BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Jembatan

Jembatan ialah suatu kontruksi yang berfungsi menghubungkan dua titik yang terpisah oleh rintangan seperti sungai, lembah, jalan raya, atau rel kereta, sehingga memungkinkan lalu lintas dapat melewati rintangan tersebut secara aman dan efisien. Menurut SNI 1725:2016, jembatan harus mampu memikul beban lalu lintas, beban lingkungan, serta beban tambahan lainnya dengan mempertimbangkan aspek kekuatan, kestablian, dan keawetan.

Jembatan dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori berdasarkan karakteristik utamanya. Pertama, klasifikasi dapat dilakukan berdasarkan bahan konstruksi yang digunakan, seperti jembatan beton bertulang, beton prategang, baja, maupun jembatan komposit yang menggabungkan beberapa jenis material. Pemilihan bahan ini akan menentukan kekuatan, durabilitas, serta metode konstruksi yang digunakan.

Kedua, jembatan juga diklasifikasikan berdasarkan sistem strukturnya. Beberapa bentuk struktur yang umum digunakan antara lain sistem gelagar (*girder*), sistem pelengkung (*arch*), sistem rangka (*truss*), serta sistem *cable-stayed* dan gantung (*suspension*). Masing-masing sistem memiliki karakteristik perilaku struktur yang berbeda sesuai dengan panjang bentang dan kebutuhan desain.

Ketiga, jembatan dapat dibedakan menurut fungsinya, misalnya jembatan jalan raya, jembatan kereta api, atau jembatan pejalan kaki. Fungsi ini mempengaruhi standar beban rencana, lebar jalur, dan persyaratan keselamatan.

Dalam konteks klasifikasi tersebut, Jembatan PCI Girder (*Prestressed Concrete I-Girder*) termasuk dalam kategori jembatan beton prategang dengan sistem struktur gelagar. Komponen girder-nya dibuat secara pracetak (*precast*) di pabrik sehingga kualitasnya lebih terkontrol, kemudian dipasang di lokasi jembatan. Sistem ini banyak digunakan untuk jembatan bentang menengah karena memiliki efisiensi struktural tinggi, mutu beton yang baik, serta mempercepat waktu pelaksanaan konstruksi.

2.2 PCI (*Prestressed Concrete I*) Girder

PCI Girder adalah elemen balok beton prategang berbentuk huruf I yang diproduksi secara pracetak (*prescast*), di mana tendon prategang ditarik (*pretensioning*) untuk menghasilkangaya tekan awal sehingga meningkatkan kapasitas kapasitas lentur, geser, torsi, dan mengurangi lendutan.

Jembatan dengan sistem PCI Girder memiliki sejumlah keunggulan yang membuatnya banyak digunakan pada konstruksi modern. Pertama, tipe girder ini sangat cocok untuk bentang menengah hingga panjang, yakni sekitar 20–50 meter, tanpa memerlukan penopang di tengah bentang. Hal ini memberikan fleksibilitas dalam desain dan mempermudah pengaturan lalu lintas di bawahnya.

Selain itu, proses pembuatannya dilakukan secara pracetak (*precast*) sehingga produksi dapat berlangsung cepat dan kualitas elemen struktural lebih terkontrol karena dibuat di lingkungan pabrik. Metode ini juga mengurangi potensi kesalahan selama pekerjaan lapangan.

Dari sisi performa, PCI Girder memiliki kapasitas lentur yang tinggi berkat gaya prategang yang diberikan, sehingga mampu menahan beban besar serta menjaga lendutan tetap dalam batas aman. Bentuk penampangnya yang menyerupai huruf I juga membuatnya lebih ringan dibandingkan gelagar beton berbentuk persegi, tanpa mengurangi kekuatan strukturalnya.

Terakhir, keunggulan penting lainnya adalah kemudahan dalam pemasangan di lapangan. Karena dimensi dan beratnya sudah diperhitungkan untuk efisiensi, girder dapat diangkat dengan crane dan dipasang secara cepat, sehingga waktu konstruksi di lokasi menjadi lebih singkat dan gangguan terhadap lalu lintas dapat diminimalkan.

PCI Girder terdiri dari beberapa elemen utama yang bekerja secara terpadu dalam memikul beban struktur. Flange atas (top flange) berfungsi untuk menahan tegangan tekan akibat momen lentur positif, yaitu pada bagian atas penampang yang berada dalam kondisi tekan, serta berperan sebagai bidang tumpuan bagi pelat lantai kendaraan (deck slab). Web (badan girder) berfungsi untuk menahan gaya

geser yang terjadi akibat beban kerja dan mentransfer gaya antara flange atas dan flange bawah. Selain itu, web juga berpengaruh terhadap kekakuan lentur girder serta berkontribusi dalam menahan efek torsi ringan. Flange bawah berfungsi untuk menahan tegangan tarik akibat momen lentur, khususnya pada kondisi tanpa prategang, serta menjadi elemen utama dalam menyalurkan gaya prategang dari tendon ke seluruh penampang girder. Tendon prategang (strand) berfungsi untuk memberikan gaya prategang berupa tekanan awal (precompressive force) yang bertujuan menutup atau mengurangi terjadinya retak tarik pada beton, meningkatkan kapasitas lentur struktur, serta mengendalikan lendutan sehingga kinerja dan keawetan PCI Girder dapat terjaga.

2.3 Perancangan Struktur Atas Jembatan

Struktur atas (superstructure) pada jembatan merupakan elemen utama yang berfungsi untuk menerima, menyalurkan, dan meneruskan beban dari lalu lintas kendaraan menuju struktur bawah. Komponen struktur atas umumnya terdiri dari tumpuan gelagar, sistem gelagar utama, slab lantai kendaraan, serta lapisan perkerasan. Tumpuan gelagar berperan sebagai penghubung antara gelagar dan struktur bawah, sehingga memastikan transfer beban berlangsung secara stabil dan aman.

Gelagar merupakan elemen struktural yang bekerja menahan gaya lentur dan geser akibat beban kendaraan maupun beban lingkungan. Sementara itu, slab lantai kendaraan berfungsi sebagai bidang tempat bergeraknya kendaraan dan turut mendistribusikan beban secara merata ke gelagar di bawahnya. Pada bagian atas slab, terdapat lapisan perkerasan yang memberikan kenyamanan, ketahanan aus, serta perlindungan tambahan terhadap elemen struktural dari pengaruh cuaca dan beban berulang. Dengan perencanaan yang tepat, seluruh komponen struktur atas dapat bekerja secara terpadu untuk menghasilkan jembatan yang kuat, stabil, dan aman bagi pengguna jalan.

Menurut SNI 1725:2016, perencanaan jembatan harus mempertimbangkan berbagai jenis beban yang bekerja pada struktur agar jembatan aman dan berfungsi sesuai umur rencana. Beban pertama yang diperhitungkan adalah beban mati (*dead load*), yaitu seluruh berat elemen struktural yang permanen, seperti berat sendiri

girder, slab beton, serta elemen diafragma. Beban ini bersifat konstan dan tidak berubah sepanjang umur jembatan.

Selain itu terdapat beban mati tambahan, yaitu beban dari elemen non-struktural yang juga bersifat tetap, seperti lapis aspal, trotoar, barrier pengaman, hingga beban air hujan yang dapat tertampung di permukaan jembatan. Beban ini harus diperhitungkan untuk memastikan lantai kendaraan dan struktur bawah tetap mampu menahan berat tambahan tersebut.

Jenis beban berikutnya adalah beban lalu lintas (*live load*), yang berasal dari kendaraan yang melintasi jembatan. SNI menggunakan model pembebanan seperti Truk T dan Lajur D untuk mensimulasikan kondisi beban kendaraan berat maupun lalu lintas umum. Beban ini bersifat berubah-ubah dan menjadi faktor dominan pada perencanaan elemen struktural utama.

Selain kendaraan, jembatan juga harus mampu menahan beban pejalan kaki, terutama pada jembatan dengan trotoar atau jembatan penyeberangan. Standar ini memastikan bahwa getaran dan kekuatan struktur tetap aman saat digunakan oleh banyak pejalan kaki.

Faktor lain yang turut diperhitungkan adalah beban gaya rem, yaitu gaya horizontal yang timbul ketika kendaraan melakukan pengereman. Beban ini bekerja secara mendatar pada girder dan perlu diasumsikan untuk memastikan stabilitas struktur.

Terakhir, jembatan juga harus mempertimbangkan beban angin, terutama pada bentang panjang atau struktur yang memiliki elemen terbuka. Angin dapat memberikan tekanan lateral yang signifikan dan mempengaruhi kenyamanan serta keamanan pengguna. Dengan mempertimbangkan seluruh beban tersebut, perencanaan jembatan dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan sesuai standar keselamatan yang berlaku.

2.4 Perancangan Struktur Bawah Jembatan

Struktur bawah jembatan ialah elemen yang berfungsi untuk menerima total beban dari struktur atas dan diteruskan ke tanah dasar. Struktur bawah umumnya terdiri dari abutment, pile cap, dan bored pile. Abutment berperan sebagai penopang

utama pada kedua ujung jembatan, yang tidak hanya menahan beban vertikal dari gelagar dan slab, tetapi juga menahan tekanan tanah lateral serta memberikan kestabilan terhadap struktur secara keseluruhan. Pile cap merupakan elemen beton bertulang yang menghubungkan tiang-tiang pondasi dengan abutment, sehingga beban yang diterima dapat disalurkan secara merata ke seluruh tiang pondasi. Pada bagian paling bawah, bored pile berfungsi sebagai elemen pondasi dalam yang menahan beban aksial dan lateral, serta memberikan kapasitas dukung yang memadai terutama pada kondisi tanah yang kurang stabil. Dengan perencanaan yang tepat, hubungan antara abutment, pile cap, dan bored pile mampu bekerja secara sinergis untuk memastikan struktur jembatan memiliki kekuatan, stabilitas, dan keamanan yang optimal.

2.4.1 Abutment

Abutment ialah komponen penting pada jembatan yang berfungsi menerima beban vertikal dari gelagar sekaligus menahan tekanan tanah dari timbunan di belakangnya. Oleh karena itu, perancangannya harus mempertimbangkan beberapa aspek teknis agar struktur bekerja secara stabil dan aman.

Pertama, perlu dianalisis tekanan tanah yang bekerja pada bagian belakang abutment. Nilai tekanan ini dipengaruhi oleh sudut gesek tanah, kohesi, kemiringan timbunan (*slope backfill*) serta kondisi tanah di lapangan. Koefisien tekanan tanah aktif (Ka) dihitung berdasarkan sudut gesek tanah, karena semakin besar sudut gesek maka tekanan tanah yang bekerja akan semakin kecil. Pemahaman karakteristik tanah ini sangat penting untuk menentukan gaya yang harus ditahan abutment.

Selanjutnya, abutment harus diperiksa terhadap potensi guling (*overturning*). Tekanan tanah dan beban eksternal lainnya menghasilkan momen yang dapat menyebabkan struktur berputar ke depan. Oleh sebab itu, perlu dihitung momen overturning dan dibandingkan dengan momen penahan yang berasal dari berat sendiri abutment, berat pondasi, serta distribusi tekanan tanah pada dasar pondasi. Struktur dinyatakan aman apabila momen penahan lebih besar dengan margin tertentu sesuai faktor keamanan.

Abutment juga harus diuji terhadap geser (*sliding*). Gaya horizontal dari tekanan tanah dapat mendorong struktur bergeser dari tempatnya. Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan gaya geser lateral yang bekerja dengan tahanan geser di dasar pondasi, yang berasal dari friksi antara pondasi dan tanah. Jika gaya tahanan lebih besar dari gaya geser, maka abutment aman terhadap pergeseran.

Selain stabilitas keseluruhan, perancang juga harus memastikan daya dukung fondasi mencukupi. Tekanan tanah di bawah footing atau pile cap tidak boleh melebihi kapasitas tanah yang diizinkan. Selain itu, potensi penurunan (*settlement*) juga harus ditinjau, baik penurunan konsolidasi maupun penurunan elastis. Untuk pondasi dalam seperti tiang pancang atau bored pile, distribusi beban pada grup tiang harus diperhitungkan, termasuk efisiensi grup yang mempengaruhi kapasitas total yang dapat ditahan pondasi.

Dengan memperhatikan seluruh aspek tersebut, abutment dapat dirancang secara optimal untuk menjamin keamanan dan keandalan struktur jembatan selama masa layanannya.

2.4.2 Fondasi

Dalam perencanaan jembatan, pemilihan jenis pondasi sangat bergantung pada kondisi tanah, jenis beban, serta kebutuhan struktur. Beberapa jenis pondasi umum yang digunakan antara lain pondasi tiang bor, tiang pancang, dan pondasi dangkal (*footing*).

1. Pondasi Tiang Bor (*Bored Pile*)

Bored pile merupakan jenis pondasi dalam yang dibuat dengan cara mengebor tanah hingga kedalaman tertentu, kemudian lubang tersebut dipasangi tulangan dan diisi beton. Metode ini sangat cocok digunakan di area yang sensitif terhadap getaran, karena proses pemasangannya tidak menimbulkan hentakan seperti pondasi pancang.

Bored pile berfungsi untuk memindahkan beban vertikal ke lapisan tanah yang lebih keras. Daya dukungnya dapat berasal dari daya dukung ujung (*end bearing*), terutama jika tiang mencapai lapisan tanah keras, maupun dari gesekan sepanjang sisi tiang (*skin friction*) jika lapisan keras berada lebih dalam. Selain

menahan beban vertikal, bored pile juga mampu menahan gaya lateral, misalnya akibat tekanan tanah, angin, atau gempa, karena kekakuan tiang dan interaksi tanah–struktur memberikan resistensi terhadap gaya horizontal.

2. Pondasi Tiang Pancang (*Driven Pile*)

Tiang pancang merupakan pondasi yang dipasang menggunakan teknik dipukul atau didorong ke dalam tanah menggunakan hammer atau alat hidrolik. Material yang digunakan bisa berupa beton pracetak, baja (seperti H-pile), maupun kayu. Sistem ini banyak dipilih karena pemasangannya cepat dan kualitas tiang dapat dikontrol sejak awal, terutama jika menggunakan bahan pracetak. Tiang pancang bekerja dengan prinsip serupa bored pile, yaitu memanfaatkan daya dukung ujung dan gesekan samping, namun metode instalasinya memberikan efek pemadatan tanah sehingga meningkatkan kapasitas daya dukung di sekitarnya.

3. Fondasi Dangkal (*Footing*)

Footing dipakai ketika lapisan tanah keras berada cukup dekat dengan permukaan, sehingga tidak diperlukan pondasi dalam. Fondasi ini bertugas menyebarkan beban dari struktur atas ke tanah secara merata. Footing merupakan elemen pondasi dangkal yang berfungsi untuk menahan dan menyebarkan beban struktur ke tanah dasar. Beberapa jenis footing yang umum digunakan antara lain footing lajur (*strip footing*), footing persegi atau balok, dan footing tapak (*spread footing*). Footing lajur biasanya digunakan untuk menahan beban memanjang, seperti pada dinding abutment, karena bentuknya yang mengikuti arah beban linear. Sementara itu, footing persegi atau footing balok digunakan ketika beban bersifat terpusat dan kondisi tanah memiliki daya dukung yang baik, sehingga ukuran fondasi dapat dibuat lebih ringkas namun tetap efektif. Jenis yang terakhir adalah footing tapak, yang memiliki bentuk lebih lebar untuk menyebarkan beban besar ke permukaan tanah secara lebih merata. Footing ini banyak dipilih ketika diperlukan kapasitas dukung yang tinggi serta distribusi beban yang lebih luas agar mencegah terjadinya penurunan setempat. Melalui pemilihan jenis footing yang tepat, stabilitas dan keamanan struktur dapat terjaga sesuai dengan karakteristik beban dan kondisi tanah di lokasi pembangunan. Dengan memahami karakteristik dan fungsi dari masing-masing jenis fondasi, perencana dapat memilih sistem fondasi

yang paling sesuai dengan kondisi tanah dan tuntutan struktural jembatan, sehingga menghasilkan bangunan yang aman dan efisien.

4. Analisis fondasi meliputi:

Dalam perencanaan fondasi dalam seperti tiang bor atau tiang pancang, terdapat beberapa aspek penting yang harus dianalisis agar fondasi mampu bekerja secara aman dan efektif. Aspek-aspek tersebut meliputi kapasitas daya dukung, penurunan, efisiensi kelompok tiang, serta gaya dalam yang terjadi pada pile cap.

a. Daya Dukung Ujung dan Friksi

Analisis daya dukung tiang bertujuan untuk mengetahui sejauh mana tiang mampu memikul beban vertikal dari struktur di atasnya. Kapasitas tiang diperoleh dari dua komponen utama, yaitu daya dukung ujung (*end bearing*) yang berasal dari reaksi tanah keras di bawah ujung tiang, serta daya dukung friksi (*skin friction*) yang muncul akibat gesekan antara permukaan samping tiang dan tanah di sekelilingnya.

Evaluasi daya dukung ini sangat penting untuk memastikan bahwa tiang tidak mengalami keruntuhan, baik keruntuhan akibat kegagalan tanah di bawah ujung tiang maupun slip akibat kurangnya gesekan pada sisi tiang. Selain itu, analisis ini menjadi dasar untuk menentukan jumlah tiang, diameter tiang, serta kapasitas *ultimite* dan izin yang digunakan dalam desain fondasi.

b. Penurunan Primer dan Penurunan Elastis

Selain kekuatan, aspek penurunan (*settlement*) juga merupakan faktor utama dalam desain fondasi. Penurunan menggambarkan pergerakan vertikal struktur akibat beban, yang terbagi menjadi penurunan elastis, yaitu penurunan yang terjadi secara langsung setelah beban bekerja, serta penurunan primer atau konsolidasi, yang terjadi secara bertahap dalam jangka waktu panjang, terutama pada tanah lempung.

Analisis penurunan dilakukan untuk memastikan bahwa struktur tidak mengalami deformasi berlebih yang dapat mengganggu kenyamanan maupun

fungsi bangunan. Penurunan yang berlebihan dapat menyebabkan berbagai kerusakan, seperti kemiringan bangunan, retak pada dinding dan kolom, pintu atau jendela sulit ditutup, hingga gangguan pada utilitas seperti pipa dan lantai. Oleh karena itu, prediksi penurunan menjadi langkah penting untuk memastikan fondasi memenuhi kriteria *serviceability*.

c. Efisiensi Kelompok Tiang (*Group Pile Efficiency*)

Ketika tiang digunakan dalam kelompok, kapasitas tiang tidak bisa dianggap sama dengan penjumlahan kapasitas tiap tiang tunggal. Hal ini karena tiang-tiang dalam satu kelompok saling mempengaruhi, terutama pada tanah lunak di mana zona tegangan antar tiang dapat saling tumpang tindih. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan efisiensi kelompok tiang untuk menentukan kapasitas efektif fondasi secara keseluruhan. Dengan demikian, perencana dapat menghindari kegagalan akibat *over* kapasitas dan memastikan jumlah serta jarak antar tiang memenuhi persyaratan stabilitas.

d. Momen dan Geser pada *Pile Cap*

Pile cap berfungsi sebagai elemen beton bertulang yang menyalurkan beban dari kolom menuju tiang-tiang fondasi. Dalam proses ini, *pile cap* harus mampu menahan berbagai gaya dalam, seperti momen lentur, geser satu arah, *punching shea*r, serta tegangan akibat konsentrasi beban di area tumpuan tiang.

Analisis ini bertujuan untuk menghasilkan desain *pile cap* yang cukup kaku, tidak retak, tidak patah, dan aman dari kegagalan *punching* oleh kolom. Selain itu, *pile cap* harus memastikan bahwa beban dari kolom terdistribusi secara merata ke setiap tiang sehingga tidak terjadi kelebihan beban pada salah satu tiang tertentu.

2.5 Studi kasus: Jembatan Tol Trans Sumatra ruas Kayu Agung-Palembang.

Jembatan PCI pada ruas Tol Trans Sumatra, khususnya segmen Kayu Agung–Palembang, merupakan salah satu infrastruktur penting yang mendukung konektivitas antarwilayah di Sumatra bagian selatan. Jembatan-jembatan dengan tipe PCI girder di koridor ini berfungsi menghubungkan berbagai titik akses utama,

baik antarkabupaten maupun antarkawasan industri yang berada di sepanjang jalur tol. Dalam perencanaan trase ini, struktur jembatan menjadi salah satu elemen krusial mengingat kondisi geoteknik di beberapa segmen umumnya berupa tanah rawa dan lapisan tanah lunak yang memerlukan solusi struktural yang tepat.

Penggunaan PCI girder dipilih karena dinilai mampu memberikan keseimbangan antara kekuatan struktural dan kebutuhan untuk mengurangi beban mati struktur, sehingga lebih sesuai dengan kondisi tanah dasar yang relatif kurang stabil. Selain itu, metode konstruksi precast memungkinkan proses pembangunan dilakukan secara lebih cepat dan efisien, terutama pada lokasi yang memiliki akses terbatas. Berdasarkan informasi dari rangkaian pembangunan ruas tol tersebut, konstruksi jembatan PCI girder menjadi bagian penting dalam upaya menjaga kelancaran transportasi dan meningkatkan kapasitas distribusi logistik kawasan.

Dalam proses konstruksinya, perhatian utama diarahkan pada upaya memastikan jembatan dapat berfungsi dengan baik dalam jangka panjang, meskipun berada pada kondisi tanah yang memiliki potensi penurunan. Langkah-langkah penanganan yang diterapkan, seperti pemilihan jenis pondasi dan pengaturan sistem struktur atas, bertujuan untuk menjaga stabilitas penuh selama masa layanan. Secara umum, pembangunan jembatan PCI girder di ruas ini memberikan kontribusi penting terhadap peningkatan infrastruktur regional dan menjadi contoh implementasi desain struktur yang menyesuaikan dengan karakteristik tanah setempat.