



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Building Information Modelling (BIM)

Building Information Modelling (BIM) merupakan sebuah metode berdasarkan pada pemodelan 3D dengan kemampuan *smart technology*. BIM dapat memberikan sebuah pemahaman dan sarana kepada para ahli di bidang konstruksi, seperti arsitektur dan *engineering*. Sehingga dapat merencanakan, mengembangkan, membangun, dan memelihara struktur agar sebuah infrastruktur konstruksi menjadi lebih efektif dan tepat guna (Direktorat Jendral Bina Konstruksi, 2019).

Berbagai tingkatan dalam BIM dapat dijangkau untuk beragam jenis proyek di bidang konstruksi. Tingkatan BIM dimulai dari BIM 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, dan bahkan 7D mewakili kriteria yang berbeda untuk menunjukkan level “kemampuan” tertentu. Tujuannya adalah untuk mengukur seberapa efektif dan seberapa banyak informasi yang dapat diperoleh dan dikelola di keseluruhan proses konstruksi. Tingkatan BIM diklasifikasikan dalam beberapa bagian sesuai fungsinya yaitu:

1. 1D : Membentuk gambaran geometris dari bentuk, ukuran, dan posisi bangunan.
2. 2D : Desain model dalam bentuk gambar atau cetakan digital yang berisi panjang dan lebar menggunakan CAD 2D.
3. 3D : Desain dari model 2D yang divisualisasikan ke dalam bentuk tiga dimensi dan mencakup semua aspek geometris, sehingga terlihat secara keseluruhan. Model 3D berfungsi sebagai koordinasi dan mengidentifikasi risiko benturan (*clash*) layanan di gedung.
4. 4D : Desain 3D yang terintegrasi dengan jadwal pembangunan dalam *planning* dan *tracking* kegiatan proyek.
5. 5D : Hasil dari desain 3D dan 4D diintegrasikan dengan biaya komponen-komponen model. Model 5D biasanya digunakan untuk estimasi biaya kegiatan proyek.

6. 6D : Informasi keberlanjutan dan performa bangunan. Hal ini membantu dalam menganalisis dampak lingkungan dan efisiensi energi bangunan.
7. 7D : Pemeliharaan dan pengoperasian fasilitas bangunan setelah konstruksi selesai. hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan manajemen aset dari proses awal desain hingga pembongkaran.



Gambar 2. 1 Klasifikasi BIM

(Sumber: Lestari et al., dikutip dalam PUPR, 2018)

Dalam sebuah proses kemajuan desain dan pengumpulan informasi dalam infrastruktur, tahap perencanaan konstruksi sudah menggunakan teknologi berbasis BIM. Saat ini sebagian besar perusahaan konstruksi di Indonesia masih menerapkan metode konvensional. Metode konvensional memiliki beberapa kekurangan dan dirasa kurang baik karena tidak efisien dalam biaya, kualitas, waktu. Seperti halnya memerlukan jangka waktu yang lama, pengelolaan mutu yang kurang baik, pengeluaran biaya yang tinggi. Sehingga dengan berbasis BIM dapat merubah konsep tahapan perencanaan dalam meningkatkan desain gambar, pengumpulan informasi yang terperinci serta spesifikasi mampu saling terkait (Rizqy et al., 2021).

Penerapan BIM di dunia konstruksi saat ini merupakan sebuah keharusan bagi pelaku pemegang infrastruktur. Karena BIM dapat memaksimalkan pekerjaan yang terperinci dan saling memiliki hubungan satu sama lain. Pengaplikasian BIM dalam pelaksanaan konstruksi dapat dikatakan memiliki berbagai manfaat, karena meliputi perencanaan, analisis, dan pemeliharaan struktur. Serta dalam

proses pengaplikasiannya BIM dapat mengurangi permasalahan dan ketidakpastian yang terjadi (Widiasanti et al., 2023).

Selain dari penerapan BIM yang menguntungkan bagi beberapa perusahaan konstruksi, terdapat juga perusahaan konstruksi yang masih terkendala dalam pengaplikasian BIM. Kondisi ini disebabkan oleh keperluan investasi yang tinggi, komunikasi internal perusahaan, aksesibilitas keahlian BIM, kebutuhan bimbingan yang berkelanjutan, dan masa peralihan dari metode konvensional menjadi berbasis BIM (Mieslenna & Wibowo, 2019).

2.2. Konsep Bangunan Tahan Gempa

Indonesia terletak di kawasan pertemuan tiga lempeng besar, yaitu Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia. Kawasan ini berpotensi mengalami tabrakan lempeng sewaktu-waktu, sehingga memicu terjadinya gempa bumi. Akibatnya, kawasan ini tergolong rawan terhadap aktivitas seismik. Meskipun waktu terjadinya gempa sulit untuk diprediksi, dampak dari gempa itu sendiri masih dapat diminimalisir melalui berbagai upaya mitigasi, salah satunya dengan menerapkan konsep bangunan tahan gempa (Simanjuntak, 2020).

Dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, analisis terhadap pengaruh gaya lateral akibat beban gempa yang bersifat siklik (*reversibel*) perlu dilakukan. Struktur harus dirancang dengan daktilitas yang memadai, khususnya pada zona kritis seperti sambungan balok-kolom maupun elemen struktur vertikal penahan gaya lateral. Penempatan sendi-sendi plastis pada balok perlu direncanakan untuk membuat struktur mengalami deformasi inelastik, sehingga bangunan tetap berdiri meskipun telah mengalami kerusakan pada struktur. Sendi plastis dirancang agar terbentuk pada elemen balok, khususnya di kedua ujung balok yang berdekatan dengan kolom, serta pada bagian dasar kolom di lantai dasar (Simanjuntak, 2020).

Sebagai upaya meningkatkan standar keamanan bangunan, Badan Standardisasi Nasional (BSN) telah menetapkan SNI 1726:2019 yang mengatur tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan, baik gedung maupun

non-gedung. Standar ini merupakan pembaruan dari SNI 1726:2012. Standar ini dapat menjadi acuan dalam mengevaluasi serta merancang struktur bangunan yang lebih tahan terhadap gempa.

2.3. Software Berbasis Building Information Modelling (BIM)

2.3.1. Structural Analysis Program 2000 (SAP2000)

SAP2000 merupakan *software* yang sangat penting dalam dunia konstruksi. *Software* ini dirancang khusus untuk menganalisa dan membuat model 3D struktur bangunan dengan sangat akurat dan kompleks yang relatif singkat. Penggunaan SAP2000 dalam menganalisa struktur sudah meluas di seluruh dunia. *Software* ini juga menjadi pilihan utama bagi para ahli dan profesional dalam merekayasa struktur. SAP 2000 mampu menganalisa statik dan dinamis, gaya lateral akibat gempa, nonlinear, kegagalan, dan masih banyak lagi. kemampuan ini sangat penting dalam menguji dan merencanakan, memaksimalkan performa, dan mengantisipasi potensi risiko pada struktur bangunan (Sholeh, 2021).

Kegunaan SAP2000 secara umum adalah untuk menghitung mekanika teknik, konstruksi beton bertulang, konstruksi baja, struktur jembatan, struktur kuda-kuda baja, dan struktur tahan gempa berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). SAP2000 memiliki antarmuka grafis yang kuat dalam memvisualisasikan model dan analisis hasil. Hal ini sangat membantu dalam memahami tentang perilaku struktur dengan baik.

SAP2000 juga mendukung format impor dan ekspor sehingga memungkinkan untuk melakukan pertukaran data dengan *software* lain seperti ACAD, Revit, ETABS, dan lainnya. Untuk menjaga kinerjanya tetap optimal, SAP 2000 terus mengalami pengembangan agar dapat menyesuaikan standar desain dan teknologi terbaru oleh perusahaan CSI (*Computers and Structures, Inc*). Dalam mengoperasikan *software* SAP2000 perlu pemahaman, keahlian teknis, dan pengetahuan tentang prinsip-prinsip analisis struktural dan desain dengan baik (Sholeh, 2021).



Gambar 2. 2 SAP2000

(Sumber: *csiamerica.com*)

2.3.2. spColumn

spColumn merupakan software khusus yang dirancang untuk menentukan kapasitas kolom beton bertulang berdasarkan berbagai kombinasi gaya aksial dan momen lentur menggunakan metode diagram interaksi. Software ini merancang kolom sesuai standar ACI 318, Eurocode 2, atau SNI 2847. Jika beban yang diterapkan lebih besar dari kapasitas kolom yang dihitung, maka software ini akan memberikan rekomendasi untuk memperbaiki desain, seperti menambah tulangan atau mengubah dimensi penampang.



Gambar 2. 3 spColumn

(Sumber: *structurepoint.org*)

2.3.3. Autodesk Revit

Autodesk Revit merupakan *software* berbasis BIM dengan *output* berupa rancangan desain dalam bentuk 3D, serta informasi kebutuhan pada proyek dapat

disimulasikan dalam bentuk pemodelan 3D. Karena dalam pengaplikasiannya terdapat perbandingan panjang, lebar, dan tinggi, sehingga software ini sangat sesuai dalam menghasilkan dan merencanakan desain tiga dimensi (Saputra et al., 2022). Pemodelan 3D pada Autodesk Revit berupa karakteristik gedung, jenis bahan pada bangunan, karakteristik objek, dan hubungan elemen konstruksi. Ketika merencanakan suatu pemodelan pada Autodesk Revit dapat dilakukan sekaligus analisis dan control pada semua tahap desain, sehingga hal ini tentu lebih efisien dari menggunakan metode konvensional (Safri & Hapsari, 2022).⁹ Menurut Jaya (2024), kategori Family dalam Revit dibagi menjadi tiga golongan:

1. *Sistem Family*, merupakan komponen dasar yang menggambarkan suatu konstruksi gedung. Sistem family ini sudah tersedia langsung dalam *Autodesk Revit*.
2. *Loadable Family*, merupakan komponen untuk melengkapi bangunan seperti pintu jendela, perabotan, tanaman, dan lainnya.
3. *In-Place Family*, merupakan komponen khusus karena hanya digunakan pada bangunan tertentu.



Gambar 2. 4 Autodesk Revit
(Sumber: Autodesk.com)

2.3.4. Microsoft Project

Microsoft Project digunakan untuk mengelola perencanaan pekerjaan dan waktu kegiatan selama proses pelaksanaan proyek konstruksi berlangsung. *Software* ini mampu mengevaluasi dan memonitoring suatu proyek yang sedang berjalan sesuai dengan tahapannya. *Software* ini dapat meningkatkan produktivitas yang

terintegrasi dengan beberapa program sejenis Microsoft Office dalam membuat laporan dan pengendalian perencanaan secara fleksibel.

Secara umum, Microsoft Project mampu membuat *Critical Path* (jalur kritis) berdasarkan prioritas dalam bentuk *Gantt Chart*; mengelola penjadwalan, durasi, dan hubungan antar aktivitas; menentukan titik-titik tertentu dalam lini masa proyek (*milestone*); menentukan *constraint* dari sebuah proyek; melakukan *tracking* pada penjadwalan proyek; dan menentukan target proyek. *Output* dari *software* ini adalah berupa tampilan tabel, grafik representasi grafis dari jadwal suatu proyek (*Gantt Chart*), kemajuan dan optimasi proyek, dan hasil kolaborasi dengan *software office* lainnya (Maulana et al., 2023).



Gambar 2. 5 Microsoft Project
(Sumber: appsource.microsoft.com)

2.3.5. Autodesk Navisworks

Autodesk Navisworks merupakan software yang digunakan untuk mendukung perencanaan sebuah *plant*, *routing* pipa, desain *Mechanical*, *Electrical*, *Plumbing* (MEP), serta seluruh elemen yang terdapat dalam proyek. Autodesk Navisworks dapat memberikan manfaat dalam meninjau *architecture*, *engineering*, dan kontraktor secara merata dengan data-data yang telah terhubung oleh para pemangku pemegang proyek konstruksi (Maulana et al., 2023). Pada tahap pengerjaan Autodesk Navisworks, dalam pembuatan desain dibuat menjadi per bagian dari analisis dan sistem data. selain itu elemen lain yang terdapat pada Naviswork berupa deteksi adanya kesalahan (*clash detection*), penjadwalan, animator, buku kerja kuantifikasi (Prayoga, 2023). Beberapa manfaat dari pengaplikasian Autodesk Navisworks:

1. Visualisasi, mampu mengatasi adanya *clash detection* yang mungkin terjadi selama proses konstruksi, dengan mengkombinasikan pemodelan 3D dan penjadwalan pada tahap konstruksi untuk mendapatkan pemodelan 4D. Hal tersebut dan bermanfaat untuk mencari tahu kelemahan bangunan dengan dibandingkan menggunakan *timeline*, sehingga mampu mendapatkan solusi dari persoalan tersebut.
2. Analisis, Autodesk Naviswork memiliki program yang menyediakan agar desain saling terhubung pada konstruksi proyek. Selain itu dapat menghasilkan anggaran biaya dengan nominal yang rendah, dan dapat mempermudah penyuntingan dengan desain yang dibutuhkan.
3. Simulasi, keuntungan 4D BIM simulasi dapat meningkatkan dan mempermudah dalam mengartikan interpretasi proyek. Sehingga dapat memudahkan manajer dan kontraktor pada proyek untuk mengontrol pelaksanaan proyek.



Gambar 2. 6 Autodesk Naviswork

(Sumber: *bhinneka.com*)

2.4. Pembebanan Pada Portal

2.4.1. Beban Mati

Beban mati merupakan semua bagian berat dari komponen bangunan yang bersifat permanen, termasuk semua dari komponen tambahan yang merupakan bagian dari bangunan itu sendiri dan tak terpisahkan (*building equipment*). Menurut SNI 1720:2020 beban mati merujuk pada seluruh komponen arsitektural dan struktural seperti material konstruksi berupa lantai, tangga, dinding, plafon, atap, dinding

sekat tetap, finishing, *cladding* gedung. Berat sendiri bahan bangunan dan komponen gedung dicantumkan pada tabel berikut, sesuai dengan PPIUG 1983.

Tabel 2. 1 Berat Bahan Bangunan

Bahan Bangunan	Berat (kg/m³)
Baja	7850
Batu Alam	2500
Batu Belah, Batu bulat, Batu Gunung (berat tumpuk)	1500
Batu Karang	700
Batu Pecah	1450
Besi Tuang	7250
Beton	2200
Beton Bertulang	2400
Kayu (Kelas I)	1000
Kerikil Koral (kering udara sampai lembab, tanpa diayak)	1650
Pasangan Bata Merah	1700
Pasangan Batu Belah, Batu Bulat, Batu Gunung	2200
Pasangan Batu Cetak	2200
Pasangan Batu Karang	1450
Pasir (kering tanpa udara sampai lembab)	1600
Pasir (jenuh air)	1800
Pasir Kerikil Koral (kerikil udara sampai lembab)	1850
Tanah, Lempung dan Lanau (kering udara sampai lembab)	1700
Tanah, Lempung dan Lanau (basah)	2000
Tanah Hitam (timbel)	11400

(Sumber: PPIUG 1983)

Tabel 2. 2 Berat Komponen Gedung

Komponen Gedung	Berat (kg/m²)
Adukan per cm tebal:	
Semen	21
Kapur, semen merah atau tras	17
Aspal, termasuk bahan-bahan mineral penambah, per cm tebal	14
Dinding pasangan bata merah:	
Satu batu	450
Setengah batu	250
Dinding pasangan batako	
Berlubang:	
Tebal dinding 20 cm	200
Tebal dinding 10 cm	120
Tanpa lubang:	

Komponen Gedung	Berat (kg/m ²)
Tebal dinding 15 cm	300
Tebal dinding 10 cm	200
Langit-langit dan dinding (termasuk rusuk-rusuknya, tanpa penggantung langit-langit atau pengaku) terdiri dari: Semen asbes (eternity dari bahan sejenisnya), dengan tebal maksimum 4 mm	11
Kaca, dengan tebal 3-4 mm	10
Lantai kayu sederhana dengan balok kayu, tanpa langit-langit dengan bentang maksimum 5 m dan untuk beban hidup maksimum 200 kg/m ²	40
Penggantung langit-langit (dari kayu), dengan bentang maksimum 5 m dan jarak sks minimum 0,80 m	7
Penutup atap genting dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	50
Penutup lantai atap sirap dengan reng dan usuk/kaso per m ² bidang atap	40
Penutup atap seng gelombang (BWG 24) tanpa gordeng	10
Penutup lantai dan ubin semen portland, teraso dan beton, tanpa adukan, per cm tebal	24
Asbes gelombang (tebal 5 mm)	11

(Sumber: PPIUG 1983)

2.4.2. Beban Hidup

Berdasarkan SNI 1727:2020, beban hidup merupakan beban yang timbul akibat aktivitas penghuni atau pengguna suatu bangunan, tidak termasuk dalam kategori beban lingkungan seperti gempa, hujan, angin, banjir, maupun beban mati. Beban konstruksi tidak dikategorikan sebagai beban hidup. Beban hidup berasal dari barang-barang, mesin, serta peralatan yang sifatnya berpindah, diganti, atau tetap berada di dalam bangunan sepanjang masa penggunaannya. Oleh karena itu, beban jenis ini dapat mempengaruhi beban pada lantai dan atap (Nugroho et al., 2020).

Menurut PPIUG (1983), perencanaan beban hidup pada lantai bangunan harus disesuaikan dengan fungsi dari ruang suatu gedung. Beban akibat dinding pemisah tidak boleh melebihi 100 kg/m². Selain itu, beban tambahan dari berat benda seperti lemari arsip, peralatan laboratorium, mesin, serta barang lainnya harus diperhitungkan secara khusus dalam suatu perencanaan struktur.

Tabel 2. 3 Beban Hidup Pada Lantai Gedung

	Kegunaan Bangunan	Berat (kg/m²)
(1)	Lantai dan tangga rumah tinggal, kecuali yang termasuk kategori (2)	200
(2)	Lantai dan tangga rumah tinggal sederhana dan gudang-gudang tidak penting yang bukan untuk toko, pabrik, atau bengkel	125
(3)	Lantai sekolah, ruang kuliah, kantor, toko, toserba, restoran, hotel, asrama, dan rumah sakit	250
(4)	Lantai ruang olahraga	400
(5)	Lantai ruang dansa	500
(6)	Lantai dan balkon dalam dari ruang-ruang untuk pertemuan yang lain, kecuali yang termasuk dalam kategori (1) sampai dengan (5) seperti masjid, gereja, ruang pagelaran, ruang rapat, bioskop, dan panggung penonton dengan tempat duduk tetap	400
(7)	Panggung penonton dengan tempat duduk tidak tetap atau untuk penonton yang berdiri	500
(8)	Tangga, bordes tangga, dan gang dari yang termasuk dalam kategori (3)	300
(9)	Tangga, bordes tangga, dan gang dari yang termasuk dalam kategori (4), (5), (6), dan (7)	500
(10)	Lantai dan ruang pelengkap dari yang termasuk dalam kategori (3), (4), (5), (6), dan (7)	250
(11)	Lantai untuk pabrik, bengkel, Gudang, perpustakaan, ruang arsip, toko buku, toko besi, ruang alat-alat dan ruang mesin, harus direncanakan terhadap beban hidup yang ditentukan tersendiri, dengan minimum	400
(12)	Lantai gedung parkir bertingkat: Untuk lantai bawah Untuk lantai tingkat lainnya	800 400
(13)	Balkon-balkon yang menjorok bebas keluar harus direncanakan terhadap beban hidup dari lantai ruang yang berbatasan, dengan minimum	300

(Sumber: PPIUG, 1983)

Dalam merancang suatu bangunan maupun struktur lainnya, beban hidup yang digunakan harus mempertimbangkan beban maksimum yang terjadi akibat aktivitas penggunaan bangunan ruang. Beban hidup yang ditetapkan tidak boleh lebih rendah dari beban merata minimum sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1727:2020.

2.4.3. Beban Angin

Menurut SNI 1727:2020, beban angin merupakan beban lateral akibat tekanan dan hisapan angin yang dihitung dengan mempertimbangkan kecepatan angin lokal, tinggi bangunan, kondisi topografi, dan kategori penggunaan bangunan. Dalam menentukan beban angin, terdapat beberapa parameter diantaranya:

2.4.3.1. Kategori Risiko Bangunan Gedung

Bangunan dan struktur lainnya harus diklasifikasikan berdasarkan tingkat risiko terhadap keselamatan jiwa, kesehatan, dan kesejahteraan yang mungkin timbul akibat kerusakan atau kegagalan struktur. Klasifikasi disesuaikan dengan fungsi dan jenis penggunaan bangunan sesuai dalam tabel berikut.

Tabel 2. 4 Kategori risiko bangunan dan struktur lainnya untuk beban banjir, angin, salju, gempa*, dan es

Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Risiko
Bangunan gedung dan struktur lain yang merupakan risiko rendah untuk kehidupan manusia dalam kejadian kegagalan struktur	I
Semua bangunan gedung dan struktur lain kecuali kategori risiko I, III, dan IV	II
Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan dapat menimbulkan risiko besar bagi kehidupan manusia. Bangunan gedung dan struktur lain, tidak termasuk dalam kategori risiko IV, dengan potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi substansial dan/atau gangguan massa dari hari ke hari kehidupan sipil pada saat terjadi kegagalan. Bangunan gedung dan struktur lain tidak termasuk dalam kategori risiko IV (termasuk,, namun tidak terbatas, pada fasilitas manufaktur, proses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuat zat-zat seperti bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan peledak) yang mengandung zat beracun atau mudah meledak. Dimana kuantitas material melebihi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup untuk menimbulkan suatu ancaman kepada publik jika dirilis^(a)	III
Bangunan gedung dan struktur lain yang dianggap sebagai fasilitas penting.	IV

Penggunaan atau Pemanfaatan Fungsi Bangunan Gedung dan Struktur	Kategori Risiko
Bangunan gedung dan struktur lain, kegagalan yang dapat menimbulkan bahaya besar bagi masyarakat. Bangunan gedung dan struktur lain (termasuk, namun tidak terbatas pada, fasilitas yang memproduksi, memproses, menangani, menyimpan, menggunakan, atau membuang zat-zat berbahaya seperti bahan bakar, bahan kimia berbahaya, atau limbah berbahaya) yang berisi jumlah ambang batas yang ditetapkan oleh pihak yang berwenang dan cukup menimbulkan ancaman bagi masyarakat jika dirilis^(a) Bangunan gedung dan struktur lain yang diperlukan untuk mempertahankan fungsi dari kategori risiko IV struktur lainnya.	
^(a)Bangunan gedung dan struktur lain yang mengandung racun, zat yang sangat beracun, atau bahan peledak harus memenuhi syarat untuk klasifikasi terhadap kategori risiko lebih rendah jika memuaskan pihak yang berwenang dengan suatu penilaian bahaya seperti dijelaskan dalam pasal 1.5.3 bahwa pelepasan zat sepadan dengan risiko yang terkait dengan kategori risiko.	

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 1.5.1)

2.4.3.2. Kecepatan Angin Dasar (V)

Menurut SNI 1727:2020 pasal 26.5.1, kecepatan angin dasar (V) merujuk pada data dalam Buku Peta Angin Indonesia, kecuali untuk wilayah angin khusus dan perkiraan kecepatan angin dasar dari data iklim regional. Penentuan kecepatan ini berlaku untuk bangunan kategori risiko I hingga IV. Arah angin diperkirakan datang dari segala arah horizontal. Jika terdapat data atau pengalaman di lapangan yang menunjukkan kecepatan angin lebih tinggi dari data yang tercantum dalam Buku Peta Angin Indonesia, maka kecepatan angin dasar yang digunakan harus disesuaikan atau diperbesar untuk menjamin keamanan struktur.

2.4.3.3. Faktor arah angin (K_d)

Faktor arah angin (K_d) harus ditentukan sesuai ketentuan SNI 1726:2020, sebagai berikut.

Tabel 2. 5 Faktor Arah Angin (K_d)

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin (K_d)
Bangunan gedung	
Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU)	0,85
Komponen dan Klading (K&K)	0,85
Atap lengkung	0,85
Kubah berbentuk bundar	1,0 ^a
Cerobong, tangka, 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
^(a) Faktor arah angin (K_d) = 0,95 diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan dengan system struktur non asimetris.	

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 26.5.3)

2.4.3.4. Eksposur

Berdasarkan SNI 1727:2020 dalam pasal 26.7, kondisi eksposur terhadap arah datangnya angin ditentukan sesuai tingkat kekasaran permukaan tanah dan eksposur. Kekasaran ini dipengaruhi oleh kondisi topografi alami, jenis vegetasi, serta keberadaan bangunan atau fasilitas di sekitarnya.

Tabel 2. 6 Kategori Kekasaran Permukaan Tanah

Kekasaran Permukaan	Deskripsi
B	Daerah perkotaan dan pinggiran kota, daerah berhutan, atau daerah lain dengan penghalang berjarak dekat seukuran tempat tinggal keluarga tunggal atau lebih besar dalam jumlah banyak.

Kekasaran Permukaan	Deskripsi
C	Dataran terbuka dengan penghalang tersebar yang memiliki tinggi umumnya < 30 ft (9,1 m). Kategori ini mencakup daerah terbuka datar dan padang rumput.
D	Permukaan datar, area tanpa halangan dan permukaan air. Kategori ini termasuk hamparan lumpur halus.

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 26.7.2)

Tabel 2. 7 Kategori Eksposur Tanah

Eksposur	Deskripsi
B	Berlaku jika permukaan tanah sesuai dengan kekasaran permukaan B. Untuk bangunan dengan tinggi atap rata-rata $\leq 30\text{ft}$ (9,1 m), berlaku jika jarak ke penghalang lebih dari 1.500ft (457 m). Untuk bangunan dengan dengan tinggi $> 30\text{ft}$ (9,1 m), berlaku jika jarak ke penghalang lebih dari 2.600ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan (pilih paling besar).
C	Berlaku dalam semua kondisi di mana eksposur B atau D tidak dapat diterapkan.
D	Berlaku jika permukaan tanah sesuai dengan kekasaran permukaan D. Diterapkan jika jarak ke penghalang lebih dari 5.000ft (1.524 m) atau 20 kali tinggi bangunan (pilih yang lebih besar). Berlaku jika bangunan berada dekat dengan daerah eksposur B atau C tetapi dalam jarak 600ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan (pilih yang lebih besar).

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 26.7.3)

2.4.3.5. Faktor topografi

Perhitungan faktor topografi beban angin harus mempertimbangkan efek peningkatan kecepatan angin menggunakan faktor K_{zt} yang dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

Dimana:

K_1 = ditentukan dari tabel 2. 8

$$K_2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu \times L_h}\right)$$

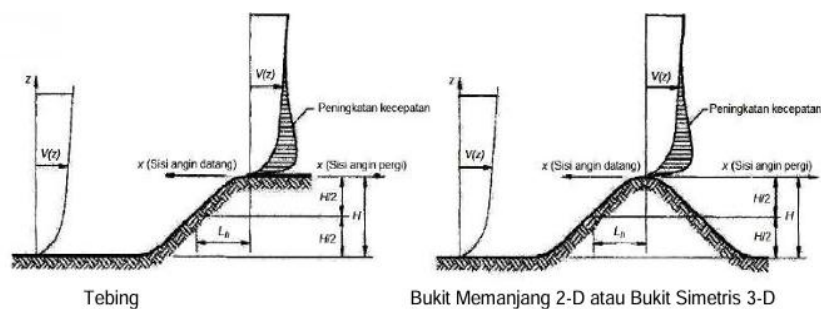
$$K_3 = e^{-\frac{\gamma z}{L_h}}$$

Parameter K_1 , K_2 , K_3 diatur dalam SNI 1727:2020 pada gambar 26.8-1. $K_{zt} = 1$ apabila syarat-syarat pada gambar 26.8-1 tidak terpenuhi.

Syarat,

$$H/L_h \geq 0,2$$

$H \geq 15$ ft (4,5 m) untuk eksposur C dan D; 60 ft (18 m) untuk eksposur B



(Sumber: SNI 1727:2020 Gambar 26.8.1)

2.4.3.6. Faktor elevasi permukaan tanah

Untuk memperhitungkan pengaruh ketinggian lokasi terhadap densitas udara, digunakan faktor elevasi permukaan tanah (K_e). Nilai dari faktor ini ditentukan melalui tabel dengan ketentuan berikut.

Tabel 2. 8 Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)

Elevasi Tanah Di Atas Permukaan Laut (Sea Level)		Faktor Elevasi Permukaan Tanah (K_e)
ft	m	
< 0	< 0	(2)
0	0	1,00
1000	305	0,96
2000	610	0,93
3000	914	0,90
4000	1219	0,86
5000	1524	0,83
6000	1829	0,80
> 6000	> 1829	(2)

(1) $K_e = 1,00$ boleh digunakan dalam semua kasus sebagai perkiraan konservatif
 (2) Untuk semua elevasi factor K_e harus ditentukan dengan interpolasi dari tabel di atas atau dari persamaan berikut:
 $K_e = e^{-0,000362z_g}$ (z_g = elevasi tanah di atas permukaan laut dalam satuan ft)

$K_e = e^{-0,000119z_g} \text{ (} z_g = \text{elevasi tanah di atas permukaan laut dalam satuan m)}$
--

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 26.9)

2.4.3.7. Tekanan kecepatan

a) Menentukan koefisien eksposur

Ketika memperhitungkan tekanan kecepatan angin pada struktur gedung, perlu menggunakan nilai K_z dan K_h , sesuai dengan kategori eksposur yang telah ditentukan. Dalam memperhitungkan beban angin diperbolehkan menggunakan nilai rata-rata koefisien K_z dan K_h untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, apabila suatu lokasi tidak secara jelas termasuk kedalam suatu eksposur dan berada di perbatasan dua kategori, yang diatur dalam tabel SNI 1720:2020 pasal 26.10-1.

Dalam menentukan nilai K_z , dapat diperhitungkan sebagai berikut:

- Pada ketinggian $15\text{ ft (46 m)} \leq Z \leq Z_g$

$$K_z = 2,01 (Z/Z_g)^{2/\alpha}$$

- Untuk $Z < 15\text{ ft (4,6 m)}$

$$K_z = 2,01 (15/Z_g)^{2/\alpha}$$

Dimana:

- α dan Z_g sesuai dengan SNI 1727:2020 pasal 26.11.1
- Untuk mendapatkan nilai tengah dari ketinggian Z , diperbolehkan menggunakan interpolasi linier.
- Kategori eksposur sesuai dengan SNI 1727:2020 pasal 26.7

b) Menentukan Tekanan Velositas

Berdasarkan pasal 26.10.2 tekanan akibat kecepatan angin pada suatu titik dengan ketinggian Z diatas permukaan tanah dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

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

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

Dimana:

K_z = Koefisien eksposur

K_{zt} = Faktor topografi

K_d = Faktor arah angin

K_e = Faktor elevasi permukaan tanah

V = Kecepatan angin dasar

q_z = Tekanan kecepatan pada ketinggian Z

2.4.3.8. Faktor pengaruh hambusan angin

Faktor efek hambusan angin pada bangunan gedung dan struktur lain yang bersifat kaku dapat diasumsikan 0,85 sesuai peraturan SNI 1727:2020 dalam pasal 26.11.1.

2.4.3.9. Klasifikasi ketertutupan

Menurut SNI 1727:2020 pasal 26.12, dalam menentukan koefisien tekanan internal, setiap bangunan harus dikategorikan sebagai bangunan terbuka, terbuka sebagian, tertutup sebagian, atau tertutup.

2.4.3.10. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Penentuan koefisien tekanan internal (GC_{pi}) pada suatu bangunan gedung berdasarkan pada klasifikasi ketertutupan yang tercantum di dalam SNI 1727:2020 pasal 26.13.1.

Tabel 2. 9 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Bangunan tertutup	A_0 kurang dari terkecil $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	Sedang	- 0,18 - 0,18
Bangunan tertutup sebagian	$A_0 > 1,1A_{oi}$ dan $A_0 >$ terkecil $0,01A_g$ atau 4 ft^2 ($0,37 \text{ m}^2$) dan $A_{oi}/A_{gi} \leq 0,2$	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

Klasifikasi Ketertutupan	Kriteria untuk Klasifikasi Ketertutupan	Tekanan Internal	Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})
Bangunan terbuka	Setiap dinding minimal terbuka 80%	Diabaikan	- 0,00
(1) Tanda plus dan minus menandakan tekanan yang bekerja ke arah dan menjauh dari permukaan dalam, masing-masing. (2) Nilai (GC_{pi}) harus digunakan dengan q_z atau q_h seperti disyaratkan. (3) Dua kasus harus diperhitungkan untuk menentukan persyaratan beban kritis untuk kondisi yang sesuai: a. Nilai positif (GC_{pi}) diterapkan pada semua permukaan dalam, atau b. Nilai negatif (GC_{pi}) diterapkan pada semua permukaan dalam Pengecualian Metode pengujian lainnya dan/atau kinerja diizinkan digunakan apabila disetujui.			

(Sumber: SNI 1727:2020 Pasal 26.13.1)

2.4.4. Beban Gempa

Beban gempa adalah gaya lateral pada struktur bangunan yang diakibatkan oleh aktivitas gempa, dan dihitung berdasarkan analisis dinamik. Faktor yang menentukan beban gempa yaitu, perhitungan analisis pembebanan pada struktur yang telah dilampaui dalam kurun waktu tertentu, kelenturan dan kekuatan struktur bangunan (Primadana & Anwar, 2021). Probabilitas terlampaunya umur struktur pada gempa rencana untuk struktur gedung sebesar 2% dalam kurun waktu 50 tahun, dan pada penentuan dampak pada rencana kegempaan yang ditinjau untuk struktur gedung dan non gedung, serta segala komponen struktur secara umum untuk tata cara ini diatur oleh SNI 1726:2019. Berikut penjelasan terkait aspek dalam menghitung beban gempa.

2.4.4.1. Kategori Risiko struktur tahan gempa

Berdasarkan jenis pemanfaatannya, struktur gedung dan non-gedung akan diklasifikasikan berdasarkan tingkat risiko bangunan terhadap bahaya gempa. Hal ini, akan dikategorikan mulai dari resiko paling minim yang membahayakan jiwa manusia saat terjadi kegagalan struktur, hingga resiko paling tinggi pada bangunan dengan sarana krusial yang apabila terjadi kegagalan struktur akan berdampak

paling besar pada perekonomian masyarakat. Hal tersebut sesuai dengan standar dan peraturan SNI 1726:2019.

Tabel 2. 10 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non-Gedung

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan non-gedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk, antara lain: - Fasilitas pertanian, perkebunan, perternakan, 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, tetapi tidak dibatasi untuk: - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ rumah susun - Pusat perbelanjaan/ mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik	II
Gedung dan non-gedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia saat terjadi kegagalan, termasuk tetapi tidak dibatasi untuk: - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo Gedung dan non-gedung, tidak termasuk ke dalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan Masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk: - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air	III

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
- Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi Gedung dan non-gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak Dimana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang diisyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.	
Gedung dan non-gedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk: - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah ibadah - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - 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, tangka air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat Gedung dan non-gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.	IV

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 4.1.2)

2.4.4.2. Faktor Keutamaan Gempa

Menurut ketentuan SNI 1726:2019, Faktor keutamaan gempa I_e perlu dikalikan dengan beban gempa rencana. Memiliki korelasi antar kategori dari risiko rendah

ke kategori risiko tinggi terhadap nilai faktor keutamaan gempa I_e . Sehingga, bangunan yang memiliki kategori risiko tinggi memiliki ketahanan yang cukup baik.

Tabel 2. 11 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber: SNI 1726:2019 pasal 4.1)

2.4.4.3. Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs digunakan dalam penentuan parameter desain seismik untuk suatu bangunan. Tujuannya untuk mengetahui tingkat amplifikasi percepatan gempa dari batuan dasar menuju permukaan tanah. Apabila data tanah tidak tersedia hingga kedalaman 30 meter, maka karakteristik tanah harus diperkirakan oleh tenaga ahli geoteknik yang telah tersertifikasi. Ahli geoteknik bertanggung jawab dalam menyusun laporan hasil penyelidikan berdasarkan kondisi geoteknik di lokasi pembangunan (SNI 1726:2019).

Situs tanah dikategorikan sebagai kelas SE jika data tanah yang tersedia tidak cukup untuk menentukan kelas situs, kecuali data geoteknik atau keputusan dari pihak berwenang menunjukkan bahwa situs termasuk ke dalam kelas lain. Selain itu, jika terdapat lapisan tanah lebih dari 3 meter antara dasar pondasi (baik telapak ataupun rakit) dan permukaan batuan dasar, maka situs tanah tidak tergolong ke dalam kelas SA dan SB.

Tabel 2. 12 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/s)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 - 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 - 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 - 350	15 - 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50

Kelas Situs	$\bar{V}_s$ (m/s)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
	Atau setiap profil tanah lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: 1. Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersementasi lemah 2. Lempung sangat organic dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

(Sumber: SNI 1726:2019 pasal 5.3)

2.4.4.4. Koefisien Situs dan Parameter Respon Spektral Percepatan Gempa Sesuai Risiko-Tertarget (MCE_R)

Perkuatan gelombang gempa dalam waktu 0,2 dan 1 detik merupakan suatu aspek yang penting dalam menentukan spektrum percepatan seismik. Gelombang pada percepatan seismik digolongkan menjadi dua yaitu pada periode pendek (F_a) dan dalam waktu 1 detik (F_v). Untuk ketentuan spektrum respon pada periode pendek (S_{MS}) dan periode 1 detik (S_{M1}), Disesuaikan berdasarkan klasifikasi situs, dengan perumusan sebagai berikut (SNI 1726:2019):

$$S_{MS} = F_a \times S_s$$

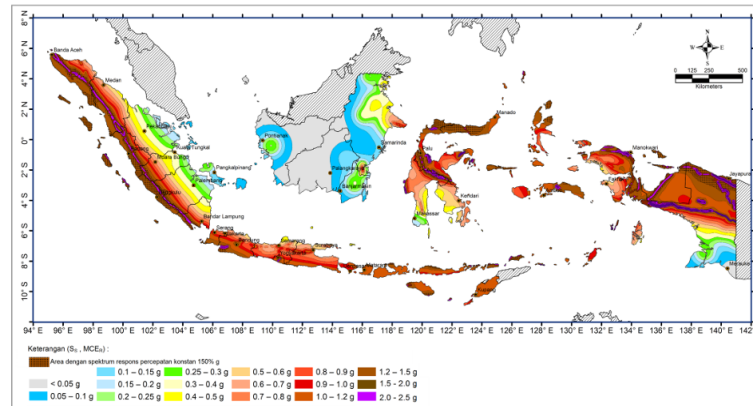
$$S_{M1} = F_s \times S_1$$

Keterangan:

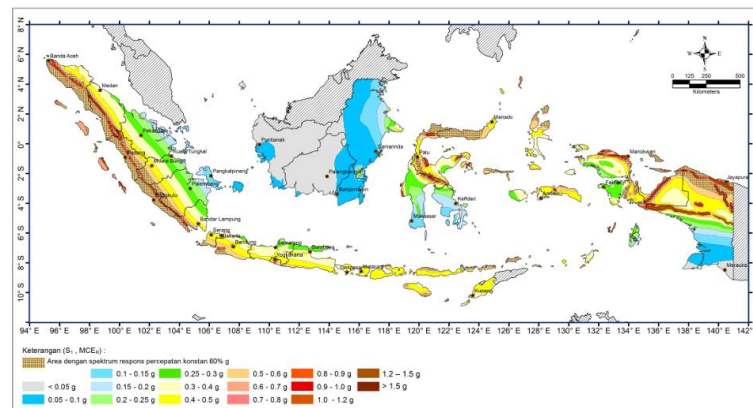
S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R untuk periode pendek

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

Nilai spektrum respon seismik percepatan gempa pada periode pendek (S_s) dan periode 1,0 (S_1) detik dapat ditemukan pada gambar tata letak wilayah.



Gambar 2. 7 Peta Respons Spektrum Periode Pendek (S_s)
(Sumber: SNI 1726:2019)



Gambar 2. 8 Peta Respon Spektrum Periode 1,0 Detik (S_1)
(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2. 13 Koefisien Situs, F_a

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

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s
SF	SS = Situs yang membutuhkan investigasi yang spesifik pada geoteknik dan analisis respons situs

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 6.2)

Tabel 2. 14 Koefisien Situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spectral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS = Situs yang membutuhkan investigasi yang spesifik pada geoteknik dan analisis respons situs					

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 6.2)

2.4.4.5. Parameter Percepatan Spektral Desain

Untuk menentukan percepatan gelombang seismik pada periode pendek S_{DS} dan untuk periode 1 detik S_{D1} , ditentukan berdasarkan rumus berikut:

$$S_{DS} = 2/3 \times S_{MS}$$

$$S_{D1} = 2/3 \times S_{M1}$$

Keterangan:

S_{DS} = Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek

S_{D1} = Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik

2.4.4.6. Spektrum Respons Desain

Spektrum respons desain merupakan metode analisis yang diuraikan dalam bentuk kurva. Metode analisis ini menggambarkan hubungan antara periode getar (T) pada sumbu x dan percepatan maksimum (S_a) pada sumbu y (Farlianti, 2021).

Berdasarkan SNI 1726:2019 pasal 6.4, nilai S_a dihitung menggunakan persamaan berikut.

1) Apabila $T < T_0$, maka:

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

2) Apabila $T_0 \leq T \leq T_s$, maka:

$$S_a = S_{DS}$$

3) Apabila $T_s < T \leq T_L$, maka:

$$S_a = S_{D1} / T$$

4) Apabila $T \geq T_L$, maka:

$$S_a = S_{D1} \times \frac{T_L}{T^2}$$

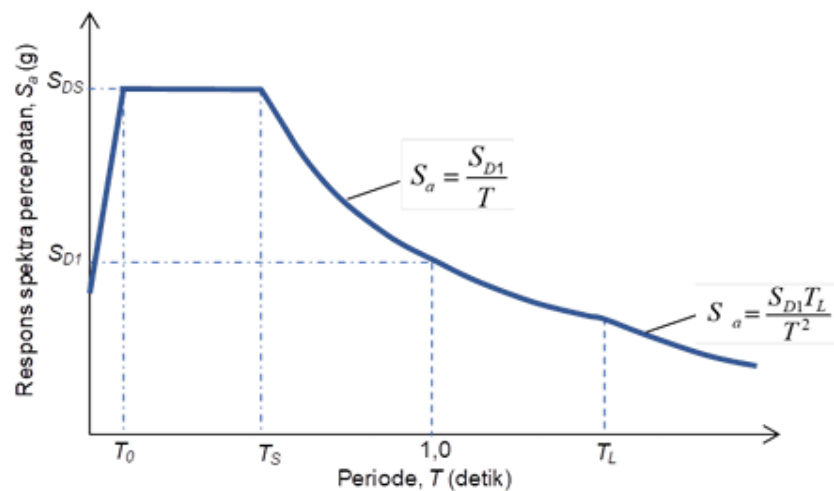
Keterangan:

T = Periode getar fundamental struktur

T_0 = $0,2 \times T_s$

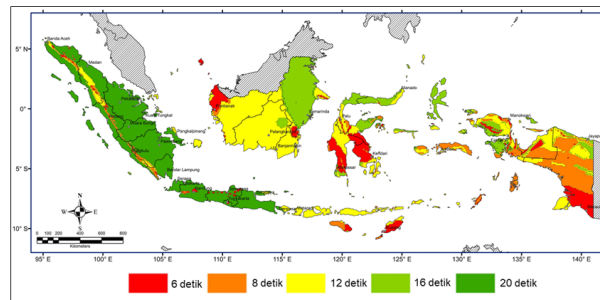
T_s = $\frac{S_{D1}}{S_{DS}}$

T_L = Transisi periode panjang (diambil dari peta transisi periode panjang)



Gambar 2. 9 Grafik Spektrum Respon Desain

(Sumber : SNI 1726:2019 Pasal 6.4)



Gambar 2. 10 Peta Transisi Periode Panjang TL Indonesia
(Sumber: SNI 1726:2019)

2.4.4.7. Penentuan Periode Getar (T)

Dalam menentukan periode fundamental struktur (T), sesuai dengan pedoman SNI 1726:2019 bahwa koefisien batas struktur (C_u) dan periode fundamental pendekatan (T_a) harus lebih atau sama dengan periode getar seismik (T).

1) Periode untuk geser dasar

$$T \leq C_u \times T_a$$

Keterangan:

T = Periode struktur getar (detik)

C_u = Koefisien batas atas periode struktur

T_a = Periode fundamental pendekatan

Tabel 2. 15 Koefisien Batas Atas Pada Periode Struktur

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain Pada 1 Detik (S_{D1})	Koefisien C_u
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

(Sumber: SNI 1726:2019)

2) Periode pendekatan

$$T_a = C_t \times h_n^x$$

Keterangan:

T_a = Periode fundamental pendekatan

C_t = Parameter periode pendekatan

x = Parameter periode pendekatan

h_n = Ketinggian struktur

Tabel 2. 16 Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100% gaya seismik yang diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismic:		
- Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
- Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan <i>bracing</i> eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan <i>bracing</i> terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua system struktur lainnya	0,0488	0,75

(Sumber: 1726:2019)

2.4.4.8. Kategori Desain Seismik (KDS)

Setiap struktur bangunan harus dikategorikan ke dalam kelas desain seismik sesuai sesuai ketentuan SNI 1726:2019, diantaranya:

- 1) Struktur dengan kategori desain seismik E mencakup bangunan kategori risiko I, II, atau III dan terletak di lokasi dimana nilai percepatan gempa pada periode 1 detik (S_1) bernilai lebih dari 0,75.
- 2) Struktur dengan kategori desain seismik F mencakup bangunan kategori risiko IV yang terletak di lokasi dengan nilai percepatan gempa pada periode 1 detik (S_1) sebesar 0,75 atau lebih.

Selain itu, seluruh struktur lainnya diklasifikasikan ke dalam desain seismik berdasarkan tingkat risiko serta parameter respons, yaitu S_{DS} dan S_{D1} . Setiap struktur bangunan juga harus dikategorikan dalam desain seismik tertinggi tanpa mempertimbangkan durasi periode fundamental getaran struktur (T), sesuai tabel berikut.

Tabel 2. 17 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek

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

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 6.5)

Tabel 2. 18 Kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode 1 detik

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

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 6.5)

Apabila $S_1 < 0,75$, maka mengacu pada tabel 2.10. Berdasarkan syarat berikut ini:

- 1) Periode fundamental struktur (T_A) pada arah sumbu x dan y, dihitung berdasarkan tabel 2.19 yaitu $< 0,8 T_s$.
- 2) Penentuan simpangan antar lantai bangunan, pada periode fundamental struktur untuk arah x dan y, nilainya harus kurang dari T_s .
- 3) Dalam penentuan koefisien respons seismik (C_s), digunakan persamaan berikut:

$$V = C_s \times W$$

keterangan:

C_s = koefisien respons seismik

W = berat seismik efektif

- 4) Pada struktur lantai dan atap yang bersifat tidak kaku, jarak antar bagian elemen yang menahan gempa tidak boleh lebih 12 m. Hal tersebut diatur pada pasal 7.3.1.2

2.4.4.9. Sistem Pemikul Gaya Seismik

Untuk menentukan sistem pemikul gaya seismik, digunakan ketentuan berikut:

Tabel 2. 19 Faktor R , C_d , dan Ω_0 Untuk Sistem Pemikul Gaya Seismik

Sistem pemikul gaya seismik	Koefisien modifikasi respons R^a	Faktor kuat lebih sistem Ω_0^b	Faktor pembesaran defleksi, C_d^c	Batasan sistem struktur dan batasan tinggi struktur, $h_n(m)^d$				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
C. Sistem rangka pemikul momen								
1. Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
2. Rangka batang baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI
3. Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ^k	TI ^k	Ti ^k
4. Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI _l	TI _l	TI _l

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
5. Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB
6. Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
7. Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI
8. Rangka baja dan beton komposit	8	3	5½	TB	TB	TB	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, $h_n(m)^d$				
				Kategori desain seismik				
				B	C	D ^e	E ^e	F ^f
pemikul momen								
9. Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI
10. Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI
11. Rangka baja dan beton komposit pemikul	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI

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
momen biasa								
12. Rangka baja canai dinding pemikul momen khusus dengan pembuatan	3½	3°	3½	10	10	10	10	10

(Sumber: SNI 1726:2019 Pasal 7.2.2)

2.4.5. Kombinasi Pembebanan

Pada perencanaan elemen struktur atas dan bawah harus mampu menahan beban terberat pada struktur. Maka, penting untuk memperhitungkan kemungkinan adanya beban tertentu yang tidak bekerja dalam kondisi-kondisi tertentu. Hal ini sesuai dengan ketentuan pada SNI 1726:2020, pasal 4.2.2.1.

- 1,4D
- 1,2D + 1,6L + 0,5L
- 1,2D + 1W + L + 0,5L_r
- 0,9D + 1W

Pada desain yang memerlukan kekuatan yang lebih tinggi, maka digunakan ketentuan kombinasi pembebanan sesuai SNI 1726:2019 pasal 8.3.2.3 berikut.

$$(1,2 + 0,2 \text{ SDS})D + E + L$$

$$(0,9 - 0,25 \text{ SDS}) D + E$$

Keterangan:

D = Beban mati

L = Beban hidup

Lr = Beban hidup di atap

W = Beban angin

E = Beban gempa

2.5. Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPM)

Dalam merancang suatu struktur yang mengacu pada prinsip tahan gempa, maka pada pertemuan rangka struktur atau yang biasa disebut dengan joint harus berdasarkan ketentuan wilayah dan resiko gempa, dimana hal tersebut akan berpengaruh dalam hubungan balok kolom yang didesain dengan menggunakan sistem rangka pemikul momen (SRPM). Sesuai dengan SNI 1726:2019, Sistem Rangka Pemikul Momen dibagi menjadi 3 jenis, yaitu sebagai berikut.

a) Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa (SRPMB)

Sistem Rangka Pemikul Momen Biasa merupakan sistem rangka pemikul yang sesuai dan memenuhi persyaratan SNI 2847:2019, yang dimana pada pendetailan tulangan balok yang bertujuan untuk memperkuat elemen rangka dan dengan cara ini, dapat meningkatkan daya tahan struktur terhadap gaya lateral. dengan sifat daktilitas rendah, kategori desain yang termasuk kedalam sistem rangka ini yaitu (KDS) B.

b) Sistem Rangka Pemikul Momen Menengah (SRPMM)

Sistem rangka ini mempunyai sifat daya tahan deformasi sedang pada struktur, penggunaan sistem ini juga untuk meminimalkan kemungkinan keruntuhan struktur pada joint (balok & kolom) selama gempa berlangsung, kategori desain yang termasuk kedalam sistem rangka ini yaitu (KDS) C.

c) **Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)**

Sifat sistem rangka ini bersifat daktilitas kuat, sistem ini juga untuk detail balok yang menahan gaya geser sepenuhnya diakibatkan oleh pergerakan gempa. Kategori desain yang termasuk kedalam sistem rangka ini yaitu (KDS) D, E, F.

2.6. Perencanaan Struktur Bangunan

Struktur bangunan umumnya dibagi menjadi dua bagian yaitu *substructure* dan *upper structure*. Struktur tersebut berkerja sama agar mampu menahan beban tanpa mengalami perubahan struktur yang besar. Struktur bawah berfungsi untuk mentransfer beban ke permukaan tanah. Pada bagian struktur bawah harus benar-benar dipastikan aman supaya stabilitas struktur tetap terjaga (Gilang Pradika et al., 2023).

Desain atau rancangan awal untuk membentuk suatu struktur bangunan disebut *Preliminary Design*. Preliminary Design disusun sesuai dengan ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI) 2487:2019. Untuk menahan beban lateral sepenuhnya dari beban gempa dengan daktilitas kuat, maka perhitungan menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

2.6.1. Struktur Atap

2.6.1.1. Gording

Pemasangan gording pada rangka kuda-kuda profil WF dipasang miring mengikuti sudut keimiringan atap (α), maka beban yang bekerja secara vertikal harus diuraikan terlebih dahulu ke arah sumbu-x (sumbu kuat) dan sumbu-y (sumbu lemah) profil. Dengan hal tersebut gording mengalami lentur dua arah (biaksial), dalam perencanaan profil gording terhadap beban, momen, hingga kontrol kekuatan profil merujuk pada SNI 1727:2020, PPPURG 1987 dan SNI 1729:2020.

a) Analisis Momen Desain Akibat Pembebanan

Momen desain akibat pembebanan dari gording dihitung berdasarkan jenis beban yang bekerja, yaitu pada beban mati, beban hidup, dan beban angin.

1) Momen akibat beban mati

Momen ini terjadi akibat beban permanen yang bekerja pada gording seperti pada berat sendiri profil baja gording, berat material penutup atap, serta berat dari trekstang dan pengikatnya.

$$M_x = \frac{1}{8} \times q_y \times L^2$$

$$M_y = \frac{1}{8} \times q_y \times L^2$$

2) Momen akibat beban hidup

Momen ini disebabkan dari beban terpusat pada pekerja dan komponen peralatannya.

$$M_x = \frac{1}{4} \times P_y \times L^2$$

$$M_y = \frac{1}{4} \times P_y \times L^2$$

3) Momen akibat beban angin

Momen ini terjadi akibat tekanan udara secara horizontal yang mengenai bagian atap bangunan, yang dibedakan menjadi sisi atap yang menjadi datang nya angin tau biasa disebut angin tekan maka menjadi momen akibat angin tekan, dan sisi atap belakang arah angin atau angin hisap. Berdasarkan PPPRUG 1987 pasal 2.1.3.3 penentuan beban angin dengan mengalikan tekanan angin dasar yang dipengaruhi sudut kemiringan atap (α).

$$M_x = \frac{1}{8} \times P_y \times L^2$$

Nilai $M_y = 0$, karena beban angin selalu bekerja tegak lurus terhadap bidang atap dan seluruh gaya hanya menekan sumbu – x.

Keterangan:

M_x = Momen lentur pada sumbu kuat profil (Kgm).

M_y = Momen lentur pada sumbu lemah profil (Kgm)

q_x, q_y = Komponen beban merata hasil uraian sudut atap (kg/m).

P_x, P_y = Komponen beban hidup terpusat uraian sudut atap (Kg)

L = Jarak antar kuda – kuda (m)

b) Kontrol Kekuatan Lentur Dua Sumbu

1) Klasifikasi Penampang Struktur Baja

Berdasarkan SNI 1729:2020 Pasal B4.1, suatu profil yang menerima beban tekan atau lentur dari rasio kelangsingannya dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis. Klasifikasi ini bertujuan untuk mengetahui apakah suatu penampang akan mengalami tekuk lokal (*local buckling*) sebelum mencapai kapasitas plastis sepenuhnya.

a. Penampang Kompak

Jika rasio kelangsingan memenuhi terhadap batas kelangsingan pada penampang kompak:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

b. Penampang Non-Kompak

Jika rasio kelangsingan berada diantara batas penampang kompak dan non kompak:

$$\lambda_p < \lambda < \lambda_r$$

c. Penampang Langsing

Jika rasio kelangsingan melebihi dari batas penampang non kompak

$$\lambda > \lambda_r$$

2) Klafikasi Kelangsingan Elemen Sayap (*Flange*)

Rasio kelangsingan pada elemen sayap gording dengan batasan kelangsingan sesuai dengan SNI 1729:2020 tabel B4.1b sebagai berikut:

$$\lambda_f = \frac{b}{t}$$

$$\lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\lambda_r = 1,0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Dimana:

λ_f = Rasio kelangsingan actual elemen sayap

λ_p = Batasan kelangsingan untuk penampang kompak

- λ_r = Batasan kelangsingan untuk penampang non kompak
- b = Lebar setengah sayap atau lebar proyeksi sayap
- t = Tebal pelat sayap (mm)
- E = Modulus elastisitas baja (Mpa)
- F_y = Tegangan leleh minimum baja (Mpa)

3) Klasifikasi kelangsingan elemen badan (*Web*)

Rasio kelangsingan pada penampang profil gording dihitung pada tinggi bersih bagian badan yang mengalami tekan sesuai dengan SNI 1729:2020 tabel B4.1b.

$$h_1 = H - 2t$$

$$\lambda_w = \frac{h_1}{t}$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Dimana:

- h_1 = Tinggi bersih badan diantara sayap (mm)
- H = Tinggi total profil baja (mm)
- λ_w = Rasio kelangsingan actual elemen badan
- λ_p = Batasan kelangsingan badan untuk penampang kompak
- λ_r = Batasan kelangsingan badan untuk penampang non kompak

c) Kontrol Momen terhadap Momen Nominal

Komponen struktur yang menerima beban lentur harus memenuhi persyaratan keamanan kapasitas berdasarkan SNI 1729:2020 pasal F1 dengan persamaan berikut:

$$\phi M_n \geq M_u$$

Dimana:

- ϕ = Faktor reduksi kekuatan lentur (0,9)
- M_n = Kekuatan lentur momen nominal
- M_u = Momen lentur ultimit terfaktor akibat beban luar

Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal F2 komponen struktur profil yang menahan lentur terhadap sumbu kuat nya, dengan besarnya momen nominal M_{nx} ditentukan berdasarkan batas kekuatan lelehnya dengan persamaan sebagai berikut:

$$M_{nx} = M_p = F_y \times Z_x$$

Dimana:

- M_{nx} = Kekuatan lentur nominal terhadap sumbu kuat
- M_p = Momen plastis penampang
- F_y = Tegangan leleh minimum baja
- Z_x = Modulus penampang plastis terhadap sumbu x

Sedangkan berdasarkan SNI 1729:2020 pasal F6, profil akan mengalami lenturan terhadap sumbu lemah. Kemampuan profil dalam menahan momen lentur ini dihitung berdasarkan batas kekuatan leleh bahan dengan persamaan berikut:

$$M_{ny} = M_p = F_y \times Z_x \leq 1,6F_y \times S_y$$

Dimana:

- M_{ny} = Kekuatan momen nominal terhadap sumbu lemah
- Z_y = Modulus penampang plastis terhadap sumbu y
- S_y = Modulus penampang elastis terhadap sumbu y

d) Kontrol terhadap Lendutan

Defleksi pada suatu komponen struktur harus dibatasi agar tidak mengganggu kemampuan layan struktur tersebut. Berdasarkan SNI 1729:2020 pasal L2, defleksi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$F_{ijin} = \frac{L}{360}$$

Dimana:

- F_{ijin} = Batas maksimum lendutan izin penampang
- L = Panjang bentang bersih gording antar kuda-kuda

Karena posisi pemasangan gording yang miring mengikuti sudut kemiringan atap, pembebanan yang bekerja pada gording tersebut mengalami lendutan dua arah (*biaxial deflection*). Besar lendutan aktual f timbul ditentukan dengan persamaan berikut:

$$F_{\text{timbul}} = \sqrt{F_x^2} + \sqrt{F_y^2}$$

Dimana:

F_{timbul} = Lendutan total kombinasi actual yang timbul pada penampang

F_x = Lendutan actual gording akibat beban layan gording pada sumbu-
x

F_y = Lendutan actual gording akibat beban layan pada arah sumbu-y

Kontrol keamanan kemampuan layanan:

$$F_{\text{ijin}} \geq F_{\text{timbul}}$$

2.6.1.1. Ikatan Angin (*Bracing*)

Berdasarkan SNI 1729:2020, perencanaan suatu komponen ikatan angin direncanakan memikul gaya tarik saja (*tension only member*) sesuai dengan tahapan sebagai berikut:

1) Jarak Miring Kuda-kuda

Jarak miring kuda-kuda merupakan panjang suatu bidang atap miring yang akan menerima beban angin. Berdasarkan prinsip geometri atap, jarak miring dihitung menggunakan rumus:

$$L = \frac{L_{\text{setengah}}}{\cos \alpha}$$

Keterangan:

L = Jarak miring kuda-kuda (m)

L_{setengah} = Panjang setengah bentang kuda-kuda (m)

α = Sudut kemiringan atap ($^{\circ}$)

2) Beban Angin (P)

Gaya angin yang menerpa atap didistribusikan sebagai beban merata. Beban ini dikonversi menjadi beban terpusat pada titik kumpul (buhul) ikatan angin. Besaran beban angin dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$P = q \times L \text{ miring}$$

Keterangan:

- P = Beban angin terpusat (kg)
 q = Beban angin merata pada atap (kg/m²)
 L = Jarak miring kuda-kuda (m)

3) Gaya Tarik Aksial Ikatan Angin (N)

Ikatan angin berfungsi untuk menahan gaya horizontal akibat angin. Sistem ikatan angin dipasang menyilang dengan sudut tertentu, sehingga gaya aksial tarik maksimum yang bekerja pada batang dihitung dengan prinsip kesetimbangan $\Sigma H = 0$.

$$N = \frac{P}{\cos \beta}$$

Keterangan:

- N = Gaya aksial tarik pada batang ikatan angin (kg)
 P = Beban angin terpusat (kg)
 β = Sudut kemiringan pemasangan ikatan angin terhadap bidang horizontal (°)

4) Luas Penampang Perlu (Fn)

Luas penampang minimum baja dihitung agar batang tidak mengalami leleh atau putus. Kuat tarik dihitung berdasarkan batas tegangan leleh izin material baja yang digunakan. Pendekatan tegangan izin elemen tarik merujuk pada spesifikasi baja struktural dalam SNI 1729:2020.

$$F_n = \frac{N}{\sigma \text{ Izin}}$$

Keterangan:

- F_n = Luas penampang netto baja yang dibutuhkan (cm²)
 N = Gaya aksial tarik pada batang (kg)

σ izin = Tegangan leleh izin material baja (kg/cm²)

5) Luas Penampang Berulir (Fbr)

Batang ikatan angin umumnya menggunakan sistem sambungan berulir (trekstang) untuk mempermudah perancangannya. Adanya ulir pada ujung batang menyebabkan luas penampang efektif baja tereduksi dibandingkan penampang utuhnya. Sesuai dengan SNI 1729:2020 Bab J3.6 tentang elemen tarik berulir, luas penampang perlu (Fbr) diperbesar sebagai faktor keamanan tegangan tarik pada penampang netto.

$$Fbr = 1,25 \times F_n$$

Keterangan:

Fbr = Luas penampang bruto setelah penyesuaian bagian ulir (cm²)

F_n = Luas penampang netto (cm²)

1,25 = Faktor pembesaran akibat reduksi luasan ulir (ekuivalen 125%)

6) Diameter Batangan Ikatan Angin (d)

Luas penampang bruto yang telah dihitung selanjutnya dikonversi untuk menentukan diameter minimum penampang melintang batang tarik. Hasil perhitungan analitis tersebut akan menghasilkan nilai diameter teoretis. Pemilihan diameter minimum ini juga mempertimbangkan aspek kekakuan elemen struktur untuk mencegah terjadinya lendutan atau deformasi lentur saat proses instalasi dan pengencangan sambungan.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Fbr}{\pi}}$$

Keterangan:

d = Diameter teoritis batang ikatan angin (cm)

Fbr = Luas penampang baja terulir (cm²)

2.6.1.2. Trekstang

Perencanaan komponen trekstang (*sagrod*) direncanakan secara khusus memikul gaya tarik aksial saja (*tension-only member*) untuk menahan lendutan lateral

gording akibat beban sejajar bidang atap. Perhitungan trekstang mengacu pada spesifikasi komponen struktur tarik sesuai dengan SNI 1729:2020 sebagai berikut:

1) Analisis Pembebanan Aksial Trekstang

Gaya tarik total rencana yang bekerja pada batang trekstang ditentukan berdasarkan beban merata sejajar bidang miring atap sepanjang bentang gording, serta beban terpusat sejajar bidang atap yang bekerja pada sistem struktur penutup atap tersebut.

$$P \text{ total} = (q_x \times L_x) + P_x$$

Keterangan:

- $P \text{ total}$ = Gaya tarik total rencana pada batang trekstang (kg)
 q_x = Beban merata pada gording arah sejajar bidang atap (kg/m)
 L_x = Jarak antar kuda-kuda atau bentang gording (m)
 P_x = Beban terpusat arah sejajar bidang atap (kg)

2) Perhitungan Luas Penampang Netto Perlu (F_n)

Luas penampang netto minimum yang diperlukan untuk mencegah terjadinya kegagalan leleh (*yielding failure*) pada elemen struktur dihitung menggunakan rumus:

$$F_n = \frac{P \text{ total}}{\sigma}$$

Keterangan:

- F_n = Luas penampang netto minimum yang dibutuhkan (cm²)
 $P \text{ total}$ = Gaya aksial tarik rencana (kg)
 σ = Tegangan leleh izin material baja struktural (kg/cm²)

3) Perhitungan Luas Penampang Bruto Berulir (F_{br})

Berdasarkan spesifikasi batas elemen tarik berulir pada SNI 1729:2020 pasal J3.6, luas penampang bruto ditingkatkan secara proporsional sebesar 125% dari luas penampang netto untuk mengompensasi pengurangan luas akibat alur ulir sekrup.

$$F_{br} = 1,25 \times F_n$$

Keterangan:

Fbr = Luas penampang bruto setelah penyesuaian bagian ulir (cm²)

Fn = Luas penampang netto (cm²)

1,25 = Faktor pembesaran akibat reduksi luasan ulir (ekuivalen 125%)

4) Penentuan Diameter Nominal Batang Tarik (d)

Diameter teoretis batang pejal berpenampang lingkaran dihitung berdasarkan konversi geometris dari nilai luas penampang bruto yang telah ditetapkan.

$$d = \sqrt{\frac{4.Fbr}{\pi}}$$

Keterangan:

d = Diameter teoritis batang ikatan angin (cm)

Fbr = Luas penampang baja terulir (cm²)

2.6.1.3. Kuda-kuda/ rafter

Perencanaan batang kuda-kuda dilakukan untuk menahan beban pada struktural atap yang bekerja dengan bentuk gaya tekan, tarik, dan interaksi tekan lentur. Perencanaan pada rangka atap ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas dan kapasitas kekuatan elemen agar memenuhi persyaratan keamanan struktur yang mengacu pada spesifikasi SNI 1729:2020 sebagai berikut:

1) Analisis Batang Tekan

Batang vertikal pada kuda-kuda menerima gaya tekan aksial pada struktur. Analisis ini dilakukan untuk mencegah batang mengalami tekuk (*buckling*) dengan parameter yang perlu direncanakan dengan kelangsingan (λ_c), faktor tekuk (ω), dan kapisitan nominal (N_n).

a) Menentukan Kelangsingan (λ_c)

Berdasarkan SNI 03-1720-2002 pasal 7.6.2, analisis kelangsingan ini memperhitungkan panjang tekuk dan jari-jari pada penampang dengan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Lk}{I_y} - \frac{F_y}{E}}$$

dimana:

L_k = Panjang tekuk (KcL)

I_y = Jari-jari penampang

Nilai Kc atau faktor panjang tekuk ditentukan sesuai SNI 03-1720-2002 pasal 7.6.3 gambar 7.6-1.

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Garis terputus menunjukkan diagram kolom tertekuk						
Nilai λ_c teoritis	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Nilai λ_c yang dianjurkan untuk kolom yang mendekati kondisi ideal	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Kode ujung						

Gambar 2. 11 Faktor Panjang Tekuk (Kc)

(Sumber : SNI 03-1729-2002)

b) Menentukan Faktor Tekuk

Berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 7.6.2, nilai faktor tekuk (ω) ditentukan berdasarkan parameter kelangsingan (λ_c) dengan batas persamaan sebagai berikut:

Nilai $\lambda_c \leq 0,25$, maka $\omega = 1$

Nilai $0,25 < \lambda_c < 1,2$ maka $\omega = \frac{1,43}{1,6 - 0,67 \lambda_c}$

Nilai $\lambda_c \geq 1,2$ maka $\omega = 1,25 \lambda_c^2$

c) Menentukan Kekuatan Nominal (N_n)

Perhitungan daya dukung nominal berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 7.6.2 dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = A_g \cdot F_{cr}$$

$$F_{cr} = \frac{F_y}{\omega}$$

dimana:

A_g = Luas penampang bruto

F_{cr} = Tegangan kritis penampang (Mpa)

F_y = Tegangan leleh material (Mpa)

Karena batang kuda-kuda menerima gaya tekan (P_u) dan momen (M_u) secara bersamaan, maka menurut SNI 03-2729-2002 pasal 7.4.3.3:

$$\text{Jika } \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0,2$$

Maka:

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0$$

$$\text{Jika } \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0,2$$

Maka:

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0$$

Dimana:

P_u = Gaya aksial terfaktor

P_n = Kuat nominal penampang struktur

Φ = Faktor reduksi kekuatan

Untuk komponen struktur tekan = 0,85

Untuk komponen struktur tarik = 0,9

Φ_b = Faktor reduksi kekuatan komponen struktur lentur (0,9)

M_{nx}, M_{ny} = Kapasitas momen nominal penampang struktur untuk sumbu – x dan sumbu – y

M_{ux}, M_{uy} = Kapasitas momen terfaktor penampang struktur untuk sumbu – x dan sumbu – y

2) Analisis Struktur Lentur

Batang kuda-kuda yang menerima beban merata seperti pada gording akan mengalami momen lentur. Analisis struktur lentur ini bertujuan untuk memastikan bahwa penampang tersebut cukup kuat dan tidak melintir atau menekuk saat menahan beban sesuai dengan aturan SNI 03-1729-2002.

a) Klasifikasi Penampang

Agar suatu penampang mencapai momen plastis penuh, maka penampang tersebut harus memenuhi syarat kekompakan berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 7.5, dengan memperhitungkan kontrol lebar tebal penampang (λ) terhadap batas kelangsingan penampang (λ_p) berikut:

$$\lambda \leq \lambda_p$$

b) Perhitungan Nilai Momen Nominal

Nilai momen nominal (M_n) ditentukan berdasarkan perbandingan panjang bentang terkekang lateral (L) terhadap panjang L_p dan L_r yang sesuai dengan pasal 8.3, serta nilai L_p dan L_r sesuai dengan kondisi pada tabel 8.3-2:

Tabel 2. 20 Momen Kritis Untuk Tekuk Lateral

Profil	L_p	L_r
Profil-I dan kanal ganda	$1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$r_y = \left[\frac{X_1}{F_L} \right] \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 \cdot f_L^2}}$ $F_L = F_y - F_r$
Profil kotak pejal	$0,13E_r \frac{\sqrt{JA}}{M_p}$	$2 E_r \frac{\sqrt{JA}}{M_r}$

(Sumber: SNI 03-1729-2002)

Dimana:

$$X_1 = \frac{\pi}{S} \sqrt{\frac{EGJA}{2}}$$

$$X_2 = 4 \left(\frac{S}{GJ} \right)^2 \frac{I_w}{I_y}$$

I_w = Konstanta puntir lengkung

J = Konstanta puntir torsi

$$= \sum \frac{b \cdot t^3}{3}$$

S = Modulus penampang elastis

E = Modulus elastis baja (200000 Mpa)

G = Modulus penampang baja (80000 Mpa)

A = Luas penampang bruto penampang baja

Kondisi batang kompak ($L \leq L_p$), maka:

$$M_n = M_p$$

Nilai M_p ditentukan dengan:

$$M_p = Z_x \times F_y$$

Dimana:

Z_x = Modulus plastis penampang

F_y = Tegangan leleh baja (Mpa)

Kondisi tekuk inelastis $L_p < L \leq L_r$, maka:

$$M_n = C_b \left[M_r + (M_p - M_r) \frac{(L_r - L)}{(L_r - L_p)} \right] \leq M_p$$

Dimana factor pengali momen (C_b) ditentukan oleh tabel 8.3-1 sebagai berikut:

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \leq 2,3$$

M_{max} = Momen maksimum pada bentang yang di tinjau

M_A = Momen $\frac{1}{4}$ bentang

M_B = Momen $\frac{1}{2}$ bentang

M_C = Momen $\frac{3}{4}$ bentang

Untuk nilai momen kritis tekuk torsi lateral (M_{cr}) pada profil-I dan kanal ganda ditentukan sesuai SNI 03-1729-2002 pada tabel 8.3-1 sebagai berikut:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y I_w}$$

Kondisi batang $L_r \leq L$, maka:

$$M_n = M_{cr} \leq M_p$$

c) Analisis Kontrol Kuat Geser

Analisis kuat geser pelat badan penampang dilakukan berdasarkan SNI 03-1729-2002 pasal 8.8:

$$V_u \leq \phi V_n$$

Dimana:

V_u = Gaya geser terfaktor dari hasil analisis struktur

ϕ = Faktor reduksi kekuatan (0,9)

V_n = Kuat geser nominal pelat badan

Untuk menentukan metode perhitungan nilai V_n sesuai dengan pasal 8.8.2 dilakukan pengecekan rasio sebagai berikut:

$$K_n = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$$

Dimana:

a = Jarak pengaku transversal (*stiffener*) pada balok

h = Tinggi bersih pelat badan balok

$$h/t_w \leq 1,10 \sqrt{\frac{K_n E}{F_y}}$$

Dimana :

t_w = Tebal pelat badan balok

E = Modulus elastisitas baja

K_n = Koefisien tekuk geser pelat badan

Jika kondisi pada persamaan di atas memenuhi maka sesuai dengan pasal 8.8.3 perhitungan nilai V_n sebagai berikut:

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w$$

Dimana nilai A_w merupakan luas kotor pelat badan ($d \times t_w$).

d) Analisis Kontrol Lendutan

Berdasarkan SNI 03-1729-2002, untuk mencegah kerusakan pada elemen non struktural lendutan perlu dibatasi. Pada pasal 6.4.3 tabel 6.4-1 memberikan batasan lendutan maksimum berdasarkan jenis komponen dan beban sebagai berikut:

Tabel 2. 21 Batas Lendutan Maksimum

Komponen struktur tidak terfaktor	Beban tetap	Beban sementara
Balok pemikul dinding atau finishing yang getas	$L/360$	-
Balok biasa	$L/240$	-
Kolom dengan analisis orde pertama saja	$h/500$	$h/200$
Kolom dengan analisis orde kedua	$h/300$	$h/200$

(Sumber: SNI 03-1729-2002)

Kontrol lendutan:

$$\Delta_{Maks} \leq \Delta_{Ijin}$$

Dimana:

Δ_{Maks} = Lendutan pada analisis yang terjadi pada struktur akibat beban kerja

Δ_{Ijin} = Batas lendutan yang diizinkan

2.6.2. Struktur Portal

2.6.2.1. Preliminary Design

2.6.2.1.1. Balok

Menurut persyaratan SNI 2847:2019, berlaku pada balok non prategang yang tidak bergantung secara struktural akan rentan terhadap kerusakan akibat deformasi yang berlebihan. Hal tersebut juga berlaku pada syarat perencanaan ketinggian balok induk, sesuai ketentuan SNI 2847:2019, pasal 9.3.1.1.

Tabel 2. 22 Tinggi Minimum Balok Non Prategang

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

(Sumber: SNI 2847:2019)

SNI 2847:2019, pasal 9.3.1.1.1 mengatur perencanaan h_{min} balok, yaitu jika f_y 420 Mpa maka ketinggian pada balok sesuai dengan tabel diatas. apabila $f_y > 420$ Mpa, maka ketinggian balok minimum tabel diatas dikalikan dengan $\left(0,4 + \frac{f_y}{700}\right)$. Dalam SNI 2847:2019, terdapat beberapa syarat batasan dimensi balok yang harus dipenuhi yaitu:

- $L_n > 4d$
- $L_n > 4 \times \left(L - \frac{C_1}{2} - \frac{C_2}{2}\right)$
- $d = h$ balok - selimut beton – $d_s - d_b/2$
- $b_w > 0,3h$ dan 250 mm

Keterangan:

- L_n = Bentang bersih balok
- d = Tinggi efektif
- d_s = Diameter nominal sengkang
= $12,736\sqrt{b}$ (SNI 2052:2014)
- d_b = Diameter nominal
= $12,736\sqrt{b}$ (SNI 2052:2014)
- h = Tinggi balok
- b_w = Lebar penampang
- C_1 = Tinggi kolom
- C_2 = Lebar kolom

2.6.2.1.2. Kolom

Dalam menentukan dimensi kolom harus sesuai dengan standar teknis SNI 2847:2019 pasal 18.7.2. Ketentuan ini menetapkan persyaratan geometris

penampang kolom dalam menahan beban gempa, agar setiap elemen penampang kolom yang direncanakan sesuai dengan standar keamanan.

$$\frac{I_{Kolom}}{L_{Balok}} \geq \frac{I_{Balok}}{L_{Balok}}$$

$$\frac{1}{12} \times \frac{b}{L_{Kolom}} \times h^3 \geq \frac{1}{12} \times \frac{b}{L_{Balok}} \times h^3$$

Dimana:

- b = Lebar penampang (m)
h = Tinggi penampang (m)
L = Bentang (m)
I kolom = Inersia kolom (m⁴)
I balok = Inersia balok (m⁴)

2.6.2.1.3. Pelat

Ketentuan dalam h_{min} pelat satu arah, diisyaratkan dalam SNI 2847:2019 diantaranya:

- a) Untuk pelat solid non-prategang nilai ketebalan keseluruhan (h) tidak diizinkan berada di bawah ketebalan (h) minimum yang telah ditentukan pada tabel berikut ini.

Tabel 2. 23 Tinggi Minimum Pelat Solid Satu Arah Non-Prategang

Kondisi Tumpuan	h min
Tumpuan sederhana	L/20
Satu ujung menerus	L/24
Kedua ujung menerus	L/28
Kantilever	L/10

(Sumber: SNI 2847-2019)

- b) Untuk $f_y > 420$ MPa, ketentuan h_{min} pada tabel diatas harus dikalikan dengan:

$$0,4 + \frac{f_y}{700}$$

Keterangan: f_y = tegangan leleh

- c) Pada pelat tanpa prategang yang dibuat dari beton ringan dengan w_c berkisar 1440 hingga 1840 kg/m³ ketentuan h_{min} pada tabel di atas diperhitungkan dengan mengalikan nilai koefisien modifikasi maksimum sebagai berikut:

- 1,65 - 0,0003 w_c
- 1,09

Keterangan:

w_c = berat volume beton normal atau berat volume ekuivalen beton ringan (kg/m³)

- d) Koefisien modifikasi berlaku untuk pelat komposit tanpa prategang dari beton ringan atau normal, yang menopang pada saat konstruksi dan menerima tekanan pada beton ringan.
- e) Ketebalan total (h) pada pelat non prategang tanpa balok interior, yang ditumpu semua sisi dan memiliki nilai perbandingan bentang yang < 2 , harus sesuai dengan ketentuan SNI 2487:2019 pasal 8.3.1.1.
- f) Ketebalan pelat non-prategang dengan balok yang berada disetiap sisi tumpuan harus memenuhi persyaratan yang ditentukan pada tabel berikut.

Tabel 2. 24 Ketebalan minimum pelat dua arah non-prategang dengan balok diantara tumpuan pada semua sisinya

αf_m	h minimum, mm	
$\alpha f_m \leq 0,2$	8.3.1.1 berlaku	
$0,2 < \alpha f_m \leq 2,0$	Terbesar dari	$\frac{\ln (0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 5\beta (\alpha f_m - 0,2)}$
		125
$\alpha f_m > 2,0$	Terbesar dari:	$\frac{\ln (0,8 + \frac{f_y}{1400})}{36 + 9\beta}$
		90

(Sumber: SNI 2847:2019)

Balok yang menumpu pelat secara sederhana pada keempat sisinya, dapat diasumsikan sebagai pelat satu arah apabila: $\frac{ly}{lx} \geq 2,5$; sedangkan balok yang dapat menumpu pelat secara sederhana pada keempat sisi nya saling berseberangan, dapat diasumsikan sebagai pelat dua arah apabila: $\frac{ly}{lx} < 2,5$

2.6.2.2. Perencanaan Penulangan

2.6.2.2.1. Pelat

a) Menentukan spasi tulangan lentur

Spasi minimum (s) tulangan lentur harus sesuai dengan pasal 8.7.2.2 dalam SNI 2847:2019, diantaranya:

- $s < 2h$ dan 450 mm, untuk penampang kritis.
- $s < 3h$ dan 450 mm, untuk penampang lainnya.

b) Menghitung luas minimum tulangan lentur (A_{smin})

Luas minimum tulangan lentur (A_{smin}), harus sesuai dengan tabel berikut.

Tabel 2. 25 A_{smin} untuk pelat satu arah non-prategang

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

(Sumber: SNI 2847-2019, pasal 7.6.1.1)

c) Menghitung tebal efektif penampang (d)

$$d = h - \text{selimut beton} - d_b - d_b/2$$

Keterangan:

d = tinggi efektif penampang

h = tebal pelat

d_b = diameter tulangan

d) Menghitung batasan tulangan ($\rho_{\min}$, ρ_b , $\rho_{\max}$)

- $\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y}$
- $\rho = 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f_y}\right)$
- $\rho_{\max} = 0,75\rho_b$

Keterangan:

$\rho_{\min}$ = rasio tulangan minimum

ρ_b = rasio tulangan

$\rho_{\max}$ = rasio tulangan maksimum

f_y = tegangan leleh (MPa)

f_c' = kuat tekan beton (MPa)

β_1 = faktor reduksi blok tegangan beton

Nilai β_1 di dalam SNI 2847:2019 tergantung pada kuat tekan beton (f_c'), dengan ketentuan:

- Untuk $f_c' \leq 28$ MPa, nilai $\beta_1 = 0,85$
- Untuk $f_c' > 28$ MPa, nilai $\beta_1 = 0,80 \times \left(\frac{f_c' - 28}{7}\right)$ dengan batas minimum: $\beta_1 \geq 0,65$

g) Menghitung momen nominal pelat (M_n)

$$M_n = \frac{M_u}{\phi}$$

Keterangan:

M_n = Momen nominal

M_u = Momen *ultimate*/ Momen terfaktor

ϕ = Faktor reduksi kekuatan

Dalam SNI 2847:2019 pasal 21.2.1, Faktor reduksi kekuatan (ϕ), harus sesuai dengan ketentuan tabel berikut.

Tabel 2. 26 Faktor reduksi kekuatan (ϕ)

Gaya atau elemen struktur		ϕ	Pengecualian
a)	Momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial	0,65 – 0,90 sesuai 21.2.2	Di dekat ujung komponen pra-tarik (pre-tension) dimana strand belum sepenuhnya bekerja, ϕ harus sesuai dengan 21.2.3
b)	Geser	0,75	Persyaratan tambahan untuk struktur tahan gempa terdapat pada 21.2.4
c)	Torsi	0,75	-
d)	Tumpu (<i>bearing</i>)	0,65	-
e)	Zona angkur pasca-tarik (<i>post-tension</i>)	0,85	-
f)	<i>Bracket</i> dan korbel	0,75	-
g)	<i>Strut</i> , ties, zona nodal, dan daerah tumpuan yang dirancang dengan strut and tie di pasal 23	0,75	-
h)	Komponen sambungan beton pracetak terkontrol leleh oleh elemen baja dalam tarik	0,90	-
i)	Beton polos	0,60	-
j)	Angkur dalam elemen beton	0,45 – 0,75 sesuai pasal 17	-

(Sumber: SNI 2847-2019, pasal 21.2.1)

Faktor reduksi pada struktur untuk memastikan bahwa struktur aman terhadap momen dan gaya aksial, harus berdasarkan tabel berikut.

Tabel 2. 27 Faktor reduksi kekuatan (ϕ) untuk momen, gaya aksial, atau kombinasi momen dan gaya aksial.

Regangan Tarik Netto (ϵ_t)	Klasifikasi	ϕ			
		Jenis tulangan transversal			
		Spiral sesuai 25.7.3		Tulangan lainnya	
$\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$	Tekanan terkontrol	0,75	a)	0,65	b)
$\epsilon_{ty} \leq \epsilon_t < 0,005$	Transisi	$\frac{0,75 + 0,15(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	c)	$\frac{0,65 + 0,25(\epsilon_t - \epsilon_{ty})}{(0,005 - \epsilon_{ty})}$	d)

Regangan Tarik Netto (ϵ_t)	Klasifikasi	ϕ			
		Jenis tulangan transversal			
		Spiral sesuai 25.7.3		Tulangan lainnya	
$\epsilon_t \geq 0,005$	Tegangan terkontrol	0,90	e)	0,90	f)

(Sumber: SNI 2847-2019, pasal 21.2.2)

h) Menghitung koefisien ketahanan (R_n)

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

$$R_n = \rho \times f_y - \frac{0,59 \times \rho^2 \times f_y^2}{f_c'}$$

Keterangan:

R_n = koefisien ketahanan

M_n = momen nominal

b = lebar pelat

d = tebal efektif pelat

ρ = rasio tulangan

f_y = kuat leleh

f_c' = kuat tekan beton

i) Menghitung luas tulangan (A_s)

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

syarat:

jika $\rho < \rho_{\min}$, maka ρ yang dipakai pada A_s perlu adalah $\rho_{\min}$

jika $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$, maka ρ yang dipakai pada A_s perlu adalah ρ

jika $\rho > \rho_{\max}$, maka diameter tulangan diperbesar

$$A_s \text{ min} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \times f_y} \times b \times d$$

$$A_s \text{ pasang} = n \times \frac{1}{4} \pi \times d_b^2$$

Syarat: $A_s \text{ pasang} > A_s, \text{min}$

dimana: $n = \frac{b}{s}$

Keterangan:

n = jumlah tulangan dalam 1 meter

b = lebar pelat

db = diameter tulangan

s = jarak tulangan yang dipakai

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 8.6.1.1, untuk memastikan suatu struktur yang kuat, tidak mudah retak, dan aman digunakan, maka luas tulangan minimum ($A_s \text{ min}$) harus dipasang pada bagian elemen yang mengalami tarik akibat beban, sesuai arah bentang yang ditinjau.

j) Cek kapasitas ($\phi M_n > M_u$)

Jika $\phi M_n > M_u$, maka struktur pelat yang telah direncanakan aman untuk digunakan karena memenuhi syarat terhadap momen nominal dan cukup untuk menahan beban terfaktor yang bekerja. Jika $\phi M_n < M_u$, maka struktur pelat yang telah direncanakan tidak dapat digunakan karena berisiko mengalami kegagalan dan keruntuhan akibat tidak mampu menahan beban terfaktor yang bekerja.

2.6.2.2.2. Balok

a) Perhitungan Tulangan Lentur

Perhitungan tulangan lentur yang mengacu pada SNI 2847:2019 meliputi:

1) Perhitungan penulangan momen nominal (M_n)

$$M_n = \frac{M_u}{\phi}$$

$$\text{Koefisien Tahanan : } R_n = \frac{M_n}{b \times d^2}$$

Untuk perhitungan d efektif sebagai berikut:

$$d = h - d'$$

d' = selimut beton - d tulangan sengkang - $\frac{1}{2}$ d tulangan

2) Perhitungan batasan / rasio tulangan (ρ)

Rasio Tulangan (ρ):

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

Rasio Tulangan Minimum (ρ_{min}):

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

Rasio Tulangan Maksimum (ρ_{max}):

$$\rho_{\text{max}} = 0,75 \left(\frac{0,85 \cdot f_c' \cdot \beta_1}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y} \right)$$

Kontrol $\rho_{\text{min}} < \rho_{\text{perlu}} < \rho_{\text{max}}$ yang digunakan perhitungan luas tulangan.

3) Perhitungan As perlu dan As min

$$As_{\text{perlu}} = \rho \cdot b \cdot d$$

Luas tulangan minimum pada struktur lentur balok berdasarkan SNI 2847:2019, pasal 12.5.1:

$$As_{\text{min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 \cdot f_y} \times b \times d$$

Keterangan:

ρ = Rasio tulangan

b = Lebar balok

d = Tinggi efektif balok

4) Menentukan Nilai As pasang

$$As_{\text{pakai}} = \frac{1}{4} \pi \times \phi^2 \times n$$

Dimana:

$$n = \frac{\text{Nilai Maks (As perlu; As, min)}}{\text{Luas Tulangan}}$$

Kontrol terhadap, As pasang > As perlu ; As min

b) Perhitungan Tulangan Geser

Perhitungan tulangan geser yang mengacu pada SNI 2847:2019 meliputi:

1) Menghitung Gaya Geser Maksimum (V_u)

Gaya geser yang harus diterima balok dihitung berdasarkan beban yang bekerja pada balok. Untuk beban terdistribusi merata, gaya geser pada tumpuan dapat dihitung dengan rumus:

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot W_u \cdot L$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser balok

W_u = Beban terfaktor atau beban rencana

L = Bentang balok

Untuk beban terpusat, gaya geser pada tumpuan dapat dihitung menggunakan rumus:

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot P_u$$

Keterangan:

P_u = Gaya aksial terfaktor (KN)

Berdasarkan SNI 2847:2019 rangka yang didesain dengan SRPMK diharapkan dapat memikul gaya geser yang bekerja akibat gempa dengan menganalisis pada kedua ujung balok /bagian joint. Untuk memastikan kekuatan dan keamanan pada struktur desain pada balok harus memperhatikan momen akibat gempa (M_{pr}) di sambungan dan sepanjang balok struktur.

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{L_n} \pm \frac{W_u \cdot L_n}{2}$$

2) Probable Moment Strength (M_{pr})

Berdasarkan pada SNI 2847:2019 pasal 18.6.5, perhitungan kuat lentur momen-momen yang bekerja diujung (M_{pr}) kuat lentur tulangan $1,25 f_y$. Hal tersebut digunakan untuk menentukan kuat geser balok.

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

dimana:

$$a_{pr} = \frac{A_s (1,25 f_y)}{0,85 f_c' b}$$

Keterangan:

V_e = Gaya geser desain

M_{pr} = Kuat lentur momen-momen yang bekerja diujung

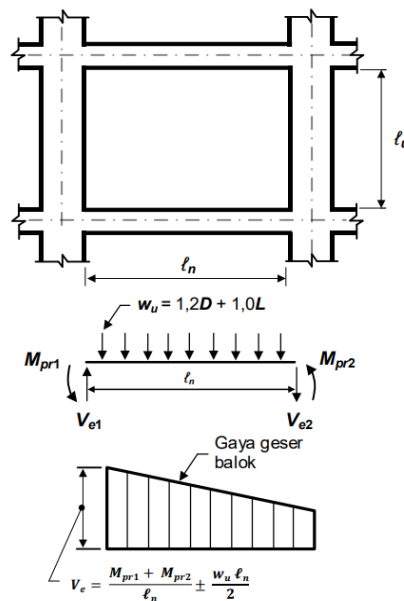
ℓ_n = Bentang bersih balok

W_u = Beban terfaktor atau beban rencana

b = Lebar balok

d = $h - d'$

a_{pr} = Tinggi probable balok tekan beton



Gambar 2. 12 Geser desain untuk balok

(Sumber: SNI 2847-2019)

3) Menghitung Kapasitas Geser Nominal (V_n)

Berdasarkan SNI 2487:2019 pasal 22.5.1.1 untuk menentukan kapasitas geser nominal (V_n) dalam balok beton bertulang, ditentukan dengan rumus, sebagai berikut:

$$V_n = V_c + V_s$$

Keterangan:

V_n = Kapasitas geser nominal balok

V_c = Kapasitas geser beton

V_s = Kapasitas geser akibat tulangan geser

Syarat: $\phi V_n/V_u > 1,0$

Pada balok SRPMK, perhitungan V_n tetap sama, namun penulangan sengkang lebih ketat dan daerah plastis diperhitungkan secara lebih detail untuk memastikan kapasitas geser dapat menahan beban gempa dengan baik.

4) Menghitung Kapasitas Geser Beton (V_c)

Menurut pasal 22.5.1 SNI 2847:2019, kapasitas geser beton (V_c) pada balok biasa tanpa gaya aksial dihitung menggunakan persamaan:

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f'c'} b w d$$

kapasitas geser beton (V_c) pada balok dengan gaya aksial tekan, dihitung menggunakan persamaan:

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \lambda \sqrt{f'c'} b w d$$

Keterangan:

V_c = Kapasitas geser beton

N_u = Gaya aksial terfaktor

A_g = Luas bruto penampang beton

λ = Faktor modifikasi beton

$f'c'$ = Kuat tekan beton

$b w$ = Lebar balok

d = Tinggi efektif balok

Untuk beton normal, $\lambda = 1$, dan untuk beton ringan, λ berkisar antara 0.75 hingga 0.85, tergantung pada berat jenis beton. Dalam memikul gaya geser, $V_c = 0$ apabila $P_u < A_g \cdot f_c' / 20$ dan balok berada di kondisi sendi plastis atau ketika balok direncanakan untuk menghadapi gaya gempa besar.

Pada balok SRPMK, perhitungan V_c tetap sama, tetapi peran tulangan geser (V_s) lebih penting karena beban dinamis gempa yang besar, membuat beton saja tidak cukup untuk menahan geser.

Untuk meminimalisir keruntuhan tekan dan tingkat maksimum keretakan, ukuran dimensi penampang harus memenuhi persamaan berikut (SNI 2847:2019, pasal 22.5.1.2).

$$V_u \leq \phi (V_c + 0,066\sqrt{f_c'}bwd)$$

5) Menghitung Kapasitas Geser Tulangan Geser (V_s)

Pada balok biasa, kapasitas geser beton (V_c) dihitung berdasarkan penampang tulangan geser (biasanya berupa sengkang atau stirrup), dengan rumus:

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

dimana:

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

Keterangan:

A_v = Luas penampang tulangan geser (mm^2)

f_y = Tegangan leleh tulangan geser (MPa)

d = Tinggi efektif (mm)

s = jarak antar tulangan geser/ sengkang (mm)

Persyaratan tulangan geser dalam SRPMK menjadi lebih ketat, terutama pada jarak sengkang (s). Hal ini bertujuan untuk memastikan sengkang dapat lebih efektif menahan geser dan mencegah keruntuhan geser secara tiba-tiba pada saat kondisi gempa. Ketentuan jarak sengkang pada SRPMK adalah:

- a. Di daerah dekat tumpuan balok (sendi plastis), jarak maksimal sengkang adalah 100 mm atau $d/4$ (menjadi lebih kecil).
- b. Di daerah lainnya jarak maksimal sengkang adalah $d/2$.

2.6.2.2.3. Kolom

- a) Persyaratan desain kolom, berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.7.2.1 yaitu:**

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

$$\frac{b}{h} \geq 0,4$$

dimana:

b = lebar balok

h = panjang balok

- b) Penulangan longitudinal pada kolom**

Penulangan longitudinal pada kolom berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.7.4.1, dihitung dengan persamaan berikut :

$$0,01 A_g \leq A_{st} \leq 0,06 A_g$$

dimana :

A_{st} (luas tulangan total longitudinal), dengan rumus

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

A_g (luas penampang struktur)

$$= b \times h$$

Syarat dalam menentukan kebutuhan tulangan harus sebagai berikut:

$A_{s \text{ perlu}} < A_{s \text{ pakai}}$

Agar keruntuhan portal yang diinginkan dapat terjadi dengan aman, maka dalam mendesain struktur kolom harus lebih kuat dari balok (*strong column weak beam*) sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.7.3.2 sebagai berikut:

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

Keterangan:

ΣM_{nc} = Jumlah kekuatan lentur nominal kolom dari kondisi gaya aksial

ΣM_{nb} = Jumlah kekuatan lentur nominal balok daerah tumpuan

c) Periksa Sendi Plastis Kolom

Penempatan tulangan transversal terjadi di sepanjang daerah sendi plastis (l_0) di kedua sisi joint pada penampang. Hal ini penting untuk mencegah deformasi akibat pergeseran lateral. Penempatan tulangan ini membantu menjaga kekuatan dan stabilitas struktur sesuai dengan SNI 2847:2019. Berikut syarat dalam menentukan sendi plastis berdasarkan pasal 18.7.5.1

Sendi plastis (l_0) > tinggi kolom (h)
 bentang bersih $l_n / 6$
 450 mm

d) Perhitungan Desain Kekangan Tulangan (*Confinement*)

Pada daerah rawan gempa suatu struktur perlu adanya sengkang tertutup untuk memastikan bahwa struktur tetap aman. Berikut yang perhitungan untuk menentukan batas kekangan sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.7.5.2

$$Ash_1 = 0,3 \left(\frac{bc f'c}{f_{yt}} \right) \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$$

$$Ash_2 = \frac{0,09 sbc f'c}{f_{yt}}$$

untuk Ash_1 dan Ash_2 akan diambil nilai yang terbesar.

Keterangan :

A_g = Luas penampang struktur

 = b.h

bc = Lebar penampang beton yang terkekang

 = $b_w - 2$ (selimut beton + $\frac{1}{2}$ D Tulangan)

Ach = Luas penampang inti beton (mm²)
 = $b_w - (2 \text{ selimut beton}) \times (h - (2 \text{ selimut beton}))$

f_{yt} = Tegangan leleh tulangan transversal (Mpa)

Untuk ketentuan dan persyaratan jarak spasi tulangan diatur berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 18.7.5.3 yaitu harus kurang dari atau sama dengan dari:

- a) $\frac{1}{4}$ dari lebar kolom (b)
- b) 6 kali diameter tulangan longitudinal
- a) s_0 , dengan syarat harus kurang dari atau sama dengan 150 mm, dan tidak lebih kecil dari 100 mm, dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$s_0 \leq 100 + \frac{350 - h_x}{3} \leq 150$$

Dimana:

$$h_x = \frac{2}{3} (h - (2 \text{ selimut beton}))$$

e) Menghitung Gaya Geser Desain Sendi Plastis

Analisis gaya ini berdasarkan momen lentur maksimum (M_{pr}) yang dapat ditahan oleh kolom. Untuk menghitung gaya geser desain pada zona sendi plastis pada tulangan kolom, disyaratkan pada SNI 2847:2019 pasal 18.7.6.1:

$$V_u = \frac{M_{pr \text{ atas}} + M_{pr \text{ bawah}}}{l_n}$$

M_{pr} kolom berlaku sama, pada pasal 18.6.5.1 kekuatan M_{pr} ujung bawah dan atas pada balok diasumsikan menahan gaya yang sama, dengan persamaan sebagai berikut:

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

dimana:

$$a_{pr} = \frac{A_s (1,25 f_y)}{0,85 f_c' b}$$

l_n = Jarak bersih kolom

f) Perhitungan Kapasitas Kuat Geser Kolom

Untuk menentukan kuat geser perlu telah diisyaratkan pada SNI 2847:2019 pasal 22.5.1, sebagai berikut:

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

Dimana:

V_u = Tulangan geser sendi palastis

$\phi = 0,75$

Dalam menentukan V_c , berdasarkan SNI 2847:2019, pasal 22.5.6.1, yaitu:

$$V_c = \frac{1}{6} \times \left[\left(1 + \frac{N_u}{14 A_g} \right) \right] \times \sqrt{f'_c} \times h \times d$$

Keterangan:

N_u = Gaya aksial kolom terkecil (KN)

A_g = Luas Penampang Kolom

d = Tinggi efektif kolom

= h kolom - selimut beton - d_s - $d_b/2$

d_s = Diameter tulangan transversal

d_b = Diameter tulangan longitudinal

Jika kebutuhan $V_s > 0$, maka dapat diperhitungkan kebutuhan geser kolom sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 22.5.10.5.3, sebagai berikut:

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

Selain itu, A_v min perlu dihitung jika diperlukan tulangan geser, sesuai dengan pasal 10.6.2.1, sebagai berikut:

$$\frac{A_v}{s} \min_1 = 0,062 \sqrt{f'_c} \frac{b}{f_y}$$

$$\frac{A_v}{s} \min_2 = 0,35 \frac{b}{f_y}$$

Persyaratan memenuhi jika $A_{sh}/s \geq A_v/s$, $A_v \min_1$ dan $A_v \min_2$.

Keterangan:

A_v = Jika sengkang persegi, maka A_v luas efektif kaki tulangan atau kawat spasi (s) (pasal 22.5.10.5.5). Jika sengkang lingkaran atau spiral, A_v adalah dua kali luas tulangan atau kawat dengan spasi s (pasal 22.5.10.5.6).

s = Jarak spasi longitudinal atau tulangan geser

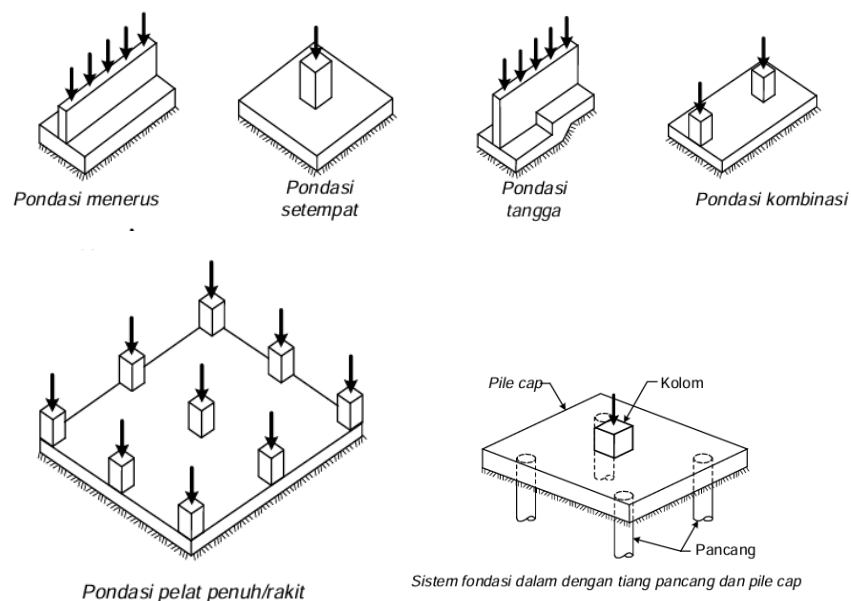
f_y = Tegangan leleh tulangan transversal (Mpa)

d = Tinggi efektif kolom

Jika $V_s < 0$, maka hanya perlu memenuhi syarat *confinement*

2.7. Struktur bawah

Pondasi adalah struktur yang berada dibagian paling bawah suatu bangunan. Berperan menyalurkan gaya dari elemen struktur atas ke tanah yang paling keras. berdasarkan kondisi tanah serta beban yang ditanggung oleh struktur, pondasi dapat dibedakan berdasarkan kedalamannya seperti pondasi dangkal dan pondasi dalam. Berikut contoh gambar pondasi dangkal dan dalam berdasarkan SNI 2847:2019.



Gambar 2. 13 Tipe-Tipe Pondasi Dangkal dan Dalam
(Sumber: SNI 2847:2019)

Menurut ketentuan SNI 1726:2019 untuk kategori desain seismik D,E,F struktur dengan pondasi dangkal atau dalam harus dirancang dengan mempertimbangkan

beberapa hal seperti ketahanan terhadap gaya gempa, interaksi dengan tanah, dan penggunaan material, hal ini sesuai dengan pasal 18.13:

- 1) Sesuai dengan pasal 18.13.4.5 yaitu, panjang tulangan transversal yang dipasang pada tiang pancang beton pracetak harus cukup agar terjaga kekuatan dan kestabilannya. serta untuk mencegah adanya perbedaan pada ujung tiang setelah pemasangan.
- 2) Pada pasal 18.13.4.6 yaitu, pile cap dan struktur perlu dirancang agar mampu menahan beban pada tiang pondasi yang miring, hal tersebut juga dilakukan agar dapat mengetahui kerusakan yang serius pada titik pertemuan pondasi miring.

Teori plastisitas diperlukan dalam menganalisis kapasitas dukung tanah yang menganggap tanah bersifat plastis (Fahmi, 2022). Berikut persamaan dalam daya dukung tanah yang dikembangkan oleh Reese dan Wright (1997).

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Keterangan:

Q_u = Daya dukung ultimate tiang (ton)

Q_p = Daya dukung ultimate ujung tiang (ton)

Q_s = Daya dukung ultimate selimut tiang (ton)

2.7.1. Pondasi Bored Pile

Pondasi bored pile biasanya digunakan pada jenis tanah yang padat dan stabil. Proses pemasangan pondasi ini dilakukan dengan cara melakukan pengeboran tanah terlebih dahulu, selanjutnya dipasang tulangan besi dan pengecoran beton. Jika tanah berair, lakukan pemasangan pada casing baja agar mencegah terjadinya longsor dan akan diambil kembali saat pengecoran beton (Rahman, dkk., 2021) Penerapan bored pile dalam struktur tahan gempa membantu meningkatkan kestabilan, distribusi beban, dan fleksibilitas desain.

Kapasitas dukung pondasi bored pile harus dihitung untuk mengetahui kekuatan struktur pondasi dan tanah yang berada disekeliling pondasi, sehingga pondasi dapat menopang beban struktur yang berada diatasnya. Uji tanah yang

umum digunakan untuk menganalisis dukung tanah adalah *Uji Standard Penetration Test* (SPT) (Susanto et al., 2020).¹¹ Untuk hasil tanah yang didapat melalui uji SPT, kekuatan daya dukung tanahnya dapat dianalisis dengan metode Reese & wright, sebagai berikut.

1) Batas Zona Pengaruh Ujung Tiang

Panjang zona tinjauan diatas dan dibawah ujung tiang dihitung berdasarkan diameter tiang (D).

Batas atas ujung tiang = $8 \times D$

Batas bawah ujung tiang = $4 \times D$

2) Nilai rata-rata N-SPT ujung tiang

Nilai N-SPT rata-rata pada daerah ujung dihitung menggunakan persamaan rerata zona pengaruh :

$$N_{spt} = \frac{\sum N_{zona}}{n}$$

Dimana :

N_{spt} = Nilai rata-rata zona ujung tiang

$\sum N_{zona}$ = Jumlah total nilai N-SPT 8D dan 4D

n = Jumlah titik lapisan yang dihitung

3) Nilai kohesi tanah

Hubungan korelasi empiris anantara nilai N-SPT rerata dengan kohesi tak terdrainase (C_u) dinyatakan dalam persamaan :

$$C_u = \frac{2}{3} \times N_{spt} \times g$$

C_u = Kohesi tanah terdrainase (kN/m²)

N_{spt} = Nilai N-SPT rata-rata terhitung

g = Percepatan gravitasi

4) Daya dukung ujung tiang

$$Q_p = q_p \cdot A$$

Keterangan:

Q_p = Tahanan ujung ultimit tiang (kN)

q_p = Tahanan ujung per satuan luas (kN/m²)

A = Luas penampang tiang bor (m²)

5) Daya dukung selimut tiang

$$Q_s = f \times L \times p$$

Keterangan:

Q_s = daya dukung selimut tiang (Ton)

f = gesekan selimut tiang (Ton/m²)

L = Panjang tiang (m)

p = keliling penampang tiang (m)

6) Daya dukung ultimate tiang

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

Keterangan:

Q_u = Kapasitas dukung ultimit tiang

Q_p = tahanan ujung ultimit tiang

Q_s = Tahanan gesek selimut tiang

7) Kapasitas Kelompok Tiang & Efisiensi

Dalam menghitung efisiensi kelompok tiang, digunakan metode menurut *Converse-Labarre Formula* dengan persamaan:

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

Keterangan:

E_g = Efisiensi kelompok tiang

m = Jumlah baris tiang

n = Jumlah tiang dalam satu baris

$\theta = \tan^{-1}(d/s)$ dalam derajat

s = Jarak ke pusat tiang

d = Diameter tiang

8) Menentukan kapasitas izin kelompok tiang

Untuk menghitung kapasitas izin kelompok tiang, digunakan persamaan berikut.

$$Q_g = E_g \times n \times Q_{all}$$

Keterangan:

Q_g = Kapasitas izin kelompok tiang

E_g = Efisiensi kelompok tiang

n = Jumlah tiang

Q_{all} = Daya dukung izin

2.8.2. Pile Cap

Pile cap berfungsi sebagai elemen penghubung antar setiap tiang pondasi sebelum kolom struktur didirikan diatas nya. Fungsi utama pada pile cap untuk memastikan keakuratan kolom berada tepat di titik pusat sentris, sehingga beban yang tersalurkan dapat terdistribusi secara merata. Perencanaan pada pile cap pada praktiknya direncanakan sesuai dengan SNI 2847:2019 sebagai berikut:

a) Analisis Gaya Geser Satu Arah Pile Cap

Pada analisis pile cap diamsusikan reaksi tiang bekerja sebagai beban terpusat yang bekerja pada titik pusat penampang tiang. Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 13.4.2.2, analisis momen dan gaya geser terfaktor (V_u) berdasarkan distribusi reaksi tiap tiang. Nilai analisis tegangan aksial (σ):

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

Perhitungan nilai gaya geser efektif (G') sebagai panjang area pembebanan yang efektif untuk memikul gaya geser, dihitung dengan persamaan berikut:

$$G' = L - \left(\frac{\text{Lebar pile cap}}{2} + \frac{\text{Lebar kolom}}{2} + d \right)$$

Analisis gaya geser terfaktor (V_u) dihitung dengan mengalikan tegangan aksial area pile cap yang dipengaruhi gaya geser, dengan persamaan berikut:

$$V_u = \sigma + \text{Lebar Pile cap} + G'$$

Keterangan:

V_u = Gaya geser pile cap (kN)

σ = Tegangan aksial (Mpa)

A = Luas penampang pile cap (m²)

P = Gaya tekan pada kolom (kN)

G' = Pembebanan pada daerah untuk geser penulangan satu arah

Cek kapasitas geser penampang sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 13.4.2.3 dengan syarat kapasitas geser rencana harus lebih besar atau sama dengan gaya geser terfaktor.

$$\phi V_c = \phi \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \sqrt{f'_c}}{6} \right) \cdot b_w \cdot d$$

$$\phi V_c > V_u$$

b) Analisis Gaya Geser Dua Arah

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.6.5.2, nilai kuat geser dua arah (V_c) diperhitungkan dengan nilai minimum dari tiga persamaan yang ada. Analisis ini dilakukan sebagai kontrol keamanan untuk mencegah kegagalan pada pile cap.

1) Persamaan 1: $0,33 \lambda \times \sqrt{f'_c}$

2) Persamaan 2: $0,17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \times \lambda \sqrt{f'_c}$

3) Persamaan 3: $0,083 \times \left(2 + \frac{a_s \times d}{b_o} \right) \times \lambda \sqrt{f'_c}$

Panjang daerah kritis (B') dihitung dengan persamaan:

$$B' = b \text{ kolom} + d$$

Keliling kritis (b_0), merupakan akumulasi dari empat sisi area kritis yang mengelilingi sisi kolom:

$$B_0 = 4 \times B'$$

Keterangan:

λ = Faktor modifikasi beton

β = Rasio sisi Panjang terhadap sisi terpendek pondasi

α_s = Koefesien posisi kolom

= Kolom interior (40)

= Kolom tepi (30)

= Kolom sudut (20)

b_0 = Keliling penampang kritis pile cap (mm)

d = Tinggi efektif pile cap (mm)

B' = Panjang penampang kritis

Gaya geser dua arah (V_u) pada pile cap harus di kontrol terhadap kapasitas kuat geser beton rencana (ϕV_c). Nilai V_u ditentukan dengan persamaan berikut:

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

c) Analisis Penulangan Lentur

Mendesain tulangan lentur pada pile cap berdasarkan SNI 2847:2019 sebagai berikut:

1) Perhitungan Momen Ultimate (M_u)

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

2) Koefesien Tahanan (R_n):

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

3) Rasio tulangan (ρ):

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

4) Luas tulangan:

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

$$A_s \text{ min} = 0,0018 \times b \times h$$

Syarat:

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

2.8.3. Tie Beam

Tie beam sendiri mengikat struktur bawah berupa pile cap menjadi satu kesatuan monolit yang kaku, hal ini bertujuan agar struktur pada bangunan memiliki ketahanan yang lebih baik saat menerima beban lateral / gempa. Berikut ketentuan teknis dalam perencanaan tie beam pada SNI 2847:2019 sebagai berikut:

a) Analisis Distribusi Tegangan Beton

Koefesien distribusi tegangan beton (β_1) dalam analisis penampang beton bertulang berfungsi untuk menentukan kedalaman blok tekan ekuivalen. Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.2.2.4.3 dalam menentukan nilai β_1 dilakukan berdasarkan kuat tekan beton (f'_c).

$$\text{Jika, } 17 \leq f'_c \leq 28 \text{ maka } \beta_1 : 0,85$$

$$\text{Jika, } 28 < f'_c < 55 \text{ maka } \beta_1 : 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7}$$

$$\text{Jika, } f'_c \geq 55 \text{ maka } \beta_1 : 0,65$$

b) Perhitungan Gaya Aksial Tie Beam

Analisis perhitungan gaya aksial tie beam dilakukan untuk menentukan gaya tarik atau gaya tekan minimal yang harus di tahan oleh tie beam sesuai dengan SNI 1726:2019. Tie beam harus didesain agar mampu menahan gaya tarik atau tekan minimum sebesar 10% dari beban aksial kolom yang dipikulnya. Hal tersebut sesuai dengan persyaratan pasal 7.13.6.2 sebagai berikut:

$$P_u = 0,1 \times S_{DS} \times P_g$$

Dimana:

P_g = hasil dari gaya aksial analisis kolom dari gaya gravitasi

c) Perhitungan Gaya Dalam dan Penurunan Tie Beam atau *Differential Settlement*

Analisis pada perhitungan ini bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan pada struktur tie beam akibat adanya perbedaan penurunan (*differential settlement*) pada antar fondasi. Hal ini berdasarkan SNI 8460:2017 pasal 9.2.4.3 sebagai berikut:

$$\Delta = \frac{Ln}{300}$$

E_c (modulus elastisitas) merupakan nilai kekakuan pada beton. Semakin tinggi nilai mutu pada beton (f'_c), maka semakin kaku balok mengacu pada SNI 2847:2019 pasal 19.2.2 dengan persamaan berikut:

$$4700 \times \sqrt{f'_c}$$

Tie beam akan menerima gaya tambahan akibat deformasi apabila terjadi penurunan tidak merata yang terjadi pada fondasi. Besarnya gaya dalam yang dihasilkan bergantung pada nilai kekakuan betron (E_c) dan inersia penampang (I_g) dari tie beam. Berikut merupakan persamaan dalam menghitung momen (M_{Diff}) dan gaya geser (V_{Diff}).

$$M_{Diff} = \frac{6.E_c.I_g.\Delta}{Ln^2}$$

$$V_{Diff} = \frac{12.E_c.I_g.\Delta}{Ln^3}$$

Keterangan:

M_{Diff} = Momen daerah tumpuan (kN m)

V_{Diff} = Gaya geser (kN)

E_c = Modulus lastisitas

I_g = Inersia penampang

$$= \frac{1}{12} \times b \times h^3$$

d) Perhitungan Gaya Dalam Akibat Beban Gravitasi (g)

Analisis pada perhitungan ini dilakukan untuk memperhitungkan gaya dalam maksimal (*ultimate*) akibat beban gravitasi (berat sendiri balok dan beban dinding). Nilai gaya dalam yang diperhitungkan ini digunakan sebagai

parameter dalam perancangan tulangan struktur. Beban merata dinding pada tie beam (Q_{SDL}), dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_{SDL} = \text{Berat jenis dinding} \times h \text{ lantai}$$

Beban merata akibat berat sendiri pada tie beam (Q_D), dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_D = \text{Berat jenis beton} \times h \times b$$

Beban merata ultimate pada tie beam (Q_u) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_u = 1,4 \times (Q_{DL} + Q_{SDL})$$

Momen ultimate dan gaya geser dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Mu tumpuan} = - \frac{Q_u \times L n^2}{12}$$

$$\text{Mu lapangan} = \frac{Q_u \times L n^2}{24}$$

$$\text{Vu tumpuan} = \frac{Q_u \times L n}{2}$$

$$\text{Vu lapangan} = \frac{Q_u \times L n^2}{24}$$

e) Analisis Perhitungan Penulangan Lentur

Perhitungan tulangan lentur (longitudinal) pada tie beam terdiri dari perhitungan tulangan lentur daerah tumpuan dan lapangan pada tekan dan tarik sesuai dengan SNI 2847:2019. Adapun rumus untuk menentukan jarak bersih antar tulangan (x):

$$X = \frac{b - 2ds - 2d - n \times db}{n - 1}$$

Keterangan:

ds = Diameter tulangan transversal

d = Tinggi efektif tie beam

N = Jumlah tulangan longitudinal

db = Diameter tulangan longitudinal

Kontrol syarat jarak bersih tulangan, sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 25.2.1 dengan persamaan berikut:

$$X \geq \text{nilai db tau 25 mm}$$

Menentukan kebutuhan tulangan dengan luas minimum yang diperhitungkan sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 9.6.1.2. As yang dihitung harus lebih besar nilai nya dari luasan minimum dengan persamaan sebagai berikut.

$$As \text{ Pasang} = n \times \frac{\pi}{4} \times db^2$$

$$As \text{ min 1} = \frac{\sqrt{f'c}}{4 \times fy} b \times d$$

$$As \text{ min 2} = \frac{1,4}{4 \times fy} b \times d$$

Keterangan:

Fy = Tegangan leleh tulangan baja (Mpa)

b = Lebar *tie beam* (mm)

d = Tinggi efektif *tie beam* (mm)

Analisis kapasitas lentur (Mn) bertujuan untuk memastikan kekuatan momen nominal pada penampang mampu dalam memikul momen terfaktor (Mu), dengan memperhitungkan nilai blok tekan beton (α) sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 22.2.2.4.1 sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{As \times fy}{0,85 \times f'c \times b}$$

$$Mn = As \times fy \times (d - \alpha/2)$$

Perhitungan nilai regangan beton (ϵ_s) berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.2.2.1 beton juga memperhitungkan jarak antara serat tekan terjauh dengan sumbu netral (c) dengan persamaan sebagai berikut.

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

Dimana perhitungan nilai (c) dengan persamaan berikut:

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

Kapasitas gaya dalam *tie beam* dihitung berdasarkan perbandingan antara kapasitas momen nominal tereduksi (ϕM_n) dan momen *ultimate* (M_u). Nilai ϕ koefisien berdasarkan SNI 2847:2019 tabel 21.2.2. Untuk nilai momen *ultimate* akibat beban gravitasi dan momen yang timbul dari *differential settlement*. Syarat desain dinyatakan sebagai berikut:

$$\phi M_n \geq M_u$$

f) Analisis Perhitungan Penulangan Geser Tie Beam

Perhitungan penulangan geser (transversal) pada tie beam dilakukan untuk menjamin struktur dapat menahan gaya geser dengan syarat kapasitas geser nominal tereduksi (ϕV_n) harus melebihi gaya geser *ultimate* (V_u). Faktor reduksi tersebut sesuai dengan pasal 12.5.3.2.

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

Dimana:

n = jumlah kaki

Batas nilai spasi maksimum, berdasarkan SNI 2847:2019 pada tabel 9.7.6.2.2 sebagai berikut.

Tabel 2. 28 Spasi Maksimum Tulangan Geser

V_s	Jarak Maksimum Tulangan Transversal (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)

Kapasitas tulangan geser (V_s) untuk memastikan tie beam mampu menahan gaya geser melalui tulangan transversal, berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.5.10.5.3 kekuatan tulangan geser terhadap kapasitas tie beam dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_s = \frac{A_v \cdot F_{yt} \cdot d}{s}$$

Keterangan:

- A_v = Luas tulangan transversal
 F_{yv} = Tegangan leleh tulangan transversal (Mpa)
 d = Tinggi efektif *tie beam*
 s = Jarak tulangan transversal rencana

Berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.5.1.2 untuk membatasi risiko nilai keruntuhan tekan diagonal pada beton, ditetapkan batas kekuatan geser sebagai berikut:

$$V_{s, \max} = 0,66 \times \sqrt{f'_c} \times b_w \times d$$

Komponen beton non prategang memiliki kontribusi alami dalam menahan gaya geser (V_c), berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 22.5.5.1:

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

Cek kapasitas tulangan geser:

$$\phi V_n \geq V_u / \phi$$

2.8. Pemodelan 3D

Bentuk 3D merupakan perwujudan objek yang mempunyai panjang, lebar, dan tinggi. Model 3D dibuat dengan menggunakan teknik penggambaran berbasis koordinat pada tiga sumbu utama x (horizontal), sumbu y (vertikal), dan z (kedalaman). Model 3D merupakan perkembangan dari model 2D dengan menggunakan data geometri tiga dimensi untuk membentuk gambar (Fauzi, 2019).

Memfaatkan Building Information Modelling (BIM) pada tahap *Clash Detection* saat pemodelan 3D dapat menjaga keakuratan serta meminimalkan adanya kesalahan. *Clash Detection* adalah proses manajemen proyek konstruksi menggunakan BIM untuk mengidentifikasi dan menyelesaikan benturan atau konflik antar elemen desain sebelum konstruksi dimulai. Benturan ini terjadi ketika

dua atau lebih elemen bangunan, seperti pipa, saluran listrik, atau struktur, menempati ruang yang sama dalam model 3D, yang dapat menyebabkan masalah di lapangan (Rizki et al., 2023).

Dengan berkembangnya BIM di bidang konstruksi dan untuk mendukung implementasi era revolusi industri 4.0 dengan peningkatan penggunaan teknologi dan informasi, diperlukannya perencanaan yang mengeksplorasi pemodelan bangunan menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis BIM, yaitu *Autodesk Revit*.

2.9. Perencanaan Anggaran Biaya

2.9.1. Quantity Take Off (QTO)

Quantity Take Off (QTO) merupakan langkah penting dalam memperkirakan kuantitas pekerjaan yang harus dilakukan dan diukur sebelum biaya pekerjaan dapat ditentukan. QTO dapat dilakukan secara manual maupun elektronik tergantung pada pilihan dan alat yang tersedia untuk memperkirakan kuantitas (Pratama & Witjaksana, 2022).

Perhitungan QTO dengan menggunakan *Microsoft Excel* yang sesuai dengan gambar *Autocad*, perhitungan dilakukan secara langsung dengan menghitung elemen bangunan seperti volume dan panjang. Dalam penyusunan QTO diperlukan suatu teknologi yang efisien dan akurat, untuk mengurangi kesalahan seperti kesalahan memasukan data dan kesalahan menghitung, selain itu proses dalam pengerjaan QTO juga sangat memakan waktu (Ramdani, 2022).

Autodesk Revit adalah aplikasi berbasis *Building Information Modelling* (BIM) yang dapat dengan baik menganalisis QTO. *Revit* mampu menghitung volume lebih cepat dibandingkan dengan metode manual, sehingga jika terjadi perubahan desain akan lebih efisien untuk meninjau QTO kembali. Namun, pembuatan model di *Revit* membutuhkan durasi panjang dan harus dilakukan dengan cermat agar hasilnya akurat dan konsisten (Apriansyah, 2021).

2.9.2. Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan perhitungan biaya proyek dengan memperkirakan biaya setiap komponen proyek, dan perlu memperhatikan durasi pekerjaan. RAB memiliki peran yang krusial dalam pelaksanaan proyek, walaupun dalam hasilnya RAB tidak menghasilkan sepenuhnya akurat (Mokolensang et al., 2021).¹⁵ Saat sebuah perusahaan mengikuti tender proyek, maka harus menyusun RAB yang digunakan sebagai acuan saat perusahaan memenangkan tender. Menurut Bambang Junaidi (2019), tahapan dalam penyusunan RAB adalah sebagai berikut.

1) Membuat Analisis Harga Satuan Pekerjaan

Analisis harga satuan pekerjaan mencakup beberapa hal, yaitu:

- a) Anggaran yang disusun didasarkan harga bahan/material terbaru yang ada di pasar.
- b) Setiap jenis pekerjaan membutuhkan koefisien bahan untuk menunjukkan jumlah material yang diperlukan.
- c) Untuk melaksanakan pekerjaan konstruksi hingga akhir, biaya tenaga kerja persatuan perlu dihitung sesuai dengan kuantitas tenaga kerja.
- d) Setiap jenis pekerjaan membutuhkan faktor atau koefisien tenaga untuk menggambarkan jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan.
- e) Dalam penyusunan anggaran untuk menyelesaikan pekerjaan, dibutuhkan biaya sewa alat yang berlaku di pasar.
- f) Setiap jenis pekerjaan membutuhkan koefisien alat yang menunjukkan jumlah alat yang diperlukan.

2) Memasukkan Analisa Harga Satuan

Dalam menghitung biaya yang dibutuhkan untuk seluruh pekerjaan, harus dikalikan dengan harga satuan volume pekerjaan. Maka, perlu memasukan hasil perhitungan harga satuan ke dalam rincian pekerjaan (*Bill of Quantity*).

3) Proses Penyusunan RAB

Bertujuan untuk memperoleh jumlah biaya yang dibutuhkan yang untuk menyelesaikan seluruh kegiatan proyek dengan menghitung detail anggaran biaya. Menurut Mokolensang dkk (2021), komponen RAB terdiri dari:

a) Biaya langsung (*Direct Cost*) adalah biaya yang memiliki keterkaitan langsung dengan produk. contohnya:

1. Bahan produksi (bahan baku)
2. Biaya tenaga kerja langsung yang langsung terkait dengan proses produksi
3. Iklan
4. Biaya angkut

b) Biaya tidak langsung (*Indirect Cost*) adalah biaya yang rumit dikaitkan secara langsung dengan item produksi dan sulit ditelusuri secara presisi dengan elemen biaya. contohnya:

1. Depresiasi (biaya yang tak terelakkan atau pasti dialami)
2. Biaya perlindungan
3. Biaya daya listrik
4. Biaya tidak langsung yang mencakup biaya produksi, pemasaran, dan administrasi.

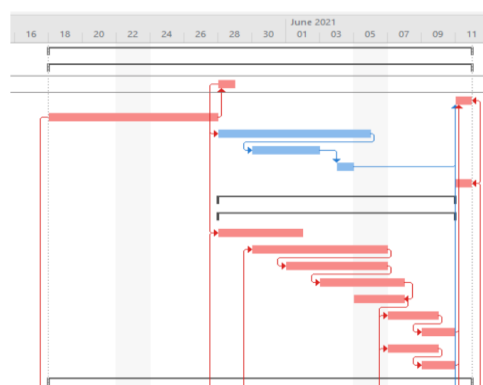
2.10. Penjadwalan

Penjadwalan proyek adalah rencana rinci yang menunjukkan kapan dan bagaimana suatu proyek akan mencapai hasil yang diharapkan. Jadwal ini digunakan sebagai alat untuk berkomunikasi, mengelola ekspektasi, dan memantau hasil kerja pelaksanaan proyek. Setelah menentukan sistem penjadwalan yang dilakukan oleh tim pengelola proyek, data penting seperti aktivitas, jangka waktu, penanggalan, sumber daya, keterikatan, dan batasan akan dimasukkan ke dalam perencanaan waktu agar menghasilkan suatu sistem rancangan penjadwalan, sehingga menghasilkan suatu penjadwalan dalam proyek (Luth & Abma, 2024).

Penjadwalan proyek harus dilakukan dengan baik agar lebih mudah dikendalikan dan selesai dengan tepat waktu. Inilah yang menjadi alasan mengapa konsep BIM digunakan sebagai solusi teknologi untuk mengoptimalkan seluruh proses konstruksi. Pada perencanaan ini, penjadwalan proyek akan diintegrasikan dengan software *Microsoft Project* dan *Autodesk Naviswork*.

2.11.1. Gantt Chart

Gantt Chart merupakan diagram berbentuk bagan batang (*Bar Chart*) yang diterapkan dalam memaparkan rencana kerja dan penjadwalan pelaksanaan dalam sebuah proyek konstruksi. Grafik ini menunjukkan kapan sebuah tugas dimulai dan batas waktu dalam menyelesaikannya (Armela et al., 2022). Dengan *Gantt Chart*, kemajuan progress bobot pekerjaan dan waktu pelaksanaan suatu proyek dapat diproyeksikan (Sulistia & Agustina, 2023). Namun, *Gantt Chart* tidak bisa secara jelas menunjukkan hubungan antar aktivitas dalam proyek jika waktunya dipercepat atau diperlambat yang berakibat pada aktivitas proyek lainnya. Dalam hal ini diperlukan modifikasi pada *Gantt Chart* untuk menutupi kekurangan tersebut (Fazis & Tugiah, 2022).



Gambar 2. 14 Contoh Gantt Chart Pada Penjadwalan Proyek

(Sumber: Armela, dkk., 2022)

2.11.2. Kurva S

Dalam suatu proyek konstruksi umumnya sering ditemukan jenis penjadwalan berbentuk *Curve-S* (Kurva S) yang digunakan untuk memproyeksikan kemajuan

2.11. Penelitian Terdahulu

Tabel 2. 29 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Metode/ Software yang digunakan	Hasil
1.	Yogi Hardianto, Ilham Muhammad Islam 2021	Etabs, Tekla Structures Menganalisis pembebanan struktur menggunakan Etabs, perencanaan Dimensi dan penulangan, pemodelan 3D dengan Tekla, penyusunan RAB dan penjadwalan.	Hasil pemodelan 3D, 4D, dan 5D yang terintegrasi BIM
2.	Novrial Alexander Kristian Surbakti (2024)	Analisis pembebanan, preliminary design, desain penulangan, pemodelan, dan Quantity Take-Off, menggunakan SAP 2000, SP Column, dan Tekla Structures	Model 3D dan 4D berbasis BIM
3.	Huda Dwi Wuryanto, Revangga Prima P (2022)	Pengumpulan data, studi pustaka, tafsiran dimensi pembebanan, perhitungan mekanika struktur, perhitungan struktur, cek kekakuan, cek ulang dimensi	Analisis atap, pelat, balok, kolom, dan struktur bawah dengan SAP 2000.