

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Building Information Modelling (BIM)*

2.1.1 Definisi BIM

Konsep *Building Information Modelling* (BIM) pertama kali diperkenalkan pada tahun 1970. BIM merupakan metodologi kolaboratif yang digunakan untuk mengintegrasikan aspek teknis, struktural, dan arsitektural dalam suatu proyek secara efisien. Teknologi BIM mencakup tujuh dimensi, yaitu dimensi 3D yang berfungsi membuat model tiga dimensi berdasarkan parameter yang telah direncanakan, dimensi 4D untuk penjadwalan, dimensi 5D berkaitan dengan estimasi biaya, dimensi 6D mengenai aspek keberlanjutan proyek, 7D digunakan untuk pemeliharaan dan pengelolaan siklus hidup bangunan (Pradana & Fakrurrahman, 2024).

Dikutip dari tulisan Kelvin, R. (2022), *Building Information Modelling* (BIM) merupakan perkembangan teknologi di sektor AEC (*Architecture, Engineering, and Construction*) yang menghasilkan model geometri akurat beserta daya konstruksi. BIM mengintegrasikan hubungan spasial, informasi geografis, jumlah dan properti elemen bangunan, jadwal proyek, material, estimasi biaya, hingga siklus hidup bangunan. Selain itu, BIM merupakan suatu sistem atau teknologi yang dapat menyajikan berbagai informasi penting dalam satu model desain konstruksi 3D yang dapat diolah dan dianalisis oleh pengguna untuk meningkatkan efisiensi dalam proses pelaksanaan konstruksi (*Associated General Contractors of America/AGC*, 2005).

Menurut tim PUPR dan Institut BIM Indonesia, *Building Information Modelling* (BIM) merupakan salah satu inovasi di industri konstruksi yang merepresentasikan secara digital karakter fisik dan fungsional dari sebuah bangunan. Setiap elemen bangunan menyimpan informasi lengkap terkait proyek seperti database berisi gambar kerja, jadwal, estimasi biaya, dan lainnya yang menjadi dasar pengambilan keputusan selama siklus hidup bangunan, mulai dari konsep awal hingga tahap pembongkaran. BIM juga diklasifikasikan ke dalam

beberapa level berdasarkan tingkat penerapannya, yang diuraikan dalam Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Karakteristik BIM Berdasarkan Tingkat Pengimplementasian

Tingkat	Karakteristik
Level 0	- Tidak ada kolaborasi antar masing-masing disiplin - 2D CAD digunakan untuk penggambaran dan dokumentasi
Level 1	- Pekerjaan desain konseptual dengan 3D model, gambar-gambar 2D CAD digunakan untuk dokumentasi, perijinan, dan informasi konstruksi. - Terdapat standar CAD dan informasi dikolaborasikan dalam bentuk elektronik. - Masing-masing disiplin yang terlibat, memiliki standar sendiri-sendiri.
Level 2	- Bekerja secara kolaborasi, semua pelaku bekerja dengan sistem dan lingkungan sendiri namun model atau objek dikolaborasikan. - Informasi dipertukarkan dengan protokol dan format yang disetujui misalnya Industry Foundation Class (IFC) atau Construction Operations Building Information Exchange (COBie).
Level 3	- Kolaborasi penuh antar semua disiplin dan pelaku menggunakan satu objek (shared object). Semua pelaku dapat mengerjakan, memodifikasi objek yang sama - Dinamakan sebagai OpenBIM.

Sumber: Tim B.I.M. PUPR dan Institut BIM Indonesia (2018)

Berdasarkan pendapat para ahli di atas, dapat disimpulkan bahwa *Building Information Modelling* (BIM) adalah sebuah sistem teknologi yang mengintegrasikan seluruh proses secara menyeluruh dalam bentuk model digital yang diwujudkan dalam visualisasi tiga dimensi. Sistem ini berfungsi mengelola serta menghasilkan data konstruksi dengan memanfaatkan perangkat lunak 3D, bekerja secara *real-time*, serta menggunakan pemodelan dinamis untuk meningkatkan produktivitas dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi.

2.1.2 Model Dimensi (D) dalam BIM

Secara umum, BIM terdiri dari 5 tahap (dimensi) yang dijelaskan lebih lanjut berdasarkan pada Gambar 2.1 berikut.

3D	2. Model Kondisi eksisting: a. <i>Laser scanning</i> b. Ground penetration (Konversi Radar (GPR)) 3. Model Logistik dan <i>safety</i> 4. Animasi, <i>rendering</i>, <i>walkthrough</i> 5. BIM Pre-Pabrikasi 6. Laser accurate BIM driven field layout
4D	SCHEDULING 1. Simulasi tahapan proyek 2. Mempelajari penjadwalan: a. Perencanaan akhir b. <i>Just in Time</i> (JIT) mengirim peralatan c. Instalasi simulasi detail 3. Validasi visual untuk persetujuan pembayaran
5D	ESTIMATING 1. Pemodelan konsep real time dan perencanaan biaya 2. Ekstrak kuantitas untuk mensupport detail estimasi biaya 3. Trade verification dari model pabrikaan: a. Struktur baja b. Pembesian c. Mekanikal dan plumbing d. Elektrikal 4. Value Engineering: a. Skenario b. Visualisasi c. Ekstak kuantitas 5. Solusi Pre-fabrication: a. Ruang peralatan b. MEP c. Multi-trade Prefabrication d. Arsitektural unik dan elemen-elemen struktur
6D	SUSTAINABILITY 1. Analisis konsep energi (via Dprofiler) 2. Analisis detail energi (via Eco tech) 3. Sustainable element tracking 4. LEED tracking
7D	APLIKASI FACILITY MANAGEMENT 1. Strategi Life cycle BIM 2. BIM as-builts 3. BIM embedded O&P Manuals 4. COBe data population dan extraction 5. Perencanaan Pemeliharaan BIM dan Technical support 6. BIM file hosting on lend Lease's digital exchange system

Gambar 2. 1 Model Dimensi dalam BIM

(Sumber: Simantu PUPR, 2018)

1. BIM 3D (3D *Modelling*)

Pemodelan BIM 3D merupakan representasi suatu objek dalam bentuk lebar, panjang, dan tinggi, yang dibuat menggunakan perangkat lunak tertentu. Proses ini bertujuan membentuk model tiga dimensi yang menggambarkan objek nyata, baik benda hidup maupun benda mati. Model ini digunakan untuk desain skematik, dokumentasi konstruksi, dan visualisasi objek, yang membantu dalam mendeteksi kesalahan pada gambar. Selain menyajikan

informasi grafis, BIM 3D juga memuat data yang menjelaskan atribut dan karakteristik dari setiap komponen di dalamnya.

2. BIM 4D (*Schedulling*)

Pemodelan BIM 4D adalah pengembangan dari model 3D yang menambahkan dimensi waktu ke dalam model digital berupa data jadwal proyek. Data ini dimasukkan ke dalam setiap komponen bangunan yang dirancang secara detail sesuai tahap pelaksanaan proyek. Informasi yang dihasilkan berfungsi untuk memberikan gambaran jadwal pelaksanaan proyek secara terstruktur serta menampilkan visualisasi perkembangan proyek secara berurutan. Data waktu yang dicantumkan mencakup estimasi waktu tunggu, waktu pemasangan atau pembangunan, durasi pengoperasian, urutan pemasangan antar elemen, hingga ketergantungan antara satu pekerjaan dengan pekerjaan lainnya di proyek. Melalui BIM 4D juga dapat mensimulasikan alur kerja konstruksi dan mendeteksi potensi bentrokan antar elemen dalam proyek (Saputra & Abma, 2023).

3. BIM 5D (*Cost Estimating*)

Pada pemodelan BIM 5D menambahkan unsur estimasi biaya ke dalam model proyek. Melalui BIM 5D, perkembangan proses konstruksi beserta perubahan biaya dapat divisualisasikan seiring berjalannya waktu. Dengan penerapan teknologi BIM 5D, pengguna mampu memperkirakan biaya total yang akan dibutuhkan berdasarkan model yang telah dibuat, serta dapat menyesuaikan estimasi biaya jika terjadi perubahan desain atau perubahan lain selama proses konstruksi berlangsung.

Estimasi biaya memiliki keterkaitan erat dengan *Quantity Take-Off* (QTO), yaitu proses menghitung kuantitas atau volume dari setiap item pekerjaan dalam suatu proyek konstruksi berdasarkan satuan masing-masing pekerjaan. QTO menghasilkan *Taking-Off List*, yaitu daftar material yang dibutuhkan, yang disusun berdasarkan gambar kerja atau model yang telah dibuat. Hasil QTO disajikan dalam bentuk *Bill of Quality* (BoQ), yang merupakan daftar item pekerjaan lengkap dengan volume beserta harga satuannya (Kelvin, 2022).

4. BIM 6D (*Sustainability, Collosion Detection, Energy Analysis*)

BIM 6D pada proses perencanaan bangunan berperan dalam melakukan analisis energi serta menilai potensi dampak lingkungan yang dihasilkan. Berbagai data tambahan yang dimasukkan ke dalam pemodelan 6D dapat mendukung operasional fasilitas, sekaligus membantu pengelolaan agar penggunaan energi dapat diminimalkan. Analisis ini didasarkan pada keseluruhan model 3D yang telah dibuat, serta mencakup seluruh aspek informasi dalam manajemen konstruksi.

5. BIM 7D (*Facility Management Application*)

BIM 7D merupakan sistem yang berfungsi mendukung pengelolaan operasional dan pemeliharaan fasilitas infrastruktur yang terhubung dengan simulasi CAD 7D sejak tahap perencanaan awal desain hingga proses pembongkaran, dengan tujuan untuk meningkatkan efektivitas manajemen aset. Selain itu, BIM 7D juga dimanfaatkan untuk menyusun estimasi biaya siklus hidup bangunan, manajemen, serta menilai dampak lingkungan yang ditimbulkan.

2.1.3 *Software Building Information Modelling (BIM)*

Penggunaan *software* BIM disesuaikan dengan dimensi yang diterapkan dalam proyek. Jenis *software* yang digunakan mencakup BIM 3D hingga 7D dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 *Software BIM Berdasarkan Dimensinya*

Dimensi	Fungsi	Software
3D	<i>Modeling</i>	<i>Autodesk Revit, Graphisoft® ArchiCAD, Bentley® Architecture, Tekla® Structures, dll.</i>
4D	<i>Time/Scheduling</i>	<i>Autodesk Navisworks, Navigator, Vico Control, dll.</i>
5D	<i>Cost Estimating</i>	<i>Autodesk® Quantity Takeoff, dll.</i>
6D	<i>Sustainability, Collosion Detection, Energy Analysis</i>	<i>Autodesk Ecotect Analysis, Autodesk Green Building Studio, Graphisoft EcoDesigner, dll.</i>
7D	<i>Facility Management Application</i>	<i>Bentley Facilities, Vintocon ArchiFM (For ArchiCAD), Onuma System, EcoDomus, dll.</i>

2.1.4 Autodesk Revit

Autodesk Revit merupakan *software* BIM yang digunakan dalam proses perencanaan struktur, arsitektur, serta sistem mekanikal, elektrikal, dan *plumbing* (MEP). Dalam penggunaannya, *Autodesk Revit* berfungsi menampilkan data teknis atau informasi engineering dalam format visual tiga dimensi (Sari & Putra (2024). Selain menghasilkan model tiga dimensi, Autodesk Revit kerap digunakan untuk menghasilkan output berupa volume pekerjaan. Hal ini menjadikan *Autodesk Revit* sangat sesuai diterapkan dalam proses perhitungan *Quantity Take Off* (QTO) (Pratama & Witjaksana, 2022).

Menurut Kelvin, R. (2022), data serta informasi yang dihasilkan dan diproses melalui Autodesk Revit dapat disimpan dalam berbagai jenis format atau ekstensi file yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Adapun beberapa format atau ekstensi file yang kompatibel dengan Autodesk Revit di antaranya sebagai berikut:

1. .DWG merupakan format file biner khusus yang berfungsi untuk menyimpan data rancangan serta meta data baik dalam bentuk 2D maupun 3D.
2. .IFC merupakan format yang berfungsi untuk menyimpan pemodelan yang mencakup elemen spasial, material, serta bentuk dari model tersebut.
3. .RTE merupakan format yang berfungsi untuk menyimpan template atau konfigurasi yang telah dibuat.
4. .RFA merupakan format yang berfungsi menyimpan dari suatu *family* pada Autodesk Revit.
5. .RFT merupakan format yang berisi template yang membantu dalam membuat *family* baru.
6. .RVT merupakan format yang berfungsi untuk menyimpan semua informasi proyek seperti *family*, *sheets*, model 3D, dan data lainnya.

2.1.5 Autodesk Navisworks Manage

Autodesk Navisworks merupakan salah satu *software* BIM yang mendukung perencanaan desain serta penjadwalan pekerjaan struktural, arsitektural, dan MEP. *Software* ini memungkinkan penggabungan model 3D yang telah dioptimasi dengan data jadwal proyek, serta dilengkapi fitur animasi visual yang menampilkan

koneksi antara model 3D dengan tahapan pekerjaan (Nugraha, 2024). Autodesk Navisworks memiliki tiga jenis yang masing-masing disesuaikan dengan fungsinya, yaitu sebagai berikut:

1. *Autodesk Navisworks Freedom*, merupakan jenis yang berfungsi untuk *review* atau melihat hasil pemodelan tanpa fitur pengeditan. Jenis ini hanya mendukung file ekstensi .NWD (*Navisworks Drawing File*) dan .DWF (*Autodesk Design Review*).
2. *Autodesk Navisworks Manage*, yaitu versi yang dilengkapi dengan fitur tambahan berupa deteksi bentrokan (*clash detection*) saat melakukan *review* pemodelan.
3. *Autodesk Navisworks Simulate*, berfungsi untuk mengatur pencahayaan dalam proses *rendering* model yang telah dibuat.

Autodesk Navisworks Manage merupakan *software* yang mengintegrasikan model BIM 3D dengan berbagai data lain dalam satu platform, sehingga mempermudah *review* desain, koordinasi, simulasi, dan presentasi. *Software* ini dilengkapi dengan fitur-fitur seperti *Clash Detective*, *TimeLiner*, *Animator*, *Scripter*, dan *Presenter* untuk mengoptimalkan model 3D. Namun, *Navisworks Manage* tidak dapat membuat atau mengedit objek 2D dan 3D sehingga harus didukung *software* lain seperti *Autodesk Revit*. Penggunaan *software* Autodesk *Navisworks Manage* dalam penerapan teknologi BIM terdapat beberapa keunggulan, di antaranya sebagai berikut:

1. Konektivitas

Navisworks memiliki fitur utama berupa integrasi data, baik dari model 3D maupun jadwal proyek. *Software* ini mendukung berbagai format desain seperti *Autodesk Revit*, *Allplan*, *ArchiCad*, dan *Tekla*, serta menerima data penjadwalan dari *Microsoft Project* dan *Primavera* dalam bentuk *gant chart* yang saling terhubung antar pekerjaan.

2. *Scheduling Simulation*

Scheduling Simulation adalah proses menampilkan hasil analisis jadwal dalam bentuk visual menggunakan model 3D. Dengan metode ini, proses pelaksanaan proyek dapat terlihat sejak tahap perencanaan sehingga perencanaan

bisa memahami alur kerja, mengidentifikasi potensi masalah, dan menyusun urutan pekerjaan secara lebih optimal.

3. *Clash Detection*

Clash Detection adalah proses mendeteksi dan menampilkan bentrokan antar komponen desain dalam proyek konstruksi. Bentrokan tersebut bisa terjadi pada elemen struktur, arsitektur, MEP, atau dengan kondisi sekitar. Fitur ini membantu memastikan proyek berjalan lebih lancar, mencegah keterlambatan, dan mengurangi biaya dengan mengidentifikasi serta menyelesaikan potensi masalah sebelum proses konstruksi dimulai.

4. Analisis Evaluasi

Menganalisis dan mengevaluasi komponen yang tidak sesuai dengan desain awal bertujuan untuk menghasilkan data yang lebih akurat. *Navisworks* menyediakan tools yang mempermudah penyederhanaan desain dan integrasi data lainnya, sehingga kualitas data yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

Secara umum, *Navisworks* sering digunakan untuk menghasilkan *scheduling simulation*, visualisasi jadwal yang terhubung dengan model 3D dan data *time schedule* proyek. *Navisworks* juga menyediakan fitur untuk mengatur animasi, durasi, hingga *point of view* kamera dalam visual *scheduling* tersebut. Data dan informasi yang diolah di *Navisworks* dapat disimpan dalam berbagai format file sesuai kebutuhan. Beberapa format file yang didukung oleh *Navisworks* adalah sebagai berikut:

1. .NWC adalah *file cache* yang secara otomatis dihasilkan saat mengonversi model 2D atau 3D dari format lain seperti .dwg atau .rvt ke *Autodesk Navisworks Manage*. Format ini bersifat *read only*, sehingga tidak dapat diedit dan disimpan ulang.
2. .NWF merupakan format yang digunakan untuk menyimpan pengaturan serta hubungan antara file .NWC dan format lainnya.
3. .NWD adalah format yang menyimpan seluruh informasi dari model BIM serta *cache* nya. Format ini paling direkomendasikan untuk keperluan kolaborasi antar tim atau pihak terkait.

2.1.6 *Software Pendukung*

Selain penggunaan *Autodesk Revit* dan *Navisworks* sebagai *software* utama dalam penerapan konsep *Building Information Modeling* (BIM), perencanaan ini juga memerlukan beberapa *software* pendukung lain yang berfungsi untuk menunjang analisis struktur, desain jembatan, penjadwalan proyek, serta perhitungan biaya. *Software* pendukung tersebut antara lain:

1. *SAP2000*

SAP2000 adalah perangkat lunak untuk analisis struktur yang populer dan mudah digunakan. Dengan prinsip utama memadukan pemodelan struktur, pembebanan, dan optimalisasi struktur secara real time sehingga mempercepat proses pemodelan struktur dengan hasil yang tepat.

2. *Microsoft Project*

Microsoft Project adalah *software* manajemen proyek yang digunakan untuk menyusun, memantau, mengelola, dan melaporkan jadwal pelaksanaan proyek. *Microsoft Project* juga terintegrasi dengan sistem BIM sehingga data penjadwalan dapat dihubungkan dengan data dari *software* BIM lainnya. Aplikasi ini dilengkapi dengan berbagai *tools* pendukung manajemen proyek, serta memiliki beberapa keunggulan dibanding *software* penjadwalan lainnya, khususnya dalam mendukung setiap tahapan proyek (Nugraha, 2024).

3. *Microsoft Excel*

Microsoft Excel merupakan *software* yang umum digunakan dalam perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) secara manual, mulai dari perhitungan volume pekerjaan hingga estimasi biaya yang dibutuhkan. Seiring perkembangan teknologi, perhitungan volume kini dapat dilakukan lebih cepat menggunakan *Autodesk Revit*. Dalam perencanaan ini, perhitungan estimasi biaya tetap menggunakan *Microsoft Excel* guna meningkatkan efisiensi.

2.2 *PCI-Girder (Precast Prestressed Concrete I-Girder)*

2.2.1 *Definisi dan Karakteristik PCI – Girder*

PCI-Girder merupakan balok pracetak beton prategang dengan penampang berbentuk huruf I yang banyak digunakan pada jembatan dengan bentang menengah ($\pm 20\text{--}50$ m). Elemen ini diproduksi di pabrik dengan mutu beton dan

baja yang terkontrol, kemudian dipasang di lokasi proyek. Penerapan beton prategang memungkinkan girder menahan tegangan tarik akibat beban layan tanpa menimbulkan retak yang berlebihan, karena sebelumnya telah diberikan gaya tekan awal melalui tendon baja mutu tinggi.

2847:2019, serta dapat pula mengacu pada *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* untuk konsep perencanaan prategang. Secara umum, karakteristik utama PCI–Girder adalah sebagai berikut:

1. Memiliki penampang berbentuk huruf I, dengan *flens* lebar yang berfungsi menahan momen lentur dan *web* (badan girder) yang berperan dalam menahan gaya geser.
2. Berfungsi sebagai elemen utama struktur atas jembatan, yang dipadukan dengan pelat lantai beton cor di tempat (*cast in situ slab*), diafragma, parapet, serta perletakan *elastomer* (*neoprene bearing*).
3. Diproduksi dengan mutu material yang tinggi, yakni beton dengan kuat tekan rencana umumnya $\geq 40\text{--}50$ MPa dan tendon baja prategang dengan kekuatan putus (*ultimate tensile strength*) sekitar 1860 MPa.

2.2.2 Komponen Utama Jembatan PCI - Girder

Komponen utama struktur PCI – Girder meliputi:

1. Beton yang digunakan merupakan beton mutu tinggi dengan tujuan meminimalkan retak dan memaksimalkan kapasitas struktur. Berdasarkan SNI 2847:2019, *Modulus Elastisitas* (E_c) dihitung dengan persamaan:
$$E_c = 4700 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$
2. Baja prategang: menggunakan *strand* 7 kawat dengan kuat tarik ultimit (f_{pu}) dan kuat leleh $0,9 f_{pu}$. Luas penampang dan jumlah tendon ditentukan dari kebutuhan gaya prategang.
3. Pelat lantai dicor di tempat (*cast in situ*) di atas girder dengan tebal minimum 200 mm tergantung pada evaluasi pra-perencanaannya. Tebal direncanakan dengan mengutamakan mampu menyalurkan beban lalu lintas secara optimal serta memenuhi syarat kekakuan dan kenyamanan pengguna jembatan.

4. Diafragma berfungsi untuk mendistribusikan beban lateral antar girder, sedangkan parapet berfungsi sebagai elemen pembatas kendaraan agar tetap berada di jalur lalu lintas.
5. Komponen perletakan menggunakan bantalan *elastomeric (neoprene)* yang ditempatkan di atas *abutment* maupun kepala pilar (apabila struktur memiliki pilar). Bantalan ini berfungsi meredam getaran serta mengakomodasi pergerakan akibat beban dan perubahan suhu.

2.2.3 Penentuan Dimensi Awal PCI–Girder

Dalam tahap perencanaan awal, tinggi PCI–Girder biasanya ditentukan dengan menggunakan pendekatan empiris berupa rasio panjang bentang terhadap tinggi girder. Menurut pedoman BMS 1992 maupun referensi AASHTO, tinggi awal girder dapat diperkirakan dengan rumus:

$$h \approx \frac{L}{18 \text{ s.d. } 22}$$

dengan,

h : tinggi efektif girder (m)

L : panjang bentang girder tumpuan ke tumpuan (m)

Rentang rasio tersebut berlaku untuk bentang sederhana (*simply supported*). Nilai $L/18$ digunakan untuk bentang yang memerlukan kekakuan lebih tinggi (misalnya bentang panjang atau beban besar), sedangkan $L/22$ digunakan untuk bentang lebih pendek dengan beban relatif lebih ringan. Pendekatan ini memberikan perkiraan awal tinggi girder yang memadai untuk menahan lendutan dan tegangan sesuai batas layanan, sebelum dilakukan analisis struktur secara detail.

Selain tinggi girder, jarak antar girder (*spacing*) juga merupakan parameter penting dalam perencanaan awal. *Spacing* girder ditentukan dengan mempertimbangkan:

1. Lebar total lantai kendaraan dan jumlah lajur lalu lintas.
2. Kapasitas pelat lantai beton di atas girder untuk mendistribusikan beban secara melintang.
3. Efisiensi jumlah girder terhadap biaya dan kemudahan konstruksi.

Secara umum, jarak antar sumbu girder berkisar antara 1,8 m hingga 2,5 m, namun nilai pastinya ditetapkan melalui analisis struktur atas dan mempertimbangkan ketentuan desain pelat lantai sesuai SNI 2847 dan SNI 1725. Namun, baik tinggi girder maupun jarak antar girder yang diperoleh dari pendekatan awal ini berfungsi sebagai panduan perencanaan. Desain akhir tetap harus ditetapkan melalui analisis struktur menyeluruh yang memperhitungkan kapasitas lentur, geser, lendutan jangka panjang, serta detail konstruksi lain seperti diafragma, parapet, dan perletakan *elastomer*.

2.2.3 Prinsip dan Ketentuan Perencanaan (Analisis Struktur) PCI - Girder

Perencanaan PCI - Girder mengacu pada dua tahap utama, yaitu tahap prategang awal (*transfer stage*) dan tahap layan (*service stage*). Pada tahap prategang awal, gaya prategang diaplikasikan di pabrik dan beban yang bekerja hanya berat sendiri girder, sedangkan pada tahap layan, struktur memikul kombinasi beban mati dan beban hidup sesuai kondisi operasi.

Beban yang harus diperhitungkan meliputi berat sendiri girder, pelat lantai, lapisan aspal, dan parapet sebagai beban mati, serta beban lalu lintas rencana berupa beban lajur “D” (*Uniformly Distributed Load* dan *Knife Edge Load*) sesuai SNI 1725:2016, ditambah faktor dinamis dan beban lain seperti rem, angin, serta gempa bila relevan. Kombinasi beban ditentukan mengikuti ketentuan batas ultimit (*Ultimate Limit State/ULS*) dan batas layan (*Service Limit State/SLS*) yang diatur pada SNI 2847:2019 dan BMS 1992. Ketentuan desain menurut SNI 2847:2019 dan BMS 1992:

1. Tegangan beton pada tahap transfer
2. Pada saat gaya prategang pertama kali ditransfer dari tendon ke beton, tegangan yang timbul dalam beton tidak boleh melampaui batas yang diizinkan.

Ketentuan yang berlaku adalah:

$$\sigma_c \leq 0,6 f'_c \quad (\text{tekan})$$

$$\sigma_t \leq 0 \quad (\text{tidak boleh terjadi retak tarik})$$

Hal ini bertujuan untuk memastikan beton mampu menahan gaya prategang awal tanpa mengalami kerusakan dini atau retak tarik yang berlebihan.

1. Tegangan beton pada tahap layan:

Pada kondisi beban layan, tegangan yang terjadi harus terkendali agar tidak menimbulkan retak yang dapat mengganggu durabilitas maupun estetika. Ketentuannya adalah:

$$\sigma_c \leq 0,45 f'_c \text{ dan } \sigma_t \leq f_{ct}$$

Dengan demikian, tegangan tekan tidak melebihi kapasitas beton, sementara tegangan tarik masih dalam batas yang dapat diterima (dikendalikan oleh kuat tarik beton).

2. Kapasitas lentur ultimit:

Untuk memastikan keamanan struktur terhadap beban maksimum, kapasitas lentur nominal harus lebih besar dari momen ultimit $\phi M_n \geq M_u$, dengan faktor reduksi kekuatan $\phi = 0,9$ (SNI 2847:2019). Prinsip ini menjamin girder memiliki kapasitas memadai dalam menahan momen maksimum yang terjadi akibat kombinasi beban rencana.

3. Kapasitas geser:

Selain lentur, elemen PCI-Girder juga harus memiliki kapasitas geser yang cukup. Syarat yang digunakan adalah $\phi V_n \geq V_u$, dengan V_n sebagai kapasitas nominal geser dan V_u sebagai gaya geser akibat beban ultimit. Hal ini bertujuan untuk mencegah kegagalan geser yang bersifat mendadak dan berbahaya.

Dalam analisis prategang, gaya prategang awal akan mengalami kehilangan (*losses*) baik segera maupun jangka panjang, yang berasal dari gesekan dan slip ankur, rangkai (*creep*), susut (*shrinkage*), dan relaksasi baja, sehingga besaran efektifnya harus dihitung berdasarkan ketentuan SNI atau AASHTO.

Selain syarat kekuatan, kontrol pada kondisi layan juga penting, termasuk lendutan yang umumnya dibatasi tidak melebihi $L/800$ untuk jembatan lalu lintas kendaraan, serta pengendalian retak pada pelat lantai dengan menyediakan rasio tulangan minimum dan detailing yang sesuai. Getaran akibat lalu lintas juga harus dipertimbangkan agar tidak mengganggu kenyamanan pengguna.

2.2.4 Keunggulan dan Aplikasi PCI-Girder

PCI-Girder memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya pilihan utama pada perencanaan jembatan bentang menengah di Indonesia. Mutu dan kualitas konstruksi lebih terjamin karena proses produksinya dilakukan di pabrik dengan pengawasan ketat terhadap mutu beton dan baja prategang, sehingga variasi kualitas di lapangan dapat diminimalkan. Dengan penerapan beton prategang mutu tinggi, PCI-Girder mampu menahan tegangan tarik yang timbul akibat beban layan tanpa mengalami retak berlebihan, serta memiliki kapasitas lentur yang lebih besar dibandingkan balok beton bertulang konvensional (Wang, 2022).

Selain itu, sistem prategang memungkinkan penampang girder lebih ramping dengan rasio tinggi terhadap bentang yang relatif kecil, sehingga lebih efisien secara struktural. Dari segi konstruksi, penggunaan elemen pracetak mempersingkat waktu pelaksanaan di lapangan karena komponen girder dapat diproduksi paralel dengan pekerjaan pondasi dan abutment, lalu diangkut dan dipasang menggunakan alat angkat tanpa memerlukan bekisting penuh, sehingga cocok untuk proyek yang menuntut percepatan jadwal (Wang, 2022; *California Department of Transportation*, 2022).

Dari aspek biaya dan pemeliharaan, PCI-Girder relatif ekonomis karena memiliki durabilitas yang tinggi, kebutuhan perawatan jangka panjang yang rendah, serta risiko kerusakan akibat retak berlebih yang lebih kecil. Selain itu, estetika jembatan dapat ditingkatkan karena dimensi dan bentuk girder dapat dirancang lebih seragam dan presisi (Wang, 2022). PCI-Girder juga terbukti sangat tahan terhadap kondisi iklim korosif, seperti iklim tropis maupun pesisir, sehingga dapat menurunkan kebutuhan perawatan intensif dan memperpanjang umur layan, sekaligus mengurangi biaya siklus hidup jangka panjang (Tong, 2016).

Meskipun demikian, perencana tetap harus memperhatikan keterbatasan PCI-Girder, seperti kebutuhan peralatan transportasi dan ereksi yang memadai, serta desain sambungan yang tepat dengan pelat rantai agar distribusi beban berjalan efektif (*California Department of Transportation*, 2022). Dalam praktiknya, PCI-Girder banyak diaplikasikan pada jembatan bentang sederhana atau menerus dengan panjang bentang antara 20 hingga 50 meter, termasuk pada jalan raya nasional, jalan tol, dan *flyover* perkotaan. Penerapan PCI Girder di Indonesia telah

diatur dalam ketentuan desain BMS 1992, SNI 2847, dan SNI 1725 yang mengatur aspek pembebanan, kombinasi beban, dan *detailing* struktur, sehingga dapat dijamin keamanan, kenyamanan, dan umur layan jembatan yang menggunakan sistem ini.

2.3 Komponen Pada Struktur Jembatan

Struktur jembatan terdiri dari dua komponen utama, yaitu struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas jembatan terdiri dari berbagai komponen yang berfungsi menopang berbagai beban seperti beban lalu lintas, beban mati, beban angin, dan lainnya. Struktur bawah jembatan mencakup beberapa komponen seperti pelat injak, pilar (apabila ada), *abutment*, dan pondasi yang berfungsi menopang serta mendukung keseluruhan beban jembatan.

2.3.1 Struktur Atas Jembatan

Struktur atas jembatan merupakan bagian utama yang secara langsung menerima beban lalu lintas baik kendaraan maupun pejalan kaki, kemudian menyalurkan beban tersebut ke struktur bawah melalui perletakan. Elemen-elemen pada struktur atas dapat dibedakan menjadi komponen utama dan komponen tambahan.

1. Komponen Utama

Komponen utama adalah elemen yang membentuk sistem struktural jembatan sehingga wajib ada dalam setiap perencanaan. Beberapa di antaranya yaitu:

a. Pelat Lantai (*Deck Slab*)

Pelat lantai berfungsi menerima beban hidup kendaraan, pejalan kaki, serta lapisan perkerasan yang berada di atasnya. Beban tersebut kemudian didistribusikan ke gelagar. Umumnya pelat dibuat dari beton bertulang dengan metode pengecoran di tempat (*cast in situ*), dengan ketebalan antara 18–25 cm, menyesuaikan kelas dan fungsi jembatan.

b. Gelagar (*Girder*)

Gelagar merupakan elemen memanjang yang menerima beban langsung dari pelat lantai dan menyalurkannya ke perletakan. Kapasitas gelagar ditentukan oleh panjang bentang, tipe struktur, dan beban

rencana. Gelagar dapat terbuat dari beton bertulang, beton prategang, maupun baja, dengan perhitungan yang memperhitungkan gaya lentur, geser, serta torsi.

c. Balok Diafragma (*Diaphragm Beam*)

Diafragma merupakan balok melintang yang menghubungkan gelagar satu dengan lainnya. Fungsi utamanya adalah memberikan kekakuan lateral, menjaga stabilitas posisi gelagar, serta membantu pemerataan distribusi beban. Diafragma biasanya ditempatkan pada bagian ujung jembatan (*end diaphragm*) maupun pada titik tertentu di tengah bentang (*intermediate diaphragm*).

d. Komponen Tambahan

Selain komponen utama, terdapat pula komponen tambahan yang berfungsi mendukung aspek keselamatan, kenyamanan, maupun estetika jembatan. Meskipun bukan elemen struktural utama, beban dari komponen tambahan tetap diperhitungkan dalam analisis.

e. Trotoar

Trotoar merupakan jalur khusus untuk pejalan kaki yang diletakkan di sisi jembatan. Trotoar memberikan ruang aman bagi pedestrian tanpa harus berbagi ruang dengan kendaraan.

f. Parapet dan *Railing*

Parapet serta *railing* berfungsi sebagai pengaman pengguna jembatan. Elemen ini mencegah kendaraan keluar jalur dan jatuh dari jembatan, sekaligus melindungi pejalan kaki dari potensi tabrakan.

g. Perlengkapan Tambahan Lain

Komponen tambahan lain yang biasanya terdapat pada jembatan antara lain penerangan jalan umum (PJU), utilitas, dan pipa drainase. Elemen-elemen ini tidak berperan langsung dalam menyalurkan beban utama, namun tetap menambah beban mati pada struktur.

2.3.2 Struktur Bawah Jembatan

Struktur bawah jembatan merupakan bagian konstruksi yang berfungsi menyalurkan seluruh beban dari struktur atas ke tanah dasar. Elemen-elemen yang

termasuk dalam struktur bawah meliputi pelat injak, abutment beserta dinding sayap (*wing wall*), serta pondasi merupakan satu kesatuan yang berfungsi memastikan jembatan memiliki kestabilan, keamanan, serta umur layan yang sesuai dengan rencana perencanaan.

1. Pelat Injak

Pelat injak (*approach slab*) merupakan elemen transisi yang menghubungkan jalan raya dengan lantai jembatan. Keberadaan pelat ini sangat penting untuk mengurangi perbedaan kekakuan antara timbunan oprit yang relatif lunak dengan struktur jembatan yang kaku. Tanpa adanya pelat injak, sering kali terjadi penurunan diferensial pada timbunan yang menyebabkan adanya perbedaan elevasi dengan jembatan. Kondisi tersebut dapat menimbulkan guncangan pada kendaraan yang melintas, mengurangi kenyamanan pengguna jalan, bahkan mempercepat kerusakan lapisan perkerasan di area sambungan. Oleh karena itu, pelat injak dirancang agar mampu menyebarkan beban kendaraan secara merata sekaligus menjaga kelancaran peralihan dari timbunan menuju struktur jembatan.

2. Abutment dan *Wing Wall*

Abutment merupakan struktur yang berada pada kedua ujung jembatan dan berfungsi sebagai penopang utama gelagar sekaligus penahan tanah timbunan di belakangnya. Abutment harus mampu menahan kombinasi gaya vertikal akibat beban lalu lintas, beban mati, serta gaya lateral yang timbul dari tekanan tanah aktif maupun gaya hidrostatik. Dalam perencanaannya, aspek kestabilan terhadap guling (*overturning*), geser (*sliding*), serta daya dukung pondasi harus diperhatikan secara seksama.

Sebagai bagian integral dari abutment, terdapat *wing wall* atau dinding sayap. Fungsi utama *wing wall* adalah menahan tanah timbunan di sisi samping agar tidak longsor serta memberikan transisi yang stabil antara oprit dengan badan jembatan. *Wing wall* biasanya dibangun dengan arah menyudut terhadap abutment, mengikuti kemiringan timbunan jalan. Dengan demikian, keberadaan abutment dan *wing wall* secara bersama-sama menjamin kontinuitas serta kestabilan struktur pada pertemuan antara jalan raya dan jembatan.

3. Pondasi

Pondasi adalah elemen struktur bawah yang berfungsi menyalurkan beban dari abutment maupun pilar ke lapisan tanah dengan daya dukung yang memadai. Pemilihan jenis pondasi sangat bergantung pada kondisi tanah setempat, kedalaman lapisan keras, serta besarnya beban yang harus dipikul. Secara umum, pondasi jembatan dapat dibedakan menjadi pondasi dangkal dan pondasi dalam.

Pondasi dangkal digunakan apabila lapisan tanah dengan daya dukung cukup berada pada kedalaman relatif dekat dengan permukaan tanah. Beban struktur disalurkan langsung melalui pondasi ke tanah permukaan. Jenis pondasi dangkal yang umum digunakan antara lain pondasi telapak (*footing*), pondasi menerus (*continuous footing*), dan pondasi setempat (*individual footing*). Pondasi telapak sering digunakan pada struktur dengan titik beban besar seperti kolom, pondasi menerus diterapkan pada struktur memanjang seperti dinding abutment, sementara pondasi setempat digunakan untuk elemen-elemen individual dengan beban yang relatif kecil.

Apabila lapisan tanah keras terletak pada kedalaman yang lebih besar, maka digunakan pondasi dalam. Pondasi dalam bekerja dengan menyalurkan beban ke lapisan tanah keras di kedalaman tertentu. Dua jenis pondasi dalam yang lazim diaplikasikan pada jembatan adalah pondasi tiang dan pondasi sumuran. Pondasi tiang digunakan apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman lebih dari delapan meter. Tiang dapat berupa tiang pancang yang dipasang dengan cara dipukul atau ditekan ke dalam tanah, maupun tiang bor yang dibuat dengan mengebor tanah lalu mengisinya dengan tulangan dan beton. Pemilihan antara tiang bor dan tiang pancang dipengaruhi oleh kondisi tanah, lingkungan sekitar, serta peralatan yang tersedia.

Sementara itu, pondasi sumuran digunakan apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman sekitar dua hingga delapan meter. Pondasi ini dibangun dengan menggali tanah berbentuk lingkaran, persegi, atau oval hingga mencapai kedalaman yang diperlukan, kemudian diperkuat dengan pasangan batu atau beton bertulang. Pondasi sumuran banyak digunakan pada jembatan di atas

sungai karena memiliki kapasitas yang baik dalam menahan beban vertikal maupun gaya horizontal akibat arus air.

2.4 Konsep Pembebanan Pada Jembatan

Langkah utama dalam merencanakan struktur pada suatu konstruksi adalah menentukan perkiraan beban yang akan ditanggung oleh struktur tersebut, yang dikenal sebagai pembebanan. Pada perencanaan ulang ini, beban yang diperhitungkan berdasarkan standar acuan berikut:

1. SNI 1725:2016 – Pembebanan Untuk Jembatan.
2. SNI 2833:2016 – Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa

Tujuan dari pembebanan ini adalah memastikan desain jembatan mampu menahan beban dengan baik, sehingga jembatan dapat berfungsi dengan aman dan optimal sepanjang umur rencana.

2.4.1 Beban Primer

Beban primer adalah beban utama yang digunakan dalam perhitungan tegangan pada perencanaan struktur jembatan. Beban ini mencakup beberapa jenis beban, antara lain:

1. Beban Mati (MS)

Beban mati merupakan semua beban yang berasal dari berat jembatan itu sendiri atau bagian-bagiannya, termasuk semua komponen tambahan yang dianggap sebagai bagian permanen dari struktur. Menurut SNI 1725:2016 tentang pembebanan jembatan, besarnya beban mati ditentukan berdasarkan massa jenis material yang digunakan dengan nilai sebagai berikut:

- a. Beton bertulang sebesar 25 kN/m^3
- b. Baja sebesar $78,5 \text{ kN/m}^3$
- c. Aspal sebesar 22 kN/m^3
- d. Air sebesar $9,8 \text{ kN/m}^3$

Selain itu, faktor beban untuk berat sendiri dapat dilihat dalam Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS})		Keadaan Batas Ultimit (γ_{UMS})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Alumunium	1,00	1,10	0,90
	Beton Pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton Cor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,75

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan merupakan kompenen non-struktural yang memberikan beban pada jembatan dan dapat mengalami perubahan seiring bertambahnya umur jembatan. Nilai faktor untuk beban mati ini dapat dilihat pada Tabel 2.4 berikut:

Tabel 2. 4 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA})		Keadaan Batas Ultimit (γ_{UMA})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 (1)	2,00	0,70
	Khusus	1,00	1,40	0,80
Catatan(1)	Faktor Bebas Layan sebesar 1,3 digunakan untuk Berat Utilitas			

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

3. Beban Akibat Tekanan Tanah

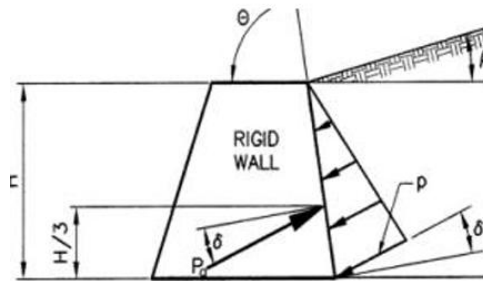
Koefisien tanah nominal dihitung berdasarkan karakteristik tanah, seperti kepadatan, kadar air, kohesi, sudut geser, dan kedalaman tanah keras, yang diperoleh melalui pengukuran serta pengujian tanah. Faktor beban akibat tekanan tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2. 5 Faktor Beban Akibat Tekanan Tanah

Jangka Waktu	Faktor Beban (γ TA)			
	Keadaan Batas Layan (γ_s TA)		Keadaan Batas Ultimit (γ_u TA)	
	Tekanan Tanah		Biasa	Terkurangi
Tetap	Tekanan tanah vertikal	1,00	1,25 (1)	0,80
	Tekanan tanah lateral			
	Tekanan tanah aktif	1,00	1,25	0,80
	Tekanan tanah pasif	1,0	1,40	0,70
	Tekanan tanah diam	1,0		

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan Untuk Jembatan, 2016)

a. Tekanan tanah aktif



Gambar 2. 2 Ilustrasi Distribusi Tekanan Tanah Aktif pada Dinding Penahan Tanah Kaku (*Rigid Retaining Wall*)

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan Untuk Jembatan, 2016)

Mengacu pada ketentuan SNI 1725:2016, nilai tekanan tanah aktif diperoleh melalui penerapan persamaan tertentu yang telah ditetapkan dalam standar tersebut. Persamaan ini digunakan untuk menghitung besar tekanan tanah yang bekerja pada dinding penahan tanah, dengan mempertimbangkan kondisi dan sifat-sifat tanah di lokasi perencanaan.

$$P_{\text{aktif}} = K_a * \gamma_s * z + 2c \sqrt{K_a}$$

untuk,

$$K_a = \sin^2 (\theta + \phi'f) / \Gamma (\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta))$$

$$\Gamma = \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi'f + \delta) \sin(\phi'f - \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right]$$

$$\phi'f = \tan^{-1} (K \phi R \times \tan \phi)$$

dengan,

P_{aktif}	: Tekanan tanah aktif (kN/m^2)
γ_s	: Berat jenis tanah (kN/m^3)
z	: Kedalaman diukur dari permukaan tanah (m)
c	: Kohesi tanah (kN/m^2)
K_a	: Koefisien tekanan tanah aktif
Γ	: Koefisien tekanan tanah lateral aktif
δ	: Sudut geser antara urukan dan dinding ($^\circ$)
β	: Sudut pada urukan terhadap garis horizontal ($^\circ$)
θ	: Sudut pada dinding belakang terhadap garis horizontal ($^\circ$)
$\phi'f$	: Sudut geser efektif tanah ($^\circ$)
$K\phi R$	: Faktor pengurangan kekuatan (0,7)

Sudut geser antara urukan dan dinding (δ) berasal dari data laboratorium, apabila tidak ada data secara detail dapat ditentukan dengan acuan SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa.

- Batuan $\rightarrow \delta = 35^\circ$
- Kerikil, campuran kerikil–pasir, pasir kasar $\rightarrow \delta = 29 - 31^\circ$
- Pasir halus hingga medium, pasir kelanaunan medium hingga kasar, kerikil kelanaunan atau berlempung $\rightarrow \delta = 24 - 29^\circ$
- Pasir halus, pasir kelanaunan atau berlempung halus hingga medium $\rightarrow \delta = 19 - 24^\circ$
- Lanau kepasiran halus, lanau non plastis $\rightarrow \delta = 17 - 19^\circ$
- Lempung prakonsolidasi atau residual yang sangat teguh dan keras $\rightarrow \delta = 22 - 26^\circ$
- Lempung agak teguh hingga lempung teguh, dan lempung kelanaunan $\rightarrow \delta = 17 - 19^\circ$
- Pasangan bata pada material fondasi $\rightarrow$ memiliki faktor geser yang sama dengan material sejenis.

b. Tekanan tanah pasif

Menurut SNI 1725:2016, untuk tanah kohesif besarnya tekanan tanah pasif dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{\text{pasif}} = K_a * \gamma_s * z + 2c \sqrt{K_p}, \text{ untuk } K_p = 1/K_a$$

dengan,

P_{pasif} : Tekanan tanah pasif (kN/m²)

γ_s : Berat jenis tanah (kN/m³)

z : Kedalaman diukur dari permukaan tanah (m)

c : Kohesi tanah (kN/m²)

K_p : Koefisien tekanan tanah pasif

2.4.2 Beban Lalu Lintas

Dalam perencanaan jembatan, beban lalu lintas terdiri dari beban lajur, beban truk dan beban pejalan kaki.

1. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” bekerja di seluruh lebar jalur kendaraan dan memberikan efek pada jembatan yang setara dengan iring-iringan kendaraan sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang diterapkan bergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Secara umum, beban “D” menjadi faktor utama dalam perhitungan dengan bentang sedang hingga panjang. Sesuai dengan SNI 1725:2016, beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi rata (BTR) yang dikombinasikan dengan beban garis terpusat (BGT). Faktor beban akibat beban lajur “D” dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut:

Tabel 2. 6 Faktor Beban Akibat Lajur “D”

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^s)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TD}^u)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Box Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

a. Beban Terbagi Rata (BTR)

Beban Terbagi Merata (BTR) memiliki intensitas q kPa, dimana nilai q bergantung terhadap panjang total L yang dikenai beban dapat dinyatakan sebagai berikut (nilai yang dipilih pada perhitungan bab 4 ditandai dengan teks *bold* dan *italic*):

- Jika $L \leq 30$ m, maka nilai $q = 9,0$ kPa
- ***Jika $L \geq 30$ m, maka nilai $q = 9,0 (0,5 + \frac{15}{L})$ kPa***

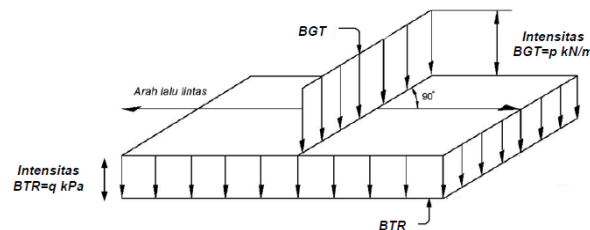
dengan,

q : Intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang (kPa)

L : Panjang total jembatan yang dibebani (m)

b. Beban Garis Terpusat (BGT)

Beban Garis Terpusat (BGT) harus tegak lurus dengan intensitas $p = 49,0$ kN/m terhadap arah lalu lintas jembatan. Beban “D” harus disusun melintang untuk menghasilkan Momen Maksimum. Secara umum, penyusunan komponen BTR dan BGT dari beban “D” dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Gambar Distribusi Beban Lajur “D”

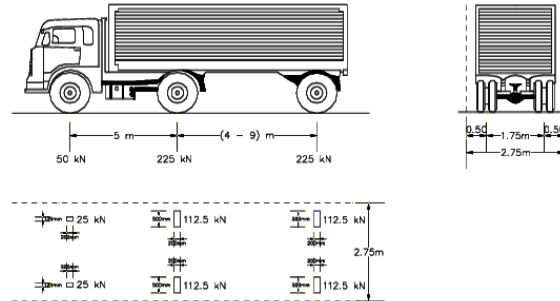
(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

2. Beban Truk “T” (TT)

Beban truk “T” adalah kendaraan berat dengan tiga as yang ditempatkan di beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Setiap as memiliki dua bidang kontak pembebanan untuk mensimulasikan dampak roda kendaraan berat. Hanya satu truk “T” diterapkan per lajur dan digunakan untuk bentang pendek serta lantai kendaraan.

Menurut SNI 1725:2016 Pasal 8.3, truk semi-trailer memiliki susunan serta berat as yang terbagi menjadi dua beban merata pada bidang kontak roda.

Jarak antar as berkisar 4 – 9 meter untuk efek maksimal dalam arah memanjang jembatan. Truk diasumsikan berada di tengah lajur lalu lintas seperti Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2. 4 Beban Truk “T” (500 kN)

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

Dalam perhitungan, beban truk “T” harus dikalikan dengan faktor pembebanan, besaran faktor dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 7 Faktor Akibat Pembebanan Truk “T”

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TT})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^s)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TT}^u)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Box Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

3. Faktor Beban Dinamis (FBD) atau *Dinamic Load Allowance* (DLA)

Faktor beban dinamis merupakan hasil interaksi antara pergerakan kendaraan dengan struktur jembatan. Dalam perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen. Besarnya BGT dari beban lajur “D” dan beban roda dari beban truk “T” harus cukup untuk memberikan terjadinya interaksi antara kendaraan yang bergeak dengan jembatan, dengan dikali dengan FBD. Dalam pembebanan “D”, FBD merupakan fungsi dari panjang bentang. Untuk bentang tunggal, panjang bentang ekuivalen diambil sama dengan panjang bentang sebenarnya. Untuk bentang menerus, panjang bentang ekuivalen L_E dihasilkan dari rumus sebagai berikut.

$$L_E = \sqrt{L_{av} \cdot L_{maks}}$$

dengan,

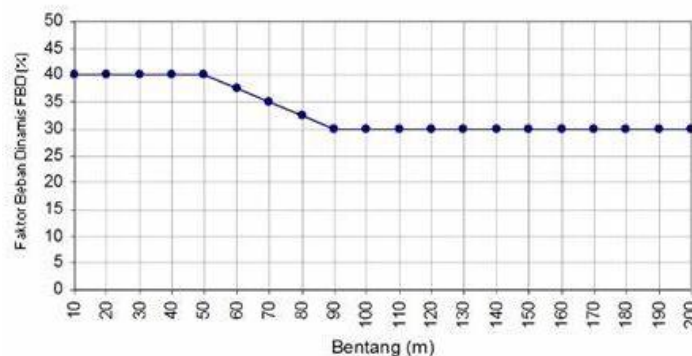
L_{av} : Panjang rata-rata dari kelompok bentang yang disambungkan secara menerus

L_{maks} : Panjang bentang maksimum dalam kelompok bentang yang disambungkan secara menerus

Besarnya faktor FBD atau DLA dapat ditentukan berdasarkan rumus atau ketentuan berikut (faktor yang dipilih pada perhitungan bab 4 ditandai dengan teks *bold* dan *italic*).

- ***DLA = 0,4*** ***untuk $L \leq 50$ m***
- $DLA = 0,4 - 0,0025 \cdot (L - 50)$ untuk $50 \text{ m} < L < 90 \text{ m}$
- ***DLA = 0,3*** ***untuk $L \geq 90 \text{ m}$***

Ketentuan ini juga dapat dianalisis melalui grafik hubungan antara bentang dan faktor beban dinamis yang dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 5 Faktor Beban Dinamis (FBD)

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

4. Beban Pejalan Kaki (TP)

Pada perencanaan redesain Jembatan Jetak ini digunakan dua dasar teori sebagai acuan dalam analisis struktur dan pembebanan pejalan kaki, yaitu ketentuan dari SNI 1725:2016 untuk pelat lantai dan formulasi beban pejalan kaki berbasis luas area trotoar untuk perhitungan pada abutment dan PCI girder.

a. Untuk perencanaan pelat lantai

Perencanaan pelat lantai jembatan pada penelitian ini mengacu pada ketentuan SNI 1725:2016, yaitu bahwa semua komponen trotoar dengan

lebar lebih dari 600 mm harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki sebesar 5 kPa ($\approx 5 \text{ kN/m}^2$).

Ketentuan ini digunakan karena pelat lantai merupakan elemen struktur yang langsung berhubungan dengan aktivitas pejalan kaki, sehingga kemungkinan terjadinya beban puncak akibat kerumunan pada area terbatas sangat tinggi. Oleh karena itu, penggunaan nilai konstan 5 kPa dipandang lebih konservatif dan mampu mewakili kondisi terburuk yang mungkin terjadi.

b. Untuk perencanaan *abutment*

Berbeda dengan pelat lantai, pembebanan pejalan kaki pada abutment dan PCI girder dihitung berdasarkan luas area trotoar yang ditumpu. Apabila digunakan nilai 5 kPa secara merata untuk seluruh luas trotoar, hasil perhitungan dapat menjadi berlebihan (*overestimate*) karena kecil kemungkinan seluruh area trotoar dipenuhi pejalan kaki pada saat yang sama. Oleh karena itu, digunakan formulasi beban pejalan kaki yang bervariasi sesuai luas area A, yaitu:

$$q = \begin{cases} 5,00 \text{ kPa}, & A \leq 10\text{m}^2 \\ \mathbf{5 - 0,033(A - 10) \text{ kPa}}, & \mathbf{10 < A \leq 100\text{m}^2} \\ 2,00 \text{ kPa}, & A > 100\text{m}^2 \end{cases}$$

dengan A adalah luas bidang trotoar yang dibebani pejalan kaki (m^2). Formulasi ini memberikan nilai beban yang lebih proporsional terhadap luas area, sehingga perhitungan pada elemen abutment maupun girder menjadi lebih realistis namun tetap memenuhi aspek keamanan (formulasi beban pejalan kaki yang dipilih pada perencanaan *abutment* ditandai dengan teks *bold* dan *italic*).

5. Gaya Rem (TB)

Menurut **SNI 1725:2016 Pasal 8.7**, gaya rem ditentukan sebagai yang terbesar dari:

- 25% dari berat gandar truk desain, atau
- 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR).

Gaya rem bekerja secara horizontal pada ketinggian 1,8 m di atas permukaan jalan, searah longitudinal. Untuk jembatan dengan jalur satu arah, semua lajur rencana dianggap dibebani secara bersamaan saat menghitung gaya rem. Dalam perhitungan, gaya rem tidak boleh dilepaskan dari beban lalu lintas vertikal yang menyertainya, karena beban vertikal dapat mengurangi dampak gaya rem. Faktor beban gaya rem (TB) dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 8 Faktor Beban Gaya Rem (TB)

Tipe Beban	Faktor Beban	
	K_{TB}^S	K^U
Transien	1,0	1,8

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

Selain itu, untuk perhitungan pada *abutment*, ketentuan gaya rem (HTB) mengikuti panjang total jembatan (L) dengan formulasi:

$$HTB = \begin{cases} 250 \text{ kN}, & L \leq 80 \text{ m} \\ 250 + 2,5 (L - 80) \text{ kN}, & 80 < L \leq 180 \text{ m} \\ 500 \text{ kN}, & L \geq 180 \text{ m} \end{cases}$$

dengan L adalah panjang total jembatan (m).

2.4.3 Beban Sekunder

Beban sekunder merupakan beban sementara yang diperhitungkan dalam analisis tegangan pada setiap perencanaan jembatan. Berikut merupakan beberapa beban sekunder yang perlu diperhitungkan.

1. Beban Angin (Pada Struktur ataupun Kendaraan)

Ketentuan ini tidak berlaku untuk jembatan besar atau jembatan penting. Jembatan besar atau penting dapat menggunakan aturan beban angin dari SNI 1725:2016 dengan harus melakukan investigasi khusus terkait pengaruh beban angin, termasuk respons dinamis dari jembatan (pada kondisi *realtime*). Akibat Jembatan Jetak bukan termasuk kategori tersebut, serta keterbatasan data angin maka digunakan aturan beban angin sebagai berikut:

$$TEW = 0.0006 * C_w * (V_w)^2 * A_b \text{ (kN)}$$

dengan:

C_w = koefisien seret (*drag coefficient*) – dapat dilihat pada Tabel 2.10

V_w = kecepatan angin rencana (m/s) untuk kondisi batas (*limit state*)

yang sedang dipertimbangkan – dapat dilihat pada Tabel 2.11

A_b = luas samping ekuivalen jembatan (m^2)

Gaya angin nominal (TEW) pada kondisi layan maupun kondisi ultimit pada sebuah jembatan bergantung pada kecepatan angin rencana, dengan persamaan tersebut. Adapun parameter komponen pada persamaan gaya angin nominal dapat dilihat pada Tabel 2.9 dan Tabel 2.10. Beban angin harus diterapkan secara merata pada seluruh bangunan atas jembatan.

Tabel 2. 9 Koefisien Seret Berdasarkan Tipe Jembatan

Tipe Jembatan	C _w
Bangunan atas masif (1), (2)	
$b / d = 1,0$	2,1 (3)
$b / d = 2,0$	1,5 (3)
$b / d \geq 6,0$	1,25 (3)
Bangunan atas rangka (Truss superstructure)	1,2

dengan:

- b : Lebar keseluruhan jembatan di antara sisi luar parapet.
- d : Kedalaman bangunan atas, termasuk kedalaman parapet masif.
- Nilai antara dari rasio b/d dapat ditentukan dengan interpolasi linier.
- Jika bangunan atas memiliki kemiringan (*super elevation*), maka nilai C_w harus ditambah 3% untuk setiap derajat kemiringan, dengan kenaikan maksimum 2,5%.

Tabel 2. 10 Parameter Kecepatan Angin Rencana (V_w)

Kondisi Batas (Limit State)	Lokasi < 5 km dari pantai	Lokasi > 5 km dari pantai
Layan (Serviceability)	30 m/s	25 m/s
Ultimit (Ultimate)	35 m/s	30 m/s

Apabila terdapat kemungkinan lalu lintas kendaraan berada di atas jembatan, maka harus ditambahkan beban garis horizontal merata pada tingkat lantai jembatan atau dilakukan perhitungan beban angin pada kendaraan, yang diberikan oleh persamaan:

$$TEW = 0.0012 * C_w * (V_w)^2 * A_b \text{ (kN)}$$

dengan $C_w = 1,2$

2. Beban Temperatur (E_{un})

Perbedaan suhu di antara bagian jembatan mengakibatkan adanya Gaya Beban Suhu. Besaran Rentang Simpangan akibat Beban Temperatur harus dihitung berdasarkan suhu maksimum dan minimum yang dinyatakan dalam $\Delta T = T_{maks} - T_{min}$.

Beban temperatur pada lantai jembatan berdasarkan SNI 1725:2016 dapat dilihat pada Tabel 2.11 berikut.

Tabel 2. 11 Standar Temperatur Lantai Jembatan

Tipe Bangunan Atas	Temperatur Jembatan Rata-Rata Minimum	Temperatur Jembatan Rata-Rata Maksimum
Lantai Beton di atas Gelagar atau Box Beton	15°C	40°C
Lantai Beton di atas Gelagar atau Rangka Baja	15°C	40°C
Lantai Pelat Baja di atas Gelagar atau Rangka Baja	15°C	40°C
Catatan: Temperatur Jembatan Rata-Rata Minimum bisa dikurangi 5°C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian di atas 500 mdpl		

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

3. Beban Gempa Lateral (E_{Qh})

Jembatan dirancang untuk meminimalkan kemungkinan kegagalan struktur. Namun tetap berisiko mengalami kerusakan signifikan serta gangguan layanan akibat aktivitas seismik. Syarat dan ketentuan untuk mengetahui atau menganalisis gaya gempa pada jembatan mengacu pada SNI 2833:2016 – Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa. Perhitungan gaya gempa dilakukan menggunakan rumus berikut berikut.

$$E_{Qh} = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t$$

dengan,

E_Q : Gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} : Koefisien respons seismik

R : Faktor modifikasi respon

W_t : Berat total struktur dari beban mati dan beban hidup sesuai perencanaan (kN)

Koefisien respon seismik (C_{sm}) dihitung berdasarkan peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan yang disesuaikan dengan zona gempa dan periode ulang gempa yang direncanakan. Koefisien percepatan yang diperoleh dari peta gempa dikalikan dengan faktor amplifikasi sesuai kondisi tanah. Untuk nilai faktor modifikasi respon (R) dapat dilihat pada Tabel 2.12 dan Tabel 2.13.

Tabel 2. 12 Modifikasi Respon (R) untuk Bangunan Bawah

Bangunan Bawah	Kategori Kepentingan		
	Sangat Penting	Penting	Lainnya
Pilar tipe dinding	1,5	1,5	2,0
Tiang/kolom beton bertulang	1,5	2,0	3,0
Tiang vertikal	1,5	1,5	2,0
Tiang miring	1,5	2,0	3,0
Kolom tunggal	1,5	2,0	3,0
Tiang baja dan komposit	1,5	3,5	5,0
Tiang vertikal	1,5	2,0	3,0
Tiang miring	1,5	3,5	5,0
Kolom majemuk	1,5	3,5	5,0

(Sumber: SNI 2833 Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, 2016)

Tabel 2. 13 Modifikasi Respon (R) untuk Hubungan antar Elemen Struktur

Hubungan Elemen Struktur	Semua Kategori Kepentingan
Bangunan atas dengan kepala jembatan	0,8
Sambungan muai (dilatasi) pada bangunan atas	0,8
Kolom, pilar, atau tiang dengan bangunan atas	1,0
Kolom atau pilar dengan pondasi	1,0

(Sumber: SNI 2833 Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, 2016)

a. Koefisien respons seismik (C_{sm})

$$C_{sm} = ((S_{DS} - A_s) * T/T_0) + A_s \quad \text{untuk } T < T_0$$

$$C_{sm} = S_{DS} \quad \text{untuk } T_0 < T \leq T_s$$

dengan,

A_s : Koefisien percepatan spektrum minimum

S_{DS} : Spektral percepatan desain untuk periode pendek

T : Waktu getar struktur

T_0 : Batas awal spektrum menurun

b. Waktu getar struktur (T)

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{Wt}{g * Kp}}$$

dengan,

Wt : Berat total yang berupa berat sendiri dan beban mati tambahan

Kp : Kekakuan struktur yang merupakan gaya horizontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan

g : Percepatan gravitasi, sebesar 9,81 m/det²

c. Kekakuan Struktur (Kp)

Pada perencanaan redesain Jembatan Jetak, gaya gempa direncanakan pada struktur balok prategang/PCI-Girder dan *abutment*, sehingga kekakuan struktur dirumuskan sebagai berikut:

- Untuk balok prategang

$$Kp = 48 * Ec * I_{xc} / L^3$$

dengan,

Ec = Modulus elastisitas beton

I_{xc} = Momen inersia terhadap alas balok prategang

L = Bentang/*span* rencana balok prategang

- Untuk *abutment*

$$\text{Tinjauan arah x (struktur } breast \text{ wall), } Kp = 3 * Ec * I_{cx} / L_{breast}$$

$$\text{Tinjauan arah y (struktur } breast \text{ wall), } Kp = 3 * Ec * I_{cy} / L_{breast}$$

dengan,

Ec = Modulus elastisitas beton

I_{c(n)} = Inersia penampang

L_{breast} = Tinggi *breast wall*

d. Respons spektra

Spektrum respons yang digunakan dalam perencanaan merupakan besaran yang merepresentasikan respons maksimum dari sistem dengan satu derajat kebebasan pada berbagai periode alami akibat getaran tanah yang teredam.

Spektrum respons di permukaan tanah diturunkan dari tiga parameter percepatan puncak pada batuan dasar (PGA, S_s , dan S_1), serta mempertimbangkan faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v . Nilai spektrum respons tersebut kemudian dihitung menggunakan persamaan berikut.

- $A_s = F_{PGA} * PGA$
- $S_{DS} = F_a * S_s$
- $S_{D1} = F_v * S_1$

dengan,

F_{PGA} = faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada batuan dasar

PGA = percepatan puncak di batuan dasar SB untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

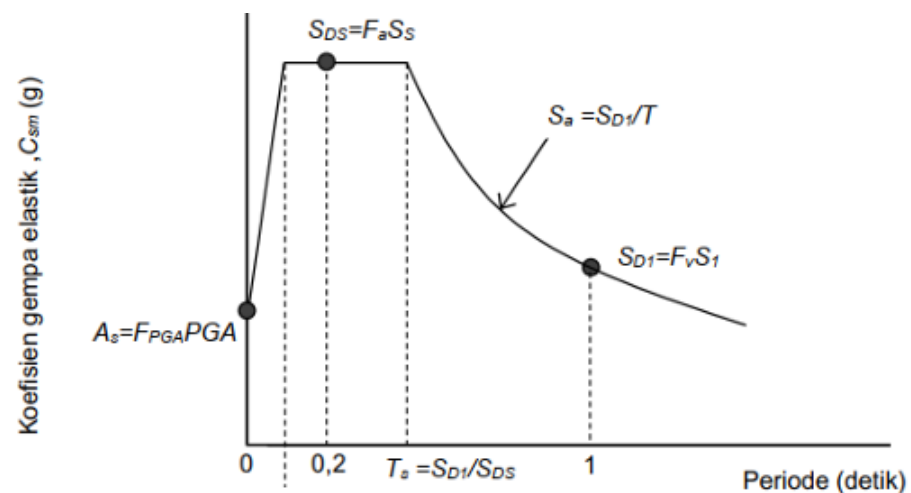
F_a = faktor amplifikasi getaran periode 0,2 detik

F_v = faktor amplifikasi getaran periode 1,0 detik

S_s = respon spektra percepatan periode 0,2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

S_1 = respon spektra percepatan periode 1,0 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Gambar 2.6 memperlihatkan model tipikal spektrum respons yang telah disederhanakan pada kondisi permukaan tanah.



Gambar 2. 6 Model Tipikal Spektrum Respons di Permukaan Tanah
(Sumber: SNI 2833 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, 2016)

e. Teknik Analisis Kelas Situs dan Penentuan Faktor Situs

Berdasarkan SNI 2833:2016, klasifikasi kondisi lokasi tanah ditetapkan dengan mempertimbangkan karakteristik tanah pada kedalaman 30 meter dari permukaan. Penentuan ini dilakukan melalui analisis korelasi antara data hasil penyelidikan lapangan, seperti uji Standard Penetration Test (SPT) atau Cone Penetration Test (CPT), serta hasil pengujian laboratorium terhadap sifat fisik dan mekanik tanah.

Klasifikasi tersebut penting untuk memperoleh gambaran tingkat kekakuan dan respon dinamis tanah terhadap beban gempa, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan spektrum respons desain. Rincian kriteria klasifikasi lokasi dapat dilihat pada Tabel 2.14 berikut.

Tabel 2. 14 Klasifikasi Kelas Situs

Kelas Situs	Vs (m/s)	N	Su (kPa)
Batuan Keras	$V_s \geq 1500$	N/A	N/A
Batuan	$750 < V_s \leq 1500$	N/A	N/A
Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak	$350 < V_s \leq 750$	$N \geq 50$	$S_u \geq 100$
Tanah Sedang	$175 < V_s \leq 350$	$15 \leq N \leq 50$	$50 \leq S_u \leq 100$
Tanah Lunak	$V_s \leq 175$	$N < 15$	$S_u < 50$

(Sumber: SNI 2833 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, 2016)

Dalam penentuan spektrum respons di permukaan tanah, diperlukan faktor koreksi yang memperhitungkan pengaruh kondisi tanah terhadap respons gempa. Faktor ini dikenal sebagai faktor amplifikasi, yang digunakan untuk menyesuaikan nilai percepatan gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah.

Tiga parameter utama yang diperhitungkan yaitu: FPGa sebagai faktor amplifikasi getaran terkait percepatan puncak pada batuan dasar (PGA), Fa sebagai faktor amplifikasi untuk periode pendek ($T = 0,2$ detik), serta Fv sebagai faktor amplifikasi untuk periode menengah hingga panjang yang mewakili getaran pada periode 1 detik.

Nilai-nilai faktor amplifikasi tersebut ditetapkan dalam standar berdasarkan klasifikasi jenis tanah, karena setiap kondisi tanah memiliki kemampuan berbeda dalam memperbesar atau meredam getaran gempa. Dengan demikian, penggunaan faktor amplifikasi memungkinkan analisis spektrum respons lebih realistis sesuai dengan kondisi lapangan. Pada SNI 2833:2016, nilai F_{PGA} , F_a , dan F_v untuk masing-masing kategori tanah dapat dilihat pada Tabel 2.15 dan Tabel 2.16.

Tabel 2. 15 Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 0,2 Detik (F_{PGA}/F_a)

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1, S_s \leq 0,25$	$PGA = 0,2, S_s = 0,5$	$PGA = 0,3, S_s = 0,75$	$PGA = 0,4, S_s = 1,0$	$PGA > 0,5, S_s \geq 1,25$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Tabel 2. 16 Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 1,0 Detik (F_v)

Kelas Situs	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,1	1,3
Tanah sedang (SD)	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,1
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

4. Beban Gempa Vertikal (EQ_v)

Menurut SNI 2833:2016, pengaruh gempa vertikal ditetapkan sebesar 10% dari reaksi beban permanen, yang terdiri atas beban mati sendiri serta beban mati tambahan.

5. Tekanan Tanah Dinamis atau Tekanan Tanah Akibat Gempa

- Dilakukan analisa terlebih dahulu terkait koefisien respon seismik (C_{sm}) yang meliputi analisa kelas situs, faktor situs dan respons spektra sehingga dapat diketahui besar sudut tekanan gempa (θ).

$$\theta = \tan^{-1} (C_{sm})$$

Sehingga dapat diketahui koefisien tekanan aktif seismik yang dapat dihitung dengan,

$$KAE = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta a)}{\cos \theta \cos^2 \beta a \cos(\delta + \theta + \beta a)} \times \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \theta + \beta a) \cos(i - \beta a)}} \right)^{-2}$$

dengan keterangan tertulis pada Tabel 2.17.

Tabel 2. 17 Keterangan Notasi Perumusan Koefisien Tekanan Aktif Seismik

Simbol	Keterangan	Satuan
γ	Berat jenis tanah	kN/m ³
H_t	Tinggi tanah	m
ϕ	Sudut geser internal tanah	°
θ	arc tan(kh / (1 - kv))	°
δ	Sudut geser antara tanah dan kepala jembatan	°
kh	Koefisien percepatan horizontal	-
kv	Koefisien percepatan vertikal (umumnya diambil 0)	-
i	Sudut kemiringan timbunan	°
βa	Kemiringan dinding kepala jembatan terhadap bidang vertikal	°

- c. Apabila telah diperoleh hasil koefisien tekanan aktif seismik maka dirumuskan gaya/tekanan tanah aktif ekuivalen (atau titik kerja resultan tekanan tanah aktif) sebagai berikut:

$$B' = \frac{(\gamma s \times H \times (1-k) \times KAE) \times (H_2 - H_1)}{H_2} \times \text{tinggi titik momen tinjauan}$$

dengan keterangan tertulis pada Tabel 2.18.

Tabel 2. 18 Keterangan Notasi Perumusan Titik Kerja Resultan Tekanan Tanah Aktif

Simbol	Keterangan	Satuan
γ_s	Berat isi tanah timbunan	kN/m ³
H	Tinggi total timbunan di belakang abutment	m
k	Faktor reduksi (misalnya akibat kondisi gempa → kh untuk horizontal, kv untuk vertikal)	-
KAE	Koefisien tekanan tanah aktif ekuivalen (<i>active earth pressure coefficient</i>)	-
H_1, H_2	Kedalaman atau batas bawah dan atas bidang tekan yang dihitung	m

2.4.4 Kombinasi Pembebanan

Analisis struktur dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi gaya-gaya yang bekerja, baik yang bersifat statis maupun dinamis. Berdasarkan SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan, terdapat beberapa kondisi kombinasi pembebanan yang perlu diperhitungkan. Kombinasi pembebanan dalam perencanaan jembatan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 19 Kombinasi Beban pada Jembatan

Jenis Kombinasi	Formula									
	MS	MA	TD	TT	TB	TP	EWS	EWI	EQX	EQY
Kuat 1 TD	1,1	2,0	1,8		1,8	1,8				
Kuat 1 TT	1,1	2,0		1,8	1,8	1,8				
Kuat 2 TD	1,1	2,0	1,4		1,4	1,4				
Kuat 2 TT	1,1	2,0		1,4	1,4	1,4				
Kuat 3	1,1	2,0					1,4			
Kuat 5	1,1	2,0					0,4	1,0		
Layan 1 TD	1,0	1,0	1,0		1,0	1,0	0,3	1,0		
Layan 1 TT	1,0	1,0		1,0	1,0	1,0	0,3	1,0		
Ekstrem 1 TD	1,1	2,0	0,5		0,5	0,5			1,0	1,0
Ekstrem 1 TT	1,1	2,0		0,5	0,5	0,5			1,0	1,0
Gempa SNI 2016 TD	1,0	1,0	0,5		0,5	0,5			0,3	1,0
Gempa SNI 2016 TT	1,0	1,0		0,5	0,5	0,5			1,0	0,3

(Sumber: SNI 1725 Pembebanan untuk Jembatan, 2016)

Dalam menganalisis besar lendutan, gaya aksial tekan, momen lentur, dan gaya geser pada jembatan, diperlukan kombinasi beban seperti pada tabel di atas. Kombinasi pembebanan daya layan digunakan untuk menghitung lendutan yang terjadi, sedangkan kombinasi kuat digunakan untuk mengevaluasi kontrol gaya dalam profil. Analisis ini dilakukan menggunakan bantuan software analisis struktur seperti SAP2000 dan sejenisnya.

2.4.5 Faktor Reduksi

Ketentuan faktor reduksi mengacu pada SNI 2847:2019 tentang persyaratan beton struktural.

Tabel 2. 20 Faktor Reduksi Kekuatan Pada Struktur Beton

Situasi Rencana	Faktor Reduksi (ϕ)
Lentur	0,90
Geser dan Torsi	0,75
Aksial Tekan	
Dengan tulangan spiral	0,75
Dengan sengkang biasa	0,65
Tumpuan Beton	0,65

Sumber: SNI 2847:2019 Tentang Persyaratan Beton Struktural

2.5 Perencanaan Struktur Jembatan

2.5.1 Perencanaan Struktur Atas

Struktur atas jembatan berfungsi sebagai elemen utama yang menerima beban lalu lintas dan beban mati dari komponen non-struktural, kemudian meneruskannya ke struktur bawah melalui perletakan. Struktur atas terdiri dari slab lantai kendaraan, girder, diafragma, trotoar, parapet, dan perletakan.

2.5.1.1 Tiang Sandaran (*Railing*)

Tiang utama dirancang mampu menahan beban hidup setidaknya sebesar 1 kN/m, menurut SNI 1725:2016. Berikut merupakan tahap melakukan perencanaan tiang sandaran:

1. Menentukan material, mutu, serta profil tiang sandaran
2. Menentukan panjang tiang sandaran berdasarkan panjang jembatan
3. Pembebanan tiang sandaran dihitung secara vertikal (qV) dan horizontal (qH)
4. Menganalisis struktur tiang sandaran
5. Cek kontrol gaya pada tiang sandaran, meliputi:

- a. Cek Momen

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} \leq \sigma_{ijin}$$

dengan,

M_{max} : Momen maksimum yang bekerja (kNm)

W : Modulus penampang (mm^3)

σ_{ijin} : Tegangan yang diizinkan (N/mm^2)

b. Cek Geser

$$\tau = \frac{D}{A} \leq \tau_{ijin}$$

dengan,

D : Gaya geser yang bekerja (kNm)

A : Luas penampang (mm²)

τ_{ijin} : Tegangan geser maksimum yang diizinkan (N/mm²)

c. Cek Lendutan

$$\delta \leq \delta_{ijin}$$

dengan,

δ_{ijin} : Lendutan maksimum yang diizinkan (mm)

2.5.1.2 Pelat Lantai Kendaraan

Analisis struktur pelat dilakukan dengan memodelkan pelat sebagai komponen balok satu dimensi di atas banyak tumpuan pada arah transversal jembatan. Panjang bentang plat ditentukan berdasarkan jarak antar girder dengan tumpuan terletak di titik tengah atau as girder. Dalam perencanaan plat lantai kendaraan, beban yang dihitung meliputi:

1. Beban sendiri pelat
2. Beban mati tambahan
 - a. Berat aspal = luas x berat jenis aspal (kN/m³)
 - b. Berat sendiri plat lantai = luas x berat jenis beton (kN/m³)
 - c. Berat air hujan = luas x berat jenis air hujan (kN/m³)
3. Beban lalulintas: beban lajur “D”, beban truk dan beban pejalan kaki
4. Beban angin pada kendaraan

Beban yang telah dihitung secara keseluruhan kemudian dianalisis terhadap momen yang terjadi pada arah X dan Y. Pada perencanaan ulang ini, analisis momen dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *SAP2000*. Selanjutnya, dilakukan kombinasi pembebanan untuk memperoleh momen ultimit. Nilai momen ultimit tersebut, baik pada tumpuan maupun lapangan, menjadi dasar dalam tahap perencanaan penulangan.

2.5.1.3 Gelagar Memanjang/Balok Girder

Gelagar berperan dalam menahan beban plat lantai, beban perkerasan, beban genangan air, beban *bridge deck*, beban lalu lintas “D”, serta beban truk “T”. Pada perencanaan jembatan ini, digunakan gelagar memanjang berupa balok prategang PCI Girder. Penampang balok prategang harus dianalisis dalam dua kondisi, yaitu kondisi komposit (dengan plat) dan kondisi non komposit (tanpa plat). Dalam perencanaan gelagar balok prategang, dilakukan beberapa tahapan secara garis besar antara lain sebagai berikut:

1. Penentuan dimensi dan material
2. Analisis lebar efektif dan momen penampang
3. Analisis pembebanan (meliputi berat sendiri, berat mati tambahan, beban lalu lintas dan beban lingkungan)
4. Perhitungan momen dan geser
5. Analisis gaya prategang dan pembesian balok
6. Perencanaan denah tendon dan eksentrisitas
7. Analisis kehilangan tegangan pada *cabl*e, kehilangan tegangan pada kondisi komposit dan kontrol tegangan terhadap kombinasi pembebanan
8. Pembesian *end block*
9. Perhitungan *shear connector*
10. Analisis lendutan balok dan kontrol terhadap pembebanan

2.5.1.4 Gelagar Melintang/Diafragma

Dalam perencanaan struktur diafragma hanya menghitung beban sendiri dari balok tersebut. Diafragma tidak menahan beban apa pun, melainkan sebagai pengaku antar girder yang terpasang pada jembatan. Berikut merupakan beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam merencanakan diafragma:

1. Mutu beton (f_c')
2. Dimensi diafragma, meliputi tinggi (h) dan tebal (t)
3. Selimut beton
4. Mutu baja tulangan (f_y)
5. Diameter tulangan utama dan tulangan geser
6. Tinggi efektif (d)

Selanjutnya melakukan analisis gaya pada struktur diafragma dengan rumus perhitungan sebagai berikut:

1. Balok diafragma hanya menahan berat sendiri

$$\text{Berat sendiri balok} = \text{luas balok} * \text{berat jenis beton (kN/m)}$$

$$q_u = 1,3 \text{ (kuat I)} * \text{berat sendiri balok (kN/m)}$$

2. Perhitungan momen dan geser

$$\text{Momen} = 1/8 * q_u * L^2$$

$$\text{Geser} = 1/2 * q_u * L$$

2.5.2 Perencanaan Struktur Bawah

Struktur bawah berfungsi menahan beban struktur atas dan meneruskan beban ke tanah dasar. Struktur bawah pada jembatan yaitu mulai dari pelat injak, *wing wall*, abutment, hingga pondasi.

2.5.2.1 Pelat Injak

Pelat injak dianggap hanya menerima beban kerja berupa beban roda gandar oleh truk yang besarnya $TT = 250 \text{ kN}$ (112,5 kN/roda) karena paling menentukan/terbesar.

Momen akibat beban truk (PTT) pada pelat injak dapat dihitung dengan mempertimbangkan penyebaran beban roda melalui lapisan perkerasan di atas pelat. Berikut adalah langkah-langkah perhitungan momen pada pelat injak:

1. Menentukan lebar bidang kontak roda truk (b')

$$b' = b + \text{tebal total lapis di atas pelat injak}$$

dengan,

$$b = \text{lebar bidang kontak roda truk pada permukaan pelat injak (500mm)}$$

2. Menentukan lebar penyebaran beban terpusat (r)

$$r = b' / 2$$

3. Menentukan faktor parameter elastis pelat (λ)

$$\lambda = [E_c * h^3 * \{12 * (1 - \nu^2) * k_s\}]^{0,25}$$

4. Perhitungan momen yang terjadi

$$M_{\max} = TT/2 * [1 - (r * \sqrt{2} / \lambda)^{0,6}]$$

5. Momen *ultimate* yang terjadi,

$$M_u = M_{\max} * 1,8 \text{ (kuat I)}$$

2.5.2.2 Abutment

1. Desain abutment harus menyesuaikan dengan jenis pondasi yang digunakan serta elevasi jembatan yang direncanakan, beban yang bekerja pada abutment meliputi beban dari bangunan atas dan tekanan tanah. Tekanan tanah aktif merupakan gaya horizontal yang bekerja pada dinding abutment; ketika dinding bergerak ke arah tanah timbunan di belakangnya, besar tekanan ini akan meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai konstan. Sebaliknya, tekanan tanah pasif adalah tegangan horizontal yang arahnya berlawanan dengan tekanan tanah aktif. Di belakang abutment terdapat massa tanah yang juga harus diperhitungkan sebagai beban tambahan akibat lalu lintas di atasnya. Besar beban lalu lintas tersebut umumnya diasumsikan setara dengan tanah setebal 0,7 m yang bekerja secara merata pada area tanah yang dilalui.
2. Abutment sebagai salah satu elemen utama pada konstruksi jembatan menerima kombinasi beban baik vertikal maupun horizontal yang berasal dari bangunan atas, tanah timbunan, maupun aksi lingkungan. Secara umum, beban yang bekerja pada abutment meliputi beban mati (D) yang berasal dari berat sendiri struktur serta komponen non-struktural, dan beban hidup lalu lintas (L) yang ditransfer melalui girder ke perletakan. Selain itu, abutment juga dipengaruhi oleh tekanan tanah (*soil pressure*) dari timbunan di belakang struktur, serta tekanan air tanah (*hydrostatic*) dan gaya angkat (*uplift*) apabila muka air mengalami kenaikan, yang dapat menimbulkan pengurangan berat efektif tanah.
3. Aksi longitudinal jembatan seperti gaya rem atau akselerasi (horizontal) juga diteruskan ke perletakan atau abutment, yang dapat menyebabkan rangkai maupun susut pada girder, perubahan suhu, serta pergeseran tumpuan. Beban gempa (EQ) turut menjadi komponen penting yang harus diperhitungkan, khususnya akibat inersia struktur atas yang diteruskan ke perletakan dan tekanan tanah ekuivalen gempa (*pseudo-statik*) terhadap dinding belakang abutment.

4. Analisis stabilitas abutment dilakukan melalui serangkaian pemeriksaan (*check control*) sesuai pedoman SNI 1725:2016, dengan mempertimbangkan kombinasi beban pada berbagai kondisi. Pemeriksaan tersebut mencakup evaluasi terhadap kemungkinan guling (*overturning*) dan geser dasar (*sliding*), serta cek eksentrisitas dan tekanan kontak tanah untuk memastikan distribusi beban tetap dalam batas yang diizinkan. Syarat yang harus dipenuhi adalah faktor keamanan (*safety factor*) minimum 1,5 untuk kondisi guling maupun geser, yang diperiksa baik pada arah X maupun Y. Untuk kontrol eksentrisitas, syarat yang digunakan adalah $e < \frac{By \text{ (lebar melintang abutment)}}{6}$ untuk arah Y dan $e < \frac{L \text{ (bentang jembatan tumpuan-tumpuan)}}{6}$ untuk arah X. Selain itu, dilakukan pula perhitungan kapasitas dukung tanah agar pondasi dapat menahan beban yang diterima tanpa mengalami kegagalan.
5. Selain analisis stabilitas, perencanaan juga harus mempertimbangkan kebutuhan struktur beton dan *detailing*, termasuk penempatan tulangan serta ketentuan penulangan minimum.

2.5.2.3 Pondasi Dalam *Spun Pile*

Pondasi dalam digunakan apabila lapisan tanah keras berada pada kedalaman yang relatif dalam sehingga pondasi dangkal tidak mampu menyalurkan beban struktur secara aman. Salah satu jenis pondasi dalam yang umum digunakan pada abutment jembatan adalah pondasi tiang pancang. Fungsi utama pondasi tiang adalah menyalurkan beban dari struktur atas ke lapisan tanah dengan daya dukung memadai melalui mekanisme ujung (*end bearing*) dan/atau gesekan kulit (*skin friction*). Pemilihan pondasi tiang pada perencanaan abutment didasarkan pada hasil investigasi tanah, kebutuhan daya dukung, dan pertimbangan teknis-ekonomis pelaksanaan di lapangan. Dalam praktiknya, pondasi tiang juga harus memenuhi kriteria ketahanan terhadap beban aksial, beban lateral, dan momen yang ditimbulkan oleh kombinasi pembebanan jembatan.

Salah satu tipe tiang pancang yang banyak digunakan pada perencanaan jembatan adalah spun pile, yaitu tiang beton pracetak berbentuk silinder berongga (*hollow*) yang diproduksi melalui metode pemintalan (*spinning*). Metode ini

menghasilkan beton dengan densitas tinggi, kuat tekan besar, serta ketahanan terhadap retak yang baik. *Spun pile* biasanya diperkuat dengan tulangan spiral dan tulangan longitudinal yang sesuai dengan ketentuan SNI, serta dapat diproduksi dengan mutu beton tinggi ($f_c' \geq 50$ MPa).

Berbeda dengan elemen abutment yang memerlukan analisis struktur dan detailing tulangan secara khusus, perencanaan pondasi dalam berupa *spun pile* tidak memerlukan perancangan penulangan ulang di tingkat perencanaan. Hal ini disebabkan *spun pile* merupakan elemen pracetak yang telah memiliki spesifikasi teknis dan kapasitas rencana yang dikeluarkan oleh pihak fabrikator. Oleh karena itu, tugas perencana adalah memilih tipe dan dimensi *spun pile* yang sesuai dengan kebutuhan daya dukung, kemudian melakukan verifikasi melalui perhitungan kapasitas tiang dan pengecekan stabilitas pondasi terhadap beban-beban yang bekerja. Berikut adalah tahapan-tahapan pada perencanaan pondasi dalam *spun pile*.

1. Menentukan Spesifikasi *Spun Pile*

- a. Bentuk: silinder berongga (*hollow*) dengan diameter tertentu (misal Ø600–Ø1000 mm).
- b. Material: beton mutu tinggi ($f_c' \geq 50$ MPa), tulangan spiral dan tulangan longitudinal sesuai SNI 2847:2019.
- c. Kapasitas struktur: kapasitas lentur retak, kapasitas lentur ultimit, dan kapasitas aksial izin ditentukan dari pabrikan dan dicek terhadap beban desain.

2. Analisis Daya Dukung Tiang

Kapasitas ultimit tiang dihitung dengan mekanisme ujung (*end bearing*) dan gesekan kulit (*skin friction*):

$$Q_{ultimit} = Q_p + Q_s$$

dengan:

Q_p : Daya dukung ujung, dengan rumus $A_p \cdot q_p$

Q_s : Daya dukung selimut, dengan rumus $\sum f_s \cdot A_s$

A_p : luas ujung tiang, dengan rumus $\pi/4 \cdot (\text{diameter tiang})^2$

A_s : luas selimut tiang, dengan rumus $\pi \cdot \text{diameter tiang} \cdot \text{kedalaman total tiang}$

q_p dan f_s : dihitung dari data N-SPT atau parameter tanah (c , ϕ , γ) mengacu pada SNI 8460:2017.

Lalu, untuk kapasitas izin tiang (Q_{izin}) diperoleh dari hasil pembagian $Q_{ultimit}$ dengan SF (*Safety Factor*) dengan nilai $SF = 2,5-3$

3. Analisis Beban Lateral

Selain beban aksial, tiang harus menahan beban lateral akibat tekanan tanah aktif di belakang abutment, gaya rem kendaraan dan beban gempa. Perhitungan menggunakan metode Broms atau *p-y curve* (mengacu ke SNI 8460:2017). Kapasitas lateral dihitung dan dicek agar defleksi $\leq$ batas izin.

4. Cek Kestabilan Grup Pilecap (Grup Tiang Pondasi)

Tiang pancang selalu dipasang berkelompok atau *group pile*, sehingga beberapa pengecekan kompleks pada setiap efek yang terjadi pada satu tiang. Pengecekan yang perlu dilakukan yang antara lainnya:

5. Cek efisiensi grup, dengan rumus:

$$\eta = Q_{grup} / \text{total tiang pondasi} * Q_{per-tiang} \leq 1$$

6. Cek jarak antar tiang, direncanakan bahwa jarak antar tiang minimal tiga kali diameter yang digunakan, ini menghindari adanya tumpang tindih zona tegangan tanah
7. Cek pondasi dangkal atau pilecap akibat: geser satu arah, geser *punching* dan lentur (pengecekan awal sebelum dinyatakan bahwa struktur memerlukan tiang pondasi)
8. Kontrol Ulang Terhadap Stabilitas Geser, Guling dan Kapasitas Dukung Tanah (*Abutment Global Stability Checking*) dengan beberapa syarat seperti faktor keamanan (SF) terhadap geser guling ditetapkan lebih dari atau sama dengan 1,5 dan faktor keamanan kapasitas dukung mengacu pada SNI 8640:2017.