

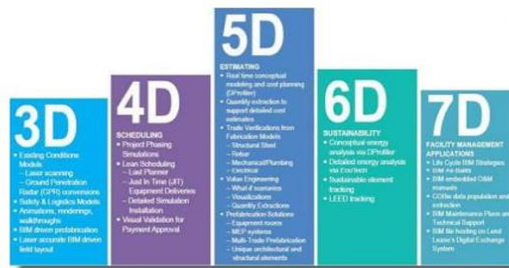
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 BIM (*Building Information Modelling*)

Elemen kunci dari penerapan sistem Building Information Modeling (BIM), dengan cakupan yang menyeluruh pada masa pakai bangunan, adalah manajemen dan pengumpulan data. Untuk meningkatkan efektivitas desain dan konstruksi bangunan, BIM sering kali menggunakan perangkat lunak pemodelan bangunan tiga dimensi yang dinamis dan real-time. Teknik mutakhir untuk menangani data proyek selama tahap perencanaan, desain, konstruksi, dan eksekusi proyek bangunan adalah pemodelan informasi bangunan, atau BIM. BIM lebih dari sekadar alat untuk membuat ilustrasi 3D. Selain itu, BIM adalah metode baru untuk mengatur data yang berkaitan dengan tahap perencanaan, desain, konstruksi, dan eksekusi proyek bangunan. Penerapan BIM dapat meningkatkan produktivitas, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan memperbaiki metode pelaksanaan, memungkinkan untuk antisipasi dan koreksi pada pekerjaan yang kompleks di lapangan.

Penerapan konsep BIM (Building Information Modelling) merupakan opsi yang mendukung ekstraksi jumlah material yang diperlukan dalam perhitungan biaya konstruksi, mengintegrasikan teknologi digital. Lebih lanjut, pendekatan ini mengintegrasikan representasi visual tiga dimensi dengan berbagai parameter non-geometris. Variabel yang disatukan mencakup aspek penjadwalan (waktu), estimasi pembiayaan, mitigasi risiko keselamatan kerja, serta dimensi proyek terkait lainnya. Melalui penerapan BIM, beragam jenis evaluasi dan simulasi teknis dapat dijalankan secara terintegrasi. Dengan menggunakan pendekatan BIM 5D ini, informasi mengenai kuantitas material dapat diambil secara mudah dari model, memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih akurat dan cepat. Melalui model ini, semua pihak yang berkepentingan dapat memperoleh informasi rinci tentang bangunan selama fase operasi dan pemeliharaan.



Gambar 2. 1 Dimensi BIM
Sumber : Kementerian PUPR, 2018

2.2 Pembebanan

Untuk membantu menentukan beban yang dapat diterima untuk rumah dan bangunan, ditunjukkan pada Pedoman pembebanan. Termasuk di dalamnya adalah panduan untuk menetapkan beban hidup yang dibutuhkan untuk berbagai elemen seperti atap dengan kemiringan, bangunan parkir bertingkat, dan landasan helikopter di atap bangunan tinggi. Pedoman ini mencakup semua jenis pesawat helikopter yang biasanya digunakan, serta menyertakan prosedur untuk mengurangi beban hidup saat merencanakan balok induk dan portal. Pedoman ini juga mencakup pemeriksaan risiko gempa. Penggunaan reduksi beban hidup dan peninjauan gempa bersifat opsional, dan disarankan untuk tidak digunakan jika mengancam keamanan konstruksi atau elemen-elemen konstruksi yang sedang dievaluasi.

Semua elemen dari suatu konstruksi wajib mematuhi standar ini dengan memperhitungkan efek-efek gaya yang ditimbulkan oleh berbagai beban, seperti beban operasional seperti kran, getaran, dampak tiba-tiba, perubahan dimensi akibat fluktuasi suhu, dampak waktu, variasi dalam ketinggian fondasi, gaya prategang (prestressing force), serta beban-beban spesifik lainnya yang berpotensi bekerja pada struktur. Kemampuan struktur untuk mempertahankan stabilitas ditentukan oleh seberapa baik struktur tersebut dapat menahan beban yang diberikan oleh gravitasi dan aktivitas seismik. Saat melakukan perencanaan struktural, penyelarasan dengan standar regulasi yang berlaku menempati posisi yang sangat krusial dalam pelaksanaannya. Sistem struktur suatu bangunan dirancang untuk menahan berbagai interaksi gaya. Komponen gaya tersebut meliputi berat sendiri (beban mati) dan penghuni (beban hidup), serta gaya

eksternal seperti angin dan gempa, ditambah dengan beban-beban spesifik lainnya. Uraian pengertian dari beban-beban tersebut, sebagaimana diatur dalam Panduan Perencanaan untuk Rumah dan Gedung (PPURG) 1987, disajikan di bawah ini:

2.2.1 Beban Mati (*Dead Load*)

Seluruh massa dari semua bahan bangunan yang dimasukkan ke dalam struktur bangunan dikenal sebagai beban mati. Total berat sendiri dari material konstruksi yang terintegrasi dalam sistem bangunan didefinisikan sebagai beban mati. Komponen penyusunnya meliputi elemen vertikal dan horizontal seperti dinding, lantai, dan atap, serta elemen pelengkap lainnya yakni tangga, langit-langit, sekat ruangan tetap, lapisan finishing, dan fasad luar. Mengacu pada ketentuan SNI 1727:2013 pasal 3.1.1, cakupan beban ini juga diperluas untuk meliputi berat dari peralatan utilitas yang terinstalasi secara tetap (*fixed equipment*) serta gaya yang dihasilkan oleh sistem kran. Saat menetapkan nilai beban mati untuk keperluan perencanaan, direkomendasikan untuk menggunakan bobot aktual dari material dan struktur yang digunakan, dan dalam situasi ketika informasi tersebut tidak tersedia, nilai yang dipergunakan harus disetujui oleh pihak berwenang yang memiliki pengetahuan serta keahlian yang relevan (SNI 1727:2013 pasal 3.1.2).

Jika beban mati (*dead load*) menghasilkan efek positif terhadap peningkatan kekuatan atau stabilitas suatu struktur atau komponen bangunan, berat beban mati tersebut harus direferensikan dari Tabel 1 dan kemudian dikalikan dengan koefisien reduksi 0,9. Jika sebagian atau seluruhnya dari beban mati memberikan kontribusi yang mendukung stabilitas suatu struktur atau elemen bangunan, sesuai dengan ketentuan Dalam konteks verifikasi stabilitas struktur, nilai beban mati wajib direduksi. Sesuai dengan Pasal 2.3, hal ini dilakukan dengan menerapkan faktor pengali sebesar 0,9 pada bobot beban mati tersebut.

2.2.2 Beban Hidup (*Live Load*)

Berbeda dengan beban struktural permanen atau beban dari bangunan sekitar, beban hidup merujuk pada gaya yang timbul akibat dinamisasi kegiatan penghuni dan makhluk hidup lain di dalam suatu struktur bangunan. *Live load* bisa muncul dari berbagai faktor seperti aktivitas penghuni, pergerakan, serta penggunaan alat-alat

di pada bangunan (SNI 1727:2013 Pasal 4.1). Merujuk pada Pasal 4.3.1, terdapat penegasan mengenai tata cara penggunaan beban hidup yang harus diikuti. yang menegaskan bahwa *Live load* yang dipergunakan pada perancangan bangunan gedung serta struktural lainnya wajib mencerminkan beban terberat yang bisa timbul dampak penghunian dan kegiatan pada pada bangunan gedung. Meskipun demikian, nilainya harus lebih tinggi atau sama dengan beban merata minimum berdasarkan peraturan.

Fungsi peruntukan bangunan dan dasar pertimbangan dalam analisis beban menjadi faktor krusial yang mempengaruhi peluang penerapan beban hidup parsial pada elemen struktur selama periode operasional gedung. Dikarenakan probabilitas terjadinya beban hidup penuh yang mempengaruhi seluruh elemen struktural utama secara bersamaan selama masa penggunaan gedung tersebut sangat rendah, penggunaan beban hidup secara penuh mungkin tidak secara optimal efisien. Oleh karena itu, nilai beban hidup yang merata dapat disesuaikan dengan faktor reduksi tertentu.

2.2.3 Beban Angin (*Wind Load*)

Wind Load mengacu pada seluruh gaya yang memengaruhi gedung atau komponen khusus dari gedung sebagai akibat dari fluktuasi perbedaan tekanan tekanan udara. Terbentuknya diferensial antara tekanan positif dan negatif menginduksi timbulnya gaya yang bekerja secara normal (tegak lurus) terhadap elemen struktur yang ditinjau; fenomena mekanika inilah yang didefinisikan sebagai beban angin, atau produksi vakum. Koefisien angin dikalikan dengan tekanan angin menghasilkan perbedaan tekanan dalam kilogram per meter persegi.

Pada bangunan tinggi, risiko dari beban angin menjadi sangat signifikan. Selain mempertimbangkan beban gempa, perencanaan sebuah bangunan juga harus memperhitungkan gaya lateral yang disebabkan oleh beban angin. Intensitas gaya lateral akibat angin pada bangunan berbanding lurus dengan ketinggiannya, di mana struktur yang lebih tinggi akan menerima paparan beban yang lebih besar, sehingga diperlukan perhatian khusus terhadap penanganan beban yang akan ditanggung oleh bangunan tersebut. Biasanya, untuk bangunan yang mencapai ketinggian tertentu, diperlukan instalasi pengaku sebagai penahan beban lateral. Atas dasar

pertimbangan tersebut, dibutuhkan adopsi sistem perkuatan yang mampu bekerja secara lebih efisien dan efektif untuk memastikan perilaku struktur tetap stabil.

Dalam bangunan yang sangat tinggi, gaya lateral yang timbul akibat angin dapat menyebabkan deformasi yang signifikan. Deformasi lateral pada bangunan harus dikendalikan agar penggunaan bangunan tetap nyaman bagi para penghuninya. Gaya lateral yang terus-menerus diterima oleh sisi bangunan gedung adalah akibat dari angin, dan semakin tinggi bangunan, semakin kuat efeknya karena bangunan tersebut menjadi penghalang bagi aliran angin, sehingga mengakibatkan deformasi baik secara horizontal maupun vertikal. Untuk mengurangi deformasi yang berlebihan akibat beban angin, pemasangan pengaku diperlukan. Setiap bangunan gedung memerlukan pemilihan pengaku yang sesuai, yang bergantung pada tinggi lantai dari bangunan tersebut.

2.2.4 Beban Gempa (Earthquake Load)

Beban gempa didefinisikan sebagai representasi gaya statis yang diaplikasikan untuk menyimulasikan respons struktur terhadap eksitasi pergerakan tanah. Secara fundamental, gaya-gaya inersia yang terbangkitkan di dalam sistem bangunan akibat akselerasi tanah inilah yang dikategorikan sebagai beban seismik. Analisis dinamik digunakan untuk menilai dampak gempa pada struktur gedung, dan beban gempa dalam hal ini mengacu pada gaya-gaya yang muncul karena gerakan tanah yang diakibatkan oleh gempa tersebut.

Untuk memberikan ilustrasi terkait pembaruan standar terkait gempa (SNI Gempa 2002), berikut ini disajikan suatu contoh penerapan metode Analisis Statis Ekuivalen untuk menghitung beban gempa pada bangunan. Acuan utama dalam prosedur perhitungan ini adalah standar SNI 03-1726-2002 (Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung).

- **Respon Spektrum Gempa**

Spektrum respons merupakan visualisasi dari korelasi antara parameter periode alami struktur (T) dan koefisien respons terhadap redaman dan gempa tertentu. Spektrum ini digunakan dalam perencanaan bangunan dan disesuaikan berdasarkan daerah gempa di Indonesia, melalui pertimbangan kecepatan maksimum dari Batu pokok dalam rentang waktu 500 tahun. Periode getaran

alami struktur (T) dalam hitungan detik dan respons spektrum gempa (C) dalam kecepatan gravitasi (g) ditampilkan pada grafik C-T spektrum respons. Dalam persamaan tersebut, digunakan rasio penyesuaian I/R. Di sini, variabel I merepresentasikan faktor keutamaan (importance factor), sedangkan variabel R mengacu pada koefisien modifikasi respons (faktor reduksi gempa), harus diterapkan pada koefisien gempa fundamental spektrum respons C.

- **Faktor Keutamaan Struktur**

Persamaan berikut menjelaskan bagaimana ketentuan SNI Gempa Bumi 2002 Pasal 4.1.2 mengharuskan dampak gempa terhadap perencanaan dihitung dengan mengalikannya dengan Faktor Prioritas:

$I = I_1 \cdot I_2$	<i>Persamaan 2. 1</i>
---------------------	-----------------------

Dimana I_1 adalah Faktor Prioritas, yang menggunakan kemungkinan terjadinya gempa bumi dalam antisipasi masa pakai bangunan untuk mengubah periode ulang gempa. sedangkan I_2 adalah Faktor Prioritas yang digunakan untuk mengubah antisipasi umur layanan bangunan. Tabel 1 digunakan untuk menentukan bagian mana dari I_1 , I_2 , dan I yang menjadi prioritas.

Tabel 2. 1 Faktor Keutamaan bervariasi tergantung pada kategori dan jenis bangunan.

Kategori gedung	Faktor Keutamaan		
	I_1	I_2	I
Gedung umum seperti untuk penghunian, perniagaan dan perkantoran.	1,0	1,0	1,0
Monumen dan bangunan monumental	1,0	1,6	1,6
Gedung penting pasca gempa seperti rumah sakit, instalasi air bersih, pembangkit tenaga listrik, pusat penyelamatan dalam keadaan darurat, fasilitas radio dan televisi	1,4	1,0	1,4
Gedung untuk menyimpan bahan berbahaya seperti gas, produk minyak bumi, asam, bahan beracun.	1,6	1,0	1,6
Cerobong, tangki di atas menara	1,5	1,0	1,5

Sumber : SNI Gempa Bumi 2002 Pasal 4.1.2

- **Faktor Reduksi Gempa**

Apabila V_e merepresentasikan beban maksimum yang bisa ditahan oleh struktur bangunan gedung secara maksimal elastis saat mendekati titik kegagalan karena pengaruh Gempa Rencana, dan V_n merupakan beban gempa nominal wajib dipertimbangkan kedalam perancangan struktur bangunan gedung, maka terdapat keterkaitan sebagai berikut:

$$V_n = \frac{V_e}{R} \quad \text{Persamaan 2. 2}$$

Persamaan untuk menghitung Faktor Reduksi Gempa, yang disimbolkan sebagai R , dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$1,6 \leq R = \mu f_1 \leq R_m \quad \text{Persamaan 2. 3}$$

Dalam rumus tersebut, f_1 menunjukkan Faktor Kelebihan Kuat yang berasal dari beban dan material yang ada dalam struktur, sementara μ (μ) mewakili Faktor Duktilitas bangunan. Istilah " R_m " adalah singkatan dari besaran faktor reduksi gempa tertinggi yang relevan dan sesuai dengan karakteristik sistem struktur yang digunakan. Sesuai standar yang berlaku, ditetapkan prasyarat mutlak bahwa nilai μ maupun R harus berada di bawah batas maksimum. Adapun rincian nilai R untuk setiap rentang μ yang memenuhi syarat tersebut diuraikan dalam Tabel 2. Ketika merancang struktur bangunan gedung yang diharapkan untuk bertahan secara elastis saat terjadi Gempa Rencana, nilai $\mu = 1$ dan $R = 1,6$

2.3 Kombinasi Pembebananan

Dalam proses perencanaan struktur, dari fondasi hingga elemen penopang struktur, harus memperhitungkan standar yang berpedoman pada kriteria SNI 1726:2019. Rancangan wajib memastikan bahwa kekuatan yang disediakan setidaknya setara atau faktor beban beban melebihi yang telah diakomodasi menggunakan berbagai kombinasi sebagai berikut:

1. $1,4 D$
2. $1,2 D + 1,6 L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$ 19
3. $1,2 D + 1,6 (L_r \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5 W)$
4. $1,2 D + 1,0 W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } R)$
5. $0,9 D + 1,0 W$
6. $1,2 D + E_v + E_h + L + 0,2 S$
7. $0,9 D - E_v + E_h$

Berikut adalah pengecualian yang berlaku:

- Kombinasi 3 dan 4 mengizinkan semua lantai tinggi, kecuali garasi/tempat parkir dan ruang pertemuan umum, untuk beban hidup L memiliki nilai faktor yang ditetapkan pada 0,5 Prasyarat ini berlaku asalkan magnitudo beban hidup L_o berada di bawah ambang batas 100 psf (4,78 kN/m²).
- Khusus pada penerapan kombinasi pembebanan 2 dan 4, variabel S wajib dievaluasi sebagai beban salju yang bekerja pada konfigurasi atap miring (ps) atau atap datar (pf). Berikut Rincian Parameter Beban:
 1. D (Beban mati) Merepresentasikan total gaya gravitasi yang dihasilkan oleh komponen bangunan yang terpasang secara permanen. Cakupannya meliputi elemen struktur dan arsitektur seperti pelat lantai, dinding partisi tetap, tangga, struktur atap, hingga plafon.
 2. L (Beban hidup) Didefinisikan sebagai beban yang timbul akibat fungsi penggunaan (okupansi) gedung, termasuk efek dinamisnya. Kategori ini secara tegas mengecualikan beban yang bersumber dari faktor lingkungan alamiah, seperti angin, air hujan, atau gempa.
 3. Beban Hidup Atap (L_r) Merupakan beban sementara yang bekerja pada permukaan atap, yang dihasilkan oleh aktivitas perawatan (maintenance), akses pekerja, penempatan material, maupun peralatan utilitas.
 4. R (beban hujan) Beban ini akibat curah hujan; beban akibat akumulasi udara tidak termasuk.
 5. Beban angin, atau W Tekanan udara menjadi penyebab beban ini.
 6. E (berat gempa) Gempa bumi dan bencana alam lainnya menjadi penyebab beban ini.

2.4 Balok

Dalam struktur bangunan, dikenal tiga klasifikasi balok, yakni balok induk, balok anak, dan kantilever. Secara definisi, balok merupakan batang struktural yang didesain untuk menahan gaya lateral. Pembebanan ini, sebagaimana dijelaskan oleh Dipohusodo (1994), memicu timbulnya gaya geser dan momen lentur. Lebih lanjut, Wahyudi L dan Rahim (1999) menguraikan bahwa interaksi gaya lateral atau lentur tersebut menciptakan zona tekan dan tarik pada penampang balok.

Dalam struktur, balok induk (girder) berfungsi sebagai komponen primer yang disangga langsung oleh kolom. Elemen ini dirancang dengan dimensi dan kapasitas beban yang lebih superior dibandingkan balok anak karena tugas vitalnya dalam mentransfer akumulasi beban dari pelat dan balok anak menuju kolom penyangga.

Di sisi lain, balok anak bertindak sebagai perantara yang meneruskan beban pelat ke balok induk. Keberadaannya krusial untuk membagi beban secara lebih distributif (merata) serta meminimalisir terjadinya defleksi atau lendutan pada struktur (Indriyani dkk., 2024). Berbeda dengan dua jenis sebelumnya, balok kantilever memiliki karakteristik mekanik khusus karena hanya menggunakan sistem tumpuan pada satu sisi (jepit), sementara ujung lainnya bebas menggantung. Konfigurasi ini memicu potensi lendutan yang besar, sehingga seringkali menuntut dimensi profil yang lebih besar daripada balok induk. Pengaplikasian balok jenis ini umum dijumpai pada area bangunan yang menjorok keluar (overstek), misalnya pada struktur balkon (Mierza & Surbakti, 2014).

2.4.1 Perencanaan dimensi balok

Secara struktural, balok dikategorikan sebagai komponen yang dirancang untuk menahan beban geser dan lentur, yang mungkin juga bekerja bersamaan dengan gaya aksial atau torsi. Oleh karena itu, perencanaan dimensi balok wajib disesuaikan dengan ketentuan desain dalam SNI 2847:2019.

Secara umum, estimasi dimensi balok mengacu pada Pasal 9.3.1.1 (tinggi minimum) dan Pasal 9.3.2 (lebar minimum 200 mm). Namun, dalam konteks desain seismik untuk Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), Pasal 18.6.2 menetapkan batasan geometri yang lebih spesifik sebagai berikut:

- a. Lebar Penampang (bw): Batas minimum adalah nilai terkecil antara $0,3h$ atau 250 mm Panjang bersih balok ($L_n \geq 4d$, dimana d merupakan tinggi efektif balok
- b. Proporsi Bentang: Panjang bentang bersih (L_n) dipersyaratkan $\geq 4d$ (tinggi efektif).
- c. Limitasi Aksial: Gaya aksial (P_u) tidak boleh melampaui 10% dari kapasitas luas penampang beton ($A_g f'_c/10$).

- d. Hubungan Balok-Kolom: Lebar balok dibatasi oleh dimensi lebar kolom pendukung (c_1 dan c_2) untuk menjamin kekakuan hubungan.

2.4.2 Penulangan Lentur Balok

Dalam merencanakan tulangan balok (baik sisi atas atau bawah), SNI 2847:2019 Pasal 18.6 menetapkan batasan yang harus dipatuhi. Batasan tersebut meliputi keharusan luas tulangan (A_s) untuk memenuhi persamaan minimum $A_s \geq 0,025 \times b_w \times d$, dengan syarat rasio tulangan ρ tidak boleh melampaui angka 0,025.. Harus selalu ada minimal dua tulangan di bagian atas, bawah, dan samping komponen.

Kolom, balok, atau sambungan fasad harus memiliki kapasitas momen positif yang setara dengan setengah dari kapasitas momen negatif berasal sambungan fasad tersebut. Kapasitas momen positif dari setiap penampang pada panjang Panjang atau jarak antara komponen struktur harus setidaknya setengah daya dukung maksimum terhadap momen yang dimiliki oleh kolom, balok, atau sambungan fasad.

2.4.3 Penulangan Geser Balok

Perencanaan penulangan untuk menangani gaya geser pada balok memiliki peran krusial dalam memastikan keandalan struktur tersebut terhadap gaya geser. Tulangan geser berperan sebagai penahan terhadap gaya geser yang muncul pada saat retakan terjadi, yang memungkinkan balok untuk tetap berfungsi secara efektif dalam menahan beban-beban yang diberikan. Dengan adanya penulangan geser, kekuatan struktur dapat dipertahankan dengan mengarahkan dan mendistribusikan gaya geser secara optimal, sehingga mencegah terjadinya kegagalan struktural yang dapat mengancam keselamatan bangunan. Selain itu, tulangan geser juga membantu dalam menjaga integritas struktur secara keseluruhan dengan memberikan dukungan lateral yang diperlukan untuk batang tulangan, mencegah terjadinya kelelahan pikul yang dapat mengurangi kinerja struktur dalam jangka panjang. berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 11.

1. Langkah pertama mensyaratkan bahwa kapasitas reduksi (ϕV_n) harus lebih besar atau sama dengan beban ultimit (V_u) (Pasal 11.1.1).
2. Parameter V_n sendiri merupakan fungsi dari kuat geser beton (V_c) ditambah kuat geser tulangan (V_s) (Pasal 11.1.1).

3. Evaluasi nilai V_c dilakukan dengan merujuk pada pedoman Pasal 11.2.
4. Secara spesifik, Pasal 12.1 menetapkan rumus V_c sebagai perkalian antara koefisien 0,17, faktor berat beton λ , akar kuat tekan $\sqrt{f'_c}$, lebar badan (b_w), dan tinggi efektif (d).
5. Sedangkan untuk V_s , Pasal 11.4.5.3 memberikan formulasi perhitungan sebesar $0,33\lambda\sqrt{f'_c} b_w d$

2.4.3.3 Persyaratan Kekuatan Minimum Balok

SNI 2847:2019 Pasal 9.5.1 menetapkan standar baku terkait evaluasi kekuatan rencana balok. Setiap elemen balok wajib didesain untuk memenuhi kondisi batas $\phi S_n \geq U$, sesuai dengan persyaratan di bawah ini:

$$1. \phi M_n \geq M_u \quad \text{Persamaan 2. 4}$$

$$2. \phi V_n \geq V_u \quad \text{Persamaan 2. 5}$$

$$3. \phi T_n \geq T_u \quad \text{Persamaan 2. 6}$$

$$4. \phi P_n \geq P_u \quad \text{Persamaan 2. 7}$$

Langkah-langkah Penulangan Balok

1. Langkah selanjutnya melibatkan evaluasi terhadap ambang batas rasio penulangan, baik batas atas (ρ_{max}) maupun batas bawah (ρ_{min}). Khusus untuk penentuan (ρ_{min}) nilai yang diadopsi adalah hasil terbesar (maksimum) yang diperoleh dari komparasi dua persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \bullet \quad \rho_b &= \frac{0,85 \times \beta \times f_{c'}'}{f_y} \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) & \text{Persamaan 2. 8} \\ \bullet \quad \rho_{max} &= 0,75 \rho_b \\ \bullet \quad \rho_{min} &= 1,4/f_y \\ \bullet \quad \rho_{min} &= \frac{0,25 \times \sqrt{f_{c'}'}}{f_y} \end{aligned}$$

2. Pengambilan nilai momen rencana maksimum (M_u) mengacu pada output hasil perhitungan yang dilakukan melalui software SAP 2000
3. Nilai Momen Nominal (M_n) ditentukan berdasarkan formulasi di bawah ini:

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

Persamaan 2. 9

4. Melakukan kalkulasi nilai R_n (Koefisien Ketahanan) dengan menggunakan formulasi:

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

Persamaan 2. 10

5. Mengevaluasi limitasi desain (kontrol batasan) dengan menggunakan variabel R_n sesuai persamaan berikut:

$$\bullet \quad R_n = \rho, f_y \left[1 - 0,59 \cdot \rho \frac{f_y}{f_{c'}} \right]$$

Persamaan 2. 11

$$\bullet \quad \rho_{1,2} = \frac{(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})}{2a}$$

6. Nilai luas tulangan yang diperlukan A_s perlu ditetapkan berdasarkan rumus berikut:

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

Persamaan 2. 12

7. Mengkalkulasi kebutuhan jumlah batang tulangan (n) menggunakan persamaan:

$$n \text{ tul} = \frac{A_s \text{ perlu}}{A_s \text{ tul}}$$

Persamaan 2. 13

8. Mengkalkulasi total luas tulangan aktual (A_s terpasang) melalui perkalian antara jumlah batang tulangan yang digunakan dengan luas penampang satu batang tulangan.

9. Pemeriksaan kapasitas penampang mensyaratkan bahwa rasio tulangan yang terpasang ρ terpasang harus melampaui atau minimal sama dengan rasio perlu ρ perlu. Untuk itu, nilai ρ terpasang dihitung menggunakan persamaan berikut sebelum dibandingkan:

$$\rho \text{ pasang} = \frac{A_s \text{ terpasang}}{b \times d}$$

Persamaan 2. 14

10. Mencari kedalaman sumbu netral berdasarkan jarak dari sisi tekan beton ke titik aplikasi resultan gaya tekan balok

$$\rho \text{ pasang} = \frac{A_s \text{ terpasang} \times f_y}{0,85 \times b \times f_{cr}}$$

Persamaan 2. 15

11. Mengkalkulasi jarak vertikal antara permukaan tekan beton terhadap sumbu netral penampang balok berdasarkan formulasi:

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

Persamaan 2. 16

12. Analisis regangan tulangan (ϵt) dilakukan untuk mendeteksi apakah baja tulangan telah mencapai kondisi leleh, sekaligus untuk menentukan kategori perilaku penampang struktur tersebut melalui rumus:

$$\epsilon t = \frac{d-c}{c} \times 0,003 > 0,005$$

Persamaan 2. 17

13. Menghitung kekuatan momen tereduksi sebagai kontrol desain, di mana nilai momen nominal (M_n) dikalikan dengan faktor $\phi = 0,90$ (untuk keruntuhan tarik/lentur)

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

Persamaan 2. 18

14. Mengecek kecukupan kapasitas lentur balok dengan prinsip dasar desain: momen rencana ϕM_n harus lebih besar daripada permintaan momen ultimit M_u .

$$\phi M_n > M_u$$

Persamaan 2. 19

2.5 Kolom

Menurut Fattah (2012), stabilitas struktur bangunan sangat bergantung pada performa kolom dalam menerima kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Penahanan beban—baik itu beban terfaktor maupun beban dari atap dan lantai di tiap tingkat—merupakan tugas utama kolom sebelum meneruskannya ke pondasi. Kapasitas kolom juga ditentukan oleh kemampuannya mengatasi momen maksimum yang dipengaruhi oleh dimensi bentang. Mengingat peran sentralnya tersebut, kerusakan pada kolom tidak dapat ditoleransi karena berpotensi menyebabkan konsekuensi katastrofik berupa keruntuhan total atau sebagian pada bangunan.

2.5.1 Perencanaan Dimensi Kolom

Perhitungan dimensi kolom dilakukan menggunakan formulasi di bawah ini. Rumus tersebut diterapkan dengan asumsi bahwa penampang kolom berbentuk persegi, di mana nilai lebar (b) dirancang identik dengan tinggi (h)

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

Persamaan 2. 20

Keterangan :

L kolom = Tinggi bersih kolom h

L balok = Bentang bersih balok

I kolom = Inersia kolom

I balok = Inersia balok

Ketentuan Mengenai Pembatasan Ukuran Penampang Kolom

Dalam proses desain kolom, kepatuhan terhadap standar baku merupakan hal mutlak. Mengacu pada SNI 2847:2019 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, khususnya Pasal 18.7.2.1, terdapat sejumlah persyaratan teknis yang wajib diimplementasikan, yaitu:

1. Jika diukur dari garis lurus pusat geometri, maka minimal dimensi penampang terkecil ialah 300 mm atau:
 $b \geq 300\text{mm}$
2. Disyaratkan bahwa proporsi dimensi penampang terkecil dibandingkan dengan dimensi vertikalnya harus melebihi 0,4; alternatif lainnya adalah:
dimensi terkecil dimensi tegak lurus $\geq 0,4$
3. Ketahanan terhadap kombinasi gaya geser, gaya aksial, dan gaya lentur menjadi fokus sentral dalam perencanaan kolom untuk Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus. Hal ini krusial untuk memastikan integritas struktur saat menerima beban.
4. Beban aksial yang ditahan oleh kolom lebih besar dari $A_g f'_c/10$ Kemudian, untuk merencanakan dimensi kolom harus memenuhi persyaratan persamaan di bawah ini dengan asumsi tinggi balok sama dengan lebar balok:

$$h_{kolom} / I_{kolom} \geq L_n \text{ Balok} / I_{balok}$$

Keterangan :

h kolom = tinggi kolom

I kolom = inersia kolom = $1/12bh^3$

Ln balok = bentang bersih balok

$$I_{\text{balok}} = \text{Inersia balok} = 1/12bh^3$$

2.5.2 Penulangan Kolom

Tahapan analisis penulangan lentur kolom dilaksanakan melalui prosedur berikut:

1. Identifikasi Parameter Material: Langkah awal melibatkan penetapan spesifikasi teknis berupa nilai f_c' , f_y , dan diameter sengkang.
2. Kalkulasi Probabilitas Momen: Nilai momen pada tumpuan atas (M_{pr3}) dan bawah (M_{pr4}) diestimasi menggunakan persamaan dasar:

$$\text{Momen tumpuan atas: } M_{pr3} = A_s \times 1,25 \times f_y \times (d - a/2) \quad \textbf{Persamaan 2. 21}$$

$$\text{Momen tumpuan bawah: } M_{pr4} = A_s \times 1,25 \times f_y \times (d - a/2) \quad \textbf{Persamaan 2. 22}$$

$$\text{Variabel } a \text{ diperoleh dari relasi } (A_s \times f_y) / (0,85 \times f_c' \times b) \quad \textbf{Persamaan 2. 23}$$

Hitung reaksi di ujung-ujung kolom:

$$V_e = (M_{pr3} + M_{pr4}) / l_u \quad \textbf{Persamaan 2. 24}$$

Dimana l_u = Panjang bentang bersih kolom

3. Evaluasi Kapasitas Geser:

$$V_s = V_u / \phi - V_c \quad \textbf{Persamaan 2. 25}$$

Perlu dicatat bahwa kontribusi beton (V_c) diasumsikan bernilai nol apabila terpenuhi dua kondisi spesifik: gaya geser gempa melebihi setengah dari gaya geser terfaktor, dan gaya aksial terfaktor tidak melampaui batas $(A_g \times f_c') / 10$

4. Detailing Tulangan Transversal Pemasangan sengkang ditentukan berdasarkan jarak (s) yang memenuhi persamaan:

$$S = (A_v \times f_y \times d) / V_s < S_{\max} \quad \textbf{Persamaan 2. 26}$$

A_v merupakan Luas tulangan sengkang (mm^2)

A_s didapatkan dari $0,09 \times (s \times b \times c \times f_c') / f_y$

Dimana:

s : Spasi atau jarak vertikal pemasangan tulangan geser.

bc : Dimensi lebar pada bagian inti beton yang terkekang.

Ag : Luas penampang utuh (bruto) pada kolom.

Ach : Luas area inti beton, yang pengukurannya diambil dari sisi luar sengkang menuju sisi luar sengkang di seberangnya.

2.5.3 Syarat Tulangan Kolom

Dalam menentukan spesifikasi teknis penulangan kolom, standar yang digunakan sebagai acuan utama adalah SNI 2847:2019. Regulasi ini memisahkan ketentuan menjadi dua segmen spesifik: Pasal 18.7.4 yang mengatur kriteria Tulangan Longitudinal dan Pasal 18.7.5 yang berfokus pada Tulangan Transversal. Uraian komprehensif mengenai persyaratan bagi kedua jenis tulangan tersebut dipaparkan sebagai berikut.

2.5.3.1 Tulangan Longitudinal

Dalam Pasal 18.7.4, terdapat dua batasan krusial terkait luas tulangan longitudinal. Batas minimum wajib dipenuhi untuk mencegah deformasi jangka panjang sekaligus memastikan momen leleh kolom tetap lebih besar daripada momen retaknya. Sementara itu, batas maksimum ditetapkan karena alasan yang berbeda. Pembatasan ini esensial untuk menjaga efektivitas transfer beban pelat-ke-kolom, membatasi tegangan geser, serta mencegah masalah kepadatan tulangan saat pengecoran. Sesuai SNI 2847:2019, ketentuannya meliputi:

Mengacu pada ketentuan Pasal 18.7.4.1, persyaratan untuk luas tulangan longitudinal (A_{st}) tidak boleh keluar dari koridor yang telah ditetapkan. Pasal tersebut mewajibkan rasio penulangan berada pada rentang $0,01 A_g$ sampai dengan $0,06 A_g$.

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

Persamaan 2. 27

Keterangan:

A_{st} = Luas tulangan longitudinal

A_g = Luas bruto penampang kolom

2..5.3.2 Tulangan Transversal

Berdasarkan SNI 2847:2019, tulangan transversal pada kolom berperan sebagai pengekang tulangan longitudinal agar tidak mengalami tekuk, sekaligus meningkatkan kapasitas kolom dalam menahan gaya geser serta memberikan daktilitas tambahan, khususnya di daerah sendi plastis. Tulangan transversal ini umumnya berupa sengkang atau spiral yang dipasang melingkari tulangan longitudinal. Aturannya, diameter tulangan transversal minimal adalah 10 mm, sedangkan untuk kolom berukuran kecil dapat digunakan diameter 8 mm. Jarak antar tulangan dibatasi agar efektivitas pengekangan tetap optimal, yakni dibatasi pada angka 150 mm, serta tidak diperkenankan melebihi hasil perkalian enam kali diameter tulangan longitudinal yang terpasang., atau seperempat ukuran sisi kolom—dipilih nilai terkecil. Pada bagian sendi plastis, jarak sengkang harus dibuat lebih rapat guna memastikan kolom memiliki kapasitas lentur dan daktilitas yang cukup. Dengan pengaturan tersebut, tulangan transversal sesuai ketentuan

2.6 Hubungan Balok – Kolom (*Joint*)

Dalam proses perancangan sambungan balok-kolom, kepatuhan terhadap standar yang berlaku adalah hal mutlak. Mengacu pada ketentuan SNI 2847:2013, kriteria yang wajib diimplementasikan meliputi:

- a. Evaluasi terhadap gaya-gaya yang membebani tulangan balok memanjang di area sambungan merupakan langkah krusial. Dalam perhitungan ini, wajib digunakan asumsi bahwa nilai tegangan tarik lentur tulangan mencapai 1,25 kali f_y .
- b. Berdasarkan standar beton yang berlaku, batas minimum sebesar 20 kali diameter tulangan balok memanjang terbesar harus dipenuhi oleh dimensi kolom. Persyaratan ini berlaku spesifik untuk sisi kolom yang sejajar dengan arah tulangan tersebut, khususnya pada area di mana kolom berlanjut melewati sambungan balok-kolom.

2.6.1 Penulangan Geser pada Hubungan Balok – Kolom

Persamaan berikut digunakan untuk mengevaluasi kekuatan geser sambungan balok-kolom dengan mengikuti pedoman SNI 2847:2013:

$$V_{jn} = c \cdot \sqrt{f'c \cdot A_j}$$

Persamaan 2. 28

Nilai c mempunyai ketentuan sebagai berikut :

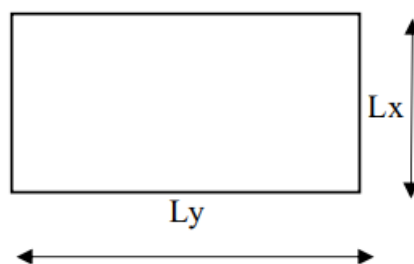
- 1,7 pada Kondisi Terikat Balok - Kolom di semua sisi.
- 1,25 pada Kondisi Terikat Balok - Kolom di tiga sisi atau dua sisi yang berlawanan.
- 1,0 pada sekenario kasus lainnya

Kekuatan geser sambungan balok-kolom dilambangkan dengan V_{jn} , dan luas efektifnya (A_j) dihitung dengan mengalikan tinggi (h) dengan lebar efektifnya.

2.7 Pelat

Perancangan pelat dalam struktur bangunan harus mempertimbangkan beberapa faktor, termasuk beban mati dan hidup, serta keseimbangan dan kesesuaian kondisi. Perhitungan perencanaan pelat meliputi dimensi dan tumpuan pelat, sistem penulangan pelat, dan analisis momen lentur. Dalam konfigurasi struktur bagian atas (upper structure), penggunaan pelat merupakan elemen yang biasa diimplementasikan, seperti lantai, dan perlu diposisikan dengan teliti agar memiliki kekerasan memadai agar mengatur lendutan atau perubahan yang berpotensi mengurangi kapasitas atau daya tahan struktur terhadap beban operasional. Dalam desain struktur, sistem pelat diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama berdasarkan distribusi gayanya, yakni pelat satu arah dan pelat dua arah. Salmon, CG, dan Wang, CK. (1979). Perencanaan pelat dibagi menjadi dua langkah penting yang harus diperhatikan, yaitu perencanaan ketebalan pelat serta perancangan penulangan dalam pelat yang merujuk pada SNI 2847:2019.

2.7.1 Perencanaan Dimensi Pelat



Gambar 2. 2 Dimensi Bidang Pelat

L_x = Bentang terpanjang

L_y = Bentang terpendek

Pada kondisi tumpuan keliling penuh dengan rasio dimensi ($L_x/L_y < 2$), mekanisme transfer beban terjadi pada dua jalur (arah x dan y), yang mendefinisikan karakteristik pelat dua arah. Konsekuensi dari pola distribusi beban ini adalah perlunya aplikasi perkuatan di kedua sisi pelat secara ortogonal. Tidak hanya aspek kekuatan, perencanaan ketebalan pelat juga harus dihitung secara presisi sebagai upaya mitigasi risiko lendutan., menurut SNI 2847:2019 Pasal 8.3.1.2. Rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung ketebalan ini:

Tabel 2. 2 Perencanaan Perhitungan Pelat Lantai

α_{fm}	h minimum, mm	
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	8.3.1.1 berlaku	
$0,2 < \alpha_{fm} \leq 2,0$	Terbesar dari :	$\frac{\ln (0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 5\beta (\alpha_{fm} - 0,2)}$
		Tidak boleh < 125 mm
$\alpha_{fm} > 2,0$	Terbesar dari :	$\frac{\ln (0,8 + \frac{fy}{1400})}{36 + 9\beta}$
		Tidak boleh < 90 mm

- Untuk pelat tepi tidak menerus, balok tepi dengan $\alpha_f \geq 0,80$ atau ketebalan minimal yang ditunjukkan pada tabel diatas. Panel tepi tidak menerus harus diperbesar setidaknya 10% sesuai SNI 2847:2019

- Jika dapat ditunjukkan dengan perhitungan bahwa lendutan yang terjadi tidak melebihi batas lendutan, pelat dengan tebal kurang dari tebal minimum yang ditetapkan dapat digunakan.

Sumber: SNI 2847:2019

Sumber : SNI 2847:2019

Di bawah ini adalah uraian ringkas tentang keterangan yang terdapat dalam tabel tersebut:

H = Ketebalan Pelat

L_n = Panjang bentang bebas dari struktur dua arah, dihitung dari tepi ke tepi penopang dalam pelat tanpa balok, dan dari tepi ke tepi penopang dalam kondisi lainnya (mm).

- β = Perbandingan bentang bebas pelat dua arah arah panjang dan pendek.
- α_{fm} = Total rata-rata α_f tiap berkas pada tepi pelat.
- α_f = Batas lateral perbandingan antara kekakuan lentur pelat ($E_c I_s$) dan kekakuan lentur penampang balok ($E_c b I_{cb}$) adalah garis tengah pelat yang berdekatan pada setiap sisi balok.

$$\alpha_f = \frac{E_c b I_{cb}}{E_c I_s}$$

Persamaan 2. 29

- I_b = Bagian pelat pada kedua sisi balok yang besarnya proyeksi balok yang berada di atas atau di bawah pelat, tetapi tidak melebihi empat kali tebal pelat, termasuk dalam momen inersia bruto pada penampang melintang. bagian balok terhadap sumbu berat.
- I_s = Total momen inersia pada penampang pelat.

2.7.2 Perencanaan Tulangan Pelat

Tujuan merancang tulangan pelat adalah untuk memberikan pelat kekuatan tarik yang diperlukan untuk menopang beban—baik hidup maupun mati—yang dikenakan padanya, memperkuat struktur dan meningkatkan keunggulan struktural pelat . Evaluasi terhadap rasio dimensi panjang dan lebar menjadi prioritas utama untuk menetapkan klasifikasi pelat, baik sebagai pelat satu arah maupun dua arah. Penentuan jenis pelat ini merupakan tahap fundamental yang wajib dijalankan sesuai pedoman teknis penulangan pelat yang termuat dalam SNI 2847:2019. Selanjutnya, identifikasi beban yang beroperasi pada pelat, perencanaan kualitas beton pelat, kekuatan tarik baja tulangan, dan ketebalan pelat menjadi tahapan penting dalam proses perencanaan penulangan pelat. Sesuai dengan SNI 2847:2019. Pada pelat satu arah minimum, tulangan lentur harus dekat dengan permukaan tarik beton karena beban, sedangkan tulangan utama tidak boleh melebihi 3x dari ketebalan pelat ($3h$). Pada pelat dua arah karena beban dari pelat yang disalurkan keempat balok sebagai penopang maka dibutuhkan tulangan. Lendutan yang dihasilkan pun relative kecil akibat adanya kekakuan dari pelat yang meningkat.

Di bawah ini adalah tahapan-tahapan perhitungan penulangan lentur pada pelat:

1. Menemukan momen nominal (M_n)

M_n = diperoleh melalui rasio antara momen akhir pelat terhadap faktor reduksi pelat (Θ), dimana $\Theta = 0,8$ pada skenario lentur.

2. Menemukan koefisien tahanan momen (R_n)

$R_n = \frac{M_n}{(b \cdot d^2)}$, dimana d adalah elemen tinggi efektif dan b adalah elemen lebar.

3. Menemukan rasio tulangan (ρ)

- $M = \frac{f_y}{(0,85 \cdot f_c)}$ dimana f_y mewakili tegangan luluh tulangan dan f_c kekuatan Jadwal pengepresan beton adalah 28 hari.

- $\rho_b = \frac{(0,85 \cdot f_c \cdot \beta_1)}{f_y} \times \frac{600}{(600 + f_y)}$, dimana β_1 adalah tegangan tekan persegi ekivalen beban yang berhubungan dengan faktor tinggi balok.

- $\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y}$ dan $\rho_{maks} = 0,75 \times \rho_b$ adalah batasan pada rasio penguatan.

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

4. Penentuan rasio penguat yang diperlukan (kebutuhan)

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

Apabila kondisi $\rho_{perlu} < \rho_{min}$ terpenuhi, maka wajib dilakukan peningkatan rasio sebesar 30%. Dengan demikian, parameter yang diadopsi dalam perhitungan selanjutnya ρ_{pakai} adalah hasil perkalian $1,3 \times \rho_{perlu}$.

5. Menghitung tulangan yang dibutuhkan (A_s)

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

6. Pengecekan kapasitas penampang

$\alpha = (A_s \times f_y) / (0,85 \cdot f_c \times b)$, dan $\phi M_n = A_s \times f_y (d - a/2)$ harus lebih besar dari nilai M_u untuk menjamin tercapainya kapasitas penampang.

2.8 Fondasi

Fondasi merupakan elemen dasar dari struktur konstruksi dengan terhubung secara langsung pada tanah atau terletak pada bawah komponen bangunan lainnya. Secara prinsip, fondasi berfungsi sebagai elemen transmisi yang bertugas meneruskan beban bangunan ke lapisan tanah dasar. Efektivitas penyaluran ini dicapai melalui distribusi beban yang merata pada seluruh luas area fondasi, sehingga daya dukung tanah dapat bekerja secara optimal. Terdapat beragam jenis fondasi yang dapat

digunakan, termasuk pondasi dangkal (seperti pondasi telapak dan pondasi rakit), Pondasi dalam, seperti tiang pancang, sumuran, dan kaison, serta pondasi apung (seperti pondasi pelat beton) J. Hadihardaja (1997). Perencanaan fondasi harus mempertimbangkan efisiensi biaya, keefektifan dalam menanggung beban struktural, optimalitas dalam hal waktu dan metode konstruksi, dan kemampuan untuk menahan beban tanpa mengalami penurunan. Untuk menentukan jenis dan dimensi fondasi yang tepat, diperlukan penyelidikan tanah di lokasi konstruksi.

2.8.1 Pile Cap

Dalam sistem pondasi dalam, pile cap didefinisikan sebagai struktur beton yang bertindak sebagai alas penyangga vital. Fungsi utama elemen ini adalah memfasilitasi penopangan sekaligus menjamin efektivitas distribusi beban yang berasal dari kelompok tiang pancang (pile) agar bekerja sebagai satu kesatuan. Pile cap ditempatkan di bagian atas tiang pancang dan bertujuan untuk menyebar beban dari tiang-tiang tersebut ke seluruh area pondasi, serta untuk memberikan dukungan yang stabil bagi struktur di atasnya. Pile cap juga dapat berperan sebagai pengikat yang menghubungkan tiang-tiang pancang menjadi satu kesatuan struktural yang kokoh. (Anggoro Wiratmoko et al., 2019) Perhitungan pile cap melibatkan berbagai aspek, termasuk dimensi, beban aksial, mutu beton, dan penulangan. Pada umumnya, perhitungan ini mencakup luas kerja lantai, kebutuhan beton, dan besi tulangan. Selain itu, perhitungan juga melibatkan efisiensi, beban maksimum tiang pancang, dan kapasitas beban tiang pancang. Dimensi pile cap, beban aksial, mutu beton, dan penulangan merupakan faktor-faktor kunci yang harus dipertimbangkan dalam perhitungan pile cap. Perhitungan ini penting untuk memastikan kekuatan dan keandalan struktur pondasi. Dalam praktiknya, perhitungan pile cap juga melibatkan volume beton dan jenis fondasi yang digunakan. (Asri Wulan dkk, 2015)

Persyaratan berikut diterapkan sesuai dengan ketentuan yang diuraikan dalam SNI 2847:2019 pada pasal 13.4.2 untuk menentukan kriteria desain tumpukan topi selama proses perencanaan:

- Perhitungan reaksi yang dihasilkan pada bagian tengah tiang menghasilkan momen terfaktor dan gaya geser.

- Dasar tiang perlu dirancang dengan cara yang telah dipersiapkan sehingga tinggi efektif selimut bagian bawahnya tidak kurang dari 300mm.

Untuk memenuhi spesifikasi pondasi satu arah, pile cap dibuat dengan benar.

(a) dan fondasi dua arah (b) dengan keterangan:

- $\phi V_n \phi V_u$, Pada V_n , yang ditentukan untuk geser satu arah menurut paragraf 22.5, V_u ditentukan sesuai dengan pasal 13.4.2.5, dan v ditentukan sesuai dengan pasal 21.2.

- $\phi V_n \phi V_u$, Pada V_n , yang ditentukan untuk geser dua arah menurut paragraf 22.6, V_u ditentukan sesuai dengan pasal 13.4.2.5, dan v ditentukan sesuai dengan pasal 21.2.

2.8.2 Bored Pile

Pondasi bored pile adalah varian pondasi dalam yang dibuat secara in-situ. Hardiyatmo (2010) menjelaskan bahwa prinsip kerja pondasi ini adalah replacement pile, dimana tanah dikeluarkan terlebih dahulu untuk menciptakan ruang bagi beton bertulang. Secara struktural, Coduto (1994) mendefinisikan tiang bor sebagai lubang silindris hasil pengeboran yang diisi beton untuk mentransfer beban ke lapisan tanah kompeten di kedalaman tertentu. Karena tidak memadatkan tanah ke samping layaknya tiang pancang, Tomlinson dan Woodward (2008) menyebutnya sebagai non-displacement pile. Keunggulan utamanya adalah minimnya deformasi pada tanah sekitar, namun sangat bergantung pada teknik pengeboran untuk menjaga lubang tetap stabil sebelum dicor. Mengacu pada pedoman teknis yang berlaku di Indonesia, yakni SNI 8460:2017, tiang bor diartikan sebagai elemen pondasi yang dikonstruksi lewat penggalian tanah dan pengecoran, yang bertujuan meneruskan beban struktur ke lapisan tanah keras atau batuan.

2.9 Pemodelan 3D

Representasi tiga dimensi (3D) yaitu proses pembuatan representasi visual objek yang meliputi dimensi panjang, lebar, dan tinggi, serta memperhatikan berbagai aspek seperti bentuk, tekstur, dan ukuran. Teknik ini umumnya diterapkan di

beragam sektor, seperti arsitektur, industri, desain mode, dan teknologi, untuk menghasilkan representasi visual yang lebih realistis dari objek atau lingkungan.(Alief Leevandra,2020). Permodelan 3D pada perencanaan ini menggunakan program Cubicost TAS & TRB dengan acuan data serta informasi pada shop draing Gedung ERHA Central Semarang .

2.9.1 Cubicost

Cubicost adalah serangkaian perangkat lunak berbasis BIM (*Building Information Modeling*) yang dipegunakan untuk memperhitungkan kuantitas pada pekerjaan konstruksi. Terdapat beberapa jenis produk perangkat lunak Cubicost, antara lain Cubicost Take off for Architecture and Structure (TAS) dan Cubicost Take off for Reinforced Bar (TRB). TAS digunakan untuk menghitung kuantitas dari elemen arsitek dan struktur, sedangkan TRB digunakan untuk menghitung kuantitas penulangan atau pembesian. (Ajeng Ayu,2020).Perangkat lunak ini dapat membantu dalam perhitungan ulang kuantitas pekerjaan beton dan baja tulangan secara otomatis, serta dapat terkoneksi dengan aplikasi BIM seperti Autodesk, Revit, dan Sketchup. Cubicost merupakan alat yang sangat bermanfaat bagi QS Engineer dan Estimator karena mampu melakukan perhitungan dengan tepat dan sesuai. Software ini memberikan dukungan yang besar dalam bidang ini dengan menyediakan Cubicost yang terbagi dalam 4 jenis, masing-masing dengan fokus fungsi yang berbeda untuk membantu melakukan perhitungan jumlah material dan estimasi biaya konstruksi. Glodon Costing Solution menawarkan berbagai macam seri Cubicost. Di antara lain :

1. Cubicost *Take-off Architecture and Structure* (TAS)

Cubicost TAS adalah bagian dari serangkaian perangkat lunak berbasis BIM (*Building Information Modeling*) yang digunakan untuk menghitung kuantitas elemen arsitektural dan struktural dalam proyek konstruksi. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk melakukan estimasi kuantitas secara otomatis berdasarkan model bangunan. Selain itu, Cubicost TAS juga dapat terkoneksi dengan aplikasi BIM seperti Autodesk, Revit, dan Sketchup. Produk ini merupakan bagian dari bundling 5D BIM Cubicost yang juga mencakup TRB (*Take off for Reinforced Bar*) dan TME (*Take off for Mechanical & Electrical*).

Cubicost TAS telah digunakan oleh berbagai perusahaan konstruksi dan telah mendapatkan sertifikasi.

2. Cubicost *Take-off reinforcement Bar* (TRB)

Cubicost TRB adalah bagian dari serangkaian perangkat lunak berbasis BIM (*Building Information Modeling*) yang digunakan untuk menghitung kuantitas penulangan atau pembesian dalam proyek konstruksi. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk melakukan estimasi kuantitas secara otomatis berdasarkan model bangunan. Cubicost TRB juga dapat mempertimbangkan perbedaan dimensi antara elemen struktural, seperti balok, dan menghitung kebutuhan besi secara miring untuk tulangan utama balok yang memiliki perbedaan dimensi dengan balok di sekitarnya. Selain itu, penggunaan Cubicost TRB dapat mempercepat proses perhitungan dan dianggap lebih disukai dibandingkan metode konvensional oleh sebagian pengguna. Produk ini juga telah mendapatkan sertifikasi dari beberapa perusahaan konstruksi.

Semua produk Cubicost yang telah disebutkan memiliki fokus yang berbeda-beda terhadap kebutuhan survei kuantitas dalam estimasi biaya konstruksi. Namun, secara keseluruhan, semua ini dapat meliputi aturan standar untuk menghitung anggaran proyek. Dampaknya adalah proses RAB menjadi lebih optimal, tepat, serta terorganisir. Pendekatan ini jauh lebih optimal dibandingkan dengan menggunakan cara tradisional.

2.9.2 Autodesk

Autodesk adalah perusahaan multinasional yang mengembangkan perangkat lunak untuk berbagai industri, termasuk arsitektur, teknik sipil, konstruksi, manufaktur, dan desain. Beberapa aplikasi Autodesk yaitu, AutoCad, Revit, Fusion, 3ds Max, Naviswork. (Autodesk, 2012). Aplikasi Autodesk yang digunakan pada perancangan kali ini adalah Naviswork.

2.9.2.1 Autodesk Naviswork

Navisworks adalah sebuah perangkat lunak yang mendukung dalam proses perancangan dan penjadwalan proyek, termasuk pekerjaan pada struktur, arsitektur, mekanik, listrik, dan tata air di dalam suatu proyek. Navisworks menyediakan

beragam fitur seperti *clash detection*, penjadwalan waktu (timeliner), animasi, lembar kerja kuantifikasi, dan sebagainya. Menurut Autodesk Inc. (2018), optimasi terhadap Model 3D dapat dicapai melalui serangkaian proses integrasi dan tinjauan interaktif. Tidak hanya itu, analisis serta visualisasi yang variatif juga diperlukan guna memvalidasi rancangan sekaligus menghasilkan estimasi yang akurat selama tahapan konstruksi berlangsung.

2.9.3 SAP 2000

SAP 2000, yang merupakan kependekan dari *Structural Analysis Program* 2000, yaitu di antara perangkat lunak yang sering dipergunakan melakukan analisis struktur secara efisien. Bangunan, jembatan, menara, konstruksi lepas pantai, dan jenis struktur lainnya semuanya didukung oleh perangkat lunak ini. Program ini dianggap praktis karena memungkinkan pembuatan model sesuai dengan preferensi pengguna, mampu melakukan analisis ulang struktur dengan cepat, serta menyediakan pemrosesan output yang lengkap dan fleksibel. Oleh karena itu, penguasaan SAP 2000 menjadi sangat penting bagi seorang *civil engineering* untuk merancang desain struktur yang aman. (Adde Currie,2023)

2.10 Quantity Take Off (QTO)

Quantity Take Off (QTO) ialah proses perhitungan jumlah material yang diperlukan untuk melaksanakan proyek konstruksi. QTO biasanya dilakukan pada tahap perencanaan proyek untuk menentukan jumlah material yang dibutuhkan dan memperkirakan biaya yang diperlukan. (Soeharto,2001). QTO melibatkan pengukuran dan perhitungan volume material seperti beton, bata, pasir, dan lain sebagainya. QTO bisa dilakukan secara manual atau menggunakan software khusus seperti Autodesk Revit, Navisworks, dan 5D BIM Cubicost. Tingkat akurasi yang tinggi serta efisiensi waktu yang optimal menjadi dampak langsung dari penerapan perangkat lunak tersebut. Hal ini dimungkinkan karena sistem mampu menjalankan perhitungan kuantitas material secara otomatis tanpa intervensi manual yang berlebih. QTO yang akurat sangat penting dalam manajemen biaya konstruksi, karena dapat membantu menghindari biaya yang tidak terduga dan memastikan bahwa proyek tetap berada dalam anggaran yang telah ditetapkan.

2.11 Perhitungan RAB

Menurut Djojowiriono (1984), penentuan Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan langkah fundamental untuk memprediksi nilai akhir suatu proyek konstruksi. Prosedur ini mewajibkan adanya kalkulasi komprehensif terhadap berbagai elemen input. Mulai dari pengadaan bahan material, pembiayaan tenaga kerja, hingga penggunaan peralatan, semuanya diperhitungkan sebagai satu kesatuan untuk menetapkan total anggaran proyek. Perhitungan RAB ini biasanya dilakukan oleh seorang Quantity Surveyor (QS) atau Estimator, dengan mempertimbangkan spesifikasi proyek, gambar kerja, dan estimasi volume pekerjaan yang akan dilakukan. Tujuan utamanya adalah untuk memastikan bahwa proyek dapat dilakukan dengan anggaran yang tersedia dan memastikan kesesuaian antara biaya dengan rencana proyek yang ada.

2.12 Penjadwalan

Penjadwalan konstruksi merupakan proses perencanaan yang melibatkan penentuan urutan kegiatan dan pengalokasian sumber daya yang diperlukan agar proyek konstruksi mampu terselesaikan sesuai dengan *timeline* yang direncanakan. Ervianto (2003). Tahap penjadwalan melibatkan identifikasi tugas-tugas yang harus diselesaikan, melakukan penentuan batas waktu yang spesifik pada masing-masing item pekerjaan, mengidentifikasi ketergantungan antar tugas, dan mengidentifikasi sumber daya yang diperlukan pada tiap kegiatan .(Kartika,2015)

Penjadwalan konstruksi sering kali dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak khusus seperti Microsoft Project atau Primavera P6, yang memungkinkan manajer proyek untuk mengelola jadwal secara terperinci, memantau kemajuan pekerjaan, dan mengidentifikasi potensi konflik atau keterlambatan. Penerapan instrumen analitis seperti Network Diagram, PERT (Program Evaluation and Review Technique), hingga metode CPM (Critical Path Method) merupakan fondasi utama dalam penyusunan jadwal konstruksi. Integrasi metode-metode ini, yang seringkali didukung oleh perangkat lunak manajemen proyek, bukan sekadar formalitas administrasi. Tujuan utamanya adalah menciptakan skenario pelaksanaan yang presisi: di mana alokasi sumber daya teroptimasi, potensi

tumpang tindih antar pekerjaan dapat dimitigasi, dan pada akhirnya, target penyelesaian proyek tercapai secara tepat waktu.

Penjadwalan konstruksi juga memperhitungkan faktor-faktor risiko dan kendala yang mungkin memengaruhi proyek, seperti cuaca buruk, keterlambatan material, atau masalah perizinan. Dengan merencanakan dan menjadwalkan dengan baik, manajer proyek dapat mengelola proyek secara efisien dan mengurangi risiko keterlambatan dan biaya tambahan.

2.12.1 Microsoft Project

Microsoft Project merupakan sebuah aplikasi manajemen proyek yang dibuat oleh Microsoft. Fungsinya yaitu untuk mempermudah manajer proyek pada saat merencanakan proyek, mengatribusikan pekerja, mengawasi progress, mengatur pengeluaran, dan mengevaluasi beban kerja. (Erizal, 2007). Microsoft Project memiliki berbagai fitur, termasuk kemampuan untuk membuat jadwal proyek yang terperinci, mengelola sumber daya, dan memantau kemajuan proyek secara efisien. Perangkat lunak ini juga memungkinkan kolaborasi antar tim proyek dan integrasi dengan aplikasi Microsoft 365 lainnya seperti Microsoft Teams, OneDrive, dan SharePoint.

2.12.2 Naviswork

Navisworks Manage merupakan instrumen evaluasi proyek komprehensif buatan Autodesk, Inc. yang dirancang untuk menjembatani koordinasi, analisis, serta komunikasi visi konstruksi. Esensi utama perangkat lunak ini terletak pada kapasitasnya dalam mengonsolidasikan data desain multidisiplin dari beragam aplikasi BIM menjadi satu model terpusat. Guna menekan risiko keterlambatan dan kerja ulang, fitur manajemen kesalahan serta deteksi tabrakan (*clash detection*) diterapkan sebagai langkah mitigasi dini terhadap potensi masalah proyek. Lebih jauh, integrasi antara model parametrik dengan variabel jadwal dan biaya memungkinkan pelaksanaan simulasi analisis 4D dan 5D secara presisi (Autodesk, 2012).