

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian dan Konsep Jembatan

Jembatan merupakan struktur yang berfungsi untuk meneruskan jalur transportasi yang terputus akibat adanya rintangan dengan elevasi lebih rendah, seperti sungai, lembah, danau, saluran irigasi, rel kereta api, maupun perlintasan jalan tidak sebidang. Dalam sistem jaringan jalan, jembatan termasuk infrastruktur dengan nilai investasi tinggi yang memiliki peran penting dalam mendukung kelancaran mobilitas dan aktivitas ekonomi masyarakat (Tim Pelaksanan Pusat Kegiatan PISEW, 2022).

Di samping itu, jenis-jenis jembatan mengalami perkembangan yang sangat pesat seiring dengan kemajuan teknologi konstruksi. Klasifikasi jembatan dapat ditinjau dari fungsi, lokasi, material yang digunakan, serta tipe strukturnya. Saat ini mulai berkembang dari bentuk konvensional hingga desain modern yang lebih kompleks dan efisien.

2.2 Analisa Hidrologi

Analisa hidrologi merupakan salah satu tahapan penting dalam merencanakan sebuah jembatan karena kondisi hidrologi sangat berpengaruh terhadap keamanan struktur jembatan yang telah direncanakan. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran sungai, khususnya besarnya debit banjir yang dapat terjadi pada lokasi pembangunan jembatan (Standar Nasional Indonesia, 2026)

Perencanaan jembatan yang melintasi sungai sangat bergantung pada penentuan debit banjir rencana. Analisis hidraulika menggunakan debit banjir yang diperoleh dari analisis hidrologi untuk menentukan tinggi muka air pada penampang sungai yang ditinjau. Hasil dapat digunakan untuk menentukan elevasi dan kebutuhan hidraulik struktur jembatan (Nadia et al., 2019)

2.2.1 Debit Banjir

Debit banjir rencana adalah debit banjir tertinggi yang dapat dialirkan di sungai selama periode waktu tertentu. Berdasarkan SNI 2415:2016 ntuk menentukan debit banjir rencana diperlukan data-data sebagai berikut:

1. Data Karakteristik DAS (Daerah Aliran Sungai)

Luas DAS merupakan karakteristik yang penting dalam menentukan besar puncak banjir dan diukur dalam kilometer persegi, pengukuran luas DAS berdasarkan peta *Topografi* yang umumnya berskala 1 : 50.000 atau 1.100.000. Untuk memperkirakan nilai parameter dan besarnya debit banjir, karakteristik DAS yang terdiri dari kondisi *Topografi*, kondisi geologi, dan kondisi tutupan lahan diperlukan:

1) Karakteristik *Topografi*

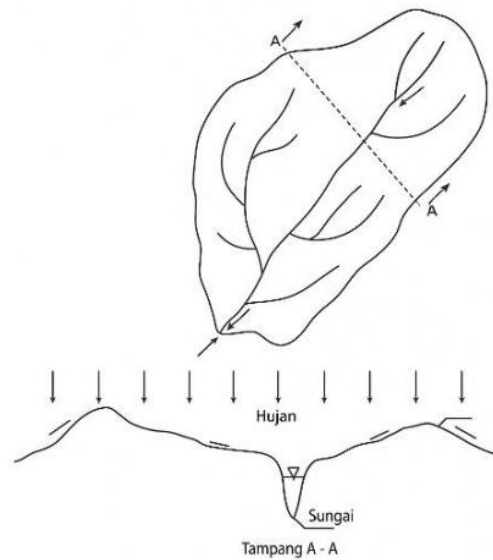
Bentuk DAS (Daerah Aliran Sungai), kemiringan lereng, dan ukurannya biasanya ditentukan dengan menggunakan peta *Topografi* skala 1:250.000 atau lebih besar, namun terkadang menggunakan peta skala besar. Dapat dilihat pada gambar 2.1. untuk daerah aliran sungai dan gambar 2.2. untuk pengaruh bentuk DAS pada aliran permukaan.

2) Karakteristik Geologi dan Tanah

Karakteristik geologi dan tanah ini meliputi, Jenis batuan, penyebaran jenis batuan dan luas batuan, sifat fisik batuan, keseragaman dari jenis batuan, serta tekstur dan struktur tanah.

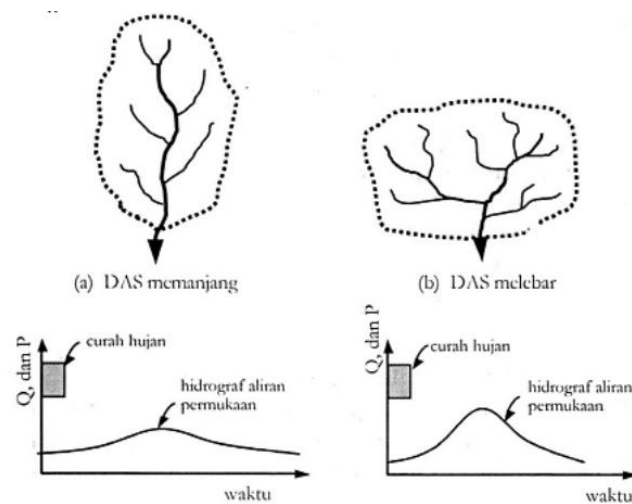
3) Karakteristik Tata Guna Lahan

luas tanah dan jenis tata gunanya sangat memengaruhi koefisien aliran dan kapasitas infiltrasi.



Gambar 2. 1 Daerah Aliran Sungai

(Sumber: *Hidrologi Terapan* (hal. 8), oleh Prof. Dr. Ir. Bambang Triatmodjo, Dea, 2008, Beta Offset)



Gambar 2. 2 Pengaruh bentuk DAS pada aliran permukaan

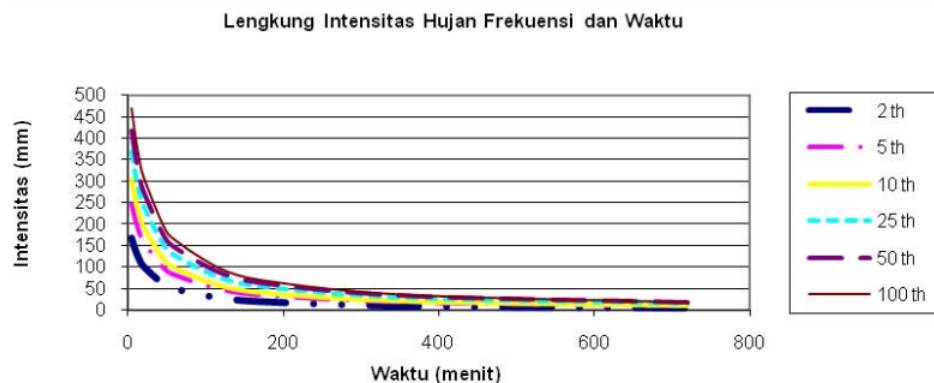
(Sumber: Suripin, 2004)

2. Data Hujan

Perhitungan debit banjir rencana membutuhkan data hujan yang dapat menunjukkan karakteristik curah hujan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) di lokasi jembatan. Data yang digunakan meliputi curah hujan harian maksimum,

intensitas hujan berdasarkan durasi, pola distribusi hujan, dan data dari pos hujan di sekitar DAS.

Sementara intensitas hujan digunakan untuk menghitung debit banjir dengan mempertimbangkan durasi hujan dan waktu konsentrasi DAS, curah hujan harian maksimum digunakan sebagai dasar untuk menentukan curah hujan rencana melalui analisis frekuensi berdasarkan periode ulang tertentu. Data dari beberapa pos hujan perlu diperiksa untuk memastikan bahwa data yang digunakan dapat mewakili kondisi hujan di wilayah DAS. Setelah data hujan memenuhi persyaratan, curah dan intensitas hujan yang direncanakan dihitung. Ini kemudian menjadi salah satu parameter dalam perhitungan debit banjir yang direncanakan pada lokasi jembatan. Dapat dilihat pada gambar 2.3. Lengkung Intensitas Hujan Frekuensi dan Waktu Curah Hujan.



Gambar 2. 3 Lengkung Intensitas Hujan Frekuensi dan Waktu Curah Hujan
(Sumber: SNI 2415:2016)

Pada gambar 2.3. menunjukkan lengkung intensitas hujan berdasarkan frekuensi, waktu, dan durasi hujan. Kurva menunjukkan korelasi antara intensitas curah hujan (mm) pada sumbu vertikal dengan waktu atau durasi hujan (menit) pada sumbu horizontal untuk beberapa interval waktu, yaitu 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun.

Grafik diatas menunjukkan bahwa intensitas hujan berkurang seiring dengan durasi hujan yang lebih lama. Hujan dengan intensitas tertinggi terjadi dalam waktu yang singkat dan kemudian menurun seiring waktu. Semakin seringnya terjadi hujan, semakin banyak intensitas hujan yang dihasilkan dalam waktu yang sama. Kurva periode ulang seratus tahun menunjukkan tingkat

intensitas tertinggi, dan kurva periode ulang dua tahun menunjukkan tingkat intensitas terendah.

Sesuai dengan durasi dan periode ulang yang dipilih, lengkung ini digunakan untuk mengukur intensitas hujan yang direncanakan. Nilai intensitas ini dapat digunakan sebagai salah satu parameter dalam perencanaan hidrologi untuk menghitung debit banjir rencana. Nilai ini selanjutnya menjadi dasar untuk analisis kapasitas hidraulik sungai, *box culvert*, dan perencanaan jembatan. Maka dari itu, grafik intensitas-durasi-frekuensi (IDF) adalah alat yang sangat penting untuk menentukan kondisi hujan yang diinginkan pada suatu daerah aliran sungai (DAS).

3. Data Debit Sungai

Data debit sungai yang diperlukan untuk perhitungan berupa debit banjir maksimum sesaat tahunan yang diperoleh dari beberapa tahun pengamatan. Data ini digunakan untuk mengetahui karakteristik debit maksimum yang terjadi pada sungai setiap tahunnya dan untuk menggambarkan kondisi banjir pada DAS. Data debit yang digunakan harus memiliki periode pencatatan yang cukup panjang, lengkap, dan konsisten.

Analisis frekuensi menggunakan data debit maksimum tahunan selanjutnya untuk menghitung besarnya debit banjir rencana berdasarkan periode ulang tertentu. Hasil debit banjir rencana kemudian digunakan sebagai dasar untuk analisis hidraulika sungai, yang mencakup penentuan tinggi muka air banjir, kapasitas penampang sungai, serta elevasi dan keamanan jembatan terhadap kondisi banjir.

4. Data Hidrograf Banjir

Data hidrograf banjir yang diperlukan untuk membuat hidrograf satuan berupa hidrograf banjir sesaat dengan satu puncak atau puncak tunggal. Data ini digunakan untuk menunjukkan hubungan antara perubahan debit terhadap waktu selama suatu kejadian banjir dan untuk menentukan karakteristik respons DAS terhadap hujan.

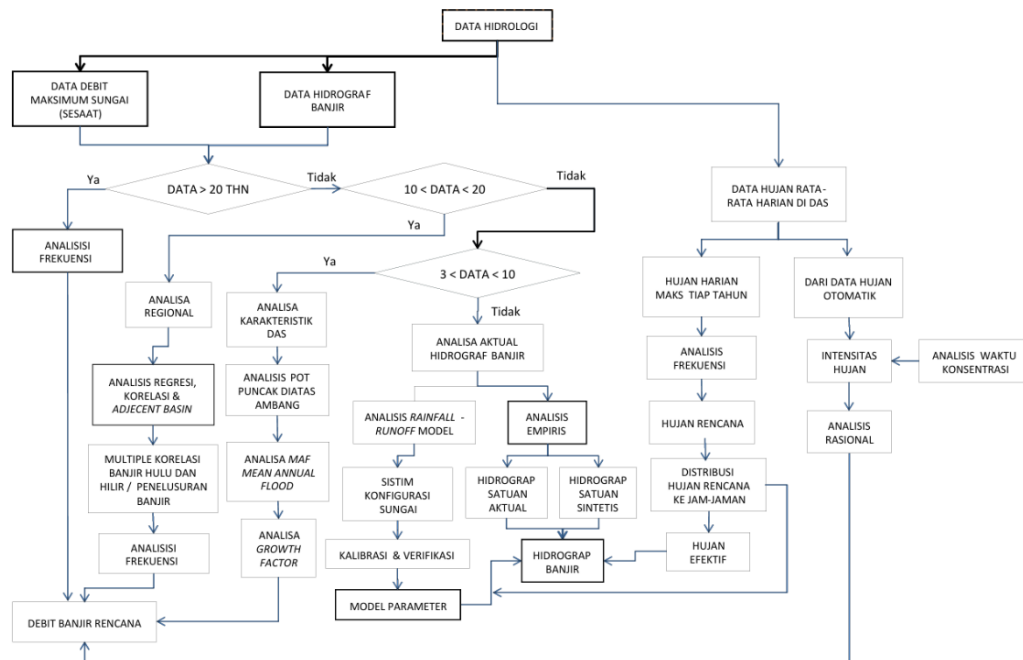
Untuk digunakan dalam perhitungan debit banjir, hidrograf yang dipilih harus berasal dari kejadian banjir yang relatif alami dan tidak dipengaruhi oleh

bendung, bendungan, waduk, atau bangunan pengatur debit lainnya. Ini karena bentuk, waktu puncak, dan besarnya debit hidrograf dapat diubah oleh bangunan tersebut. Dengan demikian, hidrograf yang dipilih harus memberikan gambaran yang lebih representatif tentang respons alami DAS.

5. Data Morfologi Sungai

Data morfologi sungai dibutuhkan untuk perhitungan banjir meliputi geometri dan karakteristik alur, seperti panjang dan lebar, kemiringan dasar, elevasi, dan tingkat kekasaran alur dan palung. Data ini digunakan untuk menggambarkan kondisi fisik sungai, dan juga digunakan sebagai parameter dalam analisis hidraulika dan untuk menentukan kapasitas aliran sungai.

Data yang berkaitan dengan struktur sungai seperti bendung, bendungan, dan cek dam, yang dapat memengaruhi pola dan besarnya aliran, juga diperlukan. Karena bangunan tersebut memiliki potensi untuk berfungsi sebagai titik pemantauan debit dan dapat memengaruhi kondisi hidraulika sungai, keberadaan bangunan tersebut harus diidentifikasi. Selanjutnya, tinggi muka air banjir, kapasitas penampang sungai, dan kondisi aliran di lokasi jembatan dihitung berdasarkan data morfologi dan struktur sungai.



Gambar 2. 4 Diagram Perhitungan Debit Banjir Rencana

(Sumber: SNI 2415:2016)

2.2.2 Hidrolika

Analisa hidrolika dilakukan untuk mengetahui kapasitas *box culvert* untuk mengalirkan debit banjir rencana. Analisa ini dilakukan dengan membandingkan debit banjir rencana yang diperoleh dari analisa hidrologi dengan kapasitas aliran *box culvert* berdasarkan kondisi geometrik dan kemiringan saluran. Dimensi *box culvert*, elevasi masuk dan keluar, panjang saluran, kemiringan dasar, tinggi muka air, dan koefisien kekasaran *Manning* adalah semua parameter yang digunakan.

Selanjutnya, persamaan *Manning* digunakan untuk menentukan kapasitas aliran *box culvert*. Berdasarkan SNI 2830:2008, persamaan ini memperhitungkan luas penampang aliran, keliling basah, jari-jari hidrolis, kemiringan dasar, dan koefisien kekasaran saluran. Berikut ini persamaan *manning*:

$$Q = A \times \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times i^{1/2}$$

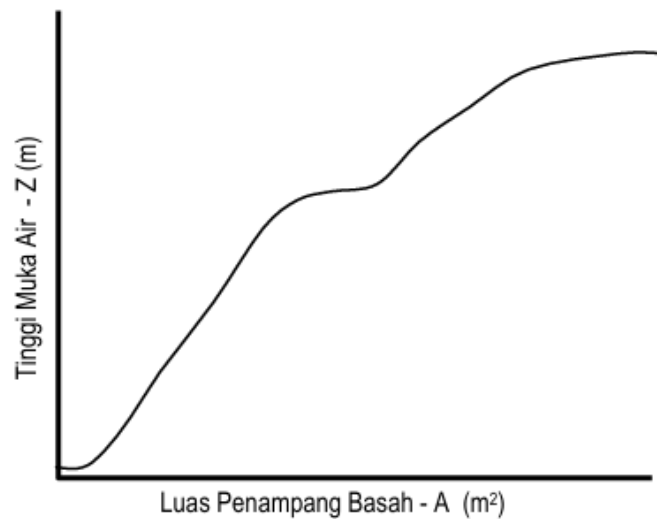
Persamaan *Manning* digunakan untuk menghitung kapasitas aliran *box culvert*. Luas penampang aliran (A), keliling basah (P), jari-jari hidrolis (R), kemiringan dasar saluran (i), dan koefisien kekasaran (n) dihitung. Untuk mengetahui kapasitas debit *box culvert*, parameter ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan *Manning*. Debit banjir rencana dibandingkan dengan hasilnya untuk menentukan kapasitas *box culvert* dalam menampung aliran. Setelah itu, hasil kapasitas tersebut dibandingkan dengan debit banjir yang direncanakan untuk menentukan apakah *box culvert* saat ini mampu menampung debit banjir yang direncanakan (Nasional et al., 2008)

Adapun hal-hal yang menjadi persyaratan dan ketentuan berdasarkan SNI 2830:2008 adalah sebagai berikut:

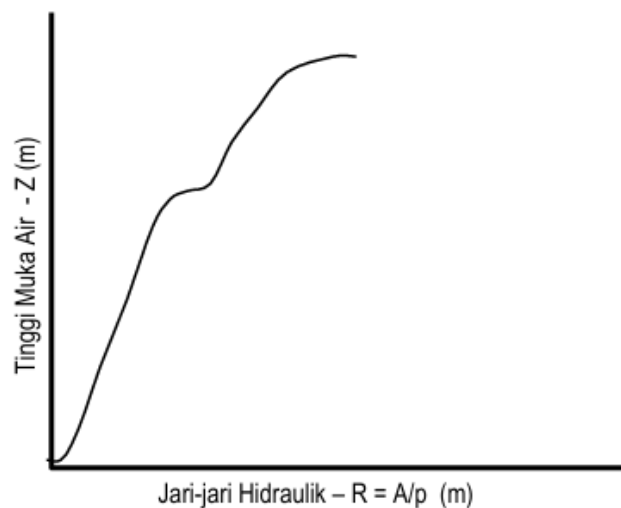
1. Data

Untuk menghitung tinggi muka air sungai, data yang diperlukan termasuk panjang dan penampang melintang sungai. Ini digunakan untuk menghitung luas penampang basah, jari-jari hidraulik, dan kemiringan dasar sungai. Koefisien kekasaran *Manning*, yang dihitung berdasarkan kondisi alur, vegetasi, material dasar, dan bantaran sungai, juga diperlukan. Data debit sungai juga diperlukan untuk perhitungan. Dapat dilihat pada gambar 2.5 untuk contoh

grafik hubungan TMA dengan luas penampang basah (A) dan gambar 2.6 contoh grafik hubungan TMA dengan jari-jari hidraulik ($R=A/p$)



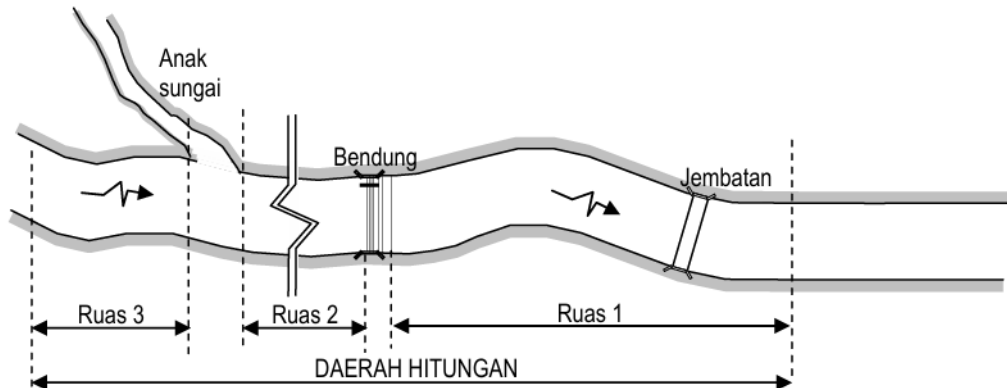
Gambar 2. 5 Contoh grafik hubungan TMA dengan luas penampang basah (A)
(Sumber: SNI 2830:2008)



Gambar 2. 6 Contoh grafik hubungan TMA dengan jari-jari hidraulik ($R=A/p$)
(Sumber: SNI 2830:2008)

Daerah hitungan mencakup dari ruas sungai, pertemuan atau percabangan sungai, serta bangunan melintang seperti bendung dan bangunan pengendali sedimen. Dapat dilihat pada gambar 2.7. Diperlukan penampang melintang tambahan jika alur menyempit karena pangkal atau pilar jembatan, kreb, atau

tebing. Semua data dikumpulkan melalui pengukuran dan pengamatan lapangan. Ini digunakan untuk menggambarkan kondisi geometrik dan karakteristik sungai untuk menentukan tinggi muka air sungai.

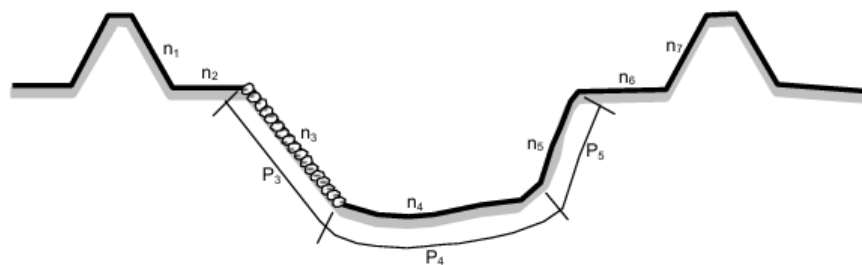


Gambar 2. 7 Contoh daerah hitungan

(Sumber: SNI 2830:2008)

2. Titik Awal Hitungan

Tinggi muka air sungai dihitung berdasarkan jenis aliran. Perhitungan dalam aliran subkritis dimulai dari hilir ke hulu, sedangkan dalam aliran superkritis dimulai dari hulu menuju hilir. Perhitungan harus dimulai di lokasi yang memiliki kondisi muka air yang diketahui, seperti badan air (laut, danau, atau waduk), bangunan sungai (bendung atau dam penahan sedimen), atau pos duga air yang memiliki hubungan debit-muka air.



Gambar 2. 8 Contoh penampang melintang sungai dengan kekasaran Manning yang berbeda-beda

(Sumber: SNI 2830:2008)

Apabila titik acuan tidak tersedia, titik awal lain dapat digunakan. Namun, tinggi muka air awal tidak boleh lebih rendah dari tinggi muka air kritis. Selain

itu, titik awal harus berada pada jarak yang cukup jauh dari daerah perhitungan untuk mengurangi kesalahan yang disebabkan oleh penetapan muka air awal sebelum mencapai lokasi analisis.

2.3 Perancangan Geoteknik

Perancangan geoteknik merupakan bagian penting dalam perencanaan konstruksi yang bertujuan untuk memastikan keamanan dan kestabilan struktur berdasarkan kondisi tanah di lokasi. Perancangan dilakukan dengan menggunakan data hasil penyelidikan tanah dan parameter geoteknik untuk menganalisis daya dukung, penurunan, konsolidasi, stabilitas tanah, dan fondasi.

2.3.1. Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan untuk mengetahui kondisi dan karakteristik tanah sebagai dasar dalam perencanaan fondasi. Secara umum, penyelidikan tanah terdiri atas penyelidikan lapangan dan pengujian laboratorium yang saling melengkapi.

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi tanah secara langsung di lokasi, meliputi susunan lapisan tanah, kedalaman tanah keras, kondisi muka air tanah, serta parameter awal yang diperlukan dalam menentukan jenis dan kedalaman fondasi. Sementara itu, pengujian laboratorium dilakukan terhadap sampel tanah yang diperoleh dari lapangan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanis tanah yang diperlukan dalam analisis daya dukung, penurunan, dan stabilitas fondasi.

1. Penyelidikan lapangan

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk memperoleh gambaran mengenai kondisi dan karakteristik lapisan tanah di lokasi pembangunan. Beberapa jenis penyelidikan lapangan yang umum dilakukan meliputi:

a. Uji Penetrasi Standar (*Standard Penetration Test*, SPT)

Uji SPT dilakukan untuk memperoleh nilai N-SPT yang dapat memberikan gambaran mengenai kepadatan tanah berbutir kasar atau konsistensi tanah kohesif.

b. Uji Penetrasi Konus (*Cone Penetration Test*, CPT) atau Sondir

Uji CPT atau sondir dilakukan untuk mengetahui tahanan ujung dan hambatan lekat tanah terhadap penetrasi konus. Hasil pengujian dapat digunakan untuk memperkirakan karakteristik lapisan tanah dan daya dukung fondasi.

c. Uji Geser Baling Lapangan (*Field Vane Shear Test*, FVT)

Uji FVT dilakukan untuk mengukur tahanan tanah terhadap rotasi baling-baling yang dipasang pada tanah lunak berbutir halus. Pengujian ini digunakan untuk menentukan kuat geser tanah dalam kondisi tidak terdrainase serta sensitivitas tanah.

d. Uji Pembebanan Pelat (*Plate Loading Test*, PLT)

Uji PLT dilakukan untuk menentukan hubungan antara beban yang diberikan dan penurunan yang terjadi pada pelat kaku yang dimodelkan sebagai fondasi. Hasil pengujian dapat digunakan untuk mengevaluasi perilaku tanah terhadap pembebanan secara langsung di lapangan.

Hasil penyelidikan lapangan digunakan sebagai salah satu dasar dalam menentukan jenis, kedalaman, dan dimensi fondasi serta memperkirakan daya dukung tanah. Jenis dan jumlah titik pengujian disesuaikan dengan jenis struktur di lokasi. Ketentuan jumlah minimum penyelidikan tanah yang digunakan sebagai acuan dalam perencanaan berdasarkan SNI 8460:2017 disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah

Jenis struktur	Jumlah minimum penyelidikan tanah
Gedung tinggi 8 lantai ke atas	- Satu titik setiap 300m² dalam pola <i>grid</i> dengan jarak 10 m sampai 30 m dengan minimum 3 titik per blok menara. - Dalam hal beberapa menara terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung dengan 4 sampai dengan 7 lantai	- Satu titik setiap 400m² dalam pola <i>grid</i> dengan jarak 15 m sampai 40 m dengan minimum 2 titik per gedung.

	- Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung kurang dari 4 lantai atau bangunan pabrik (di luar rumah tinggal)	- Satu titik setiap 600m² dalam pola <i>grid</i> dengan jarak 25 m sampai 50 m dengan minimum 1 titik per gedung. - Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Bangunan kurang dari 4 lantai dengan tapak sangat luas > 25,000m ²	- Satu titik setiap 2500m² dalam pola <i>grid</i> dengan jarak 50 m sampai 100 m. - Tambah titik untuk dapat menghasilkan potongan tanah pada orientasi.
Struktur memanjang (jalan raya, rel kereta, kanal, tanggul, <i>runway</i> , dan <i>taxiway</i>)	- Satu titik per 50 sampai 200m, kecuali <i>runway/taxiway</i> jarak maksimum dibatasi 100m. Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik di antaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail.
Terowongan transportasi	- Satu titik setiap 10 sampai 75m pada daerah pemukiman dan 20 sampai 200m pada daerah terbuka. Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik di antaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail. - Pada setiap portal minimum 1 titik.
Besmen dan/atau dinding penahan tanah - Tinggi < 6m - Tinggi ≥ 6m	1 titik setiap 15 sampai 40m . 1 titik setiap 10 sampai 30m.
Jembatan	- Untuk jembatan konvensional dengan bentang < 50 m: minimum 1 titik pada tiap abutmen dan pilar per 2 lajur lalu lintas. - Untuk jembatan khusus dengan bentang ≥ 50 m atau jembatan di laut ditentukan oleh tenaga ahli geoteknik.

Konstruksi Khusus (menara, fondasi mesin berat, tangki)	1 per 300m ² tapak konstruksi, dengan minimum 1 titik.
Bendungan besar	- Pada tahap perencanaan awal, minimum 5 titik, 3 pada sumbu bendungan dan 2 titik, masing-masing di hulu dan hilir. - Pada tahap perencanaan detail, penambahan titik bor disesuaikan kondisi geologi yang ditemukan pada penyelidikan tahap perencanaan. Minimum 1 titik setiap 50 m sepanjang sumbu dam. - Tambahkan titik pada pintu air, terowongan pengelak, <i>spillway</i>, <i>outlet</i>, <i>power house</i> dll.
Sabilitas lereng, galian dalam, dan timbunan tinggi dengan ketinggian > 6m untuk tanah normal dan > 3m pada tanah lunak	- 3 – 5 titik pada potongan kritis untuk menghasilkan model untuk dilakukan analisis. Jumlah potongan kritis tergantung tingkat masalah stabilitas. - Untuk kelongsoran yang masih aktif, minimum satu titik pada sisi atas lereng yang longsor.
Reklamasi	1 per 1000 m ² luas timbunan.

Sumber: SNI 8460:2017

2. Penyelidikan laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan terhadap sampel tanah yang diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanis tanah secara lebih terukur. Jenis pengujian laboratorium yang umum dilakukan meliputi:

- Modulus Oedometer (E_{oed}) dan Indeks Kompresi (C_c), untuk mengetahui karakteristik kompresibilitas tanah dalam satu dimensi.
- Modulus Young (E) dan Modulus Geser (G), untuk mengetahui karakteristik deformasi dan kekakuan tanah.
- Kuat Geser Terdrainase (c' dan ϕ'), untuk menentukan parameter kuat geser efektif tanah.
- Kuat Geser Residual (c'_R dan ϕ'_R), untuk mengetahui parameter kuat geser tanah pada kondisi residual.
- Kuat Geser Tak Terdrainase (c_u), untuk menentukan kekuatan tanah kohesif dalam kondisi pembebanan tanpa drainase.

- f. Kepadatan Curah/*Bulk Density* (ρ), untuk mengetahui massa tanah per satuan volume.
- g. Koefisien Konsolidasi (c_v), untuk mengetahui kecepatan proses konsolidasi dan pemampatan tanah.
- h. Permeabilitas (k), untuk mengetahui kemampuan tanah dalam meloloskan atau mengalirkan air.

Hasil pengujian laboratorium kemudian dikombinasikan dengan hasil penyelidikan lapangan untuk menentukan parameter dan klasifikasi tanah. Parameter geoteknik yang diperoleh dari berbagai jenis pengujian laboratorium tersebut selanjutnya digunakan dalam analisis daya dukung, penurunan, konsolidasi, dan stabilitas tanah sebagai dasar dalam perencanaan fondasi. Adapun jenis pengujian laboratorium yang digunakan untuk memperoleh parameter geoteknik tersebut disajikan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Uji Laboratorium Untuk Penentuan Parameter Geoteknik

Parameter Geoteknik	Jenis Tanah					
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung terkonsolidasi normal (NC clay)	Lempung terkonsolidasi berlebih (OC clay)	Lempung gambut organik
Modulus Oedometer (E _{oed}); indeks kompresi (C _c); [kompresibilitas satu dimensi]	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)
Modulus Young's (E); modulus Geser (G)	TX	TX	TX	TX	TX	TX
Kuat geser terdrainase (<i>effective</i>) (c'), (ϕ)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)
Kuat geser residual (c' _R), (ϕ _R)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)
Kuat geser tak terdrainase (c _u)	-	-	TX DSS SIT	TX DSS SIT	TX DSS SIT	TX DSS SIT

Kepadatan curah, <i>bulk density</i> (ρ)	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD
Koefisien konsolidasi (cv)			OED TX	OED TX	OED TX	OED TX
Permeabilitas(k)	TXCH PSA	TXCH PSA	PTC TXCH (PTF)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)
- = Tidak Tersedia () = Hanya tersedia sebagian Singkatan pengujian laboratorium: BDD Penentuan kepadatan curah(<i>bulk density</i>) DSS Pengujian geser langsung sederhana OED Pengujian oedometer PTF Pengujian permeabilitas untuk the Parameter Tekanan dari atas PTC Pengujian permeabilitas untuk the Parameter Tekanan tetap RS Cincin Geser(<i>ring shear</i>) SB Pengujian kotak geser translasional SIT Pengujian indeks kekuatan(biasanya dilakukan pada fase pendahuluan) PSA Analisis ukuran partikel TX Pengujian triaksial						

Sumber: SNI 8460:2017

2.3.2. Klasifikasi Tanah

Menurut SNI 6371:2015, klasifikasi tanah didasarkan pada karakteristik tanah yang diperoleh melalui pengamatan visual dan hasil pengujian laboratorium, terutama analisis ukuran butir dan batas Atterberg. Berdasarkan karakteristik tersebut, tanah dikelompokkan menjadi tanah berbutir kasar, tanah berbutir halus, dan tanah berorganik tinggi. Klasifikasi tanah berdasarkan SNI 6371:2015 selengkapnya disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Klasifikasi Tanah

Kriteria untuk Menetapkan Simbol-Simbol Kelompok dan Nama-Nama Kelompok Menggunakan Pengujian-Pengujian Laboratorium ⁴				Klasifikasi Tanah	
				Simbol Kelompok	Nama Kelompok ^B
TANAH BERBUTIR KASAR >50% tertahan ayakan No. 200	Kerikil (Lebih besar dari 50% Fraksi kasar yang tertahan ayakan No. 4)	Kerikil bersih (Butir halus ^C < 5%)	$Cu \geq 4$ dan $1 \leq Cc \leq 3^D$	GW	Kerikil ^E bergradasi baik
			$Cu < 4$ dan/atau $Cc < 1$ atau $Cc > 3^D$	GP	Kerikil ^E bergradasi jelek
		Kerikil dengan butir halus (Butir halus ^C > 12%)	Butir halus diklasifikasikan sebagai ML atau MH	GM	Kerikil ^{E, F, G} lanauan
			Butir halus diklasifikasikan sebagai CL atau CH	GC	Kerikil ^{E, F, G} lempungan
	Pasir (Lebih besar $\geq$ 50% Fraksi kasar yang lolos ayakan No. 4)	Pasir bersih (Butir halus ^H < 5%)	$Cu \geq 6$ dan $1 \leq Cc \leq 3^D$	SW	Pasir ^I bergradasi baik
			$Cu < 6$ dan/atau $Cc < 1$ atau $Cc > 3^D$	SP	Pasir ^I bergradasi jelek
		Pasir dengan butir halus (Butir halus ^H > 12%)	Butir halus diklasifikasikan sebagai ML atau MH	SM	Pasir ^{F, G, I} lanauan
			Butir halus diklasifikasikan sebagai CL atau CH	SC	Pasir ^{F, G, I} lempungan
TANAH BERBUTIR	Lanau dan lempung	Non Organik	PI > 7 dan terletak pada atau di atas garis "A"	CL	Lempung ^{K, L, M} rendah

HALUS □ 50% lolos Ayakan No. 200	Batas cair < 50		PI < 4 atau terletak di bawah garis “A”	ML	Lanau ^{K,L,M}
		Organik	Batas cair - kering oven _____ < 0,75	OL	Lempung ^{K,L,M,N} organik
	Lanau dan lempung Batas cair ≥ 50	Non Organik	Batas cair – tidak kering	CH	Lanau ^{K,L,M,O} organik
			PI terletak pada atau di atas garis “A”		Lempung ^{K,L,M} tinggi
		Organik	PI terletak di bawah garis “A”	MH	Lanau ^{K,L,M} elastis
			Batas cair - kering oven _____ < 0,75	OH	Lempung ^{K,L,M,P} organik
		Batas cair – tidak kering			Lempung ^{K,L,M,O} organik
TANAH BERORGANIK	Secara primer terdiri atas zat-zat organik, berwarna gelap dan berbau organik			PT	Gambut

^A Berdasarkan material lolos ayakan 3 inci (75 mm)

^B Apabila contoh lapangan mengandung bongkahan atau kerakal, atau keduanya tambahkan “dengan bongkahan atau kerakal atau keduanya” pada nama kelompok

^C Kerikil-kerikil dengan butiran halus 5% sampai dengan 12% diperlukan simbol ganda:
GW–GM Kerikil bergradasi baik dengan lanau
GW–GC Kerikil bergradasi baik dengan lempung
GP–GM Kerikil bergradasi jelek dengan lanau
GP–GC Kerikil bergradasi jelek dengan lempung

^D $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$

^E Apabila tanah mengandung ≥ 15% pasir, tambahkan “dengan pasir” pada nama kelompok

^F Apabila butiran halus diklasifikasikan sebagai CL–ML gunakan simbol ganda GC–GM atau SC–SM.

^G Apabila butiran halus adalah organik, tambahkan “dengan butiran halus organik” pada nama kelompok

^H Pasir-pasir dengan butiran halus 5% sampai dengan 12% diperlukan simbol ganda:
SW–SM Pasir bergradasi baik dengan lanau
SW–SC Pasir bergradasi baik dengan lempung
SP–SM Pasir bergradasi jelek dengan lanau
SP–SC Pasir bergradasi jelek dengan lempung

^I Apabila tanah mengandung ≥ 15% kerikil, tambahkan “dengan kerikil” pada nama kelompok

^J Apabila batas-batas Atterberg berada di dalam daerah yang diarsir, tanah adalah lempung lanauan CL–ML

^K Apabila tanah mengandung 15% sampai 29% tertahan ayakan No. 200, tambahkan “dengan pasir” atau “dengan kerikil” mana yang paling dominan

^L Apabila tanah mengandung ≥ 30% tertahan ayakan No. 200 dan dominan pasir, tambahkan “pasiran” pada nama kelompok

^M Apabila tanah mengandung ≥ 30% tertahan ayakan No. 200 dan dominan kerikil, tambahkan “kerikilan” pada nama kelompok

^N PI ≥ 4% dan berada pada atau di atas garis “A”

^O PI < 4% atau berada di bawah garis “A”

^P PI berada di atas garis “A”

^Q PI berada di bawah garis “A”

Sumber: SNI 6371:2015

2.4 Desain Rencana Jembatan

Untuk menentukan tinggi jembatan pada lokasi yang melintasi sungai, hasil analisis hidraulika khususnya debit banjir rencana dan elevasi muka air banjir (MAB) menjadi salah satu hal yang penting. Elevasi muka air pada saat debit banjir rencana digunakan untuk menentukan elevasi bagian terbawah bangunan atas jembatan. Selanjutnya, elevasi ini dikombinasikan dengan dimensi struktur atas, seperti *Girder*, pelat lantai, dan perkerasan, untuk menentukan elevasi *Top Jembatan*. Oleh karena itu, tinggi jembatan diperhitungkan sebagai bagian dari analisis hidrologi dan hidraulika. Ini dilakukan untuk memastikan bahwa bukaan jembatan mampu mengalirkan debit banjir yang direncanakan tanpa mengancam keamanan struktur.

Berdasarkan dari hasil analisis hidrologi dan hidrolika menunjukkan bahwa debit banjir rencana sebesar 93,408 m³/s sedangkan kapasitas *box culvert* saat ini hanya 71,462 m³/s. Hasil tersebut menunjukkan bahwasannya kapasitas *box culvert* saat ini tidak cukup untuk menampung debit banjir rencana. Maka dari itu, perlu adanya perencanaan ulang dengan mengubah *box culvert* menjadi jembatan.

2.3.1 Rencana Desain Tinggi Jembatan

Perencanaan geometrik dan hidraulik jembatan bergantung pada penentuan tingginya. Tinggi jembatan harus disesuaikan dengan elevasi jalan di sekitarnya untuk menghasilkan hubungan geometrik yang aman dan nyaman bagi pengguna jalan. Pertimbangan ini termasuk kondisi *Topografi*, elevasi dasar sungai, tinggi muka air banjir yang direncanakan, dan jumlah ruang bebas yang diperlukan antara muka air dan bagian terbawah bangunan atas jembatan (Kaharu, A. N., Husnan, R., & Labdul, 2022)

Pada jembatan yang melintasi sungai, harus ada ruang bebas vertikal yang memadai untuk membuat bagian bawah bangunan atas lebih tinggi dari muka air banjir rencana. BMS (*Bridge Management System*) memberikan informasi tentang jarak bebas vertikal antara bagian terendah bangunan atas dan muka air banjir, dan menekankan bahwa tinggi muka air yang digunakan dalam perencanaan hidraulik harus didasarkan pada debit banjir rencana (Direktorat Jenderal Binamarga, n.d.)

Selanjutnya, dalam menentukan elevasi akhir jembatan, tinggi elemen struktur atas seperti *Girder* dan pelat lantai dipertimbangkan. Oleh karena itu, elevasi *Top* jembatan dapat dihitung berdasarkan elevasi jalan, muka air banjir, ruang bebas, dan dimensi struktur. SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan mengacu pada pembebanan yang bekerja pada jembatan selama tahap perencanaan selanjutnya, dan SNI 2833:2016 mengacu pada aspek ketahanan gempa.

Kondisi hidraulik, elevasi muka air banjir, kondisi topografi, dan kebutuhan struktur dan konstruksi adalah semua faktor yang memengaruhi perencanaan jembatan. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa panjang jembatan adalah 26 m, lebarnya 12,7 m, dan elevasi topnya adalah +10,40 m. *Abutment* yang digunakan adalah 6,40 m.

2.3.2 Rencana Desain Bentang Jembatan

Bentang jembatan ditetapkan berdasarkan kondisi sungai, lebar alur yang harus dilewati, kebutuhan hidraulik, kondisi *Topografi*, dan pertimbangan struktur dan pelaksanaan konstruksi. Bentang jembatan harus mampu memberikan bukaan yang memadai terhadap aliran sungai sehingga tidak menyebabkan penyempitan alur yang berlebihan dan tetap memenuhi kapasitas hidraulik yang ditetapkan.

Posisi *Abutment* dan pilar harus disesuaikan dengan penampang sungai dan lingkungan di sekitar jembatan untuk menentukan panjang dan luasnya. Pengaruh pilar terhadap aliran, kemungkinan gerusan, dan keamanan struktur semuanya harus dipertimbangkan sebelum menempatkan pilar di sekitar aliran. Pemilihan bentang tidak hanya mempertimbangkan aspek hidraulik, sistem struktur yang digunakan, kemampuan elemen struktur untuk menahan beban, teknik pelaksanaan, ketersediaan material, kondisi eksisting dan faktor ekonomi juga perlu dijadikan dipertimbangkan (Susanti & Nurdiana, 2021).

Perencanaan jembatan harus mempertimbangkan kekuatan, stabilitas, keselamatan, kemudahan pengoperasian dan pemeliharaan, keekonomisan, keawetan, dan pertimbangan lingkungan. Prinsip-prinsip ini juga termasuk dalam kriteria desain jembatan yang digunakan oleh Pedoman Bina Marga.

Oleh karena itu, panjang jembatan tidak hanya ditentukan oleh lebar sungai tetapi didasarkan juga pada pertimbangan tentang kebutuhan hidraulik, kondisi lokasi, sistem struktur, metode konstruksi, dan faktor ekonomi. SNI 1725:2016 digunakan untuk pembebanan struktur jembatan, sementara SNI 2833:2016 digunakan untuk perencanaan beban gempa.

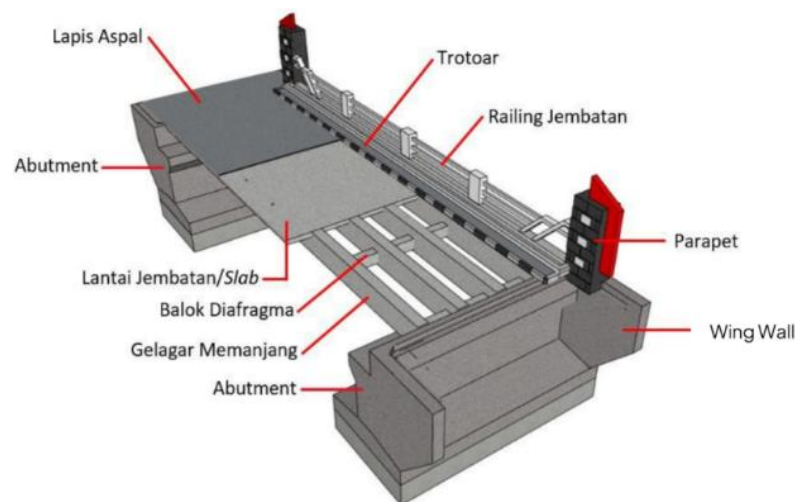
Pada lokasi penelitian, elevasi dasar sungai adalah +5,33 m, elevasi muka air banjir (MAB) adalah +6,64 m, dan elevasi jalan, ruang bebas terhadap muka air banjir, dan dimensi struktur atas jembatan dihitung untuk menentukan tinggi jembatan. Elevasi *top* jembatan kemudian ditetapkan pada +10,40 m, dan dengan mempertimbangkan jumlah ruang bebas dan susunan elemen struktur atas yang diperlukan.

Selanjutnya, tinggi *abutment* diperoleh sebesar 6,40 m dengan mempertimbangkan elevasi *Top Bridge* dan posisi dasar *pilecap*. Tinggi ini

berfungsi sebagai dasar untuk menentukan dimensi struktur bawah dan konfigurasi jembatan yang direncanakan.

2.5 Komponen Struktur Jembatan

Jembatan merupakan struktur yang terdiri dari beberapa komponen utama yang saling bekerja sama dalam menahan beban dan meneruskan gaya dari beban lalu lintas ke tanah dasar. Secara umum, komponen jembatan terbagi dari struktur atas dan struktur bawah dengan fungsi serta peranan tertentu dalam menjaga kestabilan jembatan. Dapat dilihat pada gambar 2.9 untuk komponen jembatan.



Gambar 2. 9 Komponen Struktur Jembatan

(Sumber: Tim Pelaksana Pusat Kegiatan PISEW, 2024)

2.4.1 Struktur Atas

1. Penentuan Tipe Bangunan Atas

Berdasarkan Surat Edaran Bina Marga No. 05/SE/Db/2017, tipe struktur atas jembatan dapat menggunakan desain standar Bina Marga apabila tidak direncanakan secara khusus. Pemilihan tipe ini disesuaikan dengan bentang ekonomis serta kondisi aliran di bawah jembatan. Beberapa tipe yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

- a. *Box culvert (single, double, triple)* untuk bentang 6-10 meter.
- b. *Corrugated steel plate* untuk bentang 6-12 meter.
- c. *Voided slab* untuk bentang 6-16 meter.

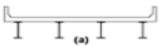
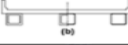
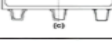
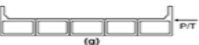
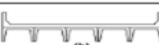
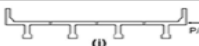
- d. Gelagar beton bertulang tipe T untuk bentang 6-20 meter.
- e. Gelagar beton prategang tipe I dan Tee untuk bentang 16-60 meter serta tipe Box untuk bentang 30-60 meter.
- f. Gelagar beton komposit tipe I dan Box untuk bentang 20-60 meter.
- g. Rangka baja untuk bentang 40-100 meter.

Sementara itu, berdasarkan Kepmen PUPR No. 485/KPTS/M/2015 tentang Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongn Jalan, jembatan dapat dikategorikan sebagai jembatan khusus apabila memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a. Jembatan dengan minimal bentang 100 meter.
- b. Jembatan pelengkung minimal 60 meter.
- c. Jembatan gantung dengan panjang total minimal 3000 meter.
- d. Jembatan dengan ketinggian pilar lebih dari 40 meter.
- e. Terowongan jalan dengan panjang tertutup minimal 200 meter.
- f. Terowongan jalan dalam metode pelaksanaanya dengan *jacking* atau pengeboran.
- g. Jembatan dan terowongan dengan tingkat kompleksitas tinggi, nilai strategis penting, dan menggunakan teknologi baru.

Berikut ini tabel 2.4 yang menunjukkan berbagai jenis bangunan atas jembatan sebagai berikut:

Tabel 2. 4 Jenis Bangunan Atas Jembatan

Komponen pendukung	Tipe dek	Penampang tipikal
Gelagar baja	Pelat beton cor di tempat, pelat beton pracetak, grid baja, panel yang dilem atau dipaku, kayu yang diberi tegangan	 (a)
Boks baja atau beton pracetak tertutup	Pelat beton cor di tempat	 (b)
Boks beton atau beton pracetak terbuka	Pelat beton cor di tempat, pelat beton pracetak	 (c)
Boks beton multisel cor di tempat	Beton monolit	 (d)
Gelagar t beton cor di tempat	Beton monolit	 (e)
Boks beton solid pracetak, berongga atau selular dengan shear key	Pelapis beton cor di tempat	 (f)
Boks beton solid pracetak, berongga atau selular dengan shear key dan dengan atau tanpa gaya prategang pasca tarik transversal	Beton integral	 (g)
Penampang kanal beton pracetak dengan shear key	Pelapis beton cor di tempat	 (h)
Penampang T ganda beton pracetak dengan shear key dan dengan atau tanpa gaya prategang pasca tarik transversal	Beton integral	 (i)
Penampang T beton pracetak dengan shear key dan dengan atau tanpa gaya prategang pasca tarik transversal	Beton integral	 (j)
Penampang I atau bulb tee beton pracetak	Beton cor di tempat, beton pracetak	 (k)
Gelagar kayu	Beton cor di tempat atau papan kayu atau papan, panel yang dilem atau dipaku, kayu yang diberi tegangan	 (l)

2. Perletakan

Perletakan merupakan komponen jembatan yang berfungsi sebagai penyalur beban dari struktur atas ke struktur bawah. Umumnya perletakan terbuat dari bahan baja dan bantalan karet. Beberapa jenis perletakan yang sering digunakan antara lain *elastomer*, *pot bearing*, *lead rubber bearing*, dan *friction pendulum bearing*.

3. Hubungan antar lantai

Sambungan siar muai berfungsi untuk memberikan celah antara dua bagian beton agar dapat mengakomodasi pemuaian akibat perubahan suhu. Celah ini biasanya diisi dengan bahan elastis seperti karet, plastik, gabus, dan mastic yang dapat mengikuti pergerakan beton. Dalam perencanaannya, kebutuhan dan jarak antar sambungan harus diperhitungkan dengan baik. Secara umum, kenaikan suhu beton sebesar 10 °C dapat menyebabkan pertambahan panjang 1 mm.

4. Sistem drainase

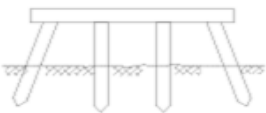
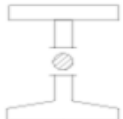
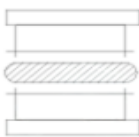
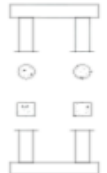
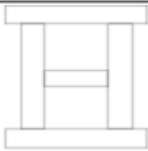
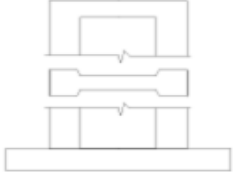
Drainase pada jembatan berfungsi untuk mengalirkan air agar tidak terjadi genangan di permukaan lantai jembatan. Pada jembatan bentang panjang, sistem drainase dilengkapi dengan penampungan air yang jumlah dan ukurannya disesuaikan dengan kebutuhan, sedangkan pada bentang pendek air dialirkan secara langsung ke pembuangan di ujung jembatan. Komponen seperti penampung dan pipa harus menggunakan material yang kuat dan tahan korosi dengan diameter minimal 150 mm. Selain itu, penampungan saluran tidak disarankan mengalami penyempitan untuk menghindari penumpukan sampah yang dapat menghambat aliran air.

2.4.2 Struktur Bawah

1. Pilar jembatan

Pilar merupakan elemen struktur yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas ke fondasi serta menahan gaya lateral pada jembatan. Sementara itu, kepala pilar (*pier head*) adalah bagian atas pilar yang menerima beban langsung dari gelagar dan meneruskannya ke kaki pilar hingga fondasi. Berikut ini adalah tipe-tipe pilar jembatan berdasarkan tingginya dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut ini:

Tabel 2. 5 Tipe-Tipe Pilar

Tipe Pilar		Tinggi Pilar (m)			
		0	10	20	30
Pilar balok cap tiang sederhana. Minimal konfigurasi fondasi tiang dua baris.					
Pilar tunggal. Pada daerah aliran sungai dianjurkan pilar sirkular.			5 15		
Pilar dinding. Pilar dengan ujung bundar dan arah dinding sesuai dengan arah aliran sungai agar dapat mengurangi gaya aliran sungai dan gerusan.			5		25
Pilar portal satu tingkat (pilar majemuk).			5 15		
Pilar portal dua tingkat.				15	25
Pilar dinding penampang I. Penampang jenis ini tidak cocok digunakan di daerah aliran sungai dan lebih cocok digunakan di daratan.					25

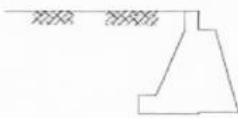
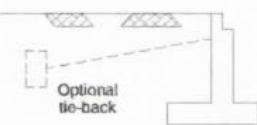
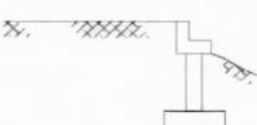
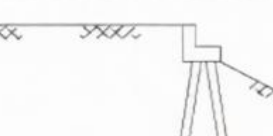
Sumber: *Bridge Management System*, 1992

2. *Abutment* jembatan

Abutment merupakan struktur bawah jembatan yang berada di ujung dan pangkal jembatan. *Abutment* ini berfungsi sebagai penopang struktur atas sekaligus sebagai penghubung antara oprit dan lantai jembatan. Timbunan pada oprit dan badan jalan ditahan oleh dinding belakang, sedangkan timbunan di sisi samping ditahan oleh dinding sayap. Dalam penentuan tipe *Abutment* terdapat beberapa faktor seperti persyaratan desain jembatan, geometri jembatan, persyaratan jalan, kondisi Sungai, kondisi geoteknik, aspek estetika, dan

pertimbangan biaya. Berikut ini adalah tipe-tipe *Abutment* jembatan berdasarkan tingginya dapat dilihat pada tabel 2.6 berikut ini:

Tabel 2. 6 Tipe-Tipe *Abutment* Jembatan

Tipe <i>Abutment</i>		Tinggi <i>Abutment</i>			
		0	10	20	30
<i>Abutment</i> tembok penahan gravitasi			3 - 4		
<i>Abutment</i> tembok penahan kantilever atau jenis T			8		
<i>Abutment</i> tembok penahan counterfort atau jenis penopang			6 - 8		
<i>Abutment</i> kolom "spill through"					
<i>Abutment</i> balok cap tiang sederhana					
<i>Abutment</i> tanah bertulang			5	15	

Sumber: *Bridge Management System*, 1992

3. Fondasi

Fondasi merupakan bagian struktur bawah yang berfungsi untuk meneruskan beban dari struktur atas ke tanah dasar secara aman dan stabil. Secara umum, fondasi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam.

Fondasi dangkal merupakan fondasi yang menyalurkan beban ke lapisan tanah dekat permukaan, sedangkan fondasi dalam ialah fondasi yang meneruskan seluruh atau sebagian beban ke lapisan tanah yang lebih dalam.

Pemilihan jenis fondasi didasarkan pada beberapa pertimbangan seperti kedalaman yang cukup untuk mencegah kerusakan akibat gerusan, keamanan terhadap kegagalan daya dukung tanah, kualitas material, kekuatan fondasi, serta kemampuan dalam mengantisipasi perubahan kondisi tanah yang merugikan dalam jangka panjang (misalnya pada tanah ekspansif yang dapat mengembang dan menyusut sehingga berpotensi menyebabkan pergerakan dan kerusakan struktur). Tipe-tipe fondasi yang umum digunakan beserta karakteristiknya dapat dilihat pada Tabel 2.7 sebagai berikut:

Tabel 2. 7 Tipe-Tipe Fondasi dan Tipikal Penggunaannya

Tipe Fondasi	Penggunaan Fondasi	Kondisi Tanah Yang Bisa Digunakan	Kondisi Tanah Yang Tidak Cocok Digunakan
Fondasi Telapak	Pilar tunggal (individu), dinding dan pilar jembatan.	• Setiap kondisi dimana kapasitas daya dukung memenuhi untuk menerima beban. • Dapat digunakan pada satu lapisan tanah, lapisan medium di atas lapisan lunak atau lapisan yang lebih lunak di atas lapisan yang lebih keras. • Cek penurunan segera, penurunan parsial dan penurunan konsolidasi.	• Setiap kondisi Dimana tanah di bawah fondasi berpotensi tergerus (<i>scouring</i>) atau likuifaksi. • Lapisan daya dukung berada di bawah muka air tanah.
<i>Mat</i> Fondasi	Sama dengan fondasi telapak, digunakan pada bebab pilar yang sangat berat. Biasanya bertujuan untuk mengurangi penurunan parsial dan penurunan total.	• Pada umumnya nilai daya dukung tanah lebih rendah dibandingkan fondasi telapak. • Biasanya lebih dari setengah area struktur diterima oleh fondasi tunggal. • Cek penurunan yang terjadi.	• Sama dengan fondasi telapak.
Fondasi Tiang	Dalam fondasi grup digunakan untuk menyalurkan	• Tanah lunak dekat permukaan tanah. • Kedalaman tanah dengan daya dukung	• Lapisan tanah keras dekat dengan permukaan tanah.

	beban pilar yang berat dan beban jembatan ke lapisan tanah yang mempunyai daya dukung cukup, juga untuk menahan terhadap <i>uplift</i> dan beban lateral.	yang cukup berada pada kedalaman 5-90 meter di bawah permukaan tanah. • Cek penurunan pada <i>group pile</i> .	• Getaran pada area konstruksi akan berpengaruh pada fasilitas yang berdekatan. • Jenis tanah didominasi oleh batuan besar.
Fondasi Tiang Bor	Beban pilar lebih besar dari pada beban yang digunakan untuk fondasi tiang pancang.	• Permukaan lunak dan dekat dengan permukaan tanah. • Untuk menahan beban, tanah dan batuan terletak pada kedalaman 8-90 meter di bawah permukaan tanah.	• Tanah lempung lunak dan pasir lepas yang mengandung air. • Kondisi artesis • Jenis tanah berupa <i>boulder</i>.
<i>Micropiles</i>	Sering digunakan untuk perkuatan <i>seismic</i> , perkuatan fondasi existing dan area kerja yang sempit.	• Pada semua jenis tanah atau kondisi timbunan, bebatuan dan lain-lain.	• Rasio kelangsingan yang tinggi berpotensi menyebabkan tekuk pada tiang jika tahanan lateral tanah hilang pada kondisi likuifaksi.

Sumber: FHWA NHI-05-042 *Design and Construction of Driven Pile Foundation*, Page 7-4

2.6 Perencanaan Struktur Jembatan

Perencanaan dan desain jembatan harus memenuhi persyaratan teknis yang mengacu pada Surat Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 06/SE/Db/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan. Dalam perencanaanya suatu jembatan wajib memenuhi standar pembebanan jembatan berdasarkan SNI 1725:2016, ketahanan struktur tahan gempa berdasarkan SNI 2833:2016, dan perencanaan beton bertulang mengacu pada RSNI T-12-2004 sebagai acuan teknis dalam memastikan kekuatan serta kekakuan struktur.

2.5.1 Pembebanan Untuk Jembatan

1. Beban permanen

- a. Berat isi untuk beban mati merupakan nilai berat yang dipakai untuk menghitung beban sendiri dari elemen struktur jembatan serta bersifat permanen. Dapat dilihat pada Tabel 2.8 berat isi untuk beban mati.

Tabel 2. 8 Berat Isi Untuk Beban Mati

No	Bahan	Berat/Satuan Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (kg/m ³)
1	Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing surfaces</i>)	22,0	2245
2	Besi tuang (<i>cast iron</i>)	71,00	7240
3	Timbunan tanah dapat dipadatkan (<i>compacted sand, silt or clay</i>)	17,2	1722
4	Kerikil dipadatkan (<i>rolled gravel, macadam or ballast</i>)	18.8-22.7	1920-2315
5	Beton aspal (<i>asphalt concrete</i>)	22,0	2245
6	Beton ringan (<i>low density</i>)	12,25-19,6	1250-2000
7	Beton $f'c < 35$ MPa	22.0-25.0	2320
8	$35 < f'c < 105$ MPa	$22.0 + 0,022 f'c$	$2240 + 2,29f'c$
9	Baja (<i>steel</i>)	78,75	7850
10	Kayu (ringan)	7,8	800
11	Kayu keras (<i>hard wood</i>)	11,0	1125

Sumber: SNI 1725:2016

- b. Berat sendiri (MS) merupakan berat dari suatu elemen struktur beserta bagian lain yang di $Topang$ nya, termasuk material penyusunnya, komponen struktural jembatan, dan elemen nonstruktural yang bersifat tetap. Dapat dilihat pada Tabel 2.9 faktor beban untuk berat sendiri.

Tabel 2. 9 Faktor Beban Untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^U)	
	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 dicor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

Sumber: SNI 1725:2016

- c. Beban mati tambahan atau utilitas (MA) merupakan berat dari elemen nonstruktural jembatan yang nilainya dapat berubah selama masa pemakaian jembatan. Dapat dilihat pada Tabel 2.10 faktor beban untuk beban mati tambahan.

Tabel 2. 10 Faktor Beban Untuk Beban Mati Tambahan

Jangka Waktu	Faktor Beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
	Keadaan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 ⁽¹⁾	2,00	0,70
	Khusus (terawasi)	1,00	1,40	0,80
Catatan ⁽¹⁾ Faktor beban layan daya layan 1,3 digunakan untuk berat utilitas				

Sumber: SNI 1725:2016

- d. Beban akibat tekanan tanah (TA) merupakan beban yang dihitung berdasarkan sifat-sifat tanah. Sifat tanah seperti kepadatan, kadar air, kohesi, sudut geser yang dapat diketahui dari hasil pengujian di lapangan dan laboratorium. Dapat dilihat pada Tabel 2.11 faktor beban akibat tekanan tanah.

Tabel 2. 11 Faktor Beban Akibat Tekanan Tanah

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{TA})			
	Kondisi Batas Layan (γ^S_{TA})		Kondisi Batas Ultimit (γ^U_{TA})	
	Tekanan Tanah		Biasa	Terkurangi
Tetap	Tekanan Tanah Vertikal	1,00	1,25	0,80
	Tekanan Tanah Lateral			
	- Aktif	1,00	1,25	0,80
	- Pasif	1,00	1,40	0,70
	- Diam	1,00	(1)	
Catatan ⁽¹⁾ Tekanan tanah lateral dalam keadaan diam biasanya tidak diperhitungkan pada keadaan batas ultimit.				

Sumber: SNI 1725:2016

2. Beban sementara

- a. Pengaruh pelaksanaan (PL) merupakan beban yang muncul akibat cara dan urutan pekerjaan saat pembangunan jembatan. Beban ini berkaitan dengan beban gaya prategang dan berat sendiri, sehingga harus diperhitungkan Bersama dengan faktor beban yang sesuai. Apabila tidak terlalu berhubungan dengan beban lain, maka tetap harus diperhitungkan dalam kondisi batas layan dan batas ultimit dengan faktor beban yang sesuai. Dapat dilihat pada Tabel 2.12 faktor beban akibat pengaruh pelaksanaan.

Tabel 2. 12 Faktor Beban Akibat Pengaruh Pelaksanaan

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{PL})		
	Keadaan Batas Layan (γ_{PL}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{PL}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Tetap	1,00	1,00	1,70

Sumber: SNI 1725:2016

3. Beban lalu lintas

- a. Lajur lalu lintas rencana merupakan nilai yang didapatkan dari hasil pembagian lebar bersih jembatan (w) dengan lebar lajur rencana (2750mm) serta nilainya ditentukan dari *integer*. Lebar lalu lintas ini juga perlu mempertimbangkan perubahan lebar jembatan di masa yang akan datang. Dapat dilihat pada Tabel 2.13 jumlah lajur lalu lintas rencana.

Tabel 2. 13 Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana

Tipe Jembatan (1)	Lebar Bersih Jembatan (2) mm	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n)
Satu Lajur	$3000 \leq w < 5250$	1
Dua Arah tanpa Median	$5250 \leq w < 7500$	2
	$7500 \leq w < 10000$	3
	$10000 \leq w < 12500$	4
	$12500 \leq w < 15250$	5
	$w \geq 15250$	6
Dua Arah dengan Median	$5500 \leq w < 8000$	2
	$8250 \leq w < 10750$	3
	$11000 \leq w < 13500$	4
	$13750 \leq w < 16250$	5
	$w \geq 16500$	6
Catatan (1) : untuk jembatan tipe lain, jumlah lajur lalu lintas rencana harus ditentukan oleh instansi yang berwenang. Catatan (2) : lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak kerb/rintangan/median dan median untuk banyak arah.		

Sumber: SNI 1725:2016

- b. Beban lajur “D” (TD) merupakan beban terdiri atas beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT). Dapat dilihat pada Tabel 2.14 faktor beban untuk beban lajur “D”.

Tabel 2. 14 Faktor Beban Untuk Beban 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
	Boks <i>Girder</i> Baja	1,00	2,00

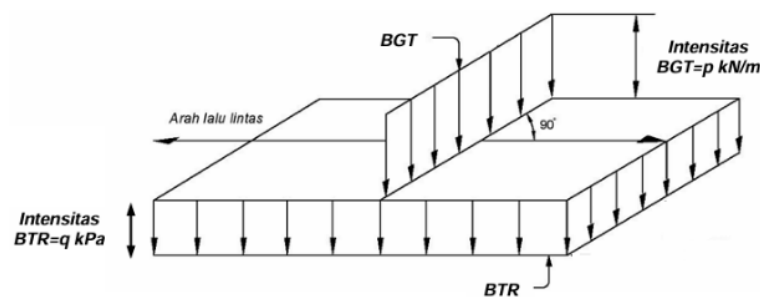
Sumber: SNI 1725:2016

- c. Intensitas Beban “D” pada gambar 2.10. untuk nilai yang didapat dari beban terbagi rata (BTR) dengan nilai q (intensitas) dari panjang total jembatan.

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m } (q = 9 \text{ kPa}) \quad (2.1)$$

$$\text{Jika } L < 30 \text{ m } (q = 9 (0,5 + \frac{15}{L}) \text{ kPa}) \quad (2.2)$$

Sementara itu, beban garis terpusat (BGT) sebesar 49 kN/m berupa beban garis yang bekerja melintang atau tegak lurus arah lalu lintas pada jembatan.



Gambar 2. 10 Beban Lajur "D"

(Sumber: SNI 1725:2016)

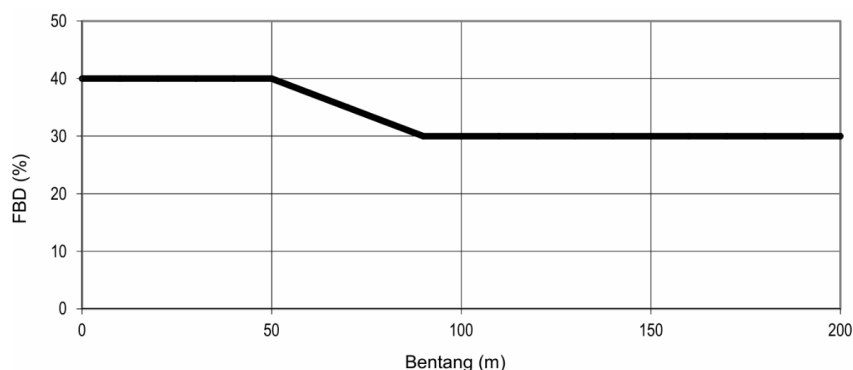
- d. Beban truk “T” (TT) merupakan beban kendaraan rencana berupa truk *semi-trailer* dengan susunan dan berat ganda tertentu. Setiap gandar dianggap sebagai beban roda yang bekerja pada permukaan jembatan untuk mensimulasikan pengaruh kendaraan berat terhadap struktur. Dapat dilihat pada Tabel 2.15 faktor beban untuk beban “T”.

Tabel 2. 15 Faktor Beban Untuk Beban "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
	Boks <i>Girder</i> Baja	1,00	2,00

Sumber: SNI 1725:2016

- e. Faktor beban dinamis (FBD) merupakan tambahan beban akibat kendaraan yang bergerak di atas jembatan. Nilainya dipengaruhi oleh getaran kendaraan dan jembatan, lalu dihitung sebagai tambahan dari beban statis. Faktor beban dinamis digunakan pada kondisi batas layan dan ultimit. Untuk beban lajur "D" (BTR) nilainya tergantung pada bentang jembatan, sedangkan untuk beban truk "T" diambil sebesar 30%. Dapat dilihat pada gambar 2.11. Faktor Beban Dinamis Beban T Untuk Pembebanan Lajur "D".



Gambar 2. 11 Faktor Beban Dinamis Beban T Untuk Pembebanan Lajur "D"
(Sumber: SNI 1725:2016)

- f. Gaya rem (TB) merupakan gaya horizontal akibat pengereman kendaraan di atas jembatan. besarnya diambil dari nilai terbesar antara 25% besar gandar truk atau 5% dari berat truk ditambah beban lajur. Gaya ini bekerja searah memanjang jembatan pada ketinggian sekitar 1,8 m dari permukaan jalan dan diperhitungkan pada semua jalur yang dilalui kendaraan dengan arah yang sama.
- g. Gaya sentrifugal (TR) merupakan gaya yang muncul saat kendaraan melewati tikungan di atas jembatan. Gaya ini dihitung dari berat gandar truk dikalikan faktor tertentu yang dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan, jari-jari tikungan, dan gravitasi. Gaya sentrifugal bekerja secara horizontal pada ketinggian 1,8 m dari permukaan jalan dan harus diteruskan ke struktur bawah jembatan. Pengaruh kemiringan jalan (superelevasi) dapat mengurangi efek gaya ini dalam perencanaan.

$$C = f \frac{V^2}{gR_l} \quad (2.3)$$

Ket.

V : Kecepatan rencana jalan raya (m/detik)

f : Faktor nilai 4/3 pada kombinasi beban selain kondisi batas fatik
Faktor nilai 1 pada kombinasi beban kondisi batas fatik

g : Percepatan gravitasi (9,8 m/detik²)

R_l : Jari-jari kelengkungan lajur lalu lintas (m)

- h. Beban pejalan kaki (TP) merupakan beban yang bekerja pada trotoar jembatan akibat aktivitas pejalan kaki. Jika lebar trotoar > 600 mm maka bebannya sebesar 5 kPa yang diperhitungkan bersamaan dengan beban kendaraan pada lajur jembatan. Akan tetapi, bila trotoar dapat dilalui kendaraan maka beban pejalan kaki tidak perlu digabung. Jika trotoar berpotensi menjadi lajur kendaraan maka beban kendaraan harus diperhitungkan di dekat tepi jembatan tanpa faktor beban dinamis.
- i. Beban akibat tumbukan kendaraan (TC) merupakan beban yang bekerja secara horizontal dan terjadi apabila kendaraan menabrak parapet jembatan. Dapat dilihat pada Tabel 2.16 kinerja terhadap tumbukan.

Tabel 2. 16 Kinerja Terhadap Tumbukan

Karakteristik Kendaraan	Mobil		Truk Pickup	Satu Unit Truk Van	Truk Trailer Tipe Van		Truk Trailer Tipe Traktor-Tanker
W (N)	7000	8000	20000	80000	220000	355000	355000
B (mm)	1700	1700	2000	2300	2450	2450	2450
G (mm)	550	550	700	1250	1630	1850	2050
Sudut Tumbuk (°)	20°	20°	25°	15°	15°	15°	15°

Sumber: SNI 1725:2016

4. Beban aksi lingkungan

- a. Penurunan (ES) merupakan perubahan posisi jembatan akibat kondisi tanah dasar. Nilai penurunan ini dapat diperoleh dari hasil uji tanah atau diasumsikan sebagai batas maksimum serta dapat berkurang akibat dari

interaksi tanah dan rangkai. Dapat dilihat pada Tabel 2.17 faktor beban akibat penurunan.

Tabel 2. 17 Faktor Beban Akibat Penurunan

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{ES})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{ES}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{ES}^U)
Permanen	1,00	N/A

Sumber: SNI 1725:2016

- b. Temperatur merata (E_{un}) merupakan perubahan suhu secara bersamaan pada gelagar jembatan yang terbuat dari beton atau baja dengan rentang suhu pada Tabel 2.18 temperatur jembatan rata-rata sebagai berikut:

Tabel 2. 18 Temperatur Jembatan Rata-Rata

Tipe Bangunan Atas	Temperatur Jembatan Rata-Rata Minimum (1)	Temperatur Jembatan Rata-Rata Maksimum
Lantai beton di atas gelagar atau boks beton.	15° C	40° C
Lantai beton di atas gelagar, boks atau rangka baja.	15° C	40° C
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks, atau rangka baja.	15° C	40° C
Catatan (1) Temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5° C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m di atas permukaan laut.		

Sumber: SNI 1725:2016

- c. Pengaruh susut dan rangkai (SH) merupakan perubahan pada beton yang terjadi seiring waktu. Dalam perencanaan jembatan beton, pengaruh ini harus diperhitungkan berdasarkan beban mati. Jika efeknya dapat mengurangi pengaruh beban lain, maka nilainya diambil yang paling kecil. Dapat dilihat pada Tabel 2.19 faktor beban akibat susut dan rangkai.

Tabel 2. 19 Faktor Beban Akibat Susut dan Rangkai

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{SH})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{SH}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{SH}^U)
Tetap	1,00	0,50
Catatan: walaupun susut dan rangkai bertambah lambat menurut waktu, tetapi pada akhirnya akan mencapai nilai yang konstan.		

Sumber: SNI 1725:2016

- d. Pengaruh prategang (PR) merupakan efek tambahan yang timbul akibat gaya prategang pada struktur. Pengaruh ini diperhitungkan pada kondisi batas layan dan ultimit, baik saat pelaksanaan maupun setelah terjadi kehilangan tegangan serta dikombinasikan dengan beban lainnya. Dapat dilihat pada Tabel 2.20 faktor beban akibat pengaruh prategang.

Tabel 2. 20 Faktor Beban Akibat Pengaruh Prategang

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{PR})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{PR}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{PR}^U)
Tetap	1,00	1,00

Sumber: SNI 1725:2016

- e. Beban angin pada struktur (EWs) merupakan gaya yang bekerja akibat hembusan angin rencana dengan kecepatan 90-126 km/jam. Gaya ini dianggap terdistribusi merata pada seluruh permukaan jembatan yang terkena angin seperti lantai kendaraan, gelagar, dan railing. Arah angin ditinjau pada kondisi yang menghasilkan pengaruh paling kritis terhadap struktur. Besarnya gaya beban angin total minimum sebesar 4,4 kN/mm pada bidang tekan, 2,2 kN/mm pada bidang hisap untuk rangka atau pelengkung, dan 4,4 kN/mm pada balok atau gelagar. Dapat dilihat pada Tabel 2.21 tekanan angin dasar.

Tabel 2. 21 Tekanan Angin Dasar

Komponen Bangunan Atas	Angin Tekan (MPa)	Angin Hisap (MPa)
Rangka, kolom, dan pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan Datar	0,0019	N/A

Sumber: SNI 1725:2016

- f. Beban angin pada kendaraan (EWI) merupakan beban tekanan angin yang bekerja pada kendaraan saat melintasi jembatan. Beban ini diperhitungkan sebagai tekanan merata sebesar 1,46 N/mm, bekerja tegak lurus arah kendaraan pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Jika arah angin tidak tegak lurus, maka komponen gaya dihitung sesuai sudut datang angin terhadap kendaraan sesuai Tabel 2.22 berikut ini.

Tabel 2. 22 Komponen Beban Angin Yang Bekerja Pada Kendaraan

Sudut (°)	Komponen Tegak Lurus (N/mm)	Komponen Sejajar (N/mm)
0	1,46	0,00
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

Sumber: SNI 1725:2016

- g. Pengaruh gempa (EQ) merupakan gaya yang bekerja pada jembatan akiat getaran tanah saat gempa bumi. Gaya ini menyebabkan pergeseran, getaran, dan tambahan gaya pada struktur sehingga jembatan yang direncanakan mampu menahannya agar tetap aman dan stabil.

Dampak gaya gempa rencana EQ dihitung dengan metode analisis statis ekuivalen berdasarkan ketentuan SNI 2833:2016. Gaya geser dasar nominal ini didapat dengan mengalikan koefisien respon spektrum C_{sm} dengan berat seismik total jembatan W_t , lalu dibagi oleh faktor modifikasi respon R_d . Faktor R_d diterapkan untuk mengurangi gaya gempa elastis dengan mempertimbangkan tingkat daktilitas dan penyimpanan energi pada struktur bangunan di bawah jembatan.

$$EQ = \frac{C_{sm}}{R_d} \times W_t \quad (2.4)$$

Ket.

E_Q : gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} : koefisien respon gempa elastis

R_d : faktor modifikasi respon

W_t : berat total struktur (bebana mati dan hidup dalam kN)

- Koefisien respon gempa elastis (C_{sm})

Koefisien respons spektrum gempa C_{sm} ditentukan berdasarkan pada periode alami jembatan T sesuai dengan ketentuan dalam SNI 2833:2016. Perhitungan C_{sm} dibagi menjadi tiga kondisi berdasarkan periode domain, yaitu daerah di mana percepatan meningkat ($T < T_0$), daerah di mana percepatan tetap konstan ($T_0 \leq T \leq T_s$), dan daerah di mana percepatan

menurun ($T > T_s$). Nilai T_0 dan T_s dihitung berdasarkan perbandingan antara parameter percepatan spektral untuk periode pendek S_{DS} dan periode 1 detik S_{D1} di lokasi jembatan.

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s \quad \text{Periode} < T_0 \quad (2.5)$$

$$C_{sm} = S_{DS} \quad \text{Periode} > \text{atau} = T_0 \quad (2.6)$$

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \quad \text{Periode} > T_s \quad (2.7)$$

Ket.

S_{DS} : nilai spektra permukaan tanah pada periode pendek (0,2 detik)

S_{D1} : nilai spektra permukaan tanah pada periode 1,0 detik)

T_0 : $0,2 T_s$

T_s : S_{D1}/S_{DS}

- Faktor modifikasi respon (R_d)

Dalam perencanaan struktur yang tahan gempa, faktor modifikasi respons digunakan untuk menilai kemampuan struktur untuk mengalami deformasi inelastik. Ini juga memperhitungkan tingkat daktilitas dan disipasi energi sistem struktur. Nilai R_d dapat berubah sesuai dengan sistem struktur utama, jenis elemen bangunan bawah, dan kategori kepentingan bangunan. Akibatnya, penetapan nilai R_d untuk elemen bangunan bawah harus disesuaikan dengan jenis elemen struktur yang digunakan. Tabel 2. 23 menunjukkan nilai faktor modifikasi respons untuk berbagai jenis bangunan bawah, berdasarkan SNI 2833:2016.

Tabel 2. 23 Modifikaksi 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			
Tiang vertikal	1,5	2,0	3,0
Tiang miring	1,5	1,5	2,0
Kolom tunggal	1,5	2,0	3,0
Tiang baja dan komposit			
Tiang vetikal	1,5	3,5	5,0
Tiang miring	1,5	2,0	3,0
Kolom majemuk	1,5	3,5	5,0
Catatan: Pilar tipe dinding dapat direncanakan sebagai kolom tunggal dalam arah sumbu lemar pilar.			

Sumber: SNI 2833:2016

Sesuai Tabel 2.20, nilai faktor modifikasi respons R untuk struktur bawah berbeda-beda tergantung pada jenis elemen dan kategori pentingnya bangunan. Pada pilar jenis dinding, nilai R masing-masing adalah 1,5 untuk kategori sangat penting dan penting, serta 2,0 untuk kategori yang lainnya. Sementara itu, pada tiang tegak dan tiang miring, nilai R berkisar antara 1,5 hingga 3,0, tergantung pada kategori pentingnya bangunan. Untuk struktur bawah yang terdiri dari kolom tunggal, nilai R adalah 1,5 untuk kategori sangat penting, 2,0 untuk kategori penting, dan 3,0 untuk kategori lainnya.

Dalam sistem tiang baja komposit, nilai R untuk tiang tegak dan tiang miring berkisar antara 1,5–5,0 dan 1,5–3,0. Untuk kolom majemuk, nilai R adalah 1,5 untuk kategori sangat penting, 3,5 untuk kategori penting, dan 5,0 untuk kategori yang lain. Oleh karena itu, pemilihan nilai R perlu memperhatikan jenis struktur bawah serta kategori kepentingan bangunan agar faktor pengurangan gaya gempa yang diterapkan dalam analisis sesuai dengan ketentuan SNI 2833:2016.

Selain faktor modifikasi respons yang berkaitan dengan jenis elemen struktur bawah, respons bangunan juga dipengaruhi oleh kondisi interaksi antar elemen struktur. Hubungan itu dapat berperan penting dalam proses pemindahan gaya gempa dari satu elemen ke elemen lainnya. Oleh karena itu, SNI 2833:2016 juga menetapkan ketentuan tentang faktor modifikasi

respons untuk interaksi antar elemen struktur. Nilai dari faktor itu digunakan untuk menghitung dampak kondisi sambungan pada respons struktur, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 2. 24 dibawah ini:

Tabel 2. 24 Faktor Modifikasi Respon (R) Untuk Bangunan 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 fondasi.	1,0

Sumber: SNI 2833:2016

Sesuai dengan Tabel 2.24, faktor modifikasi respons untuk interaksi antar elemen struktur ditentukan berdasarkan jenis hubungan yang digunakan dan berlaku untuk semua kategori kepentingan bangunan. Dalam hubungan struktur atas dengan kepala jembatan serta sambungan muai (dilatasi) pada struktur atas, diterapkan nilai faktor modifikasi respons sebesar 0,8. Sementara itu, kolom atau pilar yang terhubung dengan bangunan atas dan fondasi memiliki nilai faktor modifikasi respons sebesar 1,0. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa keadaan interaksi antara elemen struktur harus diperhatikan dalam menetapkan respons struktur terhadap beban gempa. Oleh karena itu, selain menilai karakteristik bangunan bawah melalui nilai R pada Tabel 2.20, pemodelan serta analisis struktur juga harus memperhatikan jenis keterkaitan antar elemen sesuai dengan ketentuan SNI 2833:2016.

- Kombinasi pengaruh gaya gempa

Pengaruh gabungan beban gempa dari dua arah horizontal yang bekerja sekaligus dihitung dengan mempertimbangkan interaksi kedua beban tersebut, sesuai dengan standar SNI 2833:2016. Pembebanan dilakukan dengan menggabungkan 100% gaya gempa pada arah utama dan 30% gaya gempa pada arah yang tegak lurus, yaitu $100\% EQ_X + 30\% EQ_Y$ serta $(30\% EQ_X + 100\% EQ_Y)$. Dalam kombinasi ini, beban hidup dikalikan

dengan faktor γ_{EQ} berdasarkan kelas kepentingan jembatan untuk menyatakan kemungkinan adanya lalu lintas saat terjadi gempa.

$$DL + \gamma_{EQ} LL \pm EQ_X \pm 0,3 EQ_Y \quad (2.8)$$

$$DL + \gamma_{EQ} LL \pm EQ_Y \pm 0,3 EQ_X \quad (2.9)$$

Ket.

DL : beban mati yang bekerja (kN)

γ_{EQ} : faktor beban hidup kondisi gempa

$\gamma_{EQ} = 0,5$ (jembatan sangat penting)

$\gamma_{EQ} = 0,3$ (jembatan penting)

$\gamma_{EQ} = 0$ (jembatan lainnya)

LL : beban hidup yang bekerja (kN)

EQ_X : beban gempa yang bekerja arah x

EQ_Y : beban gempa yang bekerja arah y

5. Beban aksi lainnya

- a. Gesekan pada perletakan (BF) merupakan gaya yang timbul pada tumpuan jembatan akibat pergerakan struktur, termasuk pengaruh kekakuan geser pada perletakan elastomer. Besarnya gaya gesekan dihitung berdasarkan beban tetap serta nilai koefisien gesekan.

Tabel 2. 25 Faktor Beban Akibat Gesekan Pada Perletakan

Jangka Waktu	Faktor Beban		
	γ_{BF}^S	γ_{BF}^U	
Transien		Biasa	Terkurangi
	1,00	1,30	0,80

Catatan: gaya akibat gesekan pada perletakan terjadi selama adanya pergerakan pada bangunan atas, tetapi gaya sisa mungkin terjadi setelah pergerakan berhenti. Dalam hal ini gesekan pada perletakan harus memperhitungkan adanya pengaruh tetap yang cukup besar.

Sumber: SNI 1725:2016

Gaya gesekan pada perletakan (BF) muncul karena adanya gerakan relatif antara struktur atas dan perletakan, terutama pada perletakan elastis. Gaya gesekan dihitung berdasarkan beban vertikal yang berfungsi pada perletakan dan koefisien gesekan, yang biasanya dinyatakan sebagai:

$$BF = \mu \times P$$

Dengan BF menunjukkan gaya gesekan, μ sebagai koefisien gesekan, dan P merujuk pada beban vertikal pada tempat perletakan. Sesuai dengan SNI 1725:2016, faktor beban gesekan pada penempatan ditampilkan di Tabel 2.22. Untuk keadaan transien, terfaktor, dan berkurang, digunakan faktor 1,00; 1,30; dan 0,80 secara masing-masing. Nilai tersebut diterapkan dalam kombinasi beban sesuai keadaan yang dianalisis.

6. Kombinasi beban

Kombinasi beban pada Tabel 2.26 digunakan untuk menentukan kondisi pembebanan yang paling kritis pada struktur. Setiap keadaan batas memiliki faktor beban yang berbeda sesuai dengan jenis aksi yang bekerja.

Tabel 2. 26 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EWs	EWI	BF	EUn	TG	ES	Gunakan Salah Satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	γ_P	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_P	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_P	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_P	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_P	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γ_P	γ_{EQ}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00	-	-
Ekstrem II	γ_P	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,00	1,00
Daya Layan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Layan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya Layan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Layan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Fatik (TD & TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan: - γ_P dapat berupa γ_{MS} , γ_{MA} , γ_{TA} , γ_{PR} , γ_{PL} , γ_{SH} tergantung beban yang ditinjau.
- γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa.

Sumber: SNI 1725:2016

Penentuan kombinasi pembebanan merupakan langkah krusial setelah seluruh aksi beban teridentifikasi. Kombinasi ini memperhitungkan potensi bekerjanya beberapa beban secara bersamaan agar kondisi batas pembebanan mendekati keadaan riil struktur. Formulasi dan faktor kombinasi pembebanan ini merujuk standar SNI 1725:2016 dapat dilihat pada Tabel 2.23.

Pengelompokan kombinasi pada SNI 1725:2016 mencakup empat kategori kondisi batas: Kuat (Kuat I sampai V), Ekstrem (Ekstrem I dan II), Daya Layan (Daya Layan I hingga IV), dan Fatik (TD & TR). Setiap kondisi batas memiliki pengali faktor beban berbeda untuk mengakomodasi beban mati, beban lalu lintas, gempa, angin, maupun pengaruh lingkungan lainnya. Analisis kondisi batas kuat difokuskan untuk menguji batas integritas dan kekuatan struktural dalam merespons beban puncak. Keadaan batas ekstrem meninjau kejadian tak terduga seperti bencana gempa. Adapun kondisi batas daya layan menjamin kenyamanan serta fungsionalitas jembatan selama masa pakai, sedangkan kondisi batas fatik menguji keandalan struktur terhadap beban dinamis yang berulang. Hasil analisis dari kombinasi ini menjadi dasar penentuan respons dan gaya dalam untuk tahap desain maupun verifikasi elemen jembatan.

a. Kelompok pembebanan pada jembatan

Dalam perencanaan struktur jembatan, seluruh beban yang bekerja harus diperhitungkan secara sistematis untuk menjamin keamanan dan kinerja struktur selama masa layan. Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1725:2016, beban yang bekerja pada jembatan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- Beban permanen merupakan beban yang bekerja secara terus-menerus selama umur layan jembatan meliputi: MS, MA, TA, PL, dan PR
- Beban transien merupakan beban yang bekerja sementara atau berubah-ubah selama masa pelayanan jembatan meliputi: SH, TB, TR, TC, TV, EQ, BF, TD, TT, TP, SE, ET, Eun, EWs, dan EWl.

b. Kombinasi pembebanan

Dalam perencanaan jembatan, setiap komponen dan sambungan harus mampu menahan berbagai kondisi batas yang ditentukan. Berdasarkan SNI

1725:2016 kombinasi pembebanan dikelompokkan menjadi beberapa kondisi sebagai berikut:

- Keadaan batas kuat digunakan untuk evaluasi kemampuan struktur dalam menahan beban maksimum tanpa mengalami kegagalan. Pada kondisi ini, berbagai kombinasi beban diperhitungkan termasuk beban mati, beban hidup, serta pengaruh lingkungan seperti angin dengan menggunakan faktor beban yang sesuai untuk merepresentasikan kondisi terburuk yang mungkin terjadi.
- Keadaan batas ekstrem digunakan untuk menganalisis kondisi pembebanan yang bersifat luar biasa atau jarang terjadi seperti gempa bumi dan tumbukan. Analisis pada kondisi ini bertujuan untuk memastikan bahwa struktur tetap memiliki tingkat keamanan yang memadai meskipun mengalami beban ekstrem dalam waktu singkat.
- Keadaan batas layanan digunakan untuk menilai kinerja struktur selama kondisi operasional normal. Parameter yang diperhatikan meliputi lendutan, lebar retak, serta tegangan yang terjadi pada elemen struktur sehingga jembatan tetap memenuhi aspek kenyamanan, keawetan, dan fungsi pelayanan yang diharapkan.
- Keadaan batas fatik digunakan untuk mengevaluasi ketahanan struktur terhadap beban berulang dalam jangka Panjang. Analisis ini penting untuk mencegah terjadinya kerusakan akibat kelelahan material yang dapat mengurangi umur layanan struktur.

2.5.2 Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan

1. Beton

a. Kekuatan nominal

Nilai f_c' pada umur beton 28 hari.

Kuat tekan : Beton non prategang ≥ 20 MPa
Beton prategang 30 MPa

Kuat Tarik : $0,33 \sqrt{f_c'}$ MPa saat umur beton 28 hari.

Kuat Tarik lentur : $0,60 \sqrt{f_c'}$ MPa saat umur beton 28 hari.

b. Tegangan ijin

Tegangan ijin tekan kondisi batas layan : nilainya $< 0,45 f_c'$
(MPa)

Tegangan ijin tekan kondisi beban : nilainya $< 0,60 f_{ci}'$
sementara atau kondisi transfer gaya
prategang (MPa)

Tegangan ijin tarik kondisi batas layan : $0,15 \sqrt{f_c'}$ (beton tanpa
(MPa) tulangan)
: $0,5 \sqrt{f_c'}$ (beton prategang
penuh)

Tegangan ijin tekan kondisi beban : nilainya $< 0,25 \sqrt{f_{ci}'}$ untuk
sementara atau kondisi transfer gaya serat terluar
prategang (MPa) : nilainya $< 0,50 \sqrt{f_{ci}'}$ untuk
serat terluar ujung komponen

* f_{ci}' : kuat tekan beton saat menerima beban atau saat proses transfer gaya prategang.

c. Massa jenis (W_c) ditetapkan berdasarkan jenis beton yang digunakan.
Untuk beton normal nilainya sebesar 2400 kg/m^3 .

d. Modulus elastisitas (E_c)

$$E_c = W_c^{1,5} (0,043 \sqrt{f_c'}) \quad \text{atau} \quad 4700 \sqrt{f_c'} \quad \text{untuk beton normal.} \quad (2.10)$$

e. Susut beton

Tabel 2. 27 Koefisien Standar Susut Beton Sebagai Tambahan Regangan
Jangka Panjang

Kekuatan karakteristik f_c' (MPa)	20	25	30	35	40 - 60
Koef. Susut maksimum $\epsilon_{cs,t}$	0,000174	0,000170	0,000163	0,000161	0,000153

Sumber: RSNi T-12-2004

f. Rangkak beton

Tabel 2. 28 Koefisien Standar Rangkak Beton Sebagai Tambahan
Regangan Jangka Panjang

Kekuatan karakteristik f_c' (MPa)	20	25	30	35	40 - 60
Koef. Rangkak maksimum C_u	2,8	2,5	2,3	2,15	2,0

Sumber: RSNI T-12-2004

2. Baja tulangan non-prategang

a. Kekuatan nominal

Kuat Tarik putus (F_u) : berdasarkan hasil pengujian.

Kuat Tarik leleh (F_y) : hasil pengujian < 550 MPa.

b. Tegangan ijin

Pembebanan : Untuk tulangan $f_y = 300$ mpa, tegangan ijin < 140 MPa

tetap Untuk tulangan $f_y \geq 400$ mpa, tegangan ijin < 170 MPa

Untuk tul. lentur, tegangan ijin $0,50 f_y$ atau < 200 MPa

Pembebanan : Nilai tegangan ijin dapat ditingkatkan 30% dari nilai sementara yang ditetapkan.

c. Modulus elastisitas (E_s)

$E_s = 200.000$ MPa untuk nilai tegangan $<$ kuat leleh (F_y)

3. Baja tulangan prategang

a. Kekuatan nominal

Kuat tarik baja prategang : nilainya berdasarkan hasil pengujian (F_{pu})

Kuat leleh baja prategang : $0,75 F_{pu}$ (kawat baja prategang)

(F_{py}) $0,85 F_{pu}$ (*strand* dan tendon baja bulat)

b. Tegangan ijin

Kondisi batas layan : tendon pasca tarik ($0,70 f_{pu}$)

kondisi layan ($0,60 f_{pu}$)

Kondisi transfer : akibat gaya penjangkaran tendon ($0,94 f_{py}$ dan $< 0,85 f_{pu}$)

setelah transfer gaya prategang ($0,82 f_{py}$ dan $< 0,74 f_{pu}$)

c. Modulus elastisitas (E_p)

Kawat tegang-lepas : 200×10^3 MPa

Strand tegang-lepas : 195×10^3 MPa

Baja dingin dengan kuat tarik tinggi : 170×10^3 MPa

d. Faktor reduksi kekuatan

Tabel 2. 29 Faktor Reduksi Kekuatan

Kuat rencana	Faktor reduksi
Lentur	0,80
Geser dan torsi	0,70
Aksial tekan dengan tul. spiral	0,70
Aksial tekan dengan Sengkang biasa	0,65
Tumpuan beton	0,70

Sumber: RSNi T-12-2004

e. Persyaratan kekuatan beton untuk abrasi

Bagian beton yang diperkirakan mengalami abrasi atau keausan akibat lalu lintas harus direncanakan dengan kuat tekan beton f_c' tidak kurang dari nilai minimum yang harus ditetapkan pada tabel berikut ini.

Tabel 2. 30 Persyaratan Kekuatan Beton Untuk Abrasi

Bagian Bangunan dan/atau Jenis Lalu Lintas	Kuat Tekan Minimum f_c' (MPa)
Jalan untuk pejalan kaki dan sepeda	20
Perkerasan dan lantai jembatan yang berhubungan dengan:	
1. Lalu lintas ringan yang menggunakan ban hidup (karet berisi udara) untuk kendaraan yang mempunyai berat sampai 3 ton.	20
2. Lalu lintas menengah atau berat kendaraan yang mempunyai berat lebih besar dari 3 ton.	25
3. Lalu lintas yang tidak menggunakan ban hidup	35
4. Lalu lintas dengan roda baja	Harus diperkirakan, tetapi tidak kurang dari 35

Sumber: RSNi T-12-2004

f. Persyaratan batas kadar kimia

Garam klorida atau bahan kimia yang mengandung klorida dalam jumlah tinggi tidak boleh digunakan pada elemen beton prategang. Kadar sulfat dalam beton yang dinyatakan sebagai persentase berat SO_3 terhadap semen dibatasi maksimum sebesar 5%. Selain itu, bahan kimia dengan ion kuat seperti nitrat hanya dapat digunakan apabila terbukti tidak mengurangi keawetan beton dalam jangka panjang. Berat ion klorida terlarut pada setiap satuan volume beton tidak boleh melebihi batas nilai yang ditetapkan pada tabel 2.28. berikut ini:

Tabel 2. 31 Kadar Maksimum Ion Klorida Terlarut Asam

Jenis Konstruksi	Kadar Maksimum Ion Klorida Terlarut Asam (Kg/m ³)
Beton yang tidak mengandung bahan-bahan yang memerlukan perlindungan.	3,00
Beton yang mengandung bahan-bahan yang memerlukan perlindungan.	0,80

Sumber: RSNI T-12-2004

g. Persyaratan selimut beton

Tebal selimut beton pada tulangan dan tendon harus menggunakan nilai sesuai dengan persyaratan pelaksanaan pengecoran serta kebutuhan perlindungan terhadap korosi. Dapat dilihat pada tabel 2.29 selimut beton berdasarkan diameter tulangan pada beton prategang. Tebal selimut beton untuk tulangan dan tendon adalah minimal nilai terbesar dari:

- 1,5 x ukuran agregat terbesar.
- db atau 2 x db diameter terbesar bilai dipakai berkas tulangan (db: diameter tulangan).
- 2 x diameter tendon, tapi tidak harus > 40 mm.
- 50 mm (sistem pasca tarik) terhadap serat bawah dan 40 mm terhadap bagian lain.
- 50 mm (ujung tendon pasca tarik) atau perlengkapan angkur.

Tabel 2. 32 Selimut Beton Berdasarkan Diameter Tulangan Pada Beton Prategang

Letak Struktur Beton	Diameter Tulangan (mm)	Selimut Beton (mm)
Cor langsung di atas tanah dan selalu berhubungan dengan tanah.	Bebas	70
Yang berhubungan dengan tanah atau cuaca.	D19 – D56	50
	< D16	40
Yang tidak langsung berhubungan dengan tanah atau cuaca		
a. Pelat, dinding dan pelat berusuk.	D44 & D56	40
	< D36	25
b. Balok dan kolom	Tulangan utama, pengikat, Sengkang, lilitan spiral.	40
c. Komponen struktur cangkang dan pelat.	> D19	25
	< D16	20

Sumber: RSNI T-12-2004

Cara lain dari perlindungan korosi pada tulangan dengan cara pemberian *epoxy-coated*, pelapisan ulang beton, pemberian membran rapat, ataupun kombinasi dari cara tersebut.

2.7 Building Information Modelling (BIM)

Building Information Modelling (BIM) merupakan representasi digital dari karakteristik fisik dan fungsional suatu bangunan yang memuat seluruh informasi proyek sejak tahap perencanaan, pelaksanaan, hingga pembongkaran. *Building Information Modelling* memungkinkan seluruh data proyek terintegrasi dalam satu model sehingga memudahkan koordinasi antar pihak yang terlibat (Ardo Saputra et al., 2022).

Penerapan *Building Information Modelling* pada sektor konstruksi mampu meningkatkan efisiensi pekerjaan karena proses perencanaan, estimasi volume, penjadwalan, dan pengendalian proyek dapat dilakukan secara lebih akurat dibanding metode konvensional berbasis gambar 2D. Selain itu, *Building Information Modelling* juga membantu mendeteksi benturan antar elemen bangunan (*clash detection*) sehingga kesalahan di lapangan dapat diminimalkan (Wudi Darul Putra, 2025).

Berdasarkan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2023) implementasi *Building Information Modelling* pada pekerjaan konstruksi jalan dan jembatan diarahkan untuk mendukung transformasi digital sektor infrastruktur. *Building Information Modelling* tidak hanya dimanfaatkan pada tahap desain, tetapi juga mencakup tahap konstruksi, operasi, dan pemeliharaan asset. Dengan demikian, penggunaan *Building Information Modelling* diharapkan mampu meningkatkan akurasi data, efisiensi biaya, ketepatan waktu pelaksanaan serta keberlanjutan pengelolaan infrastruktur jalan dan jembatan di Indonesia.

Di Indonesia, penggunaan *Building Information Modelling* terus berkembang sebagai bagian dari transformasi digital industri konstruksi. Namun, implementasinya masih menghadapi beberapa kendala seperti tingginya biaya investasi perangkat lunak, keterbatasan sumber daya manusia yang menguasai

Building Information Modelling serta belum meratanya standar penerapan pada proyek konstruksi. Meski demikian, manfaat utama *Building Information Modelling* yang paling dirasakan adalah efisiensi waktu kerja, peningkatan kolaborasi, dan pengurangan potensi kesalahan desain (Januar Pantiga & Anton Soekiman, 2021).

Pada konstruksi modern *Building Information Modelling* telah berkembang menjadi 4D (integrasi penjadwalan) dan 5D (integrasi biaya) sehingga model bangunan tidak hanya menampilkan bentuk visual 3D, tetapi juga simulasi tahapan pelaksanaan serta estimasi anggaran proyek secara langsung. Hal ini menjadikan *Building Information Modelling* sebagai teknologi penting dalam mendukung pembangunan yang lebih efektif, transparan, dan berkelanjutan (Faqih Nadiya Umam et al., 2022).

2.8 Software Pendukung BIM

Penerapan *Building Information Modeling* (BIM) pada tahap perencanaan membutuhkan berbagai perangkat lunak yang saling mendukung. Untuk menggambarkan setiap elemen jembatan secara digital, data dari perencanaan geometrik dan struktur jembatan terlebih dahulu digunakan untuk membuat model tiga dimensi. Selanjutnya, model tersebut dapat digunakan untuk koordinasi antarpekerjaan, memperoleh informasi kuantitas, dan membantu menyusun jadwal dan biaya proyek.

Perangkat lunak yang digunakan tidak hanya membuat model 3D, tetapi juga menghubungkan model dengan waktu pelaksanaan (4D) dan biaya pekerjaan (5D). Dengan demikian, setiap perangkat lunak melakukan fungsi yang berbeda tetapi saling terintegrasi selama proses penelitian.

2.7.1 SAP2000

SAP2000 adalah program komputer yang dirancang untuk menganalisa dan mendesain gedung atau struktur bidang dua atau tiga dimensi yang memungkinkan untuk melakukan analisis struktur baik secara statik maupun dinamik dengan berbagai kombinasi pembebanan (Ritonga & Irwan, 2023).



Gambar 2. 12 Logo SAP 2000

(Sumber: *Website SAP2000*)

Pada perencanaan ini, SAP2000 dipilih sebagai perangkat lunak yang mendukung untuk melakukan analisis dan pemodelan struktur jembatan. Penggunaan ini didasarkan pada kemampuan untuk memodelkan struktur secara tiga dimensi, menyediakan berbagai jenis pembebanan, dan melakukan analisis terhadap respons struktur akibat beban yang bekerja. Aplikasi ini memungkinkan untuk menganalisis berbagai jenis struktur dalam tampilan dua dimensi dan tiga dimensi dengan berbagai macam pembebanan kombinasi yang diberikan dengan penggunaan yang lebih mudah dan efisien. Program SAP2000 dibuat untuk mengidentifikasi gaya yang muncul pada elemen struktur sebagai akibat dari munculnya beban. Selain itu, kemampuan SAP2000 untuk melakukan analisis kombinasi pembebanan dan menghasilkan respons struktur yang secara akurat. Hal ini sesuai dengan kebutuhan penelitian tentang perencanaan struktur jembatan sebelum pengembangan hasil desain ke dalam model BIM (Ritonga & Irwan, 2023).

2.7.2 Autodesk Revit

Autodesk Revit merupakan perangkat lunak yang mengintegrasikan informasi geometrik dan non-geometrik ke dalam setiap elemen bangunan melalui sistem pemodelan parametrik. *Autodesk Revit* dapat digunakan untuk membuat model tiga dimensi, membuat gambar kerja, dan mendapatkan informasi kuantitas elemen dari model yang telah dibuat (Zanuar & Nadiar, 2026).



Gambar 2. 13 Logo Autodesk Revit

(Sumber: Website Autodesk)

Pemodelan 3D, gambar 2D, penjadwalan material, dan *Quantity Take Off* (QTO) dapat dibuat menggunakan Autodesk Revit dalam basis data terintegrasi. Meskipun memiliki keterbatasan seperti biaya lisensi yang tinggi dan kebutuhan untuk *plug-in* tambahan, sistem parametriknya mendukung estimasi volume pekerjaan secara lebih cepat dan konsisten. Dibandingkan dengan metode konvensional yang masih banyak digunakan dalam proyek konstruksi di Indonesia, akurasi hasil QTO perlu dipelajari lebih lanjut. Dengan kemampuan ini, Revit cocok untuk digunakan dalam penelitian ini untuk memodelkan elemen struktur jembatan. Selain itu, Revit juga mendukung proses pengambilan jumlah sebagai bagian dari implementasi BIM 5D.

2.7.3 Microsoft Excel

Microsoft Excel adalah perangkat lunak pengolah data berbasis *spreadsheet* yang digunakan untuk perhitungan, pengorganisasian, analisis, dan penyajian informasi dalam bentuk tabel. Data yang diperoleh dari model BIM, seperti estimasi biaya atau rencana anggaran, harga satuan, dan *quantity take-off* (QTO) (Fadhil Muhammad et al., 2025).



Gambar 2. 14 Logo Microsoft Excel

(Sumber: Website Microsoft)

Microsoft Excel dipilih sebagai perangkat lunak yang mendukung penerapan BIM 5D, terutama untuk proses pengolahan data kuantitas dan estimasi biaya.

Pemilihan ini didasarkan pada kemampuan *Excel* untuk melakukan perhitungan menggunakan formula, mengelompokkan data *Take-Off Quantity* (QTO), dan menghubungkan volume pekerjaan dengan harga satuan untuk menghasilkan estimasi biaya atau RAB. Selain itu, *Excel* mudah digunakan untuk melakukan perubahan, pemeriksaan, dan penyesuaian pada spreadsheet.

2.7.4 *Microsoft Project*

Microsoft Project merupakan perangkat lunak manajemen proyek yang membantu dalam perencanaan, penyusunan, dan pengendalian jadwal proyek. Aplikasi ini memungkinkan pengguna menyusun aktivitas pekerjaan, menentukan durasi, menetapkan sumber daya, dan melacak kemajuan pekerjaan. Dalam proses BIM, *Microsoft Project* dapat digunakan sebagai alat pendukung untuk membuat penjadwalan proyek atau model 4D, yang dapat diintegrasikan dengan model 3D untuk memberikan visualisasi urutan pekerjaan yang dilakukan (Herliawan & Firdaus, 2024)



Gambar 2. 15 Logo *Microsoft Project*

(Sumber: *Website Microsoft*)

Pemilihan *Microsoft Project* pada perencanaan ini karena mampu menyusun jadwal pekerjaan berdasarkan durasi, ketergantungan antaraktivitas, kalender kerja, dan sumber daya. Pengguna juga dapat mengetahui waktu mulai dan selesai setiap pekerjaan serta durasi proyek secara keseluruhan. Selanjutnya, data penjadwalan dapat digunakan sebagai dasar untuk integrasi dengan model 3D pada tahap BIM 4D. Ini akan memberikan gambaran yang lebih baik tentang urutan dan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan jembatan.

2.7.5 *Autodesk Navisworks*

Autodesk Navisworks merupakan perangkat lunak yang mendukung implementasi *Building Information Modeling* (BIM), khususnya untuk proses simulasi

konstruksi, visualisasi, dan koordinasi. Untuk menghasilkan simulasi konstruksi berbasis waktu atau BIM 4D, *Navisworks* dapat mengintegrasikan model tiga dimensi dengan data penjadwalan proyek. Selain itu, fitur deteksi benturan mendeteksi kemungkinan konflik atau benturan antar elemen dalam model sebelum konstruksi dimulai. Dalam penelitian ini, *Navisworks* digunakan untuk melakukan pemeriksaan konflik model dan memvisualisasikan urutan pelaksanaan pekerjaan dengan mengintegrasikan data jadwal yang dibuat menggunakan *Microsoft Project*. (Rachmawati & Abma, 2022)



Gambar 2. 16 Logo *Navisworks Manage*

(Sumber: *Website Autodesk*)

Pemilihan *Autodesk Navisworks* karena dapat mengintegrasikan model 3D dengan jadwal pelaksanaan proyek, yang memungkinkan simulasi konstruksi 4D. Selain itu, fitur deteksi konflik membantu menemukan konflik antar-elemen model sebelum pekerjaan dilakukan di lapangan. Diharapkan bahwa penggunaan *Navisworks* ini akan membantu mengevaluasi hubungan antara model, waktu pelaksanaan, dan koordinasi pekerjaan sebagai bagian dari penerapan.

2.9 Estimasi Biaya

Estimasi biaya merupakan proses perhitungan seluruh kebutuhan dana yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu proyek konstruksi sesuai ruang lingkup pekerjaan yang telah direncanakan. Pada proyek jembatan, estimasi biaya menjadi bagian penting karena digunakan sebagai dasar penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB), evaluasi kelayakan proyek, proses pelelangan, dan pengendalian keuangan selama pelaksanaan pekerjaan. Ketepatan estimasi biaya sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proyek karena kesalahan perhitungan dapat

menyebabkan kekurangan dana, pembengkakan biaya, dan keterlambatan pekerjaan.

Estimasi biaya sangat erat kaitannya dengan *Quantity Take Off* (QTO) yang merupakan estimasi dari item pekerjaan yang ada dalam suatu proyek konstruksi berdasarkan satuan masing-masing pekerjaan sehingga biaya dapat diperkirakan dari adanya QTO tersebut. QTO menyediakan sebuah daftar semua material setiap item pekerjaan yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek konstruksi yang disebut *Taking Off List*. Pada saat membuat *Taking Off List*, seorang estimator membutuhkan gambar kerja ataupun sebuah model dan dibutuhkan kemampuan yang mumpuni dari estimator berupa ketelitian, pemahaman pemahaman yang baik dari kondisi konstruksi, proses konstruksi dan material. Hasil perhitungan dari QTO nantinya akan disajikan dalam *Bill of Quantity* (BOQ).

Bill of Quantity (BoQ) merupakan daftar harga dari setiap item yang memuat kuantitas item pekerjaan serta harga dari setiap item pekerjaan tersebut. Para kontraktor yang mengikuti tender diwajibkan menghitung banyaknya item pekerjaan yang ada pada gambar tender yang sudah disediakan oleh *owner*. Nilai perkiraan harga proyek diperoleh setelah keseluruhan item pekerjaan sudah dihitung dengan masing-masing harga satuannya. Nilai perkiraan ini yang nanti menghasilkan harga penawaran kontraktor untuk proyek konstruksi.

Ketika membuat estimasi biaya dilakukan melalui analisis harga satuan pekerjaan yang mengacu pada kebutuhan material, tenaga kerja, peralatan, dan biaya tidak langsung. Setelah itu, harga satuan dikalikan dengan volume pekerjaan.

Menurut (Fadhil Muhammad et al., 2025) pengolahan estimasi biaya yang dilakukan dengan pendekatan digital menghasilkan volume pekerjaan yang lebih cepat dan sistematis sehingga anggaran yang disusun lebih akurat. Dalam menyusun estimasi biaya anggaran proyek pembangunan jembatan terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi antara lain:

1. Lokasi proyek dan aksesibilitas material.
2. Jenis dan Panjang bentang jembatan.
3. Kondisi tanah dasar dan metode pondasi.
4. Harga material dan upah tenaga kerja.

5. Durasi pelaksanaan proyek.
6. Risiko cuaca dan kondisi lapangan.

Dengan demikian, dalam penyusunan estimasi biaya harus dilakukan secara teliti, realistis, dan menyesuaikan kondisi lapangan agar proyek jembatan dapat terlaksanakan sesuai anggaran yang telah direncanakan.

2.10 Penjadwalan

Penjadwalan merupakan proses penyusunan urutan aktivitas pekerjaan, hubungan ketergantungan antar kegiatan, durasi pelaksanaan, dan target waktu penyelesaian proyek. Penjadwalan yang baik akan membantu pengendalian waktu, efisiensi penggunaan sumber daya, dan pencapaian target penyelesaian proyek.

Metode penjadwalan yang umum digunakan pada proyek konstruksi antara lain *bar chart*, kurva S, *Critical Path Method* (CPM), dan *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Berdasarkan (Guntur Saddam Saputra & Vendie Abma, 2023) dalam merencanakan penjadwalan secara rinci akan menghasilkan hubungan yang lebih sistematis dan meminimalkan potensi keterlambatan selama proses pelaksanaan. Oleh karena itu, penyusunan penjadwalan secara sistematis akan membantu proyek berjalan secara tepat waktu, efisien, dan sesuai mutu yang direncanakan.

2.11 Research Gap

Tabel 2. 33 *Research Gap*

No	Peneliti	Judul	Pokok Bahasan	Kekurangan
1.	(Santoso Burhan, 2020)	Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan Dengan Profil I <i>Girder</i> Prategang Segmental (Studi Kasus: Jembatan Kali Grawah Kec. Cepogo, Kab. Boyolali, Jawa Tengah).	Penelitian ini membahas perencanaan ulang struktur atas jembatan menggunakan <i>Girder</i> beton prategang tipe I segmental. Analisis dilakukan terhadap beban mati, beban hidup, dan gaya prategang. Selanjutnya perhitungan dimensi <i>Girder</i> , jumlah <i>tendon</i> , serta kontrol tegangan dan lendutan.	Tidak membahas biaya dan penjadwalan. Solusi: Adanya analisis Rancangan Biaya dan penyusunan penjadwalan konstruksi.
2.	(Susanto et al., 2023)	Perencanaan Ulang Struktur Jembatan Way Magnay di Ruas Jalan Krui – Biha Kabupaten Pesisir Barat.	Penelitian ini membahas perencanaan ulang struktur jembatan dengan fokus pada analisis pembebanan dan perhitungan elemen struktur seperti <i>Girder</i> , <i>Abutment</i> , pilar, <i>Pilecap</i> , dan fondasi.	Tidak membahas aspek biaya dan waktu. Solusi: Adanya pengintegrasikan aspek perhitungan

				estimasi biaya total proyek dan alokasi durasi waktu pelaksanaan konstruksi.
3.	(Na'ma, 2024)	Perencanaan Ulang Jembatan Glapan Timur Kabupaten Grobogan <i>Girder</i> 40 Meter.	Peneltian ini mengkaji perencanaan ulang jembatan bentang 40 meter. Analisis meliputi beban struktur, perhitungan dimensi <i>Girder</i> , dan elemen pendukung lainnya.	Belum ada analisis biaya dan penjadwalan. Solusi: Menganalisis Rancangan Biaya dan <i>Time schedule</i> proyek.
4.	(Pamungkas, 2017)	Perencanaan Jembatan Jabungan Kota Semarang Provinsi Jawa Tengah.	Penelitian ini membahas perencanaan jembatan secara umum, termasuk analisis pembebanan dan desain elemen struktur.	Masih menggunakan metode konvensional serta tidak membahas mengenai estimasi biaya dan waktu. Solusi:

				Menerapkan pemodelan berbasis <i>Building Information Modelling</i> (BIM) yang terintegrasi dengan aspek waktu (4D) dan biaya (5D).
5.	(Hendrawan dan Fikri, 2023)	Perencanaan Ulang Struktur Jembatan Beton Sokokidul Demak.	Penelitian ini membahas perencanaan ulang jembatan beton dengan fokus pada analisis kekuatan struktur. Dilakukan perhitungan beban, gaya dalam, dan desain elemen utama.	Tidak membahas mengenai pembiayaan dan penjadwalan. Solusi: Menghitung <i>Quantity Take-Off</i> (QTO) secara mendetail untuk menyusun RAB dan durasi pekerjaan proyek.

6.	(Nugraha, 2024)	Implementasi Konsep <i>Building Information Modelling</i> (BIM) 4D Dalam Tahapa Perencanaan Penjadwalan Proyek Pembangunan Jembatan (Studi Kasus: Penggantian Jembatan Pening Klotji Kabupaten Mojokerto).	Penelitian ini membahas penggunaan BIM 4D untuk menyusun penjadwalan proyek jembatan. Pemodelan 3D diintegrasikan dengan data waktu untuk menghasilkan simulasi tahapan konstruksi.	Tidak membahas estimasi biaya. Solusi: Pembahasan mengenai komponen estimasi biaya (BIM 5D) secara menyeluruh.
7.	(Henry et al., 2020)	Perencanaan Pejadwalan dengan Aplikasi BIM Menggunakan Analisa Probabilistik (Studi Kasus Proyek Jembatan Bedadung).	Penelitian ini membahas penjadwalan proyek menggunakan BIM dengan pendekatan probabilistik. Analisis dilakukan untuk memperkirakan durasi pekerjaan secara lebih realistis.	Tidak menggabungkan anggaran biaya proyek. Solusi: Menghubungkan model dan <i>schedule</i> dengan <i>cost database</i> guna menghasilkan

				estimasi biaya terintegrasi.
8.	(Taufik & Pradana, 2024)	Redesain Jembatan Beton Prategang Gempolsewu Kecamatan Rowosari Kabupaten Kendal Dengan Menggunakan <i>Building Information Modelling</i> .	Penelitian ini membahas redesain jembatan menggunakan BIM dengan fokus pada pemodelan 3D struktur. Pemodelan digunakan untuk memvisualisasikan elemen jembatan secara detail dan meningkatkan koordinasi desain.	Tidak menggabungkan proses biaya dan waktu. Solusi: Mengembangkan pemodelan 3D menjadi simulasi BIM 4D (waktu) dan BIM 5D (biaya) secara terpadu.
9.	(Piter & Sucita, 2024)	Perbandingan Analisis <i>Quantity Takeoff</i> Berbasis BIM Dengan Metode Konvensional Pada Pekerjaan Struktur Jembatan <i>Underpass</i> .	Penelitian ini membandingkan volume pekerjaan menggunakan BIM dan metode konvensional	Hanya fokus pada volume struktur jembatan. Solusi: Memanfaatkan hasil analisis volume

				<i>Quantity Take-Off</i> (QTO) berbasis BIM untuk langsung menyusun RAB dan <i>time schedule</i> .
10.	(Oktafino & Arifin, 2026)	Pemodelan Struktur Bangunan Jembatan Menggunakan <i>Software</i> BIM <i>Revit</i> 3D (Studi Kasus: Pembangunan Jalan Tol Probolinggo – Banyuwangi Paket 3)	Penelitian ini membahas pembuatan model 3D jembatan menggunakan <i>software</i> BIM. Pemodelan digunakan untuk menampilkan bentuk dan detail elemen struktur secara visual.	Hanya sampai pemodelan 3D belum menggabungkannya pada waktu dan biaya. Solusi: Melanjutkan model BIM 3D <i>Revit</i> ke tahap integrasi BIM 4D (penjadwalan waktu) dan BIM 5D (pembiayaan proyek).

Berdasarkan Tabel 2.33 di atas, sebagian besar masih berfokus pada perencanaan struktur, pemodelan 3D, atau penjadwalan saja. Oleh karena itu, tugas akhir ini membahas mengenai perencanaan jembatan yang mencakup perhitungan analisa struktur, penyusunan estimasi biaya, dan penjadwalan proyek konstruksi.