geser + Torsi Tumpuan dan Lapangan

$$\frac{A_{v+t}}{s_{Pasang}} \geq \frac{A_{v+t}}{s_{Perlu \text{ dan min}}}$$

Keterangan :

S_{max} = Spasi Maksimum Senggang Torsi

d) Desain Tulangan *Longitudinal* Torsi

1) Diameter Minimum Tulangan *Longitudinal* Torsi, $d_b \text{ min}$

$$0.042 s$$

2) Pengecekan Diameter Minimum

$$d_b \geq d_b \text{ min}$$

3) Luas Tulangan *Longitudinal* Torsi, A_1

$$\frac{A_t}{s} P_h$$

4) Luas Minimum Tulangan *Longitudinal* Torsi

$$0.42 \sqrt{f'_c} \frac{A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h \left(\frac{A_t}{s}\right) P_h$$

5) Jumlah Tulangan Vertikal Tumpuan, n

$$2 + \frac{n_{Tengah}}{2}$$

6) Spasi Tumpuan dan Lapangan Horizontal

$$(b - 2c_c - 2d_s - d_b) / [\min(n_{atas}, n_{bawah}) - 1]$$

7) Spasi Tumpuan dan Lapangan Vertikal

$$(h - 2c_c - 2d_s - d_b) / (n_{Vertikal} - 1)$$

8) Pengecekan Spasi Tulangan *Longitudinal* Tumpuan Lapangan

$$\text{spasi} \geq 300 \text{ mm}$$

9) Pengecekan Lentur dan Torsi Tumpuan Lapangan

$$A_{s+Al \text{ Pasang}} \geq A_{s+Al \text{ Perlu}}$$

Keterangan :

$d_b \text{ min}$ = Diameter minimum tulangan *Longitudinal* torsi

A_1 = Luas tulangan *Longitudinal* torsi

$A \text{ min}$ = luas minimum tulangan *Longitudinal* torsi

n = jumlah batang

3. Pelat Lantai

Pelat lantai merupakan elemen struktur datar dengan fungsi menerima dan mendistribusikan beban yang bekerja di atasnya, baik beban mati ataupun

beban hidup, ke elemen struktur pendukung seperti balok dan kolom. Pelat lantai direncanakan agar memiliki kekuatan dan kekakuan yang memadai guna menunjang kenyamanan serta keselamatan penggunaan bangunan

a. Menentukan nilai L_n

Penentuan jenis pelat dilakukan agar mengetahui apakah pelat bekerja sebagai pelat satu arah atau dua arah. Klasifikasi ini didasarkan pada perbandingan bentang panjang terhadap bentang pendek. Jika nilai perbandingan tersebut memenuhi $L_n \leq 2$, maka pelat termasuk dalam kategori pelat dua arah.

Rumus yang digunakan adalah:

$$L_n = L_y / L_x$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

L_n merupakan perbandingan bentang yang dihitung dari jarak bersih antar muka tumpuan. L_y adalah panjang bentang yang lebih besar, sedangkan L_x merupakan bentang dengan ukuran lebih kecil.

b. Menentukan ketebalan pelat

Penetapan tebal pelat lantai dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek utama, seperti panjang bentang, tipe pelat (satu arah atau dua arah), serta persyaratan kekakuan guna membatasi terjadinya lendutan. Acuan yang digunakan dalam menentukan ketebalan tersebut mengacu pada ketentuan dalam SNI 2847:2019. Berikut merupakan tabel Ketebalan Minimum Pelat Solid Satu Arah Nonprategang.

Tabel 4. 1 Ketebalan Minimum Pelat Solid Satu Arah Nonprategang

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)

c. Menentukan batas minimum

Persyaratan mengenai tebal minimum pelat nonprategang yang ditumpu oleh balok pada keempat sisinya ditetapkan berdasarkan ketentuan yang

disajikan dalam tabel berikut, sesuai dengan pedoman dalam SNI 2847:2019. Berikut merupakan tabel Ketebalan Minimum Dua Arah Nonprategang Dengan Balok di antara Tumpuan Pada Semua sisi.

Tabel . Ketebalan Minimum Dua Arah Nonprategang Dengan Balok di antara Tumpuan Pada Semua sisi

a_{fm}	H minimum, mm		
$a_{fm} \leq 0,2$	Pasal 8.3.1.1 SNI 2847:2019 berlaku		(a)
$0,2 \leq a_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari :	$\frac{\ln(0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 5\beta(a_{fm} - 0,2)}$	(b)
		125	(c)
$a_{fm} > 2,0$	Terbesar dari :	$\frac{\ln(0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 9\beta}$	(d)
		90	(e)

(Sumber : SNI 2847:2019)

d. Penulangan Pelat Lantai

Perhitungan penulangan pelat berdasarkan peraturan SNI 2847-2019 yaitu:

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

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

$$\rho_{max} = 0,75 \times \rho_b$$

$$m = \frac{fy}{0,85 \times f'c}$$

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

1) Spasi Maksimum

Standar desain beton bertulang mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk ketebalan pelat, fungsi batang tulangan, pengendalian retak, distribusi beban, dan kekuatan dan kekakuan struktur. Jarak tertinggi antar batang tulangan pada pelat ditetapkan berdasarkan faktor-faktor ini. Keamanan pelat dan pencegahan keretakan dijamin dengan

menjaga jarak antara batang tulangan tidak melebihi batas yang ditentukan. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$2 \times t \leq 450 \text{ mm}$$

2) Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan

Jumlah tulangan negatif pada titik tumpuan ditentukan berdasarkan besarnya momen negatif di area tumpuan, hasil analisis struktur, dimensi penampang, kualitas material, dan standar desain untuk beton bertulang, sehingga tulangan yang dipasang dapat menahan tegangan tarik di bagian atas pelat atau balok dengan aman. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\frac{b}{s} = \frac{1000}{s}, \quad \text{analisa per 1 meter}$$

Keterangan :

b = Lebar peninjauan pelat (1000 mm)

s = Spasi tulangan

3) Jarak Bersih Antara Tulangan

Jarak bersih antar tulangan adalah jarak minimum antara permukaan satu tulangan dengan permukaan tulangan yang berdekatan, yang ditentukan berdasarkan diameter tulangan, ukuran agregat maksimum, dan ketentuan desain untuk beton bertulang, sehingga proses pengecoran, pemadatan beton, dan ikatan antara beton dan tulangan dapat berlangsung dengan benar. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$s - db$$

Cek jarak bersih = Jarak Bersih > db dan 25 mm

4) As Pasang

Luas terpasang adalah luas tulangan minimum yang dipasang pada elemen beton bertulang sebagai tulangan pemisah atau pengikat untuk mengendalikan retak akibat penyusutan dan perubahan suhu serta untuk menjaga stabilitas dan distribusi tulangan utama dalam struktur. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$n \times \frac{\pi}{4} \times db^2$$

Keterangan :

n = Jumlah batang tulangan

db = Diameter tulangan

5) As Minimum

Luas penampang minimum tulangan yang harus dijaga pada komponen beton bertulang sesuai dengan peraturan desain agar struktur tidak mengalami kegagalan getas, tahan terhadap retak, dan tetap memiliki daya dukung beban dan daktilitas yang memadai.

Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$0.2\% \times b \times t$$

6) Kontrol As Tulangan

Kontrol sumbu tulangan adalah proses pengecekan luas penampang tulangan yang digunakan pada elemen beton bertulang untuk memastikan bahwa nilai tulangan yang terpasang memenuhi persyaratan sumbu minimum, tidak melebihi sumbu maksimum, dan dapat menahan gaya internal yang bekerja sesuai dengan peraturan desain statis. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$As \text{ Pasang} > As \text{ Minimum}$$

7) Tinggi blok Beton, a

Nilai tinggi blok beton (a)(a)(a) menggambarkan kedalaman zona tekan ekuivalen pada penampang beton bertulang. Besarnya dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\frac{As \times Fy}{0.85 \times Fc' \times b}$$

Keterangan :

As = Luas tulangan tarik

Fy = Tegangan leleh baja tulangan

fc' = Kuat tekan beton

b = Lebar penampang

8) Kapasitas Lentur, M_n

Kekuatan lentur (M_n) adalah kapasitas nominal penampang komponen untuk menahan momen lentur yang dihasilkan dari beban yang diterapkan. Nilai ini digunakan untuk menilai kekuatan komponen terhadap tegangan lentur dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$A_s \times F_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Keterangan :

A_s = Luas tulangan tarik

d = Tinggi efektif penampang

a = Tinggi blok tegangan beton ekuivalen

9) Titik Garis Netral, c

Posisi sumbu netral (c) menunjukkan jarak serat beton terkompresi terluar ke sumbu netral pada penampang. Nilai ini digunakan untuk menganalisis distribusi regangan dan keseimbangan gaya pada beton bertulang dan dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{a}{\beta_1}$$

Keterangan :

a = Tinggi blok tegangan beton ekuivalen

β_1 = Faktor blok tegangan beton

10) Regangan Penulangan Tarik, ϵ_s

Regangan tarik (ϵ_s) menggambarkan besarnya deformasi tulangan akibat pengaruh gaya tarik yang diterapkan. Nilai ini digunakan untuk menilai perilaku tulangan pada penampang beton bertulang dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{d - c}{c \times 0,003}$$

Keterangan :

d = Tinggi efektif penampang

c = Jarak garis netral dari serat tekan terluar

11) Faktor Reduksi, ϕ

Faktor reduksi (ϕ) adalah nilai yang diterapkan pada kapasitas daya dukung nominal suatu struktur selama perancangan untuk memperhitungkan ketidakpastian material, pelaksanaan konstruksi, dan pengaruh pembebanan. Nilai ini dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{0.65 \leq 0.65 + (\epsilon_s - 0.002)}{0.003 \times 0.25} \leq 0.9$$

12) Kapasitas Lentur Tereduksi, ϕM_n

Kapasitas lentur tereduksi diperoleh dengan mengalikan kapasitas lentur nominal dengan faktor reduksi (ϕM_n) untuk menentukan kapasitas desain. Nilai ini berfungsi untuk memverifikasi keamanan komponen struktural terhadap momen lentur maksimum dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\phi \times M_n$$

13) Momen Ultimate, M_u

Momen lentur maksimum adalah momen terbesar yang bekerja pada elemen struktur akibat beban gabungan. Nilai ini berfungsi sebagai acuan untuk menilai kapasitas lentur suatu struktur dan dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$\textit{Absolute (} Mu \textit{)}$$

14) Pengecekan Kapasitas

Uji kapasitas daya dukung beban dilakukan dengan cara membandingkan kapasitas daya dukung beban desain suatu komponen dengan gaya internal yang dihasilkan oleh beban. Suatu komponen dianggap aman jika kapasitas daya dukung bebannya melebihi beban pengaman parsial yang diterapkan. Kapasitas daya dukung beban dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$\phi M_n \geq M_u$$

4. Tangga

Tangga merupakan elemen bangunan yang berfungsi sebagai sarana penghubung antar lantai. Penentuan dimensi tangga dilakukan setelah tata letak ruang tangga direncanakan. Tahap awal dalam perencanaan tangga adalah menetapkan jumlah anak tangga berdasarkan tinggi antar lantai. Perhitungan ini bertujuan untuk menghasilkan dimensi tangga yang memenuhi aspek kenyamanan, keselamatan, serta proporsi geometris yang sesuai oleh ketentuan dalam SNI 1727:2020. Beberapa persyaratan yang harus diperhatikan dalam perencanaan tangga antara lain sebagai berikut.

a. Menentukan Dimensi Tangga

- a) Lebar bordes minimal sama dengan lebar tangga.
- b) Tinggi anak tangga (*optrade*) = 150 – 200 mm
- c) Lebar anak tangga (*aantrade*) = 280 – 300 mm

Syarat, *optrade* dan *aantrade*

$$590 \text{ mm} \leq 2 \times \textit{optrade} + \textit{aantrade} \leq 650 \text{ mm}$$

- d) Tebal pelat tangga

$$h_{min} = \frac{L}{27}$$

- e) Jumlah anak tangga

$$n = \frac{H}{\textit{Optrade}}$$

- f) Panjang tangga

$$L_{tg} = (0,5n - 1) A$$

- g) Tebal anak tangga

$$h_{anak \text{ tangga}} = \frac{\textit{Optrede}}{2}$$

- h) Panjang bordes

$$L_b = L - L_{tg}$$

Keterangan :

- L = bentang denah tangga
 n = jumlah anak tangga
 H = tinggi antar lantai
 O = *optrade*

- A = *antrade*
 L_{tg} = panjang tangga
 L_b = panjang tangga

b. Penulangan Tangga

Perencanaan tulangan pada pelat tangga dan pelat bordes dilakukan dengan menggunakan pendekatan yang sama seperti pada perencanaan pelat lantai. Sementara itu, perhitungan tulangan pada balok bordes mengacu pada metode perencanaan penulangan balok.

2.3.2 Struktur Bawah

Struktur bawah merupakan bagian bangunan yang berfungsi meneruskan seluruh beban dari struktur atas ke tanah pendukung secara aman. Elemen ini meliputi sistem pondasi dan komponen pendukung lainnya yang berperan dalam menjaga stabilitas bangunan serta memastikan beban dapat disalurkan ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai. Berikut beberapa elemen struktur bawah:

1. Pondasi dan *Pile Cap*

Pondasi merupakan bagian struktur paling bawah yang berperan dalam menyalurkan seluruh beban dari elemen di atasnya ke tanah dasar. Perencanaan pondasi dilakukan agar mampu memikul beban bangunan sekaligus menjaga kestabilan dan keamanan struktur dengan memanfaatkan daya dukung tanah secara efektif (Das & Sobhan, 2021).

a. Menghitung kuat izin tiang berdasarkan parameter awal

Penentuan kuat izin tiang dapat dilakukan dengan mengevaluasi kapasitas bahan penyusunnya, seperti beton atau baja, terhadap beban yang bekerja. Nilai kapasitas tersebut selanjutnya dibagi dengan faktor keamanan sehingga diperoleh nilai kuat izin yang aman untuk digunakan dalam perencanaan. Daya dukung pondasi dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$P \text{ tiang} = \sigma \text{ bahan} \times A \text{ tiang}$$

Keterangan:

P tiang	= Kuat izin <i>bored pile</i> (k_g)
σ	= Tegangan izin bahan tiang ($\frac{kg}{cm^2}$)
σ baja	= $0,35 - 0,5 \times f_y$
σ beton	= $0,25 - 0,33 \times f'_c$
A tiang	= Luas penampang <i>bored pile</i> (cm^2)

b. Menghitung kuat izin tiang berdasarkan parameter tanah

Kuat izin tiang dapat ditentukan dengan menggunakan parameter tanah, seperti nilai SPT dan jenis tanah, untuk menghitung daya dukung tiang. Nilai daya dukung tersebut kemudian dikoreksi dengan faktor keamanan sehingga diperoleh kuat izin yang aman untuk digunakan dalam perencanaan struktur.

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

Keterangan:

Q_p tiang	= Daya dukung ujung tiang (ton)
A_p tiang	= Luas penampang ujung <i>bored pile</i> (ft^2)
N_p	= Nilai rata-rata N-SPT di sekitar ujung <i>bored pile</i>

c. Menghitung tahanan selimut

Tahanan selimut merupakan kontribusi daya dukung tiang yang berasal dari interaksi gesekan antara permukaan tiang dan tanah di sekitarnya. Perhitungannya dilakukan dengan menentukan tegangan gesek tanah berdasarkan parameter tanah, kemudian dikalikan dengan luas permukaan tiang sepanjang kedalaman. Nilai totalnya diperoleh dari penjumlahan gaya gesek pada seluruh panjang tiang. Berikut persamaannya untuk menghitung tahanan selimut.

$$Q_s \text{ tiang} = \frac{A_s \text{ tiang} \times \bar{N} \text{ koefisien}}{50}$$

Keterangan:

Q_s tiang	= Daya dukung friksi tiang (ton)
A_s tiang	= Luas selimut tiang (ft^2)
\bar{N}	= Nilai N-SPT rata-rata di sepanjang tiang

d. Menghitung daya dukung maksimum dan izin tiang

Perhitungan daya dukung maksimum tiang dilakukan dengan menjumlahkan kontribusi tahanan ujung dan tahanan selimut. Nilai tersebut kemudian dikoreksi menggunakan faktor keamanan untuk memperoleh daya dukung izin. Dengan cara ini, nilai yang digunakan dalam perencanaan telah berada dalam batas aman terhadap beban yang bekerja.

$$Q_{ultimate} = Q_p \text{ tiang} + Q_s \text{ tiang}$$

Daya dukung izin (Q_{izin}) merupakan nilai daya dukung tanah yang telah dikoreksi dengan faktor keamanan sehingga aman digunakan dalam perencanaan. Nilai ini diperoleh dari daya dukung ultimit (Q_{ult}) yang kemudian dibagi dengan faktor keamanan. Dengan demikian, daya dukung izin mencerminkan kemampuan tanah dalam menahan beban tanpa menimbulkan keruntuhan.

$$Q_{allowable} = \frac{Q_{ultimate}}{Safety\ Factor}$$

Daya dukung bersih bored pile diperoleh dengan mengurangi berat tiang dari daya dukung izin.

$$Q_{neto} = Q_{allowable} - \text{berat sendiri tiang}$$

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

Keterangan:

A = Luas penampang tiang (cm^2)

L = Kedalaman tiang (cm)

W = Massa jenis material tiang ($\frac{kg}{cm^3}$)

e. Menghitung kebutuhan tiang pondasi

Jumlah bored pile ditentukan dengan membandingkan total beban yang bekerja dengan kapasitas izin tiap tiang. Hasil perhitungan tersebut kemudian dibulatkan ke atas agar memenuhi syarat keamanan dalam perencanaan.

$$n \text{ tiang} = \frac{P_{max}}{Q_{netto}}$$

f. Menghitung efisiensi kelompok tiang

Efisiensi kelompok tiang ditentukan dengan membandingkan kapasitas daya dukung kelompok tiang terhadap jumlah kapasitas tiang tunggal. Nilai ini digunakan untuk mengetahui pengaruh interaksi antar tiang dalam kelompok, sehingga dapat dipastikan kapasitas kelompok tetap efektif dalam menahan beban.

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

$$\theta = \arctan \frac{D}{S}$$

$$s = 2,5 D = 4D$$

Keterangan:

- m = Jumlah baris tiang
- n = Jumlah tiang dalam satu baris
- s = Jarak antar tiang dari pusat ke pusat tiang
- d = Diameter tiang

g. Menghitung daya dukung kelompok tiang

Efisiensi kelompok tiang ditentukan dengan membandingkan kapasitas daya dukung kelompok tiang terhadap jumlah kapasitas tiang tunggal. Nilai ini digunakan untuk mengetahui pengaruh interaksi antar tiang dalam kelompok, sehingga dapat dipastikan kapasitas kelompok tetap efektif dalam menahan beban.

$$Q_{tk} = E_g \times n \text{ tiang} \times Q \text{ neto}$$

$$Q_{tk} > \text{Gaya aksial bangunan (P)}$$

h. Desain dan geometri *pile cap*

- Syarat 1. Jarak antar tiang (s) = $2,5D \approx 4D$
- Syarat 2. Jarak tiang menuju tepi pile cap (s') = $1,5D \approx 2D$
- Syarat 3. Dimensi pile cap = s x Banyak Baris
Spasi + 2 x s'
- Syarat 4. Tebal efektif pile cap = Tebal Rencana –
Selimut Beton
- Syarat 5. Selimut beton pile cap = 75 mm

i. Menghitung gaya geser satu arah pada *pile cap*

Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 13.4.2.2 dan Pasal 13.4.2.5, adanya gaya tekan pada bored pile menyebabkan momen dan gaya geser terfaktor harus ditentukan berdasarkan reaksi yang diterima oleh setiap tiang.

$$V_u = \sigma \times \text{Lebar Pile Cap} \times G'$$

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$G' = L - \left(\frac{\text{Lebar Pile Cap}}{s} + \frac{\text{Lebar Kolom}}{2} + d \right)$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser pile cap (kN)

σ = Tegangan tekan nominal beton serat terjauh (MP_a)

A = Luas penampang pile cap (m^2)

P = Gaya tekan pada kolom (kN)

G' = Daerah pembebanan hitung untuk geser penulangan satu arah

Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 13.4.2.3, gaya geser pada pile cap harus berada di bawah kapasitas kuat geser beton agar tetap memenuhi persyaratan.

$$\phi V_c > V_u$$

$$\phi V_c = 0,75 \times \frac{f'_c}{6} \times \text{Lebar Pile Cap} \times d$$

j. Menghitung gaya geser dua arah pada *pile cap*

Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 22.6.5.2, selain geser satu arah, geser dua arah pada *pile cap* juga perlu diperhitungkan. Besarnya dipengaruhi oleh keliling kritis di sekitar daerah yang menahan gaya geser. Persamaan berikut digunakan untuk menentukan gaya geser dua arah pada *pile cap* berdasarkan keliling kritis tersebut.

Tabel 2. 18 Persamaan untuk gaya geser *pile cap* dua arah

V_c	
Nilai minimum dari ketiga persamaan berikut.	$0,333\lambda \times \sqrt{f'_c}$
	$0,17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \times \sqrt{f'_c}$
	$0,083 \times \left(2 + \frac{as \times d}{bo}\right) \times \lambda \sqrt{f'_c}$

(Sumber SNI 2847-2019)

Keterangan:

λ = Koefisien jenis beton pondasi

β = Rasio panjang dan lebar kolom pondasi

A_s = Koefisien posisi kolom (kolom interior = 40, kolom tepi = 30, kolom sudut = 20)

b_o = Daerah keliling kritis pile cap ($b_o = 4 \times B'$)

B' = Panjang daerah kritis pile cap ($B' = b \text{ kolom} + \frac{d}{2} \times 2$)

Gaya geser pile cap diambil dari nilai terkecil hasil perhitungan, lalu dikalikan faktor reduksi 0,75 (ϕV_c) dan harus lebih besar dari (V_u).

k. Menghitung tegangan geser tanah (V_u)

Tegangan geser tanah ditentukan dari parameter kuat geser tanah, seperti kohesi dan sudut geser dalam. Nilai tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan tanah dalam menahan gaya geser yang bekerja.

$$V_u = \sigma \times (L^2 - B'^2)$$

$$\phi V_c > V_u$$

l. Desain penulangan lentur *pile cap*

Tahapan berikut menunjukkan proses perencanaan penulangan lentur pile cap yang dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019.

1) Penentuan daerah pasang tulangan *pile cap* (B)

$$B = \frac{\text{Lebar Pile Cap}}{2} - \frac{\text{Lebar Kolom}}{2}$$

2) Menghitung berat *pile cap*

$$q = \text{Berat Jenis Material Pondasi} \times \text{Lebar Pile Cap} \times \text{Tebal Pile Cap}$$

3) Menghitung momen ultimate *pile cap*

$$M_u = 2 \times \left(\frac{P_{\text{max}}}{n \text{ tiang}} \times s \right) - \frac{1}{2} \times q \times B^2$$

4) Menghitung nilai ketahanan (R_n) *pile cap* dan koefisien ρ perlu

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \times b \times d^2}$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85 \times f'_c}{f_y} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85 \times f'_c}} \right)$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho_{\text{perlu}} \times b \times d$$

$$A_{s \text{ min}} = 0,0018 \times b \times \text{Tebal Pile Cap}$$

$$A_s \text{ pasang} > A_s \text{ perlu dan } A_s \text{ min}$$

m. Menghitung kelelahan tarik baja

Kelelahan tarik baja ditentukan berdasarkan tegangan leleh (F_y) sebagai batas saat baja mulai mengalami deformasi plastis akibat gaya tarik. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam perencanaan tulangan untuk memastikan baja bekerja sesuai kapasitasnya.

$$\sum H = 0, C_c = T_s$$

$$0,85 \times f'_c \times a \times b = A_s \times f_y; a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} \quad c = \frac{\alpha}{\beta}$$

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{c} \times \epsilon_c; \epsilon_c = 0,003$$

$$\epsilon_s' = \frac{f_y}{E_{sbaja}}$$

$$\epsilon_s > \epsilon_s' \text{ (Baja Telah Mengalami Leleh)}$$

n. Menghitung nilai momen nominal *pile cap* (M_n)

Untuk menghitung nilai momen nominal *pile cap* dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini.

$$M_n = 0,85 \times f'_c \times c \times a \times b \times \left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$M_u = \phi M_n, \text{ di mana } \phi = 0,9$$

$$M_u > M_n$$

o. Desain penulangan *bored pile*

Tahapan untuk desain penulangan *bored pile* dapat adalah sebagai berikut.

1) Penentuan rasio penulangan *Longitudinal* tiang

$$p = \frac{A_s \text{ tulangan}}{A_g \text{ penampang tiang}}$$

$$p \geq 0,50\%$$

2) Desain tulangan *transversal* tiang

$$A_v \text{ tumpuan} = 2 \times \frac{A_v \text{ tulangan transversal}}{\text{Jarak Tulangan Rencana}}$$

3) Menghitung kuat geser pada tiang

$$A_c = 0,17 \times \left(1 + \frac{N_u}{14 \times A_g}\right) \times \sqrt{f'_c} \times \text{Diam.} \times d$$

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

$$A_s/s \text{ perlu} = \frac{V_s}{f_{yv} \times d}$$

$$A_s/s \geq A_s/s \text{ perlu}$$

- 4) Menentukan panjang daerah plastis tiang (*Confinement*)

Mengacu SNI 2847:2019 Tabel 18.13.7.5.1, panjang sendi plastis bored pile ditentukan, dengan tulangan *transversal* lebih rapat pada zona tersebut.

$$i_o = 7 \times D; D = \text{diameter tiang}$$

- 5) Penentuan nilai *confinement* daerah sendi plastis

Persamaan berikut digunakan untuk menentukan nilai kekangan pada daerah sendi plastis bored pile sesuai SNI 2847:2019 Tabel 18.13.7.5.

$$\rho_{\text{terpasang}} = \frac{4 \times A_v}{s \times d}$$

$$\rho_{\text{min}} = 0,12 \times \frac{f'_c}{f_{yv}}$$

$$\rho_{\text{terpasang}} \geq \rho_{\text{min}}$$

Keterangan:

A_v = Luas penampang tulangan *transversal* daerah tumpuan

S = Jarak tulangan *transversal*

D = Tebal efektif *pile cap*

- 6) Menentukan diameter minimal tulangan *transversal bored pile*

Ketentuan berikut menunjukkan batas maksimum jarak tulangan *transversal* pada daerah sendi plastis yang ditentukan berdasarkan diameter tiang dan tebal selimut beton.

$$R_b = \frac{\text{Diam.Tiang}}{2} - \text{Selimut Beton} - \phi \text{Transversal} - \frac{\phi \text{Longitudinal}}{2}$$

$$\theta = \frac{360}{n}; n = \text{Banyak Tulangan Rencana}$$

$$h_x = 2 \times R_b \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$s_{\text{max}1} = D/4$$

$$s_{\text{max}2} = 6 \times d_b$$

$$s_{\text{max}3} = 100 + \left(350 - \frac{h_x}{3}\right)$$

$$s_{pakai} \leq s_{max} 1,2,3$$

- 7) Menentukan spasi tulangan *transversal* daerah luar *confinement*
 Persamaan berikut digunakan untuk menentukan jarak tulangan *transversal* pada bored pile di luar zona sendi plastis.

$$s_{max}1 = D/2$$

$$s_{max}2 = 12 \times d_b$$

$$s_{max}3 = 100 \text{ mm}$$

$$s_{pakai} \leq s_{max} 1,2,3$$

2. Tie Beam

Tie Beam adalah elemen beton bertulang yang menghubungkan antar pondasi atau *pile cap* pada bangunan. Elemen ini berfungsi meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur bawah, mengurangi perbedaan penurunan pondasi, serta membantu mendistribusikan gaya vertikal dan horizontal secara lebih merata.

- a. Desain geometri *Tie Beam*

Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 18.13.6.2, lebar minimum *Tie Beam* (b) ditetapkan sebagai nilai terkecil dari persamaan berikut ini.

$$b \geq \frac{L_n}{20} \text{ atau } b \geq 450 \text{ mm}$$

Keterangan:

L_n = Panjang bentang *Tie Beam* (mm)

- b. Desain distribusi tegangan beton

Distribusi tegangan beton diasumsikan mengikuti blok tegangan tekan dengan kedalaman ditentukan oleh faktor (β_1), untuk memenuhi keseimbangan gaya dan momen. Mengacu SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.3, nilai nya ditentukan dari tabel berikut. Berikut merupakan table Nilai distribusi tegangan beton (β_1)

Tabel 2. 19 Nilai distribusi tegangan beton (β_1)

f'_c	β_1
$17 \leq f'_c \leq 28$	0,85
$28 \leq f'_c \leq 55$	$0,85 - \frac{0,05 \times (f'_c - 28)}{7}$

$f'_c \geq 55$	0,65
----------------	------

(Sumber SNI 2847-2019)

c. Perhitungan gaya aksial *Tie Beam*

Penentuan gaya aksial pada *Tie Beam* (P_u) didasarkan pada SNI 1726:2019 Pasal 7.13.6.2, yang mengharuskan elemen pengikat fondasi memiliki kapasitas tarik atau tekan minimum sebesar 10% dari gaya aksial kolom akibat beban gravitasi (P_g) dengan mempertimbangkan parameter percepatan spektral periode pendek (S_{DS}) atau dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P_u = 10\% \times S_{DS} \times P_g$$

Nilai gaya aksial kolom akibat beban gravitasi (P_g) dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$P_g = 1,2DL + 1,6LL$$

Keterangan:

DL = *Dead Load* atau beban mati strukturLL = *Live Load* atau beban hidup struktur

d. Perhitungan gaya dalam pengaruh beban gravitasi

Gaya dalam yang berasal dari beban gravitasi perlu diperhitungkan untuk menentukan gaya dalam maksimum (ultimit) yang digunakan sebagai dasar perencanaan penulangan *Tie Beam*.

$$M_{u \text{ tumpuan}} = - \frac{Q_u \times L_n^2}{12}$$

$$M_{u \text{ lapangan}} = \frac{Q_u \times L_n^2}{24}$$

$$V_{u \text{ tumpuan}} = \frac{Q_u \times L_n}{2}$$

$$V_{u \text{ lapangan}} = \frac{Q_u \times L_n}{4}$$

Keterangan:

 Q_u = Beban merata maksimum *Tie Beam* ($Q_u = 1.4 \times (Q_{DL} + Q_{SDL})$) Q_D = Berat sendiri *Tie Beam* ($Q_D = \text{Berat jenis beton} \times h \times b$) Q_{SDL} = Berat dinding pada *Tie Beam* ($Q_{SDL} = \text{Berat jenis dinding} \times h \text{ lantai}$)

e. Desain tulangan *Longitudinal Tie Beam*

Dalam perancangan *Tie Beam*, tulangan *Longitudinal* ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019, yang disajikan melalui berbagai persyaratan dan rumus sebagai acuan perhitungan.

1) Penentuan jarak bersih antar tulangan (x)

$$x = \frac{b - 2d_s - 2d - n \times d_b}{n - 1}$$

Keterangan:

d_s = Diameter tulangan *transversal*

d = Tinggi efektif *Tie Beam* ($d = h - \text{selimut beton} - d_s \times d_b / 2$)

n = Jumlah tulangan *Longitudinal*

d_b = Diameter tulangan *Longitudinal*

2) Jarak bersih tulangan (y)

Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1, jarak bersih antar tulangan harus memenuhi nilai minimum, yaitu tidak boleh kurang dari diameter tulangan *Longitudinal* atau 25 mm, dengan menggunakan nilai yang lebih besar.

$$x \geq \text{nilai maksimum antara } d_b \text{ atau } 25 \text{ mm}$$

3) Menghitung kebutuhan tulangan *Tie Beam*

Pada *Tie Beam*, luas tulangan (A_s) harus tidak kurang dari nilai minimum sesuai SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2.

$$A_{s \text{ min } 1} = \frac{\sqrt{f'_c}}{4 \times f_y} \times b \times d$$

$$A_{s \text{ min } 2} = \frac{1,4}{4 \times f_y} \times b \times d$$

4) Penentuan tinggi blok tegangan tekan ekuivalen pada *Tie Beam*

Penentuan tinggi blok tegangan persegi ekuivalen pada *Tie Beam* dilakukan untuk memperoleh kedalaman daerah tekan beton sebagai dasar dalam analisis kapasitas penampang.

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

- 5) Penentuan jarak antara serat tekan terjauh dengan sumbu netral (c)
Setelah tinggi blok tegangan persegi ekuivalen pada *Tie Beam* ditetapkan, jarak antara serat tekan terluar dan sumbu netral beton dapat ditentukan melalui persamaan berikut.

$$c = \frac{\alpha}{\beta_1}$$

- 6) Penentuan nilai regangan beton (ϵ_s)
Mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.1, regangan tekan maksimum beton pada kondisi ultimit ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$c = \frac{d-c}{c} \times 0,003$$

- 7) Penentuan momen *ultimit* dan momen nominal *Tie Beam*
Nilai momen nominal *Tie Beam* (M_n) dikalikan dengan faktor reduksi (ϕ) sesuai SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2 untuk memperoleh ϕM_n , sedangkan momen ultimit (M_u) merupakan hasil kombinasi momen akibat beban gravitasi.
- 8) Pengecekan kapasitas gaya dalam
Pada desain tulangan *Tie Beam*, momen nominal tereduksi (ϕM_n) harus lebih besar dari momen ultimit (M_u) yang bekerja. Jika syarat ini tidak terpenuhi, perlu dilakukan penyesuaian berupa penambahan dimensi penampang atau jumlah tulangan.

f. Desain tulangan *transversal Tie Beam*

Dalam desain *Tie Beam*, penulangan *transversal* ditentukan dengan mengacu pada ketentuan SNI 2847:2019 yang dijabarkan melalui persyaratan dan rumus berikut.

- 1) Penentuan gaya geser *ultimit Tie Beam* pengaruh faktor reduksi (ϕ)
Penentuan gaya geser ultimit pada *Tie Beam* dilakukan dengan mempertimbangkan faktor reduksi kekuatan ($\phi = 0,75$), sehingga nilai gaya geser yang dievaluasi dinyatakan sebagai V_u/ϕ . Penerapan faktor

ini bertujuan untuk memastikan kapasitas struktur tetap aman, terutama pada kondisi pembebanan kritis.

2) Desain penulangan *transversal Tie Beam*

Agar elemen mampu menahan gaya geser yang bekerja, luas tulangan *transversal* (A_v) harus dirancang sehingga kapasitas geser nominal (ϕV_n) melebihi gaya geser ultimit yang telah dikoreksi (V_u/ϕ). Penentuan nilai A_v dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$A_v = \frac{1}{4} \pi \times d_s^2 \times n; n = \text{Jumlah Kaki}$$

Mengacu pada SNI 2847:2019 Tabel 9.7.6.2.2, jarak antara tulangan (s) harus di desain supaya tidak melewati batas maksimum. Berikut merupakan tabel Jarak maksimum tulangan *transversal Tie Beam*.

Tabel 2. 20 Jarak maksimum tulangan *transversal Tie Beam*

V_s	Jarak Maksimum Tulangan <i>Transversal</i> (mm)		
		Balok Nonprategang	Balok Prategang
$\leq 0,33 \times \sqrt{f_c}$ $\times b_w \times d$	Terkecil dari	$d/2$	$3h/4$
		600	
$> 0,33 \times \sqrt{f_c}$ $\times b_w \times d$	Terkecil dari	$d/4$	$3h/8$
		300	

(Sumber SNI 2847-2019)

Mengacu pada tabel diatas, penulangan *transversal* yang menahan gaya geser dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_s = A_v \times f_{yv} \times \frac{d}{s}$$

Keterangan:

A_v = Luas tulangan *transversal* total (mm^2)

f_{yv} = Tegangan leleh tulangan *transversal* (MPa)

d = Tinggi efektif *Tie Beam* (mm)

s = Jarak tulangan *transversal* rencana (mm)

3) Penentuan gaya geser nominal penulangan *transversal* (V_n)

Kapasitas geser nominal (V_n) diperoleh dari penjumlahan kontribusi beton (V_c) dan tulangan geser (V_s), sehingga dinyatakan sebagai $V_n = V_c + V_s$.

Penentuan nilai (V_c) dapat dihitung melalui persamaan berikut.

$$V_c = 0,17 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

Nilai kontribusi gaya geser oleh tulangan *transversal* (V_s) ditetapkan sebagai nilai minimum dari dua persamaan yang tersedia, yaitu

$$V_s = A_v \times f_{yv} \times \frac{d}{s} \text{ dan } V_s = 0,66 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

4) Pengecekan kapasitas tulangan *transversal*

Pemeriksaan kapasitas tulangan *transversal* dilakukan dengan membandingkan kapasitas geser rencana (ϕV_n) terhadap gaya geser ultimit (V_u). Elemen dinyatakan aman apabila $\phi V_n \geq V_u$, sehingga tulangan geser mampu menahan gaya yang bekerja pada struktur.

2.4 Rencana Anggaran Biaya

Rencana Anggaran Biaya (RAB) adalah dokumen perencanaan yang memuat estimasi keseluruhan biaya yang dibutuhkan dalam pelaksanaan suatu proyek konstruksi. Penyusunan RAB didasarkan pada perhitungan volume setiap item pekerjaan yang dikalikan dengan harga satuan pekerjaan, yang mencakup biaya material, tenaga kerja, peralatan, serta biaya tidak langsung lainnya. RAB digunakan sebagai pedoman dalam perencanaan dan pengendalian biaya proyek, serta sebagai alat evaluasi untuk memastikan pelaksanaan pekerjaan sesuai dengan anggaran yang telah ditetapkan. Berikut ini adalah komponen utama dalam penyusunan rencana anggaran biaya:

2.4.1 Volume Pekerjaan

Volume pekerjaan adalah besaran kuantitas setiap item pekerjaan konstruksi yang dihitung berdasarkan gambar rencana dan spesifikasi teknis yang telah ditentukan. Perhitungan ini mencakup berbagai jenis pekerjaan, seperti pekerjaan tanah,

struktur, hingga finishing, yang dinyatakan dalam satuan panjang, luas, atau volume sesuai dengan karakteristik pekerjaan. Volume pekerjaan menjadi dasar dalam penyusunan rencana anggaran biaya (RAB), perencanaan kebutuhan material, serta pengendalian pelaksanaan proyek di lapangan. Oleh karena itu, perhitungan volume harus dilakukan secara teliti dan sistematis agar tidak terjadi kesalahan yang dapat berdampak pada biaya dan waktu pelaksanaan proyek (Permen PUPR, 2022).

2.4.2 *Quantity Take Off*

Quantity Take Off (QTO) merupakan proses sistematis dalam menghitung dan mengukur seluruh volume pekerjaan konstruksi berdasarkan gambar rencana, spesifikasi teknis, serta dokumen pendukung lainnya. Kegiatan ini mencakup identifikasi setiap item pekerjaan, seperti pekerjaan tanah, beton, tulangan, hingga finishing, kemudian dihitung volumenya secara rinci sesuai satuan yang berlaku. Hasil perhitungan QTO digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rencana anggaran biaya (RAB), perencanaan kebutuhan material dan tenaga kerja, serta sebagai acuan dalam pengendalian biaya selama pelaksanaan proyek. Oleh karena itu, ketelitian dan ketepatan dalam proses QTO sangat penting agar tidak terjadi kesalahan estimasi yang dapat berdampak pada pembengkakan biaya maupun keterlambatan proyek (Chudley & Greeno, 2021).

2.5 Analisa Harga Satuan Pekerjaan

Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) adalah proses perhitungan biaya untuk setiap jenis pekerjaan konstruksi yang disusun berdasarkan kebutuhan sumber daya, seperti material, tenaga kerja, dan peralatan. Analisis ini dilakukan dengan menguraikan setiap komponen pekerjaan secara rinci, kemudian menentukan koefisien kebutuhan serta harga satuan masing-masing komponen. Hasil dari AHSP digunakan sebagai dasar dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) serta sebagai acuan dalam pengendalian biaya selama pelaksanaan proyek. Oleh karena itu, ketepatan dalam penyusunan AHSP sangat penting agar estimasi biaya yang

dihasilkan realistis, efisien, dan sesuai dengan kondisi lapangan (Permen PUPR, 2022)

2.6 Penjadwalan

Penjadwalan proyek adalah proses perencanaan waktu pelaksanaan seluruh kegiatan dalam suatu proyek konstruksi dengan menyusun urutan pekerjaan, durasi, serta hubungan ketergantungan antar aktivitas. Penjadwalan ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap pekerjaan dapat dilaksanakan secara efektif dan efisien sesuai dengan waktu yang telah ditetapkan. Dalam pelaksanaannya, penjadwalan proyek digunakan sebagai pedoman dalam pengendalian waktu, alokasi sumber daya, serta evaluasi kemajuan pekerjaan di lapangan. Oleh karena itu, penyusunan jadwal yang tepat sangat penting untuk menghindari keterlambatan dan memastikan proyek dapat diselesaikan sesuai target yang direncanakan (Permen PUPR, 2022).