

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penjelasan Umum Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY

Universitas Negeri Yogyakarta (UNY) sebagai institusi pendidikan besar di Indonesia secara berkelanjutan melakukan pembangunan fasilitas untuk menunjang kualitas akademik dan proses pembelajaran. Pembangunan fasilitas di UNY mencakup berbagai aspek, mulai dari gedung perkuliahan yang representatif, laboratorium dengan peralatan mutakhir, hingga sarana penunjang seperti perpustakaan digital, pusat penelitian, dan ruang diskusi mahasiswa.

Oleh karena itu, dilakukan perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY dengan pendekatan BIM 5D yang mengintegrasikan sistem struktur atas yang tahan gempa. Tahap awal perencanaan meliputi perhitungan desain awal (*Preliminary design*) serta analisis beban struktur yang mengacu pada SNI 1727:2020 tentang Beban Desain *Minimum* dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain, serta PPIUG 1983 mengenai Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung.

Perencanaan struktur beton mengacu pada SNI 2847:2019 mengenai persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung serta SNI 2847:2013 tentang tata cara perencanaan struktur beton pada bangunan gedung. Sementara itu, perencanaan struktur tahan gempa didasarkan pada SNI 1726:2019 yang mengatur tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung.

2.2 *Building Information Modelling* (BIM)

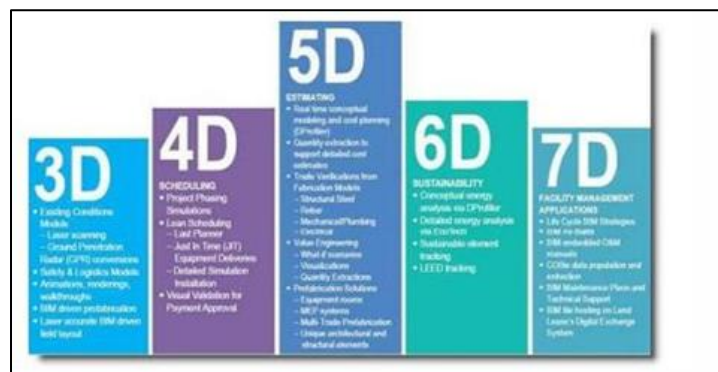
Metode terbaru dalam mengelola informasi proyek pada tahap perencanaan, desain, konstruksi, dan pelaksanaan proyek bangunan dikenal dengan istilah *Building Information Modeling* (BIM). Penggunaan BIM sebagai metode terbaru dapat meningkatkan efisiensi dalam mengatur informasi proyek konstruksi untuk

mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan memperbaiki proses pelaksanaan proyek. Hampir semua perusahaan besar di industri konstruksi telah menerapkan BIM, tetapi masih ada juga beberapa perusahaan konstruksi yang di mana belum memiliki pemahaman dan pengalaman terkait teknologi tersebut (Mieslenna and PUPR, 2019).

Building Information Modeling (BIM) memiliki beberapa tahapan dimensi dalam proses perencanaannya. Tahap awal meliputi BIM 2D dan 3D yang berfokus pada data dan informasi bangunan. Selanjutnya, BIM 4D berkaitan dengan penjadwalan proyek, BIM 5D menitik beratkan pada *work breakdown structure* dan estimasi biaya, BIM 6D berfokus pada analisis energi, serta BIM 7D mencakup *building life cycles* secara keseluruhan (Rachmawati, 2022). Secara lebih rinci, pembagian BIM berdasarkan modul pelatihan perencanaan konstruksi dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2018) dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. BIM 2D merupakan tahap awal pemodelan desain yang dituangkan dalam gambar kerja berupa sketsa denah, detail, dan potongan, yang merepresentasikan dimensi panjang, lebar, dan tinggi bangunan.
2. BIM 3D merupakan tahap pemodelan yang menampilkan visualisasi bangunan secara menyeluruh sebagai pengembangan dari BIM 2D, sehingga dapat dilihat dalam tiga sumbu, yaitu x, y, dan z (panjang, lebar, dan tinggi). Selain itu, BIM 3D memungkinkan identifikasi potensi benturan (*clash*) antara elemen struktur dan arsitektur.
3. BIM 4D merupakan pengembangan dari BIM 3D yang diintegrasikan dengan penjadwalan proyek (*schedule*), sehingga dapat digunakan untuk merencanakan durasi dan tahapan pekerjaan. Selain itu, BIM 4D juga berfungsi dalam memantau serta membandingkan antara rencana dan realisasi progres pembangunan.
4. BIM 5D merupakan pengembangan dari integrasi BIM 3D dan 4D yang digunakan untuk menampilkan volume pekerjaan serta menyusun *Work Breakdown Structure* (WBS) guna mendukung estimasi biaya dalam proyek pembangunan.

5. BIM 6D merupakan tahapan analisis yang berfokus pada aspek keberlanjutan, khususnya dalam mengevaluasi kinerja energi bangunan (*energy analysis*) guna mendukung konsep ramah lingkungan.
6. BIM 7D merupakan tahap pemodelan yang mendukung pengelolaan fasilitas dan aset bangunan sejak fase desain hingga pembongkaran. Selain itu, BIM 7D juga menyediakan rekomendasi pemeliharaan yang efektif untuk menjaga kinerja bangunan.



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

Perencanaan BIM 5D pada Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY diawali dengan pemodelan 2D menggunakan AutoCAD serta perhitungan yang mengacu pada SNI 2847:2013 dan SNI 2847:2019. Selanjutnya, dilakukan analisis struktur menggunakan SAP2000 untuk mengevaluasi kekuatan elemen terhadap beban berdasarkan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019. Hasil analisis kemudian dikembangkan menjadi model 3D menggunakan Revit untuk menentukan volume pekerjaan. Model 3D tersebut diintegrasikan dengan Microsoft Project dalam penyusunan jadwal proyek, serta menggunakan Navisworks untuk simulasi pelaksanaan konstruksi.

2.2.1 AutoCAD

AutoCAD merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menghasilkan gambar kerja dengan tingkat presisi tinggi dalam bentuk 2 dimensi (Alghifari et al., 2023). Secara umum, AutoCAD dikembangkan oleh Autodesk sebagai aplikasi

yang mampu menerjemahkan gambar baik dalam format 2D maupun 3D, dengan fokus pada desain serta analisis yang lebih detail. Dalam proyek konstruksi, AutoCAD banyak dimanfaatkan oleh kontraktor, konsultan perencana, hingga tenaga pemodelan struktur. Khususnya dalam perencanaan bangunan, *software* ini berperan penting dalam membantu pembuatan desain yang sesuai kondisi lapangan, baik untuk pekerjaan struktur, arsitektur, maupun perencanaan *Mechanical, Electrical, dan Plumbing* (MEP).

Dibandingkan dengan perangkat lunak pemodelan lainnya, AutoCAD memiliki keunggulan berupa kemudahan penggunaan, fleksibilitas dalam pembuatan gambar teknik, serta kompatibilitas yang tinggi dengan berbagai *software* analisis dan desain konstruksi. Format file DWG yang digunakan juga telah menjadi standar dalam industri konstruksi sehingga memudahkan proses pertukaran data antar konsultan, kontraktor, maupun pemilik proyek. Selain itu, AutoCAD mampu menghasilkan gambar kerja dua dimensi yang detail dan akurat dengan kebutuhan perangkat lunak yang relatif lebih rendah dibandingkan *software* berbasis *Building Information Modeling* (BIM) seperti Revit. Keunggulan tersebut menjadikan AutoCAD masih banyak digunakan pada tahap perencanaan awal maupun penyusunan gambar kerja proyek konstruksi.

Pada tahap awal perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi dilakukan penyusunan desain struktur awal dalam bentuk *layout* denah. Desain ini mencakup penentuan posisi, panjang, dan lebar balok, penempatan kolom struktur, lokasi tangga dan lift, tata letak dinding, serta fungsi ruang pada setiap lantai bangunan.

2.2.2 SAP2000

SAP2000 adalah perangkat lunak analisis dan desain struktural yang banyak digunakan dalam teknik sipil dan konstruksi. Dikembangkan oleh Komputer dan Struktur, Inc. (CSI), SAP2000 menyediakan banyak fungsi untuk menganalisis semua jenis struktur, termasuk bangunan, jembatan, dan struktur industri. Perangkat lunak ini mendukung berbagai metode analisis seperti analisis statis, dinamis, dan non-linier, serta mampu menangani berbagai metode beban dan pemodelan. Pada

pekerjaan konstruksi Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY, SAP2000 digunakan untuk merencanakan struktur bangunan terhadap berbagai jenis beban, seperti beban mati, beban hidup, serta beban mati tambahan yang mencakup elemen arsitektur dan MEP. Selain itu, perangkat lunak ini juga dimanfaatkan untuk menganalisis respons struktur terhadap pengaruh beban gempa.

Menurut Sari (2024), SAP2000 juga menyediakan alat desain yang mematuhi berbagai undang-undang dan standar internasional, memungkinkan para insinyur menghasilkan desain yang memenuhi persyaratan peraturan. Dengan fitur-fitur seperti pemodelan elemen hingga, analisis respons spektrum, dan pelaporan hasil yang komprehensif, SAP 2000 adalah alat yang sangat berguna untuk memastikan keamanan dan kinerja infrastruktur. Perangkat lunak ini sudah banyak digunakan di seluruh penjuru dunia dalam proyek-proyek besar, membuktikan keandalannya dalam menghadapi tantangan analisis struktural.

Pada perencanaan ini, SAP2000 dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan analisis respons struktur terhadap beban gempa sesuai ketentuan SNI 1726:2019. Hasil analisis berupa gaya dalam, perpindahan struktur, periode getar, gaya geser dasar, serta respons dinamik bangunan dapat diperoleh secara akurat dan digunakan sebagai dasar dalam proses desain elemen struktur. Kemampuan tersebut menjadi salah satu keunggulan SAP2000 dibandingkan perangkat lunak analisis lainnya, khususnya untuk perencanaan bangunan bertingkat yang berada pada wilayah rawan gempa.

2.2.3 Autodesk Revit

Pada umumnya, para pelaksana konstruksi sudah menggunakan aplikasi Autodesk Revit sebagai aplikasi untuk merencanakan sebuah struktur gedung bangunan, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Autodesk Revit merupakan salah satu *software* dari Autodesk yang menghasilkan gambar akhir berupa *modeling* 3D. Menurut Pratama (2022), volume pekerjaan dan analisa hasil perencanaan menjadi hasil Output dari program Autodesk Revit. Hal ini memberi kemudahan terutama bagi

pelaksana konstruksi untuk melakukan proses desain yang membutuhkan efisiensi dan ketepatan waktu yang sangat baik.

Autodesk Revit memiliki berbagai manfaat dalam mendukung proses perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY, di antaranya sebagai media digital yang membantu manajemen pelaksanaan konstruksi dari tahap awal hingga akhir. Selain itu, Revit berfungsi sebagai alat pemodelan yang dapat diintegrasikan ke tahap selanjutnya, seperti penggabungan model desain dengan penjadwalan proyek.

Autodesk Revit dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam menghasilkan model tiga dimensi yang terintegrasi dengan informasi kuantitas pekerjaan, biaya, dan waktu pelaksanaan proyek. Dibandingkan dengan *software* BIM lainnya seperti Tekla Structures dan ArchiCAD, Revit menawarkan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam integrasi lintas disiplin serta kemudahan dalam proses *Quantity Take Off* (QTO). Selain itu, Revit memiliki interoperabilitas yang baik dengan Navisworks untuk simulasi 4D dan Microsoft Project untuk integrasi jadwal proyek, sehingga sangat mendukung penerapan konsep BIM 5D pada penelitian ini. Oleh karena itu, Autodesk Revit dipilih sebagai perangkat lunak utama dalam proses pemodelan dan pengelolaan informasi proyek.

2.2.4 Microsoft Project

Perencanaan bangunan terdiri dari berbagai tahapan analisis struktur yang memerlukan tingkat ketelitian tinggi. Oleh karena itu, diperlukan perangkat lunak yang dapat membantu tenaga konstruksi dalam menyusun perencanaan secara lebih efektif dan efisien, baik dari segi waktu, tenaga, maupun biaya. Salah satu aplikasi yang digunakan untuk mendukung proses tersebut adalah Microsoft Project, yang berfungsi mempermudah penyusunan jadwal proyek.

Menurut Rachmawati (2022), penggunaan Microsoft Project diawali dengan tahap pengaturan awal yang mencakup penyusunan data *Work Breakdown Structure* (WBS) serta data perhitungan pendukung lainnya. Selanjutnya, dilakukan input data yang meliputi nama pekerjaan, durasi pekerjaan, hubungan antar pekerjaan, serta jam kerja tenaga kerja yang terlibat dalam pelaksanaan proyek.

Dengan demikian, Microsoft Project menghasilkan beberapa keluaran utama, yaitu *Gantt chart* yang berbentuk *diagram horizontal* untuk menunjukkan jadwal sepanjang siklus proyek, serta *network diagram* yang menggambarkan urutan dan hubungan antar kegiatan selama pelaksanaan proyek.

Dibandingkan dengan perangkat lunak penjadwalan proyek lainnya, Microsoft Project memiliki keunggulan dalam kemudahan penggunaan, tampilan antarmuka yang sederhana, serta proses penyusunan jadwal yang relatif mudah dipahami oleh pengguna. Microsoft Project menyediakan berbagai fitur perencanaan dan pengendalian proyek, seperti penyusunan *Work Breakdown Structure* (WBS), pengaturan hubungan ketergantungan antar aktivitas, penentuan jalur kritis (*critical path*), pengelolaan sumber daya (*resource management*), serta pemantauan progres pekerjaan. Selain itu, Microsoft Project memiliki kompatibilitas yang baik dengan perangkat lunak lain yang digunakan dalam industri konstruksi sehingga memudahkan proses pertukaran data dan koordinasi proyek.

Pada penelitian ini, Microsoft Project digunakan untuk menyusun jadwal pelaksanaan proyek yang selanjutnya diintegrasikan dengan model tiga dimensi Autodesk Revit melalui Autodesk Navisworks. Integrasi tersebut memungkinkan simulasi pelaksanaan konstruksi dalam bentuk model 4D sehingga urutan pekerjaan dapat divisualisasikan secara lebih jelas. Kemampuan integrasi ini menjadi salah satu keunggulan Microsoft Project dibandingkan beberapa perangkat lunak penjadwalan lainnya, khususnya dalam mendukung penerapan konsep Building Information Modeling (BIM) 5D yang menghubungkan aspek waktu dan biaya dengan model bangunan digital.

2.2.5 Naviswork

Autodesk Navisworks adalah perangkat lunak yang digunakan untuk meninjau dan mengelola proyek konstruksi secara terintegrasi, terutama pada proyek yang menggunakan BIM. Navisworks memungkinkan penggabungan berbagai model dari *software* desain yang berbeda, sehingga tim proyek dapat memvisualisasikan, menganalisis, dan memeriksa model 3D secara komprehensif. Salah satu fitur

utama dari Navisworks adalah *clash detection*, yang digunakan untuk mendeteksi bentrokan atau konflik antar elemen bangunan yang dirancang oleh berbagai disiplin ilmu (arsitektur, struktur, MEP), sehingga membantu mengurangi potensi kesalahan dan penundaan selama proses konstruksi. Autodesk Naviswork Manage adalah *software* peninjau proyek yang juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi konflik, perencanaan, perintah kerja, dan perencanaan proyek (Autodesk Inc.,2018).

Selain itu, Navisworks memiliki fitur penjadwalan 4D yang menghubungkan elemen model 3D dengan jadwal konstruksi, memungkinkan simulasi alur kerja dan pemantauan kemajuan proyek dari waktu ke waktu. Navisworks juga mendukung kolaborasi *multi-disiplin* dengan menampilkan model dari berbagai format desain, memfasilitasi tinjauan bersama tim proyek. Dengan kemampuannya untuk memeriksa konsistensi, mengelola waktu, serta mengoptimalkan koordinasi antar tim, Navisworks menjadi alat penting dalam mengelola proyek konstruksi yang kompleks.

Dibandingkan dengan perangkat lunak koordinasi BIM lainnya, Autodesk Navisworks memiliki keunggulan dalam kemampuan integrasi model dari berbagai format file dan perangkat lunak desain. Navisworks memungkinkan pengguna menggabungkan model yang berasal dari Autodesk Revit, AutoCAD, Civil 3D, maupun perangkat lunak lainnya ke dalam satu lingkungan kerja terpadu. Selain itu, Navisworks memiliki kemampuan visualisasi yang baik sehingga memudahkan proses peninjauan model, identifikasi potensi permasalahan desain, serta koordinasi antar disiplin sebelum pelaksanaan konstruksi dimulai.

Autodesk Navisworks juga memiliki keunggulan dalam penerapan simulasi 4D melalui integrasi model tiga dimensi dengan jadwal proyek yang disusun menggunakan Microsoft Project. Fitur tersebut memungkinkan visualisasi urutan pelaksanaan pekerjaan secara lebih jelas sehingga membantu dalam proses perencanaan, pengendalian waktu, dan evaluasi metode konstruksi. Selain itu, fitur *clash detection* yang tersedia mampu mendeteksi konflik antar elemen struktur, arsitektur, dan MEP secara otomatis sehingga dapat meminimalkan potensi pekerjaan ulang (*rework*) selama tahap pelaksanaan proyek. Kemampuan integrasi,

koordinasi, dan simulasi tersebut menjadikan Autodesk Navisworks sebagai salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam implementasi Building Information Modeling (BIM) pada proyek konstruksi modern.

2.3 Perencanaan Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan Dan Psikologi UNY

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1727:2020 mengenai beban desain *minimum* dan kriteria untuk bangunan gedung serta struktur lainnya, perencanaan harus mencakup seluruh aspek struktur dengan mempertimbangkan persyaratan kekuatan. Hal ini meliputi penentuan dimensi elemen, kebutuhan tulangan pada beton bertulang, serta evaluasi risiko yang mungkin terjadi pada bangunan. Ketentuan terkait kekuatan dan kekakuan struktur juga diatur dalam SNI 1727:2020 pasal 1.3 tentang persyaratan dasar, yang menyatakan bahwa bangunan harus dirancang agar memiliki stabilitas yang memadai, baik terhadap komponen struktural maupun nonstruktural. Selain itu, dalam analisis struktur, kekuatan bangunan ditentukan melalui penerapan kombinasi beban untuk mendapatkan kondisi beban maksimum yang mungkin bekerja pada bangunan.

Perencanaan kombinasi beban mengacu pada SNI 2847:2013 pasal 9.2.1 atau SNI 1727:2020 pasal 2.3, yang mengatur bahwa perhitungan harus mencakup struktur, komponen, hingga pondasi agar kekuatan rencana minimal sama atau lebih besar dari efek beban terfaktor. Selain itu, tegangan pada struktur tidak boleh melampaui batas izin yang telah ditetapkan berdasarkan kombinasi pembebanan tersebut. Dengan demikian, kekuatan bangunan yang dapat diterima harus direncanakan sesuai ketentuan berikut:

1. Prosedur perencanaan harus memastikan bahwa komponen struktural maupun nonstruktural memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan kombinasi beban sebagaimana diatur dalam pasal 2.3 tentang kombinasi dasar yang berkaitan dengan material konstruksi.
2. Ketentuan tegangan izin mensyaratkan bahwa elemen struktural maupun nonstruktural harus dirancang dengan kapasitas yang memadai untuk menahan kombinasi beban sesuai dengan pasal 2.3 tentang kombinasi dasar yang berkaitan dengan material konstruksi.

3. Perencanaan harus memasukkan kombinasi beban gempa sesuai pasal 2.3.6 sebagai bagian tambahan dari kombinasi dasar, serta tidak perlu dikombinasikan secara bersamaan dengan beban angin.

2.4 Konsep *Preliminary design* dan Perhitungan Kebutuhan Tulangan Struktur Atas Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY

Preliminary design merupakan tahap awal perencanaan struktur untuk menentukan dimensi awal elemen seperti balok, kolom, *sloof*, dan pelat berdasarkan pendekatan empiris dan standar yang berlaku. Tahap ini bertujuan memperoleh desain awal yang aman dan efisien sebelum analisis detail dilakukan. Selanjutnya, dilakukan perhitungan pembebanan meliputi beban mati, beban hidup, dan beban lainnya, kemudian dianalisis gaya seperti momen, geser, dan aksial.

Hasil analisis digunakan untuk menentukan kebutuhan tulangan pada setiap elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai ketentuan. Tahap ini memberikan gambaran awal struktur yang aman dan menjadi dasar untuk pengembangan desain lebih lanjut.

2.4.1 Perhitungan Rencana Balok

Balok adalah elemen struktur yang bekerja menahan momen lentur dan gaya geser akibat beban transversal yang bekerja sepanjang bentangnya. Elemen ini berfungsi menopang beban dari bagian atas, seperti pelat lantai, sekaligus meneruskan gaya momen tersebut ke kolom (Afnaldi et al., 2022).

Balok harus memiliki kekuatan dan stabilitas yang memadai agar mampu menahan gaya akibat beban yang bekerja pada bangunan. Stabilitas tersebut ditentukan melalui perhitungan dimensi balok serta penggunaan tulangan baja yang sesuai. Dalam balok, bagian beton berperan menahan gaya tekan dan memberikan kekuatan lentur, sedangkan tulangan baja berfungsi menahan gaya tarik.

1. *Preliminary Design* Balok

Perencanaan awal (*preliminary design*) dilakukan untuk menentukan dimensi balok berdasarkan SNI 2847:2013 Tabel 9.5(a), sebagaimana disajikan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2. 1 Preliminary Design Balok

Perletakan Komponen Struktur	h minimum
Tertumpu Sederhana	$\ell / 16$
Satu Ujung Menerus	$\ell / 18,5$
Kedua Ujung Menerus	$\ell / 21$
Kantilever	$\ell / 8$

(Sumber: SNI 2847:2019)

Dengan demikian, rumus perencanaan awal (preliminary design) balok untuk menentukan tinggi struktur dapat dinyatakan sebagai berikut:

- a. Balok Induk $= h = L/12$
- b. Balok Anak $= h = L/16$
- c. Kantilever $= h = L/8$
- d. *Sloof* $= h = L/18,5$

Perencanaan dimensi lebar balok dapat ditentukan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$b = 1/2 h$$

- a. Bentang bersih (ℓ_n) $\geq 4 d$ efektif
- b. Lebar (bw) \geq nilai minimum dari 0,3h dan 250 mm (balok induk).
- c. Lebar (bw) \geq nilai minimum dari 0,3h
- d. Lebar (bw) $<$ nilai minimum b kolom penumpu dan 0,75 h kolom.

Dengan:

h = tinggi balok (mm)

b = lebar balok (mm)

2. Perhitungan Tulangan Balok

Balok menerima beban lentur dan geser yang harus direncanakan dengan memenuhi ketentuan sebagai berikut:

a. Perhitungan Tulangan Lentur Tarik dan Tekan

Tulangan pada balok harus memenuhi ketentuan rasio tulangan sesuai dengan (SNI 2847:2013) pasal 21.5.2.1, dimana nilai rasio tulangan (ρ) tidak boleh melebihi 0,025 terhadap dimensi efektif penampang. Perhitungan rasio tersebut dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

Menentukan nilai koefisien ketahanan (R_n). Apabila kuat tekan beton (f'_c) lebih dari 28 MPa, maka digunakan ketentuan sebagai berikut:

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

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times R_n}{f_y}} \right)$$

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

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

$$A_s \text{ Perlu Tekan} = \rho \times b \times d_{efektif}$$

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

(SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2, sebelumnya Pasal 21.5.2.1 pada SNI 2847:2013)

$$A_s \text{ Tulangan} = \frac{1}{4} \pi D^2$$

$$\text{Jumlah Tulangan } (n) = \frac{A_s \text{ Perlu Tekan}}{A_s \text{ Tulangan}}$$

Sesuai dengan ketentuan dalam SNI 2847:2013 pasal 21.3.4.1, luas tulangan tekan (A_s) dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$A_s \text{ Perlu Tekan} = 1/3 \times A_s \text{ Pakai Tarik}$$

Syarat;

$A_s \text{ Pakai} > A_s \text{ perlu}$

Dengan:

β = distribusi tegangan

ρ = rasio batasan tulangan

A_s = luas tulangan (mm²)

b. Kontrol Regangan Tarik Balok

Regangan balok dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

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

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

$$\phi M_n \text{ Hitung} = 0,85 \times f'_c \times a \times b \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

Syarat:

$\phi M_n \text{ Hitung} > M_n \text{ Perlu}$.

Dengan:

M_n = momen lentur nominal (kNm)

M_u = momen terfaktor (kNm)

c. Perhitungan Kuat Geser

Berdasarkan ketentuan (SNI 2847:2013) pada Pasal 21.5.4.1, nilai gaya geser nominal (V_c) ditetapkan melalui analisis gaya statis pada bagian komponen di area pertemuan tumpuan.

Diperoleh kuat geser nominal (V_c) (SNI 2847:2013) pasal 11.2.1.1 untuk komponen struktur yang dikenai geser dan lentur:

$$V_c = 1/6 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d$$

$$V_n = V_u / \phi$$

Syarat kontrol geser (SNI 2847:2019) pasal 7.5.1.1:

$V_n > V_c$ (Memenuhi)

$V_u > \phi V_c$ (Memenuhi)

Tulangan geser minimum ($A_v \text{ min}$) wajib dipasang apabila nilai gaya geser terfaktor $V_u > \phi V_c$, dengan ketentuan perhitungannya dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$A_v \text{ Pakai} = \frac{1}{4} \pi r^2 \times n \text{ kaki}$$

$$S \text{ Perlu} = \frac{A_v \text{ Pakai}}{A_v / S \text{ Perlu}}$$

Berdasarkan ketentuan SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4, ditetapkan adanya batas maksimum jarak antar tulangan geser yang harus dipenuhi sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

$$S_{\min} = 100 \text{ mm}$$

$$S_{\text{maks 1}} = \frac{1}{4} d$$

$$S_{\text{maks 2}} = 6D$$

$$S_{\text{maks 3}} = 150 \text{ mm}$$

Dengan:

$$V_c = \text{kuat geser nominal beton (kN)}$$

$$V_u = \text{kuat geser terfaktor (kN)}$$

$$V_n = \text{kuat geser nominal (kN)}$$

$$A_v = \text{luas tulangan geser (mm}^2\text{)}$$

$$\phi = \text{faktor reduksi geser desain bangunan gempa} = 0,6$$

2.4.2 Perhitungan Rencana Pelat Lantai

Pelat lantai merupakan elemen struktur yang tidak bersentuhan langsung dengan tanah dan berfungsi sebagai pemisah antar lantai bangunan. Menurut Azzura (2025), pelat lantai juga berperan sebagai diafragma atau pengaku *horizontal*, sehingga ketebalannya perlu direncanakan sesuai beban mati dan beban hidup yang bekerja di atasnya dengan mengacu pada ketentuan (SNI 2847:2019).

Pada perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY, pelat lantai dirancang menggunakan sistem beton bertulang. Dalam sistem ini, digunakan tulangan baja yang berfungsi untuk menahan gaya tarik pada struktur bangunan.

1. *Preliminary Design Plat*

Pelat lantai dianalisis berdasarkan perbandingan panjang bentang pada arah sumbu x terhadap sumbu y. Rasio ini digunakan untuk menentukan tipe pelat lantai serta menghitung ketebalan pelat atap yang sesuai dengan ketentuan perencanaan.

Jenis plat lantai dirumuskan sebagai berikut:

$$\beta = \frac{L_y}{L_x} < 2 \text{ pelat dua arah}$$

$$\beta = \frac{L_y}{L_x} > 2 \text{ pelat satu arah}$$

Berdasarkan hasil perhitungan rasio, diperoleh nilai perbandingan kuat lentur balok terhadap kuat lentur pelat (α_f) pada balok arah memanjang dan balok arah melintang, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Tebal Minimum Pelat Dua Arah Non Prategang

Nilai α_{fm}	h minimum
$\alpha_{fm} \leq 0,2$	Sesuai Tabel 9.5.3.2 SNI 2847:2013
$0,2 < \alpha_{fm} < 2$	Tidak kurang dari: $h = \frac{\ell_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 5\beta(\alpha_{fm} - 0,2)}$
$\alpha_{fm} \geq 2$	dan tidak boleh kurang dari 125 mm Tidak kurang dari: $h = \frac{\ell_n \left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 9\beta}$
	dan tidak boleh kurang dari 90 mm

(Sumber: SNI 2847:2013) pasal 9.5.3.3

2. Perhitungan Tulangan Plat

Perencanaan dimensi pelat lantai kemudian dilanjutkan dengan analisis kebutuhan tulangan baja yang disesuaikan agar seimbang dengan mutu beton dan mutu baja yang digunakan. Berikut tahapan perhitungannya:

a. Menentukan Batasan Tulangan

$$\rho_b = 0,85 \times \beta \times \frac{f'_c}{f_y} \times \frac{600}{600 + f_y}$$

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

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

b. Menghitung Koefisien Tahanan Balok (R_n)

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

$$R_n = \frac{M_n}{b \times dx / y^2}$$

Dengan:

Mn Perlu = momen nominal (kNm)

ϕ = faktor reduksi = 0,8

c. Luas Tulangan Perlu

$$\rho_{perlu} = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times R_n}{f_y}} \right)$$

Jika $\rho_{perlu} < \rho_{min} < \rho_{max}$ maka digunakan ρ_{min} :

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

$$A_s \text{ pakai} = \frac{1}{4} \times n \times \pi \times D^2$$

Syarat:

As Hitung > As perlu

d. Cek Kapasitas Lentur

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

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

Syarat:

Mn Hitung > Mn Perlu (Memenuhi)

e. Kontrol Lentutan Plat

Berdasarkan (SNI 2847:2019) Pasal 8.3.2.1, lentutan sesaat dan jangka panjang pelat dianalisis mengacu pada Tabel 24.2.2, dan disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Acuan Batas Lentutan

Jenis Komponen Struktur	Kondisi	Lentutan yang Diperhitungkan	Batas Lentutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen nonstruktural yang mungkin rusak	Lentutan seketika akibat beban hidup (L) dan beban hujan (R) maksimum	$\ell/180$
Lantai	akibat lentutan besar	Lentutan seketika akibat beban hidup (L)	$\ell/360$
Atap atau lantai	Memikul atau disatukan dengan	Mungkin akan rusak akibat	Bagian lentutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu $\ell/480$

Jenis Komponen Struktur	Kondisi	Lendutan yang Diperhitungkan	Batas Lendutan
Atap atau lantai	elemen nonstruktural yang tidak rusak akibat lendutan besar	lendutan yang besar seketika hidup	ℓ/240
	Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar	lendutan jangka panjang akibat beban tetap ditambah lendutan seketika akibat beban hidup	

Sumber: (SNI 2847:2019)

Pelat lantai direncanakan sebagai elemen struktur yang menahan beban bersama komponen nonstruktural. Batas lendutan pelat lantai ditentukan melalui perhitungan sebagai berikut:

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{240}$$

$$\delta_e = \frac{5}{384} \times q \times \frac{L_x^3}{E_c \times I_e}$$

Lendutan jangka panjang dihitung berdasarkan durasi beban tetap sesuai SNI 2847:2019 Tabel 24.2.4.1.3, dan disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Faktor Waktu Lendutan Pelat (ξ)

Durasi beban tetap, dalam bulan	Faktor pengaruh waktu ξ
3	1,0
6	1,2
12	1,4
60 atau lebih	2,0

Sumber: (SNI 2847:2019)

Lendutan jangka panjang yang disebabkan oleh pengaruh rangkang dan susut dihitung berdasarkan ketentuan SNI 2847:2019 Pasal R24.2.4.1, dengan perumusan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho}$$

$$\delta_g = \lambda \times q_U$$

$$\delta_{total} = \delta_e + \delta_g$$

Syarat:

$$\delta_{total} < \delta_{max}$$

Dengan:

qU = beban total (N/mm)

δ = lendutan (mm)

2.4.3 Perhitungan Rencana Kolom

Kolom merupakan elemen struktur yang berfungsi menahan beban vertikal. Elemen ini menerima beban dari balok dan pelat lantai, kemudian meneruskannya ke pondasi (Rumbyarso, 2021).

Terdapat beberapa jenis kolom yang digunakan pada bangunan gedung, antara lain kolom baja, kolom spiral, kolom komposit, dan kolom dengan sengkang lateral. Pada perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY, dipilih sistem struktur tahan gempa dengan menggunakan kolom beton bertulang yang dilengkapi sengkang lateral. Sengkang lateral ini berfungsi menjaga posisi tulangan utama agar tetap stabil dan tidak bergeser saat proses pengecoran berlangsung.

Menurut Pasaribu (2023), kolom bekerja menahan beban aksial ultimit dan momen ultimit secara bersamaan. Oleh karena itu, penentuan dimensi dan pembebanannya dihitung berdasarkan beban yang diterima bangunan, yang berasal dari pelat lantai dan diteruskan melalui balok induk serta elemen penghubung antar balok.

1. *Preliminary Kolom*

Perencanaan dimensi kolom dihitung berdasarkan kolom yang menopang beban terbesar pelat. Sesuai (SNI 2847:2019) pasal R12.5.1.4, beban kolom diperhitungkan sebagai berikut:

$$P = 1,2 qD + 1,6 qL$$

Perencanaan dimensi kolom dirumuskan sebagai berikut:

$$A = \frac{P}{\phi \times f'_c}$$

$$B = \sqrt{A}$$

Dengan :

A = Luas Penampang (cm²)

B = Lebar Penampang (cm)

P = Beban Aksial Rencana (kg)

2. Perhitungan Tulangan Kolom

Berdasarkan (SNI 2847:2013) pasal 21.6.1 dimensi kolom harus dipenuhi berdasarkan:

Menahan beban aksial berfaktor lebih besar dari:

$$\frac{A_g \times f'_c}{10} < P_u$$

Ukuran Penampang terpendek: $b \geq 300mm$ (OK)

Rasio

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

Dalam struktur kolom beton bertulang, terdapat beberapa ketentuan yang harus diperhatikan terkait kekuatan baja tulangan, antara lain:

a. Rasio Tulangan

Ketentuan rasio tulangan mengacu pada SNI 2847:2019 Pasal 18.7.4.1, dengan persyaratan sebagai berikut:

$$1\% < \frac{A_s}{b \times h} < 6\%$$

b. Kapasitas Beban Aksial Kolom terhadap Beban Terfaktor

Berdasarkan ketentuan SNI 2847:2013 Pasal 10.3.6.2, kapasitas beban aksial kolom harus lebih besar dari beban aksial terfaktor ($\phi P_n > P_u$), yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi P_n = \phi \left[0.85 \times f'_c \times ab + A_s \times f_y \right]$$

$$\phi P_n = 0,85 \times f'_c \times ab \times b$$

Syarat:

$\phi P_n > P_u$ (Memenuhi)

Dengan:

ab = kondisi keruntuhan imbang (mm)

P_n = beban aksial nominal (kN)

P_u = beban aksial terfaktor (kN)

Kapasitas beban aksial kolom perlu dianalisis dengan mempertimbangkan eksentrisitas yang timbul akibat beban yang bekerja di sekitar kolom. Hal ini disebabkan karena kolom lebih rentan mengalami kegagalan akibat gaya eksentris dibandingkan dengan kolom yang menerima beban sentris. Oleh karena itu, kolom harus dirancang untuk mampu menahan kombinasi gaya tekan dan momen lentur yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\phi P_n e_b = \phi P_n \times e_b + A_s' \times f_y \times (d - d' - d'') \times A_s \times f_s \times d''$$

Syarat:

$$\phi P_n e_b > M_u$$

c. Periksa Eksentrisitas Baja Tulangan Longitudinal dan Transversal

Tegangan baja tulangan tekan (ϵ_s):

$$C_b = \frac{ab}{\beta_1}$$

$$\epsilon_s' = 0.003 \left(\frac{C_b - d'}{C_b} \right)$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$$

Syarat (SNI 2847:2019) tabel 21.2.2:

$$\epsilon_s' > \epsilon_y$$

Dengan:

$E_s = 200.000 \text{ Mpa}$, (SNI 2847:2013) pasal 8.5.2.

d. Periksa Gaya Geser (V_c)

Gaya geser rencana (V_c) dihitung untuk menentukan kebutuhan tulangan geser pada kolom. Berdasarkan ketentuan SNI 2847:2013 Pasal 21.6.3.1, gaya geser maksimum pada setiap joint komponen struktur ditentukan dengan menggunakan kekuatan momen maksimum yang mungkin terjadi

(M_{pr}). Dalam perhitungan gaya geser rencana (V_c), nilainya tidak boleh lebih kecil dari gaya geser terfaktor (V_u) yang diperoleh dari hasil analisis struktur.

$$M_{pr} = \frac{M_u}{\phi}$$

$$V_c = \frac{2 \times M_{pr}}{L_n}$$

Syarat:

V_c > V_u (Memenuhi)

e. Perhitungan Tulangan Geser Kolom

Luas tulangan yang digunakan untuk menahan gaya geser pada kolom dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A_v \text{ Pakai} = \frac{1}{4} \pi r^2 \times n \text{ kaki}$$

$$S \text{ Perlu} = \frac{A_v \text{ Pakai}}{A_v / S \text{ Perlu}}$$

Berdasarkan ketentuan SNI 2847:2013 Pasal 21.6.4, terdapat beberapa batasan terkait jarak tulangan geser sebagai berikut:

$$S \text{ min} = 100 \text{ mm}$$

$$S_{maks1} = \frac{1}{4} h$$

$$S \text{ maks 2} = 6D$$

$$S \text{ maks 3} = 150 \text{ mm}$$

2.5 Pembebanan

Struktur bangunan tahan gempa memiliki tingkat respons terhadap beban gempa yang berbeda-beda, tergantung pada jenis material yang digunakan. Mengacu pada SNI 2847:2013, perencanaan harus didasarkan pada asumsi bahwa struktur mampu menahan seluruh beban yang bekerja. Selain itu, sesuai pasal 8.2.3, perhitungan juga perlu memasukkan pengaruh beban angin dan gempa untuk mempertimbangkan gaya lateral secara menyeluruh. Penerapan kriteria pembebanan gempa ini bertujuan untuk meminimalkan potensi kerusakan, baik pada elemen struktur maupun arsitektural.

Pembebanan pada struktur bangunan bertingkat dihitung sebagai satu sistem yang saling bekerja, dengan mempertimbangkan berbagai jenis beban seperti beban mati, beban hidup, beban mati tambahan, beban angin, dan beban gempa, menurut Prayoga (2021).

2.5.1 Beban Mati

Semua massa dari semua material konstruksi yang dimasukkan ke dalam struktur bangunan dikenal sebagai beban mati. Bersama dengan berbagai komponen arsitektur dan komponen struktur lainnya, *dead load* terdiri dari beban total bagian struktur utama, meliputi dinding, lantai, atap, plafon, tangga, partisi tetap, pelapis atas, dan selubung bangunan. Juga termasuk dalam ruang lingkup ini adalah peralatan yang dipasang secara permanen, bersama dengan beban kran yang diterapkan SNI 1727:2013 pasal 3.1.1.

Saat menetapkan nilai *dead load* 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.

2.5.2 Beban Hidup

Berat yang disebabkan oleh aktivitas manusia, keberadaan makhluk hidup, dan penghuni bangunan atau struktur lainnya dikenal sebagai beban hidup. beban ini bukan termasuk beban struktural ataupun beban dari struktur di dekatnya. Beban hidup dapat berasal dari berbagai faktor seperti kegiatan penghuni, aktivitas, dan penggunaan peralatan di dalam bangunan SNI 1727:2013 Pasal 4.1. Penggunaan beban hidup harus sesuai dengan Pasal 4.3.1, yang menekankan bahwa beban hidup yang dipakai dalam desain gedung dan struktur lainnya harus sesuai dengan beban maksimum yang mungkin timbul dari aktivitas dan rancangan bangunan. Walaupun begitu, nilai tersebut harus mencapai atau melebihi beban *minimum* yang sudah ditetapkan sesuai peraturan.

Peluang terjadinya sebagian dari beban hidup yang dikenakan pada elemen struktural utama bangunan selama digunakan sangat dipengaruhi oleh tujuan penggunaan bangunan dan alasan di balik perhitungan beban hidup tersebut. Karena kemungkinan terjadinya *live load maksimum* yang memengaruhi seluruh elemen utama struktur dengan bersamaan selama penggunaan gedung yang sangat kecil, penggunaan *live load* penuh kemungkinan yang tidak efisien secara optimal. Karena itu, nilai beban hidup yang seimbang bisa diubah sesuai dengan faktor reduksi khusus.

2.5.3 Beban Hujan

Pada perencanaan bangunan tahan gempa, beban hujan turut diperhitungkan khususnya pada desain struktur atap. Struktur atap harus dirancang dengan baik untuk mengantisipasi kemungkinan kerusakan pada sistem drainase utama. Berdasarkan PPIUG 1983 Tabel 3.1, beban air hujan ditetapkan sebesar 20 kg/m² dan diperhitungkan sebagai bagian dari beban hidup yang bekerja pada atap bangunan.

2.5.4 Perhitungan Beban Angin

Perencanaan beban angin pada bangunan gedung maupun non-gedung, termasuk Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) serta elemen Komponen dan *Cladding* (K&K), harus mengacu pada prosedur yang tercantum dalam (SNI 1727:2020) pasal 30.4.1, dengan mengikuti tahapan sebagai berikut:

1. Menetapkan nilai kecepatan angin rata-rata di Kota Yogyakarta dengan mengacu pada data yang tercantum dalam Peraturan Daerah Nomor 7 Tahun 2014 mengenai Rencana Induk Sistem Drainase Kota Yogyakarta.
2. Menetapkan nilai faktor arah angin (K_d) berdasarkan ketentuan dalam (SNI 1727:2020) pada Tabel 26.6-1, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Faktor Arah Angin (Kd)

Tipe Struktur	Faktor Arah Angin Kd
Bangunan gedung	0,85
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 penunjuk solid yang berdiri bebas serta panel penunjuk terikat	0,85
Panel penunjuk terbuka dan rangka terbuka bidang tunggal	
Rangka batang menara	
Segitiga, persegi, atau persegi panjang	0,85
Semua penampang lainnya	0,95

Faktor arah angin **Kd = 0,95** diizinkan untuk struktur bundar atau struktur segi delapan yang memenuhi ketentuan SNI 1727.

(Sumber: SNI 1727:2020)

- Menetapkan koefisien faktor topografi (Kzt) berdasarkan kondisi eksposur angin sesuai SNI 1727:2020 Pasal 26.8.1, dengan nilai Kzt sebesar 1.
- Menetapkan tekanan kecepatan angin dengan mengacu pada SNI 1727:2020 Pasal 26.10.1, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Tekanan Kecepatan Angin (Ke)

Elevasi Tanah di Atas Permukaan Laut (ft)	Elevasi Tanah di Atas Permukaan Laut (m)	Faktor Elevasi Permukaan Tanah Ke
< 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)

Catatan:

- Perkiraan konservatif, boleh diambil $K_e = 1,00$ dalam semua kasus.
- Faktor K_e harus ditentukan dari tabel di atas dengan menggunakan interpolasi atau rumus berikut untuk semua elevasi:

$$K_e = e^{-0.0000362z_g}$$
 (z_g = elevasi tanah di atas permukaan laut dalam ft)

$$K_e = e^{-0.000119z_g}$$
 (z_g = elevasi tanah di atas permukaan laut dalam m)
- Dalam semua kasus K_e boleh diambil sebesar 1,00

5. Menetapkan faktor hembusan angin (G) sesuai ketentuan yang berlaku dalam perencanaan beban angin.
6. Menghitung koefisien tekanan internal ($G C_{pi}$) dan koefisien tekanan eksternal (C_p) berdasarkan (SNI 1727:2020) Pasal 26.12.3.2, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Koefisien Tekanan Dinding

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

(Sumber: SNI 1727:2020)

7. Menghitung faktor eksposur tekanan kecepatan (K_z) berdasarkan SNI 1727:2020 Tabel 26.22-1, dengan ketentuan untuk ketinggian $4,6 \text{ m} \leq z \leq z_g$ dirumuskan sebagai berikut:

$$K_z = 2.01 \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

8. Menghitung kecepatan velositas angin sebagai dasar penentuan beban yang bekerja pada struktur. Nilai kecepatan tersebut mengacu pada SNI 1727:2020 Pasal 27.1.5, dengan mempertimbangkan batasan yang berlaku dan dirumuskan sebagai berikut:

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

Apabila nilai $q_z < q_i$, maka nilai q_i digunakan sebagai kecepatan velositas yang dipakai, dengan ketentuan sebagai berikut:

q_z = beban angin rencana pada struktur dalam satuan (kN/m^2).

q_i = beban angin pakai pada struktur dalam satuan (kN/m^2).

9. Menetapkan besarnya tekanan angin berdasarkan ketentuan dalam (SNI 1727:2020) Pasal 27.3.1, dengan rumusan sebagai berikut:

$$p = q_i \times G \times C_p - q_z (G C_{Pi})$$

Dengan:

P = tekanan angin (kN/m²)

2.6 Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Mengacu Pada (SNI 1726:2019) dan (SNI 2847:2013)

Dalam perencanaan struktur gedung tahan gempa, diperlukan keselarasan antara denah bangunan, material yang digunakan, serta sistem struktur dalam merancang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY. Tahap awal perencanaan ini perlu dianalisis secara matang untuk menentukan prosedur sistem yang efektif dalam mewujudkan struktur yang tahan gempa. Menurut Tamba dan Panjaitan (2025), sistem struktur bangunan tahan gempa akan mengalami pergerakan baik secara vertikal maupun horizontal. Oleh karena itu, perhitungan harus difokuskan pada pusat massa struktur dengan mempertimbangkan berbagai ragam kombinasi pembebanan.

Pedoman yang digunakan dalam perencanaan ulang Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY mengacu pada SNI 1726:2019 sebagai dasar perencanaan ketahanan gempa struktur bangunan. Sementara itu, SNI 2847:2013 digunakan sebagai acuan dalam menentukan spesifikasi beton serta kombinasi pembebanan, yang berkaitan dengan perilaku keruntuhan dan konsep perencanaan struktur beton.

2.6.1 Klasifikasi Risiko dan Faktor Keutamaan Gempa

Faktor keutamaan gempa merupakan acuan dalam menentukan besarnya beban gempa pada perencanaan struktur bangunan. Dalam SNI 1726:2019 dijelaskan bahwa penentuan faktor ini didasarkan pada jenis pemanfaatan gedung yang dikelompokkan ke dalam kategori risiko. Pada kategori I, II, dan III, mencakup bangunan gedung maupun non-gedung yang berpotensi mengandung bahan berbahaya atau beracun yang dapat membahayakan masyarakat apabila terjadi kegagalan fungsi.

Pada kategori risiko IV, diperuntukkan bagi bangunan gedung maupun non-gedung yang berfungsi penting dalam menjaga keberlangsungan operasional atau

mendukung struktur lainnya. Nilai faktor keutamaan gempa mengacu pada SNI 1726:2019 Tabel 3 pada Pasal 4.1.2. Dalam hal ini, Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY termasuk dalam kategori risiko IV, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.8 dan 2.9.

Tabel 2. 8 Faktor Keutamaan Gempa

Jenis Pemanfaatan	Kategori Risiko
Gedung dan nongedung yang dikategorikan sebagai fasilitas yang penting, termasuk tetapi tidak dibatasi untuk: <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 Gedung dan nongedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV. 	IV

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2. 9 Koefisien Faktor Keutamaan Gempa

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

(Sumber: SNI 1727:2020)

2.6.2 Klasifikasi Situs

Klasifikasi situs dalam perencanaan bangunan tahan gempa perlu ditetapkan untuk menentukan desain seismik serta besarnya amplifikasi percepatan gempa yang terjadi. Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 5.3, penentuan klasifikasi situs disajikan pada Tabel 2.10.

Tabel 2. 10 Klasifikasi Situs

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	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 niralir, $\bar{S}_u < 25$ kPa Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah; lempung sangat organik dan/atau gambut dengan ketebalan $H > 3$ m Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$). Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m.		

(Sumber: SNI 1726:2019)

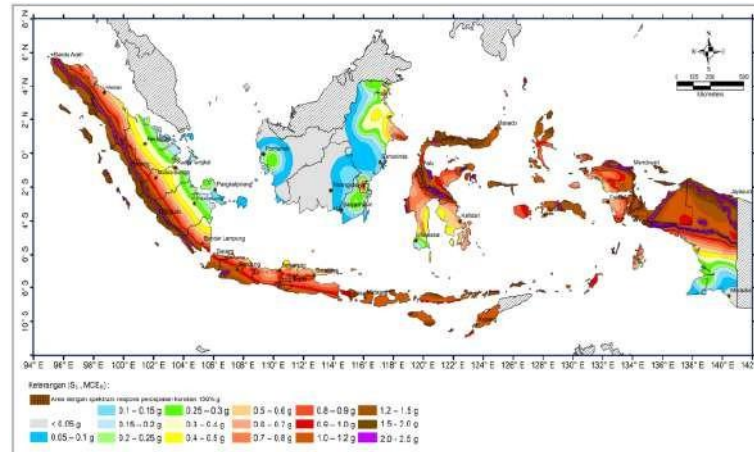
Pada kondisi tanah yang berpotensi mengalami keruntuhan, seperti lempung gambut dengan ketebalan $H > 3$ m, lempung berplastisitas tinggi dengan $h > 7,5$ m dan indeks plastisitas (PI) > 75 , serta lempung lunak hingga sedang dengan ketebalan $h > 35$ m, maka lokasi tersebut dapat diklasifikasikan sebagai situs kelas SF.

Apabila suatu lapisan tanah memiliki kuat geser kurang dari 25 kPa, ketebalan lempung lunak lebih dari 3 m, serta indeks plastisitas (PI) lebih dari 20, maka kondisi tersebut termasuk dalam kategori situs kelas SE. Penentuan kelas situs SA dan SB didasarkan pada kecepatan gelombang geser tanah. Kelas situs SB umumnya ditetapkan melalui pengukuran pada batuan yang relatif lebih lunak, apabila pengukuran tidak tersedia, maka dapat diasumsikan atau disubstitusikan ke dalam klasifikasi situs kelas SC.

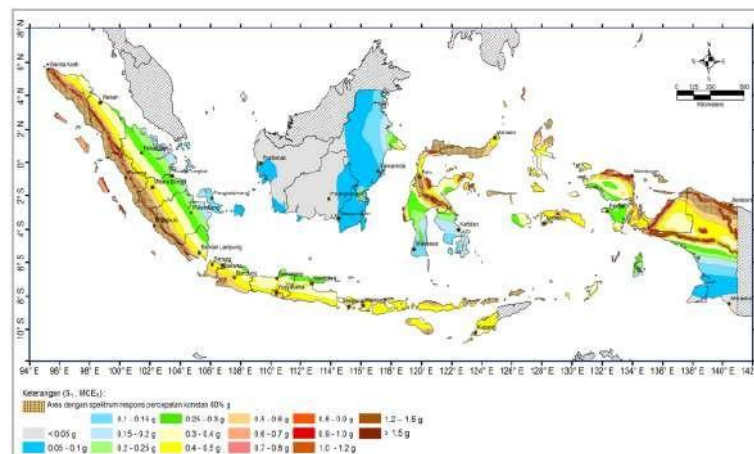
2.6.3 Parameter Spektrum Respons Gempa dan Koefisien Situs

Parameter periode 0,2s dan 1s digunakan sebagai dasar dalam menentukan respons spektral yang dihasilkan dari proses amplifikasi seismik. Berdasarkan SNI

1726:2019 Gambar 15 dan 16, diperoleh peta distribusi parameter spektrum respons sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan 2.2.



Gambar 2. 2 Percepatan Respons Spektral Gempa Periode 0,2s (S_s)
(Sumber : Sumber: SNI 1726:2019)



Gambar 2. 3 Percepatan Respons Spektral Gempa Periode 0,1s (S_s)
(Sumber : Sumber: SNI 1726:2019)

Parameter spektrum untuk periode pendek (SMS) dan periode 1 detik (SM1) dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$SMS = Fa \cdot Ss$$

$$SM1 = Fv \cdot S1$$

Dengan:

S_s = Parameter respons spektral percepatan gempa MCER pada periode pendek 0,2s

S₁ = Parameter respons spektral percepatan gempa MCER pada periode 1s

Koefisien Fa dan Fv ditentukan berdasarkan tabel koefisien yang mengacu pada SNI 1726:2019 Pasal 6.2, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Koefisien Situs Fa

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCER) pada Periode Pendek T = 0,2 s, S _s					
	S _s ≤ 0,25	S _s = 0,50	S _s = 0,75	S _s = 1,00	S _s = 1,25	S _s ≥ 1,50
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. 12 Koefisien Situs Fv

Kelas Situs	Parameter Respons Spektral Percepatan Gempa Maksimum yang Dipertimbangkan Risiko-Tertarget (MCER) pada Periode 1 Detik, S ₁					
	S ₁ ≤ 0,1	S ₁ = 0,2	S ₁ = 0,3	S ₁ = 0,4	S ₁ = 0,5	S ₁ ≥ 0,6
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS(a)					

(Sumber: SNI 1726:2019)

2.6.4 Spektrum Respons Desain

Spektrum respons merupakan representasi grafik yang menunjukkan hubungan antara periode getar struktur (T) dengan respons struktur, yang dipengaruhi oleh rasio redaman. Terdapat beberapa ketentuan dalam perhitungan spektrum respons desain yang diatur dalam SNI 1726:2019 Pasal 6.3, sebagai berikut:

1. Persamaan parameter spektral desain:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}$$

2. Perhitungan periode getar dasar (fundamental) struktur:

$$T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

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

3. Untuk nilai $T \geq T_0$, spektrum respons percepatan desain (S_a) diperoleh sebagai berikut:

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

4. Untuk periode $T \geq T_0$ dan $T \leq T_s$, diperoleh sebagai berikut:

$$S_a(T_s) = SDS$$

Dengan:

S_{DS} = respons spektral percepatan desain periode pendek

S_{D1} = respons spektral percepatan desain periode 1s

T = periode getar fundamental struktur

2.6.5 Penentuan Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa ditentukan berdasarkan kategori risiko serta parameter percepatan respons spektral desain yang diterima, yaitu S_{DS} dan S_{D1} .

Hasil perhitungan dalam penentuan kategori desain seismik selanjutnya diinput ke dalam analisis struktur menggunakan SAP2000, sehingga beban gempa yang bekerja pada bangunan dapat diperhitungkan secara otomatis. Penetapan kategori desain seismik ini bertujuan untuk menentukan sistem struktur bangunan tahan gempa yang sesuai dengan kondisi wilayah yang ditinjau. Dengan demikian, sistem tersebut dapat menjadi solusi yang efektif dan efisien dalam perencanaan desain yang akan digunakan.

Berdasarkan SNI 1726:2019 Pasal 6.5, terdapat pedoman mengenai respons spektral desain S_{DS} dan S_{D1} . Nilai hasil perhitungan S_{DS} dan S_{D1} tersebut digunakan untuk menentukan tingkat risiko kegempaan sesuai dengan kategori risiko yang dianalisis.

Sesuai dengan acuan yang digunakan, nilai-nilai untuk menentukan tingkat risiko kegempaan disajikan dalam Tabel 2.13 hingga Tabel 2.15 berikut:

Tabel 2. 13 Kategori Desain Seismik Periode Pendek 0,2s

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2. 14 Kategori Desain Seismik 1s

Nilai SD_1	Kategori Risiko I atau II atau III	Kategori Risiko IV
$SD_1 < 0,067$	A	A
$0,067 \leq SD_1 < 0,133$	B	C
$0,133 \leq SD_1 < 0,20$	C	D
$0,20 \leq SD_1$	D	D

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2. 15 Kategori Desain Seismik (KDS) dan Risiko Kegempaan

Tinggi Risiko Kegempaan		
Rendah	Menengah	Tinggi
KDS: A, B	KDS: C	KDS: D, E, F
SRPMB / M / K	SRPMM / K	SRPMK

(Sumber: SNI 1726:2019)

2.6.6 Sistem Struktur Penahan Gaya Seismik pada Bangunan

Sistem penahan gaya seismik berkaitan dengan kategori desain seismik sebagaimana diatur dalam SNI 1726:2019 pasal 7.2.2. Tipe sistem penahan gaya gempa yang digunakan akan memengaruhi nilai koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih (Ω_0), serta faktor pembesaran defleksi (C_d).

Nilai koefisien modifikasi respons (R), faktor kuat lebih (Ω_0), serta faktor pembesaran defleksi (C_d) digunakan sebagai parameter input dalam analisis respons spektrum pada program SAP2000.

Koefisien tersebut menggambarkan perbedaan perilaku masing-masing subsistem dalam struktur bangunan tahan gempa. Hal ini bertujuan agar kinerja dan mekanisme ketahanan bangunan sesuai dengan sistem yang telah dimodelkan dalam SAP2000.

Penentuan sistem penahan gaya seismik berdasarkan ketentuan pasal 7.2.2 disajikan pada Tabel 2.16.

Tabel 2. 16 Sistem Penahan Gaya Seismik

No.	Sistem Struktur	R _o	Ω _o	C _d	A	B	C	D	E	F
1	Rangka baja pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB	TB
2	Rangka baja pemikul momen khusus	7	3	5½	TB	TB	48	30	TI	TI
3	Rangka baja pemikul momen menengah	4½	3	4	TB	TB	10 ¹	TI ¹	TI ¹	TI ¹
4	Rangka baja pemikul momen biasa	3½	3	3	TB	TB	TI	TI	TI	TI
5	Rangka beton bertulang pemikul momen khusus ¹¹	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB	TB
6	Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI	TI
7	Rangka beton bertulang pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI	TI
8	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen khusus	8	3	5½	TB	TB	TB	TB	TB	TB
9	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen menengah	5	3	4½	TB	TB	TI	TI	TI	TI
10	Rangka baja dan beton komposit terkekang parsial pemikul momen	6	3	5½	48	48	30	TI	TI	TI
11	Rangka baja dan beton komposit pemikul momen biasa	3	3	2½	TB	TI	TI	TI	TI	TI
12	Rangka baja canai dingin pemikul momen khusus dengan perkuatan ¹	3½	3 ^o	3½	10	10	10	10	10	10

(Sumber: SNI 1726:2019)

2.6.7 Batasan Periode Getar Alami Struktur (Periode Fundamental)

Periode getar struktur yang dilambangkan dengan T atau T_a merupakan parameter penting dalam menentukan besarnya beban gempa yang bekerja pada suatu bangunan. Selain itu, periode getar juga berperan dalam penentuan beban angin yang akan digunakan dalam proses analisis struktur bangunan tahan gempa.

Perhitungan periode getar struktur dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain nilai R , I , serta komponen pendukung lainnya. Mengacu pada SNI 1726:2019 pasal 7.8.2.1, periode getar struktur dibatasi oleh koefisien batas atas yang disajikan pada Tabel 2.16 dan 2.17.

Tabel 2. 17 Koefisien Pendekatan C_t dan x

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

(Sumber: SNI 1726:2019)

Tabel 2. 18 Koefisien Periode Batas Atas

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 Detik, SD_1	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)

Rumus perhitungan nilai T_a dalam satuan detik dinyatakan sebagai berikut:

$$T_{min} = (C_t h_n)^x$$

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

Dengan:

h_n = Ketinggian struktur diukur dari dasar hingga tingkat tertinggi bangunan

C_t dan x = Koefisien yang ditetapkan berdasarkan Tabel 2.11

2.7 Kombinasi Pembebanan pada Struktur Bangunan

Seluruh perencanaan struktur bangunan dirancang secara cermat dengan mempertimbangkan kebutuhan serta fungsi bangunan tersebut. Setiap elemen pada struktur bangunan tahan gempa harus diperhitungkan agar memiliki kapasitas yang

setara atau lebih besar dibandingkan dengan beban yang bekerja, sesuai dengan kombinasi pembebanan.

Oleh karena itu, kombinasi pembebanan direncanakan mengacu pada SNI 2847:2020 guna menentukan kondisi beban minimum dan maksimum yang mungkin terjadi pada suatu bangunan.

Setiap kondisi batas kekuatan yang relevan harus diselidiki. Didukung SNI 2847:2013 pasal 9.2.1 dan SNI 1727:2020 pasal 2.3.1, kombinasi pembebanan terfaktor diuraikan sebagai berikut:

1. $1,4D$
2. $1,2D + 1,6L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
3. $1,2D + 1,6(Lr \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W)$
4. $1,2D + 1,0W + L + 0,5(Lr \text{ atau } R)$
5. $0,9D + 1,0W$

Sesuai dengan SNI 1726:2019, terdapat ketentuan kombinasi pembebanan untuk pengaruh gempa. Kombinasi pembebanan yang mempertimbangkan efek beban seismik dinyatakan sebagai berikut:

1. $(1.2 + 0.2S_{DS})D + 1.0L \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$
2. $(1.2 + 0.2S_{DS})D + 1.0L \pm 0.3E_x \pm 1.0E_y$
3. $(0.9 - 0.2S_{DS})D + 1.0L \pm 1.0E_x \pm 0.3E_y$
4. $(0.9 - 0.2S_{DS})D + 1.0L \pm 0.3E_x \pm 1.0E_y$

Dengan:

- D = beban mati
- H = beban hujan
- W = beban angin
- E = beban gempa
- L = beban hidup gedung
- Lr = beban hidup atap reduksi

2.8 Analisis Struktur Atas Menggunakan SAP2000

Pemodelan tiga dimensi (3D) pada perencanaan Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Revit, dengan mengacu pada data dan informasi yang terdapat dalam *Detail Engineering Design* (DED) gedung tersebut. Dimensi struktur yang ditampilkan pada model 3D merupakan hasil analisis struktur menggunakan SAP2000, yang didasarkan pada *preliminary design* serta perhitungan tulangan sebagaimana diuraikan pada SubBab 2.4.

Menurut Sholeh (2021), analisis struktur dengan menggunakan SAP2000 memiliki beberapa tahapan yang harus dilaksanakan, di antaranya:

1. Menyusun model struktur berdasarkan hasil *preliminary design*.
2. Mendefinisikan sifat material, dimensi penampang, jenis pembebanan, serta kombinasi pembebanan yang digunakan.
3. Melaksanakan analisis struktur.
4. Setelah dilakukan analisis struktur, terdapat dua kemungkinan kondisi yang dapat terjadi. Pertama, apabila hasil analisis memenuhi persyaratan, maka dapat dilanjutkan dengan perhitungan kebutuhan tulangan berdasarkan Output SAP2000, yaitu luas tulangan yang diperlukan. Kedua, apabila hasil analisis belum memenuhi, maka perlu dilakukan penyesuaian, seperti perubahan dimensi penampang atau peningkatan mutu material pada properti material yang digunakan.

2.9 Perencanaan Struktur Bawah (Pondasi) Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY

Perencanaan pondasi melibatkan pemilihan jenis pondasi yang cocok dan desain struktur pendukung lainnya untuk menopang bangunan di atasnya. Perencanaan ini melibatkan evaluasi kondisi tanah, penentuan beban, pemilihan pondasi yang sesuai, dan perancangan struktur pendukung. Perencanaan pondasi diperlukan untuk memastikan kestabilan dan keamanan bangunan di atasnya, serta mempertimbangkan berbagai aspek termasuk bentuk, waktu, biaya, dan perawatan

yang diperlukan. Pondasi yang digunakan pada proyek ini merupakan jenis pondasi *bored pile*.

Selanjutnya, untuk perencanaan *pile cap* sendiri menggunakan struktur beton bertulang yang ditempatkan di atas *bored pile* untuk menyebar beban dari struktur di atasnya ke *bored pile*. Proses ini melibatkan analisis beban, pemilihan ukuran dan jumlah pondasi yang dibutuhkan, serta desain *pile cap* untuk memastikan distribusi beban yang merata ke *bored pile*. Perencanaan ini mempertimbangkan berbagai faktor seperti kondisi tanah, kekuatan beton, dan persyaratan konstruksi untuk memastikan stabilitas dan kinerja optimal dari struktur tersebut. Berikut merupakan perhitungan dalam merencanakan pondasi:

1. Merencanakan Properties Tiang :

$$\text{Dimensi (A)} = A = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$\text{Volume (V)} = V = A \times L$$

$$\text{Keliling (K)} = K = \pi d$$

2. Menghitung Daya Dukung Ultimate

$$Q_u = \frac{q_c \times A}{3} + \frac{T_f \times K}{5}$$

3. Menghitung Daya Dukung Netto

$$W = V \times \gamma_{\text{beton}}$$

$$Q_{\text{nett}} = Q_u - W$$

4. Menghitung Kebutuhan Pondasi

$$n = \frac{P}{Q_{\text{nett}}}$$

5. Menghitung Efisiensi Pondasi

$$\text{Jarak antar tiang (s)} = 2,5d - 4d$$

$$Eff = 1 - \frac{\theta[(n-1)m + (m-1)n]}{90 \times m \times n}$$

Dengan

$$\theta = \arctan\left(\frac{d}{s}\right)$$

m = jumlah baris

n' = jumlah tiang

6. Menghitung Daya Dukung Izin

$$Q_{izin} = n \times Eff \times Q_{nett}$$

7. Kontrol Daya Dukung Izin

$$P < Q \text{ Izin}$$

Jika P lebih besar dari Q izin, maka desain direncanakan ulang sesuai langkah – langkah diatas dan sesuaikan dengan kebutuhan.

Untuk merencanakan dimensi *pilecap* dapat didasarkan pada SNI 2847-2019 yaitu dengan tebal *pilecap* > 300 mm dan dengan perhitungan berikut ini.

8. Menghitung Lebar Penampang Kritis

$$B = \frac{\text{Lebar pilecap}}{2} - \frac{\text{Lebar kolom}}{2}$$

9. Menghitung Berat *Pilecap* dan Penampang Kritis

$$M_u = 2 \times \left(\frac{P_u}{n} \times S \right) - \gamma_c \times q' \times B^2$$

Dengan q' – berat jenis beton bertulang x dimensi *pilecap* x tebal *pile cap*

10. Menghitung Tulangan

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

$$\rho_{pertu} = \left(0.85 \times \frac{f'_c}{f_y} \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times R_n}{0.85 \times f'_c}} \right)$$

$$A_s = \rho \times b \times d$$

$$A_{s,min} = 0.0018 \times b \times h$$

$$A_{s,pakai} = \frac{1}{4} \pi d^2 \times \left(\frac{\text{Dimensi pilecap}}{\text{Jarak tulangan}} \right)$$

11. Kontrol Tulangan

As Pakai > As perlu, tulangan harus direncanakan ulang atau diperbesar apabila As perlu > As Pakai

2.10 Pemodelan Tiga Dimensi (3D) Menggunakan Autodesk Revit

Pemodelan tiga dimensi (3D) pada perencanaan Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan dan Psikologi UNY dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Autodesk Revit, dengan mengacu pada data dan informasi yang tercantum dalam *Detail*

Engineering Design (DED) gedung tersebut. Dimensi struktur yang ditampilkan dalam model 3D merupakan hasil analisis struktur menggunakan SAP2000, yang didasarkan pada *preliminary design* serta perhitungan tulangan sebagaimana dijelaskan pada Bab 2.8.

Berdasarkan Suharianto dan Prasetyono (2023), tahapan pemodelan tiga dimensi (3D) menggunakan Autodesk Revit dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Melakukan tahap persiapan dengan membuka perangkat lunak Autodesk Revit sesuai dengan versi tahun yang akan digunakan.
2. Melaksanakan pemodelan struktur bawah.
3. Melaksanakan pemodelan struktur atas yang mencakup kolom lantai 1, balok lantai 2, serta dilanjutkan hingga seluruh tingkat bangunan yang direncanakan.
4. Melakukan pemodelan tulangan baja pada setiap elemen struktur.
5. Melakukan perhitungan volume struktur berdasarkan hasil *quantity take off* yang diperoleh dari Output pemodelan 3D Autodesk Revit.

2.11 Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan salah satu aspek perencanaan yang harus diperhitungkan secara matang, baik pada proyek konstruksi maupun non-konstruksi (Sumantri et al., 2022). Dalam proyek konstruksi, penyusunan RAB dilakukan sejak tahap awal hingga akhir pelaksanaan proyek. Perencanaan anggaran biaya disusun sebelum proyek dimulai dan dapat diperbarui secara berkala selama proses konstruksi berlangsung.

Berdasarkan Output Autodesk Revit berupa *quantity take off* atau volume struktur, penyusunan RAB dilakukan dengan menghitung volume pekerjaan yang kemudian dikalikan dengan analisis harga satuan bahan, upah, dan peralatan, serta analisis harga pekerjaan yang disesuaikan dengan lokasi wilayah proyek.

2.12 Penjadwalan Proyek Menggunakan Microsoft Project

Jadwal merupakan salah satu parameter penting dalam menilai keberhasilan proyek konstruksi, selain aspek biaya dan mutu. Penyusunan penjadwalan harus mempertimbangkan durasi berdasarkan urutan kegiatan dalam proyek, sehingga

menghasilkan rencana waktu yang realistis. Pada umumnya, penjadwalan proyek menggunakan estimasi durasi yang bersifat pasti. Namun, dalam pelaksanaannya terdapat berbagai faktor yang menyebabkan durasi menjadi tidak pasti, seperti kondisi cuaca, tingkat produktivitas tenaga kerja, kualitas material dan peralatan, serta faktor lainnya.

Oleh karena itu, penjadwalan proyek disusun berdasarkan bobot pekerjaan yang diperoleh dari total nilai setiap item pekerjaan, guna memantau kesesuaian antara rencana dan realisasi pelaksanaan di lapangan (Muin, 2022). Dalam hal ini, digunakan perangkat lunak Microsoft Project Pro untuk menyusun penjadwalan pekerjaan proyek.

2.13 Simulasi Proyek Menggunakan Navisworks

Simulasi proyek merupakan salah satu tahapan dalam *Building Information Modelling* (BIM) yang bertujuan untuk menampilkan visualisasi pelaksanaan proyek. Menurut Maulana et al., (2023), proses visualisasi dilakukan dengan mengintegrasikan hasil perencanaan struktur yang meliputi pemodelan 3D, RAB, serta penjadwalan proyek. Pada tahap ini, digunakan perangkat lunak Navisworks untuk melaksanakan simulasi proyek.

Navisworks merupakan aplikasi yang dikembangkan oleh Autodesk dan dapat diintegrasikan dengan Autodesk Revit serta Microsoft Project untuk menghasilkan visualisasi proses pembangunan secara realistis. Berdasarkan penjadwalan yang telah disusun, perkembangan pekerjaan proyek sejak tahap awal dapat ditampilkan dalam bentuk simulasi. Melalui simulasi proyek tersebut, efektivitas pelaksanaan pekerjaan dapat dievaluasi.