

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Building Information Modeling (BIM)*

Building Information Modeling (BIM) merupakan pendekatan berbasis teknologi digital yang mengintegrasikan representasi fisik dan fungsional bangunan dalam sebuah model virtual yang digunakan sepanjang siklus hidup proyek, mulai dari tahap perencanaan, pelaksanaan, hingga pengelolaan. Melalui model ini, para pemangku kepentingan seperti perencana, konsultan, kontraktor, dan pemilik proyek dapat berkolaborasi secara terkoordinasi serta melakukan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih akurat dan efisien (Succar & Poirier, 2020; Abubakar et al., 2022). Pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan kualitas komunikasi antar disiplin, mengurangi potensi kesalahan desain dan pelaksanaan, serta memperbaiki kinerja proyek dari segi waktu, biaya, dan mutu (Sacks et al., 2020; Olanrewaju et al., 2023).

Seiring dengan perkembangan industri konstruksi, kebutuhan terhadap penerapan BIM terus meningkat, khususnya dalam mendukung interoperabilitas sistem, penerapan prinsip konstruksi berkelanjutan, serta standarisasi tingkat kematangan BIM dalam proyek pembangunan (ISO 19650, 2021; Hosseini et al., 2022). Di Indonesia, penerapan BIM diperkuat melalui kebijakan pemerintah, salah satunya Peraturan Menteri PUPR Republik Indonesia Nomor 22/PRT/M/2018, yang mewajibkan penggunaan BIM pada pembangunan gedung tidak sederhana, terutama bangunan dengan luas dan jumlah lantai tertentu, sebagai upaya untuk meningkatkan efektivitas perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian proyek konstruksi.

2.1.1 Klasifikasi Dimensi *Building Information Modelling* (BIM)

Perkembangan dimensi BIM mengikuti evolusi pemodelan dari gambar manual hingga pemodelan 3D. Penambahan dimensi, seperti 4D untuk waktu dan 5D untuk biaya, bertujuan memperjelas informasi dalam model. Namun, karena belum ada kesepakatan internasional terkait dimensi lanjutan, standar lebih menekankan kejelasan kebutuhan informasi dibandingkan penggunaan istilah dimensi seperti 5D, 6D, atau 7D (Hamil, 2021).

1. 2D BIM

BIM 2D adalah model geometrik digital pada sumbu X dan Y yang dilengkapi informasi pendukung. Pemodelan ini digunakan pada sistem CAD awal untuk menghasilkan denah dan potongan secara lebih cepat dan akurat dibandingkan penggambaran manual.

2. 3D BIM

BIM 3D merupakan model geometrik digital yang tersusun atas sumbu X, Y, dan Z serta dilengkapi dengan informasi pendukung lainnya.

3. 4D BIM

BIM 4D mengintegrasikan informasi waktu ke dalam model untuk memvisualisasikan urutan pekerjaan konstruksi. Pendekatan ini penting bagi kontraktor karena meningkatkan pemahaman tahapan pelaksanaan serta memperkuat koordinasi antara tim perencana dan pelaksana melalui penggunaan model 3D bersama.

4. 5D BIM

BIM 5D umumnya diartikan sebagai integrasi informasi biaya ke dalam model. Dalam penerapannya, kebutuhan biaya harus didefinisikan secara jelas, seperti jenis biaya yang digunakan, tahap perhitungan, pihak yang bertanggung jawab, serta metode pengukuran yang diterapkan.

5. 6D BIM

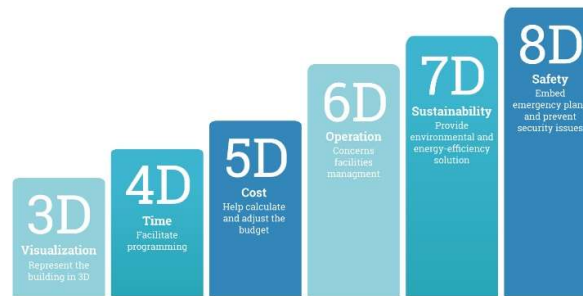
BIM 6D sering dikaitkan dengan informasi manajemen fasilitas, meskipun belum ada kesepakatan industri. Oleh karena itu, kebutuhan informasinya perlu didefinisikan secara jelas.

6. 7D BIM

BIM 7D oleh sebagian pihak dikaitkan dengan integrasi informasi keberlanjutan. Namun, seperti pada BIM 6D, jenis dan ruang lingkup data yang dibutuhkan harus ditetapkan secara jelas.

7. 8D BIM

BIM 8D oleh sebagian pihak diartikan sebagai integrasi informasi keselamatan dan kesehatan kerja. Oleh karena itu, jenis dan ruang lingkup data yang diperlukan harus ditentukan secara jelas.



Gambar 2. 1 Klasifikasi Dimensi BIM

(Sumber : Google)

2.1.2 *Software* Perencanaan dengan Konsep BIM

Pada tahap perencanaan, *software* BIM digunakan sebagai sarana utama koordinasi antar disiplin, meliputi arsitektur, struktur, serta sistem mekanikal, elektrikal, *plumbing*. Pemodelan tiga dimensi memungkinkan visualisasi desain secara menyeluruh dan membantu mengidentifikasi potensi konflik sejak dini, sehingga risiko perubahan dan kesalahan pada tahap konstruksi dapat dikurangi (Alashwal et al., 2021).

1. Autodesk – Revit

Penelitian ini menghitung jumlah pekerjaan struktur yang diperlukan pada proyek pembangunan Gedung SMPN 15 di Jakarta Selatan menggunakan *software* BIM Autodesk Revit. Autodesk Revit memungkinkan perencanaan bangunan dari aspek struktur, arsitektur, dan Mechanical Electrical Plumbing (MEP) dalam bentuk 2D dan 3D secara terintegrasi. Model yang telah dibuat selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk memperoleh data volume material,

volume pekerjaan, serta penjadwalan. Penggunaan *Autodesk Revit* membantu meningkatkan efisiensi perhitungan Quantity Take Off dan mendukung penyusunan penjadwalan proyek yang lebih rinci (Fadhilah et al., 2022).



Gambar 2. 2 Autodesk Revit

(Sumber : Autodesk.com)

2. Autodesk – Naviswork Manager

Autodesk Navisworks Manage merupakan perangkat lunak yang mendukung proses koordinasi dan evaluasi proyek secara menyeluruh dengan mengintegrasikan data desain dari berbagai disiplin ke dalam satu model BIM terpadu. Aplikasi ini memiliki fitur deteksi benturan (clash detection) dan manajemen konflik yang berfungsi untuk mengidentifikasi potensi permasalahan sejak tahap perencanaan, sehingga dapat mengurangi risiko keterlambatan dan pekerjaan ulang. Selain itu, Navisworks juga mendukung simulasi BIM 4D dan 5D melalui penggabungan model dengan data penjadwalan dan biaya proyek (Dzakiroh et al., 2023).



Gambar 2. 3 Naviswork Manage

(Sumber : Autodesk.com)

3. Microsoft Project

Microsoft Project digunakan sebagai perangkat lunak pengelolaan administrasi proyek yang berfungsi untuk perencanaan, pengendalian, pemantauan, serta pelaporan kegiatan proyek. Melalui Microsoft Project, jalur kritis (Critical Path Method) dapat ditentukan dan divisualisasikan dalam bentuk Gantt chart, termasuk pengaturan durasi pekerjaan, hubungan antar aktivitas, penetapan milestone dan constraint, serta pemantauan perkembangan jadwal proyek guna mencapai target yang telah direncanakan (Dzakiroh et al., 2023).



Gambar 2. 4 Microsoft Project

(Sumber : Microsoft.com)

4. ETABS

Perangkat lunak analisis struktur yang disebut ETABS (Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems) digunakan untuk memodelkan, menganalisis, dan mendesain struktur bangunan dalam tiga dimensi. Dengan menggunakan program ini, insinyur sipil dapat melakukan evaluasi perilaku struktur terhadap beban yang bekerja, termasuk beban gravitasi dan lateral. Ini memungkinkan mereka untuk melakukan evaluasi menyeluruh atas hasil perencanaan struktur (Husein, 2024).



Gambar 2. 5 ETABS

(Sumber : Google)

5. Autodesk – AutoCAD

AutoCAD merupakan perangkat lunak CAD yang digunakan untuk menyusun gambar kerja dalam bentuk dua dan tiga dimensi. Penggunaan AutoCAD 3D membantu menampilkan bentuk bangunan secara lebih jelas sehingga memudahkan pemahaman desain serta mengurangi potensi kesalahan pada tahap perencanaan dan pelaksanaan konstruksi (Prasetyo et al., 2022).



Gambar 2. 6 AutoCAD

(Sumber : Autodesk.com)

6. SPColumn

SPColumn merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis dan merancang kolom beton bertulang melalui pendekatan diagram interaksi gaya aksial dan momen lentur, sehingga kapasitas serta keamanan kolom dapat dievaluasi secara akurat sesuai ketentuan peraturan beton bertulang. Penggunaan SPColumn memberikan hasil yang lebih efisien dan presisi dibandingkan perhitungan manual, terutama dalam perencanaan struktur

tahan gempa dan penerapan konsep strong column weak beam (StructurePoint, 2021; SNI 2847:2019).



Gambar 2. 7 SPColumn

(Sumber : Google)

2.2 Pembebanan Struktur

Sesuai dengan SNI 1727:2020, struktur gedung bertingkat harus direncanakan secara presisi agar mampu memikul total beban bangunan. Standar beban minimum yang diterapkan dalam desain ini merujuk pada ketentuan berikut:

2.2.1 Beban Mati

Beban mati dalam perencanaan struktur adalah beban permanen yang berasal dari berat seluruh elemen bangunan yang terpasang secara tetap, seperti dinding, lantai, atap, dan elemen struktural lainnya yang nilainya hampir tidak berubah selama masa operasional bangunan (Setiawan et al., 2023).

Tabel 2. 1 Daftar Beban Mati

| No. | Material | Beban (kN/m ²) |
|-----|-----------------------|----------------------------|
| 1 | Plesteran | 0,48 |
| 2 | Hebel | 1,87 |
| 3 | Partisi | 0,72 |
| 4 | Pasir (0.05) | 0,785 |
| 5 | Spesi (0.03) | 0,618 |
| 6 | Keramik | 0,167 |
| 7 | Beban MEP | 0,3 |
| 8 | Plafond | 0,088 |
| 9 | Rangka Plafond | 0,049 |
| 10 | Water Proofing (0,02) | 0,412 |

(Sumber : SNI 1727-2020)

2.2.2 Beban Hidup

Beban hidup, menurut SNI 1727:2020 (Badan Standarisasi Nasional, 2020), adalah beban yang bekerja karena aktivitas penghuni dan penggunaan suatu ruang.

Tabel 2. 2 Daftar Beban Hidup

| No. | Hunian atau Penggunaan | Beban (Kg/m ²) |
|-----|-------------------------|----------------------------|
| 1 | Ruang Kelas | 3,83 |
| 2 | Koridor Lantai 1 | 4,79 |
| 3 | Ruang Kantor | 2,4 |
| 4 | Kantin | 4,79 |
| 5 | Perpustakaan | 2,87 |
| 6 | Tangga | 4,79 |
| 7 | Lab Komputer | 4,79 |
| 8 | Lab IPA | 2,87 |
| 9 | Atap | 4,79 |
| 10 | Koridor d Atas Lantai 1 | 3,83 |
| 11 | Toilet | 2,87 |
| 12 | Dak Beton | 1,2 |
| 13 | Roof Garden | 5 |
| 14 | Mushola | 1,5 |
| 15 | Ruang Serbaguna | 1,5 |

(Sumber : SNI 1727-2020)

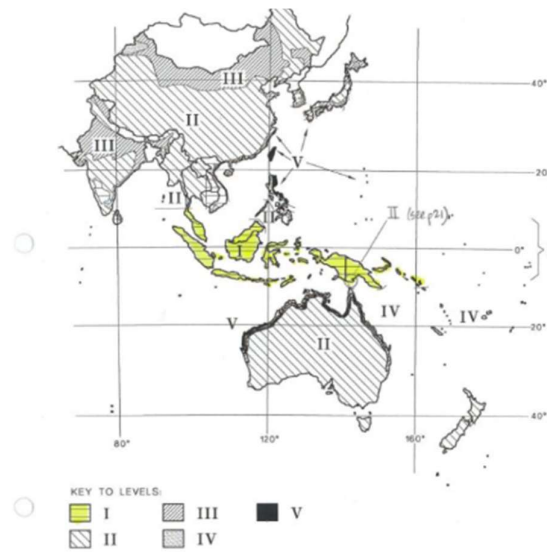
2.2.3 Beban Angin

Beban angin adalah beban lateral yang bekerja pada struktur bangunan secara horizontal karena tekanan angin. SNI 1727:2020 membahas perencanaan beban angin pada bangunan gedung dari Bab 26 hingga Bab 31. Bab ini membahas hal-hal seperti menentukan kecepatan angin rencana, kategori eksposur, dan metode analisis yang digunakan. Selama perencanaan, struktur harus memiliki kemampuan untuk menahan beban angin melalui Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) dan Komponen dan Klading (K&K) sesuai dengan persyaratan yang berlaku (Badan Standardisasi Nasional, 2020).

1. Metode sistem penahan gaya angin

Penentuan beban angin untuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) dilakukan dengan menggunakan salah satu prosedur yang ditetapkan dalam SNI 1727:2020. Pemilihan metode ini disesuaikan dengan karakteristik bangunan, seperti tinggi, bentuk, serta jenis elemen struktur yang dianalisis. Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.1.2.1, terdapat beberapa prosedur yang dapat digunakan dalam penentuan beban angin untuk SPGAU, yaitu sebagai berikut:

- a. Prosedur terarah untuk bangunan dari semua ketinggian seperti disyaratkan dalam Pasal 27 untuk bangunan memenuhi persyaratan yang disyaratkan di dalamnya;
 - b. Prosedur amplop untuk bangunan bertingkat rendah seperti disyaratkan dalam Pasal 28 untuk bangunan memenuhi persyaratan yang disyaratkan di dalamnya;
 - c. Prosedur terarah untuk perlengkapan bangunan (struktur dan peralatan bagian atap) dan struktur lainnya (seperti dinding solid berdiri bebas dan panel penunjuk solid berdiri bebas, cerobong asap, tangki, panel penunjuk terbuka, rangka terbuka bidang tunggal, dan menara rangka batang) sebagaimana disyaratkan dalam Pasal 29; atau
 - d. Prosedur terowongan angin untuk semua bangunan gedung dan struktur lain seperti disyaratkan dalam Pasal 31.
2. Parameter beban angin
- Penentuan parameter beban angin dalam perencanaan struktur dilakukan dengan mengacu pada kondisi wilayah dan karakteristik angin setempat. Salah satu acuan yang digunakan adalah peta zona kecepatan angin yang menunjukkan distribusi intensitas angin berdasarkan tingkat risiko dan kondisi geografis. Peta ini menunjukkan klasifikasi wilayah berdasarkan pengaruh angin, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan kecepatan angin rencana yang akan digunakan dalam analisis beban angin pada bangunan.



Gambar 2. 8 Peta Angin HB
(Sumber : Peta Angin HB 212-2002)

Tabel 2. 3 Tabel Kecepatan Angin Rencana (V_r) Berdasarkan Tingkat Risiko Wilayah (*Handbook Level*)

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

(Sumber : HB 212-2002)

3. Faktor Arah Angin

Faktor arah angin merupakan salah satu parameter penting dalam perhitungan beban angin yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh arah datangnya angin terhadap struktur bangunan. Nilai faktor ini ditentukan berdasarkan tipe struktur yang direncanakan sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1727:2020. Pemilihan nilai faktor arah angin yang tepat diperlukan agar beban angin yang bekerja pada struktur dapat direpresentasikan secara realistis sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Tabel 2. 4 Faktor Arah Angin

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

(Sumber : SNI 1727:2020)

4. Kategori Eksposur

Jenis eksposur dipilih untuk mengidentifikasi pengaruh kondisi kekasaran permukaan tanah terhadap distribusi tekanan angin pada bangunan. Kategori ini ditetapkan berdasarkan karakteristik lingkungan sekitar, seperti kepadatan bangunan dan hambatan permukaan lainnya. Penentuan kategori eksposur mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.7.3.

- a. Eksposur B: Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata kurang dari atau sama dengan 30 ft (9,1 m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan B, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 1.500 ft (457 m). Untuk bangunan gedung atau struktur lain dengan tinggi atap rata-rata lebih besar dari 30 ft (9,1 m), Eksposur B berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah B berada dalam arah melawan angin untuk jarak lebih besar dari 2.600 ft (792 m) atau 20 kali tinggi bangunan atau struktur, pilih yang terbesar.
- b. Eksposur C: Eksposur C berlaku untuk semua kasus di mana Eksposur B atau Eksposur D tidak berlaku.
- c. Eksposur D: Eksposur D berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah, sebagaimana ditentukan oleh Kekasaran Permukaan D, berlaku di arah melawan angin untuk jarak yang lebih besar dari 5.000 ft (1.524 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar. Eksposur D juga berlaku bilamana kekasaran permukaan tanah dekat dari situs dalam arah melawan angin adalah B atau C, dan situs yang berada dalam jarak 600 ft (183 m) atau 20 kali tinggi bangunan gedung atau tinggi struktur, pilih yang terbesar, dari kondisi Eksposur D sebagaimana ditentukan dalam kalimat sebelumnya.

5. Faktor Topografi

Faktor topografi digunakan untuk memperhitungkan pengaruh kondisi permukaan tanah, seperti adanya bukit atau tebing, terhadap peningkatan kecepatan angin pada bangunan. Pengaruh ini dinyatakan dalam bentuk faktor topografi K_{zt} yang digunakan dalam perhitungan beban angin. Penentuan nilai faktor topografi mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.8.2. Efek peningkatan kecepatan angin harus dimasukkan dalam perhitungan beban angin desain dengan menggunakan faktor K_{zt} :

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

Jika kondisi situs dan lokasi bangunan gedung dan struktur lain tidak memenuhi semua kondisi yang disyaratkan dalam Pasal 26.8.1, maka $K_{zt} = 1,0$.

6. Faktor Elevasi Permukaan Tanah

Faktor elevasi permukaan tanah digunakan untuk menyesuaikan pengaruh ketinggian lokasi terhadap densitas udara dalam perhitungan beban angin. Nilai faktor ini dinyatakan sebagai K_e dan ditentukan berdasarkan elevasi lokasi terhadap permukaan laut sesuai SNI 1727:2020 Pasal 26.9. Nilai K_e diperoleh dari Tabel 26.9-1, namun dalam perencanaan dapat diambil sebesar 1,0 untuk semua kondisi elevasi.

Tabel 2. 5 Faktor Elevasi Permukaan Tanah, K_e

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

(Sumber : SNI 1727:2020)

7. Tekanan kecepatan (K_z)

Koefisien eksposur tekanan kecepatan merupakan parameter yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh ketinggian terhadap distribusi tekanan angin pada bangunan. Nilai koefisien ini bervariasi sesuai dengan kategori eksposur dan ketinggian dari permukaan tanah. Penentuan nilai koefisien eksposur tekanan kecepatan mengacu pada SNI 1727:2020 Tabel 26.10-1,

yang menyajikan hubungan antara ketinggian dan nilai koefisien untuk masing-masing kategori eksposur.

Tabel 2. 6 Koefisien Eksposur Tekanan Kecepatan, Kh dan Kz

| Ketinggian di atas permukaan tanah | | Eksposur B | Eksposur C | Eksposur D |
|------------------------------------|-------|--------------------------|------------|------------|
| ft | m | | | |
| 0-15 | 0-4,6 | 0,57 (0,70) ^a | 0,85 | 1,03 |
| 20 | 6,1 | 0,62 (0,70) ^a | 0,90 | 1,08 |
| 25 | 7,6 | 0,66 (0,70) ^a | 0,94 | 1,12 |
| 30 | 9,1 | 0,70 | 0,98 | 1,16 |
| 40 | 12,2 | 0,76 | 1,04 | 1,12 |
| 50 | 15,2 | 0,81 | 1,09 | 1,27 |
| 60 | 18,0 | 0,85 | 1,13 | 1,31 |
| 70 | 21,3 | 0,89 | 1,17 | 1,34 |
| 80 | 24,4 | 0,93 | 1,21 | 1,38 |
| 90 | 27,4 | 0,96 | 1,24 | 1,40 |
| 100 | 30,5 | 0,99 | 1,26 | 1,43 |
| 120 | 36,6 | 1,04 | 1,31 | 1,48 |
| 140 | 42,7 | 1,09 | 1,36 | 1,52 |
| 160 | 48,8 | 1,13 | 1,39 | 1,55 |
| 180 | 54,9 | 1,17 | 1,43 | 1,58 |
| 200 | 61,0 | 1,20 | 1,46 | 1,61 |
| 250 | 76,2 | 1,28 | 1,53 | 1,68 |
| 300 | 91,4 | 1,35 | 1,59 | 1,73 |
| 350 | 106,7 | 1,41 | 1,64 | 1,78 |
| 400 | 121,9 | 1,47 | 1,69 | 1,82 |
| 450 | 137,2 | 1,52 | 1,73 | 1,86 |
| 500 | 152,4 | 1,56 | 1,77 | 1,89 |

^aGunakan 0,70 pada Pasal 28, Eksposur B, apabila $z < 30$ ft (9,1 m)
(Sumber : SNI 1727:2020)

8. Tekanan kecepatan velositas (q_z)

Nilai tekanan kecepatan (velocity pressure) ditentukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 26.10.2, dengan persamaan sebagai berikut.

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

Nilai q_z harus memenuhi ketentuan $q_z \geq 0,77$. Apabila hasil perhitungan lebih kecil dari 0,77 kN/m², maka nilai yang digunakan adalah nilai minimum sebesar 0,77 kN/m².

9. Faktor pengaruh hembusan angin (G)

Faktor pengaruh hembusan angin (G) digunakan untuk memperhitungkan efek fluktuasi kecepatan angin terhadap respons struktur. Nilai faktor ini bergantung pada karakteristik bangunan, khususnya kekakuan struktur yang direncanakan. Berdasarkan SNI 1727:2020 Pasal 26.11.1, untuk bangunan gedung dan struktur lain yang bersifat kaku, nilai faktor hembusan angin dapat diambil sebesar 0,85.

10. Koefisien tekanan internal (GC_{pi})

Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) digunakan untuk memperhitungkan pengaruh tekanan angin yang bekerja di dalam bangunan akibat adanya bukaan pada selubung bangunan. Nilai koefisien ini ditentukan berdasarkan klasifikasi ketertutupan bangunan, seperti bangunan tertutup, tertutup sebagian, atau terbuka. Penentuan nilai (GC_{pi}) mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Tabel 26.13-1.

Tabel 2. 7 Koefisien Tekanan Internal (GC_{pi})

| Klasifikasi ketertutupan | Kriteria untuk klasifikasi ketertutupan | Tekanan internal | Koefisien tekanan internal (GC_{pi}) |
|----------------------------|---|------------------|--|
| Bangunan tertutup | Ao 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 | Ao > $1,1A_{oi}$ dan Ao > terkecil dari $0,01A_g$ 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 |
| Bangunan terbuka | Setiap dinding minimal terbuka 80% | Diabaikan | 0,00 |

(Sumber : SNI 1727:2020)

11. Koefisien tekanan eksternal (C_p)

Koefisien tekanan eksternal (C_p) digunakan untuk menentukan besarnya tekanan angin yang bekerja pada permukaan luar bangunan. Nilai koefisien ini dipengaruhi oleh bentuk bangunan, orientasi terhadap arah angin, serta posisi permukaan yang ditinjau, seperti sisi angin datang (windward), sisi angin pergi (leeward), dan sisi samping. Penentuan nilai (C_p) mengacu pada ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 27.3.

Tabel 2. 8 Koefisien Tekanan Eksternal (C_p)

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

(Sumber : SNI 1727:2020)

12. Tekanan angin (p) pada permukaan Gedung

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 Pasal 27.3.1, nilai tekanan angin (p) ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Keterangan :

p = Tekanan angin desain pada permukaan (kN/m^2)

q = Tekanan kecepatan (velocity pressure) pada ketinggian z (kN/m^2)

GC_p = Koefisien tekanan eksternal (sudah termasuk faktor gust)

q_i = Tekanan kecepatan pada tinggi referensi untuk tekanan internal

GC_{pi} = Koefisien tekanan internal

2.2.4 Beban Gempa

Dalam perencanaan bangunan, beban gempa harus diperhitungkan untuk mencegah kerusakan maupun kegagalan akibat gempa bumi yang direncanakan. Beban gempa adalah gaya yang bekerja pada bangunan karena percepatan tanah yang disebabkan oleh gempa bumi. SNI 1726:2019 menetapkan standar untuk perhitungan beban gempa di Indonesia. Standar ini menggunakan spektrum respons, klasifikasi situs, kategori risiko bangunan, dan sistem struktur penahan gaya gempa untuk menentukan perencanaan ketahanan gempa. Selanjutnya, berdasarkan karakteristik dan kompleksitas bangunan, besarnya beban gempa dihitung menggunakan metode statik ekuivalen atau dinamik (Badan Standarisasi Nasional, 2019).

1. Klasifikasi jenis tanah

Parameter tanah didasarkan pada hasil penyelidikan dan pengujian tanah di lapangan. Untuk menghitung beban gempa, data Tes Penerapan Standar (SPT) digunakan. Nilai NSPT rata-rata diperoleh dengan mengikuti persyaratan yang tercantum dalam SNI 1726:2019.

Tabel 2. 9 Kelas Situs Tanah

| Kelas Situs | Vs (m/detik) | N atau Nch | Su (kPa) |
|---|---|------------|----------|
| SA (Batuan Keras) | >1500 | N/A | N/A |
| SB (Batuan) | 750-1500 | N/A | N/A |
| SD (Tanah Sedang) | 175-350 | 15-50 | 50-100 |
| SE (Tanah Lunak) | <175 | <15 | <50 |
| | Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat geser nirial $su < 25$ kPa | | |
| SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs) | Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: <ul style="list-style-type: none"> • Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah. • Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$m). • Lempung berplastis sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$). • Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $su < 50$kPa. | | |

(Sumber : SNI 1726-2019)

2. Kategori resiko gempa

Semua struktur bangunan memiliki tingkat risiko yang berbeda. Pengaruh gempa yang direncanakan terhadap struktur tersebut kemudian disesuaikan dengan faktor keutamaan gempa (I_e) sesuai dengan klasifikasi tingkat risiko bangunan.

Tabel 2. 10 Kategori Risiko Bangunan Gedung dan Non Gedung untuk Beban Gempa

| Jenis Pemanfaatan | Kategori risiko |
|--|-----------------|
| <p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan • Fasilitas sementara • Gudang penyimpanan • Rumah jaga dan struktur kecil lainnya | I |
| <p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I,III,IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perumahan • Rumah toko dan rumah kantor • Pasar • Gedung perkantoran • Gedung apartemen/ rumah susun • Pusat perbelanjaan/ mall • Bangunan industri • Fasilitas manufaktur • Pabrik | II |
| <p>Gedung dan nongedung yang memiliki risiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bioskop • Gedung pertemuan • Stadion • Fasilitas masyarakat yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas penitipan anak • Penjara • Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan nongedung tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap</p> | |

| Jenis Pemanfaatan | Kategori risiko |
|--|-----------------|
| <p>kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pusat pembangkit listrik biasa • Fasilitas penanganan air • Fasilitas penanganan limbah • Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan nongedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p> | III |
| <p>Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bangunan-bangunan monumental • Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan • Rumah ibadah • Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat • Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat • Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, tsunami, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya • Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat • Pusat pembangkit energi dan fasilitas publik lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat • Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p> | IV |

(Sumber : SNI 1726-2019)

3. Menentukan faktor keutamaan gempa

Sesuai dengan SNI 1729:2019, kategori risiko bangunan digunakan sebagai dasar untuk menentukan faktor-faktor prioritas gempa.

Tabel 2. 11 Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber : SNI 1726:2019)

4. Menentukan parameter respon spektrum percepatan gempa maksimum
Spectrum Respons desain ditunjukkan dalam gambar 3.1 dengan mengikuti ketentuan di bawah ini:

- a. Untuk periode $< T_0$, Spectrum respons percepatan desain S_a dapat menggunakan persamaan:

$$S_a = SDS (0,4 + 0,6 T T_0)$$

- b. Untuk periode $\geq T_0$ dan $\leq T_s$, spectrum respons percepatan desain $S_a = SDS$.

- c. Untuk Periode $> T_s$, spectrum respons percepatan desain, S dapat menggunakan persamaan:

$$S_a = \frac{SD1}{T}$$

Keterangan :

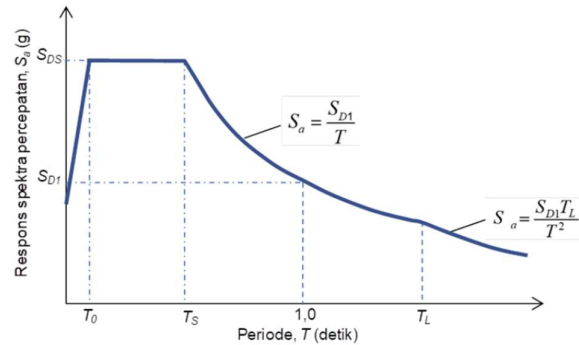
SDS = Parameter respons spectral percepatan desain pada periode pendek

SD1 = Parameter respons spectral percepatan desain pada periode 1 detik

T = Periode getar fundamental struktur

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

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



Gambar 2. 9 Spektrum Respons Percepatan
(Sumber : SNI 1726-2019)

Parameter percepatan spectral desain ditentukan dengan perumusan sebagai berikut :

$$SDS = 2/3.SMS$$

$$SD1 = 2/3.SM1$$

Sedangkan nilai SMS dan SM1 ditentukan dengan perumusan sebagai berikut

$$SMS = Fa.Ss$$

$$SD1 = Fv.S1$$

Keterangan:

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

S1 = parameter respons spectral percepatan gempa MCER terpasang untuk periode 1,0 detik

5. Menentukan faktor amplifikasi getaran Fa dan Fv
 Nilai faktor amplifikasi getaran Fa dan Fv dihitung dengan menggunakan percepatan spektral pada periode pendek ($T = 0,2$ detik atau Ss) dan periode satu detik (S1). Ini dilakukan sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

Tabel 2. 12 Tabel Koevisien Situs, Fa

| Kelas Situs | Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s | | | | | |
|----------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $S_s \leq 0,1$ | $S_s \leq 0,2$ | $S_s \leq 0,3$ | $S_s \leq 0,4$ | $S_s \leq 0,5$ | $S_s \leq 0,6$ |
| SA | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SB | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| SC | 1,3 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| SD | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| SE | 2,4 | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 0,8 |
| SF | SS(a) | | | | | |

(Sumber SNI 1726-2019)

Tabel 2. 13 Tabel Koevisien Situs, Fv

| Kelas Situs | Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCER) terpetakan pada periode 1 detik (S_i) | | | | | |
|----------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $S_i \leq 0,1$ | $S_i \leq 0,2$ | $S_i \leq 0,3$ | $S_i \leq 0,4$ | $S_i \leq 0,5$ | $S_i \leq 0,6$ |
| SA | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SB | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| SC | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,4 |
| SD | 2,4 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,8 | 1,7 |
| SE | 4,2 | 3,3 | 2,8 | 2,4 | 2,2 | 2,0 |
| SF | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) | SS(a) |

(Sumber SNI 1726-2019)

Catatan :

SSb = Situs yang memerlukan investigasi geoteknik secara spesifik serta analisis respon situs secara detail

Berdasarkan nilai SDS dan SD1 yang telah diperoleh, struktur bangunan kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori desain seismik sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

6. Menentukan kategori desain seismik (KDS)

Penentuan Kategori Desain Seismik (KDS) dilakukan berdasarkan nilai percepatan spektral desain SDS dan SD1 yang telah diperoleh sebelumnya, serta mempertimbangkan kategori risiko bangunan. Klasifikasi ini digunakan untuk menentukan tingkat ketahanan struktur terhadap pengaruh gempa dan persyaratan perencanaan struktur yang harus dipenuhi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Tabel 2. 14 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode Pendek

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

(Sumber SNI 1726-2019)

Tabel 2. 15 Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan Pada Periode 1 Detik

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

(Sumber SNI 1726-2019)

7. Menentukan struktur penahan gaya seismik

Faktor koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih sistem (Ω_0), faktor pembesaran defleksi (C_d), dan batasan tinggi sistem struktur (h_n) adalah beberapa parameter yang menentukan sistem struktur penahan gaya seismik. Tabel berikut menunjukkan nilai parameter berdasarkan jenis sistem pemikul gaya seismik yang digunakan.

Tabel 2. 16 Faktor Koefisien Modifikasi Respons, Faktor Kuat Lebih Sistem, Faktor Pembesaran Defleksi, dan Batasan Tinggi Sistem Struktur

| Sistem Pemikul Gaya Seismik | Koefisien Modifikasi Respons R^a | Faktor Kuat Lebih Sistem Ω_0^b | Faktor Pembesaran Defleksi C_d^c | Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|----|-------|-------|-------|
| | | | | Kategori Desain Seismik | | | | |
| | | | | B | C | D^e | E^e | F^f |
| A. Sistem dinding penumpu | | | | | | | | |
| Dinding geser beton bertulang khusus | 5 | 2½ | 5 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser beton bertulang biasa | 4 | 2½ | 4 | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser beton polos didetail | 2 | 2½ | 2 | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser beton polos biasa | 1½ | 2½ | 1½ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser pracetak menengah | 4 | 2½ | 4 | TB | TB | 12 | 12 | 12 |
| Dinding geser pracetak biasa | 3 | 2½ | 3 | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata bertulang khusus | 5 | 2½ | 3½ | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser bata bertulang menengah | 3½ | 2½ | 2¼ | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata bertulang biasa | 2 | 2½ | 1¾ | TB | 48 | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata polos didetail | 2 | 2½ | 1¾ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata polos biasa | 1½ | 2½ | 1¾ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata prategang | 1½ | 2½ | 1¾ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata ringan (AAC) bertulang | 2 | 2½ | 2 | TB | 10 | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata ringan | 1½ | 2½ | 1½ | 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, hn (m) ^d | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|----|----------------|----------------|----------------|
| | | | | Kategori Desain Seismik | | | | |
| | | | | B | C | D ^e | E ^e | F ^f |
| (AAC) polos biasa | | | | | | | | |
| Dinding rangka ringan kayu berpanel | 6½ | 3 | 4 | TB | TB | 20 | 20 | 20 |
| Dinding rangka ringan baja canai dingin | 6½ | 3 | 4 | TB | TB | 20 | 20 | 20 |
| Dinding rangka ringan panel geser | 2 | 2½ | 2 | TB | TB | 10 | TI | TI |
| Sistem dinding rangka ringan (baja canai dingin) dengan bresing strip datar | 4 | 2 | 3½ | TB | TB | 20 | 20 | 20 |
| B. Sistem rangka bangunan | | | | | | | | |
| Rangka baja dengan bresing eksentris | 8 | 2 | 4 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Rangka baja dengan bresing konsentris khusus | 6 | 2 | 5 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Rangka baja dengan bresing konsentris biasa | 3¾ | 2 | 3¾ | TB | TB | 10 | 10 | TI |
| Dinding geser beton bertulang khusus | 6 | 2½ | 5 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser beton bertulang biasa | 5 | 2½ | 4½ | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser beton polos didetail | 2 | 2½ | 2 | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser beton polos biasa | 1½ | 2½ | 1½ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser pracetak menengah | 5 | 2½ | 4½ | TB | TB | 12 | 12 | 12 |

| Sistem Pemikul Gaya Seismik | Koefisien Modifikasi Respons R^a | Faktor Kuat Lebih Sistem Ω_0^b | Faktor Pembesaran Defleksi C_d^c | Batasan Sistem Struktur dan Batasan Tinggi Struktur, h_n (m) ^d | | | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|----|-------|-------|-------|
| | | | | Kategori Desain Seismik | | | | |
| | | | | B | C | D^e | E^e | F^f |
| Dinding geser pracetak biasa | 4 | 2½ | 4 | TB | TB | TI | TI | TI |
| Rangka baja beton komposit dengan bresing eksentris | 8 | 2 | 4 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Rangka baja beton komposit dengan bresing konsentris khusus | 5 | 2 | 4½ | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Rangka baja beton komposit dengan bresing biasa | 3 | 2 | 3 | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser pelat baja dan beton komposit | 6½ | 2½ | 5½ | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser baja dan beton komposit khusus | 6 | 2½ | 5 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser baja dan beton komposit biasa | 5 | 2½ | 4½ | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata bertulang khusus | 5½ | 2½ | 4 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser bata bertulang menengah | 4 | 2½ | 4 | TB | TB | TI | TI | TI |
| Dinding geser bata bertulang biasa | 2 | 2½ | 2 | TB | 48 | TI | TI | TI |
| Dinding geser batu bata polos didetail | 2 | 2½ | 2 | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser batu bata polos biasa | 1½ | 2½ | 1¼ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding geser batu bata prategang | 1½ | 2½ | 1¼ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Dinding rangka ringan (kayu) | 7 | 2½ | 4½ | TB | TB | 22 | 22 | 22 |

| 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 |
| yang dilapisi panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser | | | | | | | | |
| Dinding rangka ringan (baja canai dingin) yang dilapisi dengan panel struktur kayu yang dimaksudkan untuk tahanan geser, atau dengan lembaran baja | 7 | 2½ | 4½ | TB | TB | 22 | 22 | 22 |
| Dinding rangka ringan dengan panel geser dari semua material lainnya | 2½ | 2½ | 2½ | TB | TB | 10 | TB | TB |
| Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk | 8 | 2½ | 5 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| Dinding geser pelat baja khusus | 7 | 2 | 6 | TB | TB | 48 | 48 | 30 |
| C. Sistem Rangka Pemikul Momen | | | | | | | | |
| Rangka baja pemikul momen khusus | 8 | 3 | 5½ | TB | TB | TB | TB | TB |
| Rangka batang baja pemikul momen khusus | 7 | 3 | 5½ | TB | TB | 48 | 30 | TI |
| Rangka baja pemikul momen menengah | 4½ | 3 | 4 | TB | TB | 10 | TI | TI |
| Rangka baja pemikul momen biasa | 3½ | 3 | 3 | TB | TB | TI | TI | TI |

| 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 |
| Rangka beton bertulang pemikul momen khusus | 8 | 3 | 5½ | TB | TB | TB | TB | TB |
| Rangka beton bertulang pemikul momen menengah | 5 | 3 | 4½ | TB | TB | TI | TI | TI |
| Rangka beton bertulang pemikul momen biasa | 3 | 3 | 2½ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus | 8 | 3 | 5½ | TB | TB | TB | TB | TB |
| Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah | 5 | 3 | 4½ | TB | TB | TI | TI | TI |
| Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen | 6 | 3 | 5½ | 48 | 48 | 30 | TI | TI |
| Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa | 3 | 3 | 2½ | TB | TI | TI | TI | TI |
| Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan pembautan | 3½ | 3 | 3½ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

(Sumber SNI 1726-2019)

8. Menentukan periode fundamental

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

$$T_a = C_t h_n^x$$

Keterangan :

h_n = Ketinggian struktur (m)

Tabel 2. 17 Parameter Percepatan Respons Spektral Desain Pada 1 Detik, SD1

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

(Sumber SNI 1726-2019)

Tabel 2. 18 Tipe Struktur Pada Sistem Rangka Pemikul Momen

| Tipe Struktur | C_t | α |
|--|--------|----------|
| Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 % gaya seismik yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya seismik: | | |
| 1. Rangka baja pemikul momen | 0,0724 | 0,8 |
| 2. Rangka beton pemikul momen | 0,0466 | 0,9 |
| Rangka baja dengan bresing eksentris | 0,0731 | 0,75 |
| Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk | 0,0731 | 0,75 |
| Semua sistem struktur lainnya | 0,0488 | 0,75 |

(Sumber SNI 1726-2019)

2.2.5 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan gempa dalam perencanaan struktur bangunan gedung dan non-gedung mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI 1726:2019 tentang persyaratan perencanaan ketahanan gempa. Kombinasi pembebanan tersebut ditentukan sebagai berikut.

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

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

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

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a. $1.34D + E_{x+}TT + 0.3E_\gamma + L$

b. $1.34D - E_{x+}TT + 0.3E_\gamma + L$

c. $1.34D + E_{x+}TT - 0.3E_\gamma + L$

d. $1.34D - E_{x+}TT - 0.3E_\gamma + L$

e. $1.34D + E_{x-}TT + 0.3E_\gamma + L$

f. $1.34D - E_{x-}TT + 0.3E_\gamma + L$

g. $1.34D + E_{x-}TT - 0.3E_\gamma + L$

h. $1.34D - E_{x-}TT - 0.3E_\gamma + L$

i. $1.34D + E_{\gamma+}TT + 0.3E_x + L$

j. $1.34D - E_{\gamma+}TT + 0.3E_x + L$

k. $1.34D + E_{\gamma+}TT - 0.3E_x + L$

l. $1.34D - E_{\gamma+}TT - 0.3E_x + L$

m. $1.34D + E_{\gamma-}TT + 0.3E_x + L$

n. $1.34D - E_{\gamma-}TT + 0.3E_x + L$

o. $1.34D + E_{\gamma-}TT - 0.3E_x + L$

p. $1.34D - E_{\gamma-}TT - 0.3E_x + L$

2) $0.9 DL - E_v + E_h$

Kemudian persamaan tersebut dipecah menjadi :

a. $0.76D + E_{x+}TT + 0.3E_\gamma$

b. $0.76D - E_{x+}TT + 0.3E_\gamma$

c. $0.76D + E_{x+}TT - 0.3E_\gamma$

d. $0.76D - E_{x+}TT - 0.3E_\gamma$

e. $0.76D + E_{x-}TT + 0.3E_\gamma$

f. $0.76D - E_{x-}TT + 0.3E_\gamma$

g. $0.76D + E_{x-}TT - 0.3E_\gamma$

h. $0.76D - E_{x-}TT - 0.3E_\gamma$

i. $0.76D + E_{\gamma+}TT + 0.3E_x$

j. $0.76D - E_{\gamma+}TT + 0.3E_x$

k. $0.76D + E_{\gamma+}TT - 0.3E_x$

- l. $0.76D - E_{\gamma+TT} - 0.3E_x$
- m. $0.76D + E_{\gamma-TT} + 0.3E_x$
- n. $0.76D - E_{\gamma-TT} + 0.3E_x$
- o. $0.76D + E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$
- p. $0.76D - E_{\gamma-TT} - 0.3E_x$

Keterangan :

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

2.3 Elemen Struktur Gedung

Elemen struktur gedung adalah komponen utama bangunan yang berfungsi menahan serta menyalurkan beban secara aman hingga ke tanah. Elemen tersebut meliputi pondasi, kolom, balok, pelat lantai, serta elemen penahan gaya lateral seperti dinding geser atau rangka pemikul momen. Setiap komponen berfungsi bersama untuk menyalurkan beban, sehingga perencanaan struktur harus mempertimbangkan beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa agar struktur memenuhi kekuatan, kekakuan, dan daktilitas yang diperlukan (BSN, 2019; BSN, 2020).

2.3.1 Pondasi dan *Pile cap*

Pondasi adalah komponen struktur yang meneruskan dan mendistribusikan beban dari struktur atas ke tanah pendukung secara aman. Ini memastikan bahwa struktur tetap stabil dan tidak runtuh atau turun terlalu banyak. Perencanaan pondasi harus disesuaikan dengan kondisi tanah dan beban yang bekerja agar memenuhi persyaratan kekuatan dan kestabilan (BSN, 2019). Pada sistem pondasi tiang pancang, *pile cap* merupakan elemen penting yang berfungsi menyalurkan beban

dari kolom ke kelompok tiang secara merata. Pile cap umumnya terletak di atas kepala tiang dan berperan dalam menahan beban vertikal serta mengendalikan penurunan pondasi agar sistem pondasi dapat bekerja secara efektif dan efisien (Setiawan, 2024).

1. Menentukan kuat izin tiang berdasarkan kekuatan bahan tiang

Daya dukung fondasi adalah faktor penting dalam perencanaan fondasi karena menunjukkan kemampuan fondasi dalam menahan beban yang paling besar yang diteruskan oleh struktur di atasnya. Kekuatan material penyusun fondasi dan kondisi tanah di lokasi pembangunan mempengaruhi daya dukung fondasi, dan semakin tinggi kualitas material dan kondisi tanah, semakin besar kemampuan fondasi untuk menahan beban yang bekerja (BSN, 2019).

Persamaan yang digunakan untuk menghitung daya dukung pondasi balok bor berdasarkan material penyusunnya disajikan di sini.

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

Keterangan:

$P \text{ tiang}$ = Kuat izin *bored pile* (k_g)

σ = Tegangan izin bahan tiang ($\frac{kg}{cm^2}$)

$\sigma \text{ baja}$ = $0,35 - 0,5 \times f_y$

$\sigma \text{ beton}$ = $0,25 - 0,33 \times f'_c$

$A \text{ tiang}$ = Luas penampang *bored pile* (cm^2)

2. Menentukan kuat izin tiang berdasarkan kekuatan tanah

Tanah memiliki peran penting dalam sistem fondasi, yaitu sebagai media pendukung yang menyalurkan beban struktur di atasnya. Untuk mengetahui kemampuan tanah dalam menahan beban, diperlukan penyelidikan tanah guna memperoleh parameter daya dukung sebagai dasar dalam perencanaan kapasitas dan kedalaman fondasi. Salah satu metode penyelidikan tanah yang umum digunakan adalah *Standard Penetration Test* (SPT), yang bertujuan untuk memperoleh nilai tahanan penetrasi tanah akibat pembebanan sebagai indikator karakteristik tanah (Das & Sobhan, 2021).

Berikut ini disajikan persamaan yang digunakan untuk menentukan daya dukung fondasi berdasarkan kekuatan tanah.

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

Keterangan:

Q_p tiang = Daya dukung ujung tiang (ton)

A_p tiang = Luas penampang ujung *bored pile* (ft^2)

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

3. Menghitung tahanan selimut

Menurut Meyerhof (1956), persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung daya dukung friksi tiang yang berasal dari tahanan selimut akibat interaksi antara permukaan tiang dan tanah di sekitarnya.

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

Keterangan:

Q_s tiang = Daya dukung friksi tiang (ton)

A_s tiang = Luas selimut tiang (ft^2)

\bar{N} = Nilai N-SPT rata-rata di sepanjang tiang

4. Menghitung daya dukung *ultimate* dan *allowable* tiang

Daya dukung ultimit pada fondasi *bored pile* menunjukkan ketika seluruh beban struktur telah termobilisasi secara maksimal, sehingga kapasitas puncak fondasi dapat diukur (Santoso & Hartono, 2020). Daya dukung ini dihitung sebagai penjumlahan antara daya dukung ujung tiang (Q_p) dan daya dukung selimut tiang (Q_s).

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

Daya dukung izin fondasi *bored pile* dihitung dengan membagi nilai daya dukung ultimit terhadap faktor keamanan yang digunakan dalam perencanaan.

$$Q \text{ allowable} = \frac{Q \text{ ultimate}}{\text{Safety Factor}}$$

Nilai daya dukung bersih fondasi *bored pile* diperoleh dengan mengurangkan daya dukung izin terhadap berat sendiri tiang.

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

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

Keterangan:

A = Luas penampang tiang (cm^2)

L = Kedalaman tiang (cm)

W = Massa jenis material tiang (kg/cm^3)

5. Menentukan kebutuhan jumlah *bored pile*

Perencanaan jumlah bored pile dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi beban tekan secara merata ke setiap tiang. Penentuan jumlah tiang didasarkan pada gaya tekan maksimum yang bekerja pada struktur, dengan menggunakan persamaan berikut.

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

6. Menentukan efisiensi kelompok tiang

Dalam perencanaan kelompok *bored pile*, penting untuk mempertimbangkan efisiensi kelompok tiang karena interaksi distribusi tegangan antara tiang berdekatan. Oleh karena itu, jarak antara tiang harus direncanakan secara efektif untuk mencapai nilai efisiensi terbaik. Nilai efisiensi kelompok tiang ditentukan menggunakan persamaan berikut.

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

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

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

Keterangan:

m = Jumlah baris tiang

n = Jumlah tiang dalam satu baris

s = Jarak antar tiang dari pusat ke pusat tiang

d = Diameter tiang

7. Menghitung daya dukung kelompok tiang

Jumlah tiang, efisiensi kelompok tiang, dan daya dukung bersih masing-masing tiang masing-masing memengaruhi kapasitas daya dukung kelompok tiang. Nilai efisiensi yang tinggi menunjukkan kemampuan kelompok tiang dalam menahan beban tekan secara lebih efektif.

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

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

8. Syarat desain geometri *pile cap*

Perencanaan geometri pile cap harus memenuhi beberapa persyaratan, yang tercantum dalam SNI 2847:2019:

$$\text{Syarat 1. Jarak antar tiang (s)} = 2,5D \approx 4D$$

$$\text{Syarat 2. Jarak tiang menuju tepi pile cap (s')} = 1,5D \approx 2D$$

$$\text{Syarat 3. Dimensi pile cap} = s \times \text{Banyak Baris} \\ \text{Spasi} + 2 \times s'$$

$$\text{Syarat 4. Tebal efektif pile cap} = \text{Tebal Rencana} - \\ \text{Selimut Beton}$$

$$\text{Syarat 5. Selimut beton pile cap} = 75 \text{ mm}$$

9. Menentukan gaya geser satu arah *pile cap*

Berdasarkan Pasal 13.4.2.2 dan Pasal 13.4.2.5 SNI 2847:2019, momen dan gaya geser terfaktor harus dihitung berdasarkan reaksi yang bekerja pada masing-masing tiang karena gaya tekan pada *bored pile*.

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

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

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

Keterangan:

V_u = Gaya geser pile cap (KN)

σ = Tegangan tekan nominal beton serat terjauh (MP_a)

A = Luas penampang pile cap (m^2)

P = Gaya tekan pada kolom (KN)

G' = Daerah pembebanan yang dihitung untuk geser penulangan satu arah

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 13.4.2.3, gaya geser yang bekerja pada pile cap harus lebih kecil dari kapasitas kuat geser beton pile cap.

$$\phi V_c > V_u$$

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

10. Menentukan gaya geser dua arah *pile cap*

Berdasarkan SNI 2847:2019, Pasal 22.6.5.2 menyatakan bahwa selain gaya geser satu arah, gaya geser dua arah pada *pile cap* juga harus dipertimbangkan, yang dipengaruhi oleh daerah keliling kritis terhadap gaya geser tersebut. Persamaan yang digunakan untuk menentukan gaya geser dua arah pada *pile cap* berdasarkan daerah keliling kritis adalah sebagai berikut.

Tabel 2. 19 Persamaan Gaya Geser Dua Arah *Pile Cap*

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

(Sumber SNI 2847-2019)

Keterangan:

λ = Koefisien jenis beton pondasi

β = Rasio panjang dan lebar kolom pondasi

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

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

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

Gaya geser pada *pile cap* ditentukan sebagai nilai minimum dari ketiga persamaan pada tabel, yang kemudian dikalikan dengan faktor reduksi sebesar 0,75 (ϕV_c). Nilai ϕV_c tersebut harus lebih besar daripada gaya geser terfaktor (V_u) yang terjadi akibat reaksi tanah pada *pile cap*.

11. Menentukan tegangan geser tanah (V_u)

Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan tegangan geser tanah akibat gaya tekan yang bekerja pada kolom *pile cap*.

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

$$\phi V_c > V_u$$

12. Syarat desain penulangan lentur *pile cap*

Berikut merupakan tahapan dalam perencanaan penulangan lentur *pile cap* yang mengacu pada SNI 2847:2019.

- a. Menentukan daerah pasang tulangan *pile cap* (B)

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

- b. Menghitung berat sendiri *pile cap* (q)

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

- c. Menghitung momen ultimate *pile cap* (M_u)

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

- d. Menemukan nilai ketahanan (R_n) *pile cap* dan koefisien p perlu

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

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

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

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

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

13. Syarat desain penulangan *bored pile*

Berikut adalah langkah-langkah yang diperlukan dalam perencanaan penulangan *bored pile*.

- a. Menentukan rasio penulangan *longitudinal* tiang

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

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

- b. Mendesain penulangan *transversal* tiang

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

- c. Menentukan panjang daerah sendi plastis tiang (*Confinement*)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 18.13.7.5.1, panjang daerah sendi plastis pada *bored pile* harus dipertimbangkan sehingga ada tulangan transversal yang lebih rapat pada area tersebut dibandingkan dengan area di luar sendi plastis. Persamaan untuk menghitung panjang daerah sendi plastis pada *bored pile* disajikan di sini.

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

- d. Menentukan nilai *confinement* atau kekangan daerah sendi plastis

Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai kekangan pada daerah sendi plastis pondasi *bored pile* berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 18.13.7.5.1.

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

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

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

Keterangan:

A_v = Luas penampang tulangan *transversal* daerah tumpuan

S = Jarak tulangan *transversal*

D = Tebal efektif *pile cap*

- e. Menentukan jarak tulangan *transversal* luar daerah *confinement*

Jarak tulangan transversal di luar zona sendi plastis pada pondasi *bored pile* diukur dengan persamaan berikut.

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

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

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

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

2.3.2 Tie Beam

Tie beam adalah elemen struktur horizontal yang menghubungkan pondasi dan kolom untuk membantu meratakan penyaluran beban serta meningkatkan kestabilan bangunan. Elemen ini juga berfungsi mengurangi perbedaan penurunan pondasi dan menambah kekakuan struktur secara keseluruhan (Siregar & Putra, 2021).

Berikut merupakan persyaratan dalam perencanaan struktur *tie beam* yang mengacu pada SNI 2847:2019.

1. Syarat desain geometri *tie beam*

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.13.6.2, lebar minimum *tie beam* (b) ditentukan sebagai nilai terkecil dari persamaan berikut.

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

Keterangan:

L_n = Panjang bentang *tie beam* (mm)

2. Syarat desain distribusi tegangan beton

Posisi sumbu netral (c) dari serat tekan terjauh pada penampang *tie beam* ditentukan oleh koefisien distribusi tegangan beton (β_1), yang dipengaruhi oleh mutu beton (f'_c) yang digunakan. Nilai β_1 dapat dihitung menggunakan persamaan berikut, berdasarkan SNI 2847:2019, Pasal 22.2.2.4.3.

Tabel 2. 20 Nilai Distribusi Tegangan Beton (β_1)

| f'_c | β_1 |
|------------------------|--|
| $17 \leq f'_c \leq 28$ | 0,85 |
| $28 \leq f'_c \leq 55$ | $0,85 - \frac{0,05 \times (f'_c - 28)}{7}$ |
| $f'_c \geq 55$ | 0,65 |

(Sumber SNI 2847-2019)

3. Syarat perhitungan gaya aksial *tie beam*

Perhitungan gaya aksial pada *tie beam* (P_u) mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 7.13.6.2, yang mensyaratkan bahwa pengikat fondasi harus memiliki kuat tarik atau tekan desain sebesar 10% dari gaya aksial kolom akibat beban

gravitasi (P_g) dan parameter percepatan spektral periode pendek (S_{DS}), atau ditentukan melalui persamaan berikut.

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

Besarnya gaya aksial kolom akibat beban gravitasi (P_g) ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut.

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

Keterangan:

DL = *Dead Load* atau beban mati struktur

LL = *Live Load* atau beban hidup struktur

4. Perhitungan Gaya Dalam Akibat Beban Gravitasi (g)

Selain gaya dalam akibat beban gravitasi, gaya dalam maksimum (ultimit) perlu diperhitungkan sebagai dasar dalam perencanaan penulangan tie beam.

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

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

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

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

Keterangan:

Q_u = Beban merata maksimum *tie beam* ($Q_u = 1.4 \times (Q_{DL} + Q_{SDL})$)

Q_D = Berat sendiri *tie beam* ($Q_D = \text{Berat jenis beton} \times h \times b$)

Q_{SDL} = Berat dinding pada *tie beam* ($Q_{SDL} = \text{Berat jenis dinding} \times h \text{ lantai}$)

5. Desain penulangan *longitudinal tie beam*

SNI 2847:2019 menetapkan persyaratan dan persamaan untuk perencanaan penulangan longitudinal *tie beam*:

a. Menentukan jarak bersih antar tulangan (x)

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

Keterangan:

d_s = Diameter tulangan *transversal*

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

n = Jumlah tulangan *longitudinal*

d_b = Diameter tulangan *longitudinal*

b. Jarak bersih tulangan (y)

Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 25.2.1, jarak bersih antar tulangan harus memenuhi nilai minimum, yaitu lebih besar dari diameter tulangan *longitudinal* atau 25 mm, dipilih yang terbesar:

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

c. Menentukan kebutuhan tulangan *tie beam*

Dalam perencanaan tulangan *tie beam*, luas tulangan yang dipasang (A_s) harus lebih besar dari luas tulangan minimum yang disyaratkan dalam SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2, yang ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

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

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

Keterangan:

f_y = Tegangan leleh tulangan baja (MP_a)

b = Lebar *tie beam* (mm)

d = Tinggi efektif *tie beam* (mm)

d. Menentukan tinggi blok tegangan persegi ekuivalen *tie beam*

SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.4.1 menetapkan tinggi blok tegangan persegi ekuivalen (α) untuk menghitung momen nominal *tie beam* (M_n), menggunakan persamaan berikut:

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

- e. Menentukan jarak antara serat tekan terjauh dengan sumbu netral (c)
Setelah menentukan tinggi blok tegangan persegi ekuivalen pada *tie beam*, jarak antara serat tekan terjauh dan sumbu netral beton dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

- f. Menentukan nilai regangan beton (ϵ_s)
Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.2.2.1, regangan tekan maksimum beton pada kondisi ultimit ditentukan menggunakan persamaan berikut:

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

- g. Menentukan momen nominal dan momen *ultimate tie beam*
Nilai momen nominal *tie beam* (M_n) harus dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan (ϕ) sesuai ketentuan SNI 2847:2019 Tabel 21.2.2, sehingga diperoleh $\phi M_n = \phi \times M_n$

- h. Cek kapasitas gaya dalam *tie beam*
Dalam perencanaan penulangan *tie beam*, nilai momen nominal tereduksi (ϕM_n) harus lebih besar daripada momen *ultimite* (M_u) yang bekerja pada struktur. Apabila syarat tersebut tidak terpenuhi, maka diperlukan penyesuaian berupa peningkatan dimensi penampang atau penambahan jumlah tulangan.

6. Desain penulangan transversal *tie beam*
SNI 2847:2019 menetapkan persyaratan dan persamaan untuk perencanaan penulangan transversal *tie beam*.

- a. Menentukan gaya geser *ultimate tie beam* akibat faktor reduksi (ϕ)
Dalam perencanaan penulangan *transversal tie beam*, gaya geser ultimit yang telah dikoreksi dengan faktor reduksi (V_u/ϕ) perlu diperhitungkan sebagai dasar evaluasi keamanan desain. Nilai faktor reduksi tersebut mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 12.5.3.2 sebesar 0,75. Penggunaan faktor reduksi ini menjadi penting terutama apabila struktur berada pada Kategori Desain Seismik D, E, atau F.

b. Mendesain tulangan *transversal tie beam*

Luas tulangan transversal (A_v) harus direncanakan secara tepat agar kuat geser nominal (ϕV_n) lebih besar dari gaya geser ultimit (V_u/ϕ), sehingga penulangan mampu menahan gaya geser yang bekerja pada struktur. Berikut disajikan persamaan untuk menentukan luas tulangan *transversal* (A_v).

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

Selain menentukan apakah tulangan transversal diperlukan, Anda juga harus memastikan bahwa jarak antar tulangan (s) tidak melebihi batas yang diizinkan. Persamaan berikut menunjukkan jarak maksimum tulangan *transversal*, berdasarkan SNI 2847:2019 Tabel 9.7.6.2.2.

Tabel 2. 21 Jarak Maksimum Tulangan *Transversal Tie Beam*

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

(Sumber SNI 2847-2019)

Berdasarkan ketentuan pada tabel tersebut, gaya geser yang ditahan oleh tulangan *transversal* (V_s) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

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

Keterangan:

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

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

d = Tinggi efektif *tie beam* (mm)

s = Jarak tulangan *transversal* rencana (mm)

- c. Menentukan gaya geser nominal tulangan *transversal* (V_n)

Gaya geser nominal (V_n) pada elemen ditentukan sebagai penjumlahan antara kontribusi beton (V_c) dan tulangan *transversal* (V_s). Berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 22.5.5.1, nilai V_c dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Nilai gaya geser yang ditahan oleh tulangan *transversal* (V_s) ditentukan sebagai nilai terkecil dari dua persamaan, yaitu

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

- d. Cek kapasitas penulangan *transversal*

Dalam perencanaan penulangan *transversal tie beam*, kuat geser nominal tereduksi (ϕV_n) harus lebih besar daripada gaya geser *ultimite* terfaktor (V_u/ϕ).

2.3.3 Pelat Lantai

Pelat lantai adalah komponen struktur beton bertulang yang digunakan untuk menahan beban hidup dan mati bangunan sebelum didistribusikan ke balok dan kolom sebagai bagian dari sistem struktur utama. Dalam perencanaannya, pelat lantai harus memenuhi ketentuan kekuatan, ketebalan minimum, serta batas lendutan agar struktur tetap aman dan nyaman digunakan sesuai dengan SNI 2847:2019. Beberapa penelitian menyatakan bahwa pemilihan sistem pelat, terutama pelat tanpa balok (*flat slab*), berpengaruh terhadap distribusi momen dan kinerja struktur sehingga membutuhkan perencanaan yang teliti sesuai standar yang berlaku (Putra et al., 2022). Selain itu, ketebalan pelat dan pengaturan tulangan memiliki peran penting dalam mengendalikan lendutan serta retak pada pelat lantai, sehingga penerapan ketentuan SNI secara konsisten diperlukan untuk memenuhi persyaratan kekuatan dan servisabilitas struktur (Siregar et al., 2023).

1. Dimensi Pelat Lantai

Berdasarkan SNI 2847:2019, pelat lantai yang ditumpu oleh balok pada seluruh sisinya harus direncanakan sesuai dengan ketentuan yang telah ditetapkan dalam standar tersebut.

a. Menentukan nilai L_n

Untuk mengidentifikasi jenis pelat, apakah termasuk pelat satu arah atau dua arah. Apabila $L_n \leq 2$, pelat diklasifikasikan sebagai pelat dua arah :

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

Keterangan :

L_n = Jarak bersih memanjang diukur antar muka tumpuan.

L_y = Bentang Panjang

L_x = Bentang Pendek

b. Menentukan ketebalan pelat

Ketebalan pelat lantai ditentukan berdasarkan ketentuan yang berlaku dengan mempertimbangkan bentang pelat, jenis pelat (satu arah atau dua arah), serta syarat kekakuan untuk mengendalikan lendutan. Penentuan tebal pelat ini mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI 2847:2019

Tabel 2. 22 Ketebalan Minimum Pelat Solid
Satu Arah Nonprategang

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

(Sumber : SNI 2847:2019, Tabel 7.3.1.1)

c. Menentukan batas minimum

Ketentuan batas minimum ketebalan pelat nonprategang yang ditumpu oleh balok pada seluruh sisinya ditentukan sesuai dengan ketentuan yang tercantum pada tabel berikut :

Tabel 2. 23 Ketebalan Minimum Dua Arah Nonprategang Dengan Balok di antara Tumpuan Pada Semua sisi

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

(Sumber : SNI 2847:2019)

2. Penulangan Pelat Lantai

Peraturan SNI 2847-2019 menetapkan perhitungan penulangan pelat, yang meliputi:

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

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

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

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

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

a. Spasi Maksimum

Penentuan spasi maksimum tulangan pelat lantai dilakukan berdasarkan tebal pelat dan ketentuan yang berlaku agar distribusi tulangan serta pengendalian retak tetap terpenuhi. Berikut persamaannya untuk menghitung spasi maksimum. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

b. Jumlah Tulangan Negatif Tumpuan

Tulangan negatif tumpuan ditentukan dari besar momen negatif yang bekerja pada daerah tumpuan untuk menahan tarik di bagian atas elemen struktur. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

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

Keterangan :

b = Lebar peninjauan pelat (1000 mm)

s = Spasi tulangan

c. Jarak Bersih Antar Tulangan

Jarak bersih antar tulangan ditentukan agar pemasangan beton dan distribusi agregat dapat berlangsung dengan baik serta memenuhi ketentuan yang berlaku. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$s - db$$

Cek jarak bersih = Jarak Bersih \geq db dan 25 mm

d. As Pasang

As pasang merupakan luas tulangan yang dipasang pada elemen struktur sesuai hasil perencanaan untuk memenuhi kebutuhan kekuatan dan ketentuan desain. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

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

Keterangan :

n = Jumlah batang tulangan

db = Diameter tulangan

e. As Minimum

As minimum adalah luas tulangan minimum yang harus dipenuhi pada elemen struktur sesuai ketentuan peraturan untuk mencegah retak dan menjaga kapasitas elemen. Dapat dihitung dengan persamaan berikut

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

f. Kontrol As Tulangan

Kontrol As dilakukan dengan membandingkan tulangan terpasang dan tulangan yang disyaratkan. Dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

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

g. Tinggi Blok Beton, a

Tinggi blok beton (a) menunjukkan kedalaman daerah tekan ekuivalen pada penampang beton. Bisa dihitung menggunakan persamaan berikut.

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

Keterangan :

As = Luas tulangan tarik

Fy = Tegangan leleh baja tulangan

fc' = Kuat tekan beton

b = Lebar penampang

h. Kapasitas Lentur, M_n

Kapasitas lentur (M_n) merupakan kemampuan nominal penampang dalam menahan momen lentur yang bekerja. Nilai ini digunakan untuk mengevaluasi kekuatan elemen struktur terhadap pembebanan lentur. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$As \times Fy \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Keterangan :

As = Luas tulangan tarik

d = Tinggi efektif penampang

a = Tinggi blok tegangan beton ekuivalen

i. Lokasi Garis Netral, c

Lokasi garis netral (c) menunjukkan jarak antara serat tekan terluar beton dan garis netral penampang. Nilai ini digunakan untuk menentukan distribusi regangan dan keseimbangan gaya pada penampang beton bertulang. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

Keterangan :

a = Tinggi blok tegangan beton ekuivalen

β_1 = Faktor blok tegangan beton

- j. Regangan Tulangan Tarik, ϵ_s

Regangan tulangan tarik (ϵ_s) menunjukkan besarnya deformasi pada tulangan akibat gaya tarik yang bekerja. Nilai ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi perilaku tulangan pada penampang beton bertulang. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

Keterangan :

d = Tinggi efektif penampang

c = Jarak garis netral dari serat tekan terluar

- k. Faktor Reduksi, ϕ

Faktor reduksi (ϕ) digunakan untuk mengurangi kapasitas nominal struktur dalam perencanaan. Nilai ini diterapkan untuk mempertimbangkan ketidakpastian material, metode pelaksanaan, dan kondisi pembebanan. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

- l. Kapasitas Lentur Tereduksi, ϕM_n

Kapasitas lentur tereduksi merupakan hasil kapasitas lentur nominal yang telah dikalikan dengan faktor reduksi (ϕM_n). Nilai ini digunakan untuk mengevaluasi keamanan elemen terhadap momen ultimit yang bekerja. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\phi \times M_n$$

- m. Momen Ultimit, M_u

Momen ultimit merupakan momen maksimum yang bekerja pada elemen struktur akibat kombinasi pembebanan terfaktor. Nilai ini digunakan

sebagai dasar dalam evaluasi kapasitas lentur struktur. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$Absolute (Mu)$$

n. Cek Kapasitas

Cek kapasitas dilakukan dengan membandingkan kapasitas rencana elemen terhadap gaya dalam yang bekerja. Struktur dinyatakan aman apabila kapasitasnya lebih besar dari beban terfaktor. Dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\phi Mn \geq Mu$$

2.3.4 Kolom

Kolom beton bertulang adalah komponen utama struktur vertikal yang berfungsi untuk menahan beban aksial dan momen lentur sebelum disalurkan ke pondasi. Dalam perencanaannya, kolom beton bertulang harus dirancang dengan memperhatikan dimensi penampang, rasio tulangan, serta persyaratan kekuatan dan kinerja layanan agar memenuhi ketentuan SNI 2847:2019. Sehingga keamanan struktur gedung bertingkat dapat terjamin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan analisis dan perencanaan kolom beton bertulang yang mengacu pada SNI 2847:2019 sangat diperlukan untuk memastikan kapasitas dukung yang memadai serta kesesuaian detail tulangan, khususnya pada bangunan bertingkat yang menjadikan kolom sebagai elemen pemikul beban utama (Kezia et al., 2023).

1. Dimensi Kolom

Estimasi luas penampang bruto kolom dilakukan untuk menentukan dimensi kolom yang dibutuhkan agar mampu menahan beban aksial yang bekerja,

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

$$b \times h = Ag$$

Keterangan :

Ag = Luas penampang bruto kolom

Pu = Beban aksial

h = Panjang kolom

b = Lebar kolom

2. Penulangan Kolom

Untuk memenuhi persyaratan daktilitas struktur, elemen kolom dirancang untuk menahan beban aksial dan momen kerja.. Ketentuan mengenai tulangan kolom, baik tulangan *longitudinal* maupun tulangan *transversal*, mengacu pada persyaratan yang tercantum dalam SNI 2847:2019. Adapun ketentuan tersebut meliputi hal-hal sebagai berikut.

a. Syarat Gaya dan Geometri

1) Syarat Gaya Aksial

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

Keterangan :

P_u = Gaya aksial terfaktor

A_g = Luas penampang bruto beton

F_c' = Kuat tekan beton

2) Syarat Sisi Terpendek

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

3) Syarat Rasio Dimensi Penampang

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

Keterangan :

b = Sisi pendek kolom

h = Sisi panjang kolom

4) Pengecekan Gaya Dalam Aksial Lentur dengan *SP Column*

Pengecekan gaya dalam aksial lentur dilakukan menggunakan SP Column untuk mengevaluasi kapasitas penampang kolom terhadap kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Pemeriksaan dilakukan berdasarkan diagram interaksi (P–M)(P–M)(P–M) guna memastikan titik kombinasi beban masih berada dalam batas aman kapasitas penampang.

a) Luas Tulangan *Longitudinal*, A_g

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

b) Rasio Tulangan, ρ

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

c) Cek ρ min dan ρ max

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

5) Pegecekan *Strong Column Weak Beam* (SCWB)

Evaluasi *Strong Column Weak Beam* (SCWB) dilakukan menggunakan hasil analisis dari *SP Column*, dengan memilih nilai gaya aksial maksimum (ρ_{max}) dan momen nominal (M_n) pada rasio yang paling mendekati 1%. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar dalam pemeriksaan kekuatan sambungan balok dan kolom. Setelah itu tahap pengecekan syarat pada SCWB dihitung dengan persamaan berikut.

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

Keterangan :

M_{nc} = Momen nominal kolom

M_n = Momen nominal balok

6) Zona Sendi Plastis

Zona sendi plastis ditentukan untuk mengidentifikasi bagian struktur yang berpotensi mengalami perilaku inelastis saat menerima beban gempa. Panjang daerah tersebut digunakan sebagai acuan dalam penempatan tulangan pengekang pada area kritis struktur. Dapat ditentukan melalui persamaan berikut.

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

l_o = Panjang zona sendi plastis

hn = Tinggi bersih elemen struktur

Menurut SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4.1, luas tulangan *longitudinal* (A_{st}) pada kolom harus memenuhi batas minimum sebesar $0,01 A_g$ dan tidak melebihi $0,06 A_g$. Selain itu, berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 18.7.3.2, kekuatan lentur kolom juga harus memenuhi ketentuan *Strong Column Weak Beam* (SCWB), yaitu $\sum M_{nc} \geq 1,2 \sum M_{nb}$.

b. Tulangan *Transversal*

Panjang minimal yang diperlukan untuk menyediakan tulangan *transversal* yang rapat pada ujung kolom, di mana leleh lentur sering terjadi (SNI 2847:2019, bab 18.7.5.1). SNI 2847:2019 menyatakan bahwa panjang daerah sendi plastis dihitung berdasarkan tinggi terbesar kolom pada muka *joint* atau penampang yang dapat mengalami pelelehan lentur, yaitu seperenam tinggi bersih kolom atau 450 mm.

1) Luas Tulangan *Transversal* (A_{sh})

Luas tulangan *transversal* (A_{sh}) merupakan total luas penampang sengkang atau tulangan pengekuat dalam satu arah pada daerah *confinement*. Nilai ini digunakan untuk menentukan kemampuan tulangan *transversal* dalam memberikan pengekuat pada beton inti serta meningkatkan daktilitas elemen struktur. Dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini.

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

Keterangan :

n = Jumlah kaki sengkang

d_s = Diameter tulangan sengkang

2) Kekangan Zona Pada Sendi Plastis dan Luar Sendi Plastis

Pada zona sendi plastis, tulangan pengekuat dipasang lebih rapat untuk meningkatkan daktilitas dan menjaga kekuatan elemen saat terjadi deformasi inelastis akibat gempa. Sementara itu, di luar zona sendi plastis, jarak tulangan pengekuat dapat dibuat lebih renggang karena tingkat deformasi yang terjadi relatif lebih kecil.

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

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

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

Keterangan :

bc = Lebar inti beton terkekang

Ag = Luas penampang bruto kolom

A_{ch} = Luas inti beton terkekang

3) Kuat Geser Zona Sendi Plastis dan Luar Sendi Plastis

Pada zona sendi plastis, kuat geser direncanakan lebih besar karena daerah ini berpotensi mengalami deformasi inelastis akibat gempa. Sedangkan di luar zona sendi plastis, kebutuhan kuat geser relatif lebih kecil karena pengaruh deformasi tidak sebesar pada daerah plastis.

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

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

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

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

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

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

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

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

Keterangan :

V_c = Kontribusi tulangan geser terhadap kuat geser

N_u = Gaya aksial terfaktor

V_s = Kontribusi tulangan geser terhadap kuat geser

ds = Diameter tulangan sengkang

Cc = Selimut bersih

2.3.5 Balok

Balok beton bertulang adalah elemen struktur horizontal yang berperan menerima beban lentur dan gaya geser yang berasal dari pelat lantai, kemudian menyalurkannya ke kolom sebagai bagian dari sistem struktur bangunan. Dalam perencanaannya, balok beton bertulang harus dirancang dengan memperhatikan dimensi penampang, proporsi tulangan lentur dan geser, serta persyaratan kekuatan dan kinerja layan agar sesuai dengan ketentuan SNI 2847:2019. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan perencanaan balok beton bertulang yang mengacu pada SNI 2847:2019 berpengaruh signifikan terhadap kapasitas lentur dan geser balok serta berkontribusi pada keamanan dan efisiensi struktur bangunan gedung bertingkat (Roring et al., 2022).

1. Dimensi Balok

Dalam perencanaan elemen struktur balok, penentuan dimensi awal merupakan tahap penting yang bertujuan untuk menjamin kinerja struktur yang aman dan efisien. Salah satu parameter yang digunakan sebagai acuan adalah tinggi minimum balok, yang ditentukan berdasarkan kondisi perletakan serta ketentuan dalam standar yang berlaku. Tabel berikut menunjukkan persyaratan tinggi minimum untuk balok non-prategang, mengacu pada SNI 2847:2019.

Tabel 2. 24 Syarat Tinggi Minimum Struktur Balok Nonprategang

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

(Sumber: SNI 2847:2019)

Berdasarkan ketentuan pada tabel tersebut, tinggi minimum balok dengan mutu tulangan $f_y=420$ dapat ditentukan sebagai berikut.

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

Lebar balok dapat ditentukan dengan ketentuan minimal sebesar 0,5 dari tinggi balok. Persamaan tersebut tidak hanya digunakan untuk menentukan

dimensi balok, tetapi juga dapat diterapkan dalam penentuan dimensi *tie beam*.

Pada bangunan yang menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), perlu dilakukan pemeriksaan terhadap batasan dimensi elemen struktur sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Pasal 18.6.2.1 SNI 2847:2019, dengan persyaratan sebagai berikut.

- a. Bentang bersih balok harus memenuhi ketentuan, $L_n \geq 4d$

Keterangan:

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

$$\text{Jarak efektif beton (} d \text{)} = h \text{ balok} - \text{cover} - \emptyset \text{ sengkang} - \frac{1}{2} \emptyset \text{ tul utama}$$

- b. Lebar penampang balok ditetapkan ($0,3h$ dan 250 mm)
 c. Proyeksi lebar balok yang melampaui lebar kolom penumpu tidak boleh melebihi nilai terkecil dari c_2 dan $0,75c_1$ pada masing-masing sisi kolom.

2. Penulangan Balok

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

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

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

Rasio tulangan (ρ) tidak boleh melebihi 0,025, dan minimal harus dipasang dua batang tulangan pada masing-masing sisi atas dan bawah.

- a. Penulangan Lentur Balok

Untuk menentukan kebutuhan tulangan balok pada daerah tumpuan dan lapangan, digunakan persamaan sebagai berikut.

$$m_n = \frac{m_u}{\emptyset}$$

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

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

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

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

Menurut SNI 2847:2019 Pasal 18.6.3.2, luas tulangan minimum pada tumpuan positif (A_s min) tidak boleh kurang dari 0,5 kali luas tulangan tumpuan negatif. Selain itu, luas tulangan minimum pada lapangan negatif tidak boleh kurang dari 0,25 kali luas tulangan pada momen maksimum lapangan positif.

- 1) Cek Jarak Bersih

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

- 2) A_s Pasang

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

- 3) A_{smin1}

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

- 4) A_{smin2}

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

- 5) Cek A_s Min

$$A_s \text{ Pasang} \geq A_{smin}$$

- 6) ρ

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

- 7) ρ Max

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

- 8) Cek A_s Max

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

9) a

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

10) M_n

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

11) c

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

12) ε_s

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

13) ϕ

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

14) ϕM_n

$$\phi M_n$$

15) Cek Kapasitas

$$\phi M_n > M_u$$

16) As Perlu

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

Keterangan :

A_s = luas tulangan tarik

n = jumlah batang tulangan

db = diameter tulangan longitudinal

$A_s \text{ min}$ = luas tulangan minimum

b = lebar penampang balok

d = tinggi efektif balok

ρ = rasio tulangan

ρ_b = rasio tulangan seimbang

β_1 = faktor blok tegangan beton

- a = tinggi blok tegangan beton ekuivalen
 ϵ_s = regangan tulangan tarik
 ϕ = faktor reduksi kekuatan

b. Penulangan *transversal* balok

Untuk menentukan kebutuhan tulangan *transversal* balok dalam menahan gaya geser, digunakan persamaan sebagai berikut.

1) Desain Gaya Tumpuan dan Lapangan

a) A_{pr}^+

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

b) A_{pr}^-

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

c) M_{pr}^+

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

d) M_{pr}^-

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

e) V_{pr}

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

f) V_e

$$V_g + V_{pr}$$

g) Tahanan Geser Beton

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

h) A_v

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

i) $S_{max 1}$

$$d/4$$

j) $S_{max 2}$

$$6db$$

k) V_s

$$\frac{A_v \cdot f_{yv} \cdot d}{s}$$

l) Batas V_s

$$0.66\sqrt{f'_c} b d$$

m) V_n

$$V_c + V_s$$

n) Rasio kapasitas geser

$$\phi V_n / V_u$$

o) Cek Kapasitas

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

Keterangan

apr^+ = Tinggi blok tegangan beton kondisi probable moment tumpuan positif

apr^- = Tinggi blok tegangan beton kondisi probable moment tumpuan negative

Mpr^+ = Momen probable arah positif

Mpr^- = Momen probable arah negative

Vpr = Gaya geser akibat probable moment

V_e = Gaya geser gempa total

V_c = Kontribusi beton terhadap kapasitas geser

c. Penulangan Torsi Balok

1) Geometri Penampang Torsi

a) A_{cp}

$$b \times h$$

b) P_{cp}

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

c) x_0

$$\begin{aligned}
 \text{d) } y_0 &= b - 2c_c - d_s \\
 \text{e) } A_{oh} &= h - 2c_c - d_s \\
 \text{f) } A_o &= x_o \cdot y_o \\
 \text{g) } P_h &= 0.85 A_{oh} \\
 &= 2(x_o + y_o)
 \end{aligned}$$

Keterangan :

- A_{cp} = Luas penampang luar beton
- P_{cp} = keliling luar penampang beton
- x_o = Lebar inti sengkang efektif
- y_o = Tinggi inti sengkang beton
- A_{oh} = Luas area inti sengkang efektif
- A_o = Luas area efektif torsi
- P_h = Keliling inti Sengkang efektif
- b = Lebar penampang balok
- h = Tinggi penampang balok
- c = Tebal selimut beton
- d_s = Diameter sengkang

2) Pengecekan Kebutuhan Tulangan Torsi

a) T_{cr}

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

b) Gaya geser desain

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

c) Cek Kebutuhan Tulangan Torsi

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

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

Keterangan :

T_{cr} = Torsi retak beton

3) Pengecekan Kecukupan Dimensi Penampang

a) V_c

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

b) Tegangan ultimate geser + torsi

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

c) Kapasitas tegangan beton

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

d) Cek dimensi penampang

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

Keterangan :

V_c = Kontribusi beton terhadap kapasitas geser

4) Penulangan *Transversal* Torsi

a) S_{max}

$$Ph/8$$

b) Cek spasi tumpuan

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

c) Cek spasi lapangan

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

d) A_{v+t} / s tumpuan pasang

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

e) A_t / s

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

f) A_v / s tumpuan perlu

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

g) A_v / s lapangan perlu

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

h) A_{v+t} / s tumpuan dan lapangan perlu

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

i) A_{v+t} / s min 1

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

j) A_{v+t} / s min 2

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

k) Cek geser + torsi tumpuan dan lapangan

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

Keterangan :

S_{max} = Spasi maksimum sengkang torsi

5) Penulangan *Longitudinal* Torsi

a) d_b min

$$0.042 s$$

b) Cek d_b

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

c) A_1

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

d) A_1 min

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

e) n tumpuan vertikal

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

f) Spasi tumpuan dan lapangan horizontal

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

g) Spasi tumpuan dan lapangan vertikal

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

h) Cek spasi tulangan longitudinal tumpuan dan lapangan

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

i) Cek lentur + torsi tumpuan dan lapangan

$$A_{S+A1 \text{ Pasang}} \geq A_{S+A \text{ Perlu}}$$

Keterangan :

db min = Diameter minimum tulagn longitudinal torsi

A1 = Luas tulangan longitudinal torsi

A1 min = luas minimum tulangan longitudinal torsi

n = jumlah batang

2.3.6 Tangga

Tangga merupakan elemen bangunan yang berfungsi sebagai penghubung antara lantai bawah dan lantai di atasnya. Penentuan dimensi tangga dilakukan setelah perencanaan denah ruang tangga ditetapkan. Tahap awal perencanaan tangga meliputi penentuan jumlah anak tangga berdasarkan tinggi antar lantai. Perhitungan ini bertujuan untuk memperoleh dimensi tangga yang memenuhi aspek kenyamanan, keamanan, serta proporsi geometris yang sesuai dengan ketentuan yang berlaku dalam SNI 1727:2020. Adapun beberapa persyaratan yang perlu diperhatikan dalam perencanaan tangga adalah sebagai berikut.

1. Dimensi Tangga

Dimensi tangga ditentukan berdasarkan hubungan antara tinggi anak tangga (riser) dan lebar pijakan tangga (tread) sehingga menghasilkan tangga yang nyaman, aman, dan proporsional untuk digunakan.

a. Lebar bordes minimal sama dengan lebar tangga.

b. Tinggi anak tangga (*optrade*) = 150 – 200 mm

c. Lebar anak tangga (*aantrade*) = 280 – 300 mm

Syarat, *optrade* dan *aantrade*

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

d. Tebal pelat tangga

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

e. Jumlah anak tangga

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

f. Panjang tangga

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

g. Tebal anak tangga

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

h. Panjang bordes

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

Keterangan :

L = bentang denah tangga

n = jumlah anak tangga

H = tinggi antar lantai

O = *optrade*

A = *antrade*

L_{tg} = panjang tangga

L_b = panjang tangga

2. Penulangan Tangga

Penulangan pelat tangga dan pelat bordes direncanakan menggunakan persamaan yang sama seperti pada perencanaan pelat lantai, sedangkan balok bordes dihitung dengan menggunakan persamaan penulangan balok.

2.4 Rencana Anggaran Biaya

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan dokumen perencanaan biaya yang memuat estimasi total biaya proyek konstruksi berdasarkan perhitungan volume pekerjaan dan harga satuan yang berlaku. RAB berperan penting sebagai dasar penentuan nilai kontrak, perencanaan keuangan proyek, serta alat pengendalian biaya selama pelaksanaan pekerjaan konstruksi. Penelitian menunjukkan bahwa penyusunan RAB yang akurat sangat dipengaruhi oleh ketelitian dalam proses *quantity take off*, metode perhitungan yang digunakan, serta kelengkapan data perencanaan seperti gambar kerja dan spesifikasi teknis (Novita & Pangestuti, 2021). Selain itu, perbandingan antara RAB dan Rencana Anggaran Pelaksanaan (RAP) dapat digunakan untuk mengevaluasi efisiensi biaya dan mengidentifikasi potensi deviasi anggaran selama pelaksanaan proyek (Basri & Isfahani, 2025). Studi lain juga menegaskan bahwa penggunaan analisis harga satuan yang tepat dan sistematis sangat diperlukan agar RAB dapat menjadi alat pengendalian biaya yang efektif dan mendukung keberhasilan proyek konstruksi (Toisutta et al., 2024).

2.4.1 Volume Pekerjaan

Volume pekerjaan merupakan hasil pengukuran kuantitas setiap item pekerjaan konstruksi yang dihitung berdasarkan gambar rencana dan spesifikasi teknis. Perhitungan volume pekerjaan menjadi tahap penting dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) karena berpengaruh langsung terhadap besarnya biaya proyek yang direncanakan. Ketelitian dalam proses *quantity take off* sangat diperlukan agar volume pekerjaan yang diperoleh sesuai dengan kondisi desain dan tidak menimbulkan kesalahan perhitungan biaya (Novita & Pangestuti, 2021). Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa ketidaktepatan perhitungan volume pekerjaan dapat menyebabkan perbedaan signifikan antara biaya rencana dan biaya pelaksanaan, sehingga berdampak pada terjadinya deviasi biaya selama proyek berlangsung (Basri & Isfahani, 2025).

2.4.2 Quantity Takeoff (QTO)

Quantity Take Off (QTO) adalah kegiatan menghitung dan mengukur kuantitas pekerjaan konstruksi berdasarkan gambar rencana dan spesifikasi teknis yang digunakan sebagai dasar penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Keakuratan QTO sangat menentukan ketepatan estimasi biaya proyek, karena kesalahan dalam perhitungan kuantitas dapat menimbulkan selisih antara biaya yang direncanakan dan biaya aktual pelaksanaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketelitian dalam interpretasi gambar kerja serta penerapan metode perhitungan yang sesuai, termasuk penggunaan perangkat lunak digital, dapat meningkatkan ketepatan dan efisiensi pelaksanaan QTO pada proyek konstruksi gedung (Sembiring & Tarigan, 2022; Lumbanraja, 2023).

2.4.3 Analisa Harga Satuan Pekerjaan

Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) merupakan metode untuk menghitung biaya satuan pekerjaan konstruksi berdasarkan komponen material, upah tenaga kerja, dan peralatan. AHSP digunakan sebagai acuan dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) agar estimasi biaya dapat disusun secara rinci dan terstruktur. Hasil penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa perhitungan harga satuan menggunakan metode AHSP dapat menghasilkan nilai yang berbeda dibandingkan dengan biaya aktual di lapangan, karena AHSP menggunakan koefisien dan komponen biaya yang lebih lengkap. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa metode AHSP mampu memberikan estimasi biaya yang lebih detail, namun pemilihan metode perhitungan tetap perlu disesuaikan dengan kondisi dan tujuan pengendalian biaya proyek (*Analisis Perbandingan Harga Satuan Pekerjaan antara Metode AHSP dan Metode Aktual*, 2025).

2.5 Penjadwalan Proyek

Penjadwalan proyek adalah kegiatan perencanaan susunan serta lamanya setiap aktivitas pekerjaan konstruksi dengan tujuan agar pelaksanaan proyek dapat selesai sesuai dengan target waktu yang direncanakan. Penjadwalan berperan sebagai

sarana pengendalian waktu, pengoordinasian antarpekerjaan, serta acuan dalam memantau perkembangan proyek selama tahap pelaksanaan. Hasil penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa penerapan metode penjadwalan seperti *bar chart*, *Critical Path Method* (CPM), dan *network planning* efektif dalam mengidentifikasi aktivitas kritis yang berpotensi menyebabkan keterlambatan proyek (Siregar & Lubis, 2021). Penelitian lainnya juga menyimpulkan bahwa penyusunan penjadwalan proyek yang sistematis dan realistis dapat meningkatkan kinerja pengendalian waktu serta mengurangi risiko keterlambatan pada proyek konstruksi (Wibowo et al., 2022).