

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Jembatan adalah suatu struktur konstruksi yang dibangun untuk menghubungkan dua tempat yang terpisah oleh rintangan seperti sungai, lembah, rel kereta api, maupun jalan raya. Menurut Supriyadi dan Muntohar (2007), jembatan merupakan bagian penting dalam sistem transportasi karena berfungsi untuk menjamin kontinuitas pergerakan lalu lintas.

Seiring bertambahnya umur layanan dan meningkatnya volume lalu lintas, banyak jembatan eksisting mengalami penurunan kinerja struktur. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi kinerja struktur untuk memastikan apakah jembatan masih memenuhi standar yang berlaku atau memerlukan perkuatan. Evaluasi ini umumnya dilakukan berdasarkan standar pembebanan terbaru, seperti SNI 1725:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016).

2.2 Klasifikasi Jembatan

Klasifikasi jembatan merupakan proses pengelompokan jembatan berdasarkan karakteristik tertentu untuk mempermudah dalam perencanaan, analisis, pelaksanaan konstruksi, serta pemeliharaan. Menurut Troitsky (1994) dan Chen & Duan (2014), klasifikasi jembatan dapat ditinjau dari beberapa aspek utama, yaitu material, sistem struktur, fungsi, dan panjang bentang.

2.2.1. Klasifikasi Jembatan Berdasarkan Material

Jembatan terdiri dari beton bertulang, beton prategang, baja, dan komposit. Pemilihan material sangat mempengaruhi kekuatan, durabilitas, serta biaya konstruksi jembatan (Kementerian PUPR, 2015).

a. Jembatan Baja (*Steel Bridge*)

Jembatan baja adalah jenis jembatan yang menggunakan baja sebagai material utama pada struktur atas, terutama pada elemen gelagar, rangka (*truss*), maupun kabel struktur. Baja merupakan material konstruksi yang memiliki kekuatan tarik tinggi, daktilitas yang baik, serta mampu menahan beban dinamis dan beban berulang secara efektif. Oleh karena itu, jembatan baja banyak digunakan pada jembatan dengan bentang menengah hingga panjang karena mampu

memberikan kapasitas struktur yang besar dengan dimensi elemen yang relatif lebih kecil dibanding material lain.

Menurut E. C. Hambly dalam buku *Bridge Deck Behaviour*, penggunaan baja pada struktur jembatan memberikan keuntungan dalam hal efisiensi struktur karena baja memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Selain itu, material baja memungkinkan proses prefabrikasi di pabrik sehingga pekerjaan konstruksi di lapangan dapat dilakukan lebih cepat dan lebih efisien (Hambly, 1991).

Jembatan baja umumnya digunakan pada :

1. Jembatan rangka (*Truss Bridge*),
2. Jembatan gelagar baja (*Steel Girder Bridge*),
3. Jembatan pelengkung baja (*Steel Arch Bridge*),
4. serta Jembatan kabel (*Cable-Stayed Bridge Dan Suspension Bridge*).

Kelebihan utama jembatan baja adalah memiliki kekuatan tinggi terhadap gaya tarik dan lentur sehingga sangat cocok digunakan untuk bentang panjang. Selain itu, baja memiliki sifat elastis dan daktilitas yang baik sehingga mampu meredam pengaruh getaran dan beban dinamis akibat lalu lintas kendaraan maupun gempa. Proses fabrikasi baja juga dapat dilakukan di pabrik dengan tingkat presisi tinggi sehingga mutu konstruksi lebih terkontrol.

Adapun kelebihan jembatan baja antara lain :

1. Memiliki kekuatan tinggi terhadap beban tarik dan lentur.
2. Cocok digunakan pada bentang menengah hingga panjang.
3. Dapat diprefabrikasi sehingga mempercepat proses konstruksi.
4. Memiliki berat struktur yang relatif lebih ringan dibanding beton.
5. Memiliki daktilitas tinggi sehingga lebih baik terhadap pengaruh gempa.

Namun demikian, jembatan baja juga memiliki beberapa kekurangan. Material baja rentan mengalami korosi apabila terpapar lingkungan lembab atau agresif tanpa perlindungan yang memadai. Oleh karena itu diperlukan pemeliharaan rutin seperti pengecatan ulang dan pelapisan anti karat untuk menjaga umur layanan struktur. Selain itu, biaya material baja relatif lebih tinggi dibanding beberapa material konstruksi lainnya.

Kekurangan jembatan baja antara lain :

1. Rentan terhadap korosi jika tidak dilindungi dengan baik.

2. Membutuhkan perawatan berkala seperti pengecatan.
3. Biaya material dan fabrikasi relatif tinggi.
4. Rentan terhadap kelelahan material (*fatigue*) akibat beban berulang.

Menurut Hambly (1991), salah satu penyebab utama kerusakan pada jembatan baja adalah kelelahan material (*fatigue*) yang terjadi akibat pembebanan berulang secara terus-menerus. Retak kelelahan biasanya muncul pada sambungan atau bagian struktur yang mengalami konsentrasi tegangan tinggi sehingga perlu dilakukan inspeksi dan pemeliharaan berkala untuk mencegah kegagalan struktur.

b. Jembatan Beton (*Concrete Bridge*)

Jembatan beton adalah jenis jembatan yang menggunakan beton sebagai material utama pada struktur atas maupun struktur bawah. Beton yang digunakan pada konstruksi jembatan umumnya berupa beton bertulang (*Reinforced Concrete*) dan beton prategang (*Prestressed Concrete*). Material beton banyak digunakan dalam konstruksi jembatan karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi, daya tahan yang baik terhadap kondisi lingkungan, serta biaya pemeliharaan yang relatif rendah dibanding material lainnya.

Menurut Arthur H. Nilson, beton bertulang merupakan kombinasi antara beton dan tulangan baja yang bekerja secara bersama untuk menahan gaya tekan dan tarik pada struktur. Beton memiliki kemampuan sangat baik dalam menahan gaya tekan, sedangkan tulangan baja berfungsi menahan gaya tarik yang tidak mampu ditahan oleh beton (Nilson, Darwin, & Dolan, 2010).

Pada konstruksi jembatan, beton dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu :

1. Beton Bertulang (*Reinforced Concrete*)

Beton bertulang merupakan kombinasi beton dengan tulangan baja yang ditanam di dalam beton untuk meningkatkan kemampuan struktur dalam menahan gaya tarik, lentur, dan geser. Jenis beton ini banyak digunakan pada jembatan bentang pendek hingga menengah karena memiliki sistem konstruksi yang sederhana dan biaya pelaksanaan yang relatif ekonomis.

2. Beton Prategang (*Prestressed Concrete*)

Beton prategang adalah beton yang diberikan gaya tekan awal menggunakan tendon atau kabel baja berkekuatan tinggi sebelum menerima beban kerja. Tujuan pemberian gaya prategang adalah untuk mengurangi

tegangan tarik dan retak pada beton saat struktur menerima pembebanan. Beton prategang banyak digunakan pada jembatan bentang menengah hingga panjang karena memiliki kapasitas struktur yang lebih besar dan lendutan yang lebih kecil dibanding beton bertulang biasa.

Menurut Nilson, Darwin, dan Dolan (2010), penggunaan beton prategang mampu meningkatkan kapasitas lentur struktur serta mengurangi terjadinya retak pada elemen beton sehingga kinerja dan umur layanan struktur menjadi lebih baik. Selain itu, beton prategang juga mampu menghasilkan dimensi penampang yang lebih ramping dan efisien untuk bentang panjang.

Jembatan beton memiliki beberapa kelebihan dibanding jenis jembatan lainnya. Beton memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, cuaca, dan pengaruh lingkungan sehingga sangat cocok digunakan di daerah tropis dengan tingkat kelembaban tinggi. Selain itu, biaya perawatan jembatan beton relatif lebih rendah karena tidak memerlukan pengecatan berkala seperti jembatan baja.

Kelebihan jembatan beton antara lain :

1. Tahan terhadap korosi dan pengaruh cuaca.
2. Memiliki biaya pemeliharaan yang relatif rendah.
3. Memiliki umur layanan yang panjang.
4. Memiliki kekakuan struktur yang baik.
5. Cocok digunakan pada berbagai kondisi lingkungan.

Meskipun demikian, jembatan beton juga memiliki beberapa kekurangan. Beton memiliki berat sendiri yang cukup besar sehingga menyebabkan beban mati struktur meningkat. Selain itu, penggunaan beton menjadi kurang efisien untuk bentang yang sangat panjang karena dimensi struktur yang dibutuhkan akan semakin besar.

Kekurangan jembatan beton antara lain :

1. Memiliki berat sendiri yang besar.
2. Kurang efisien untuk bentang sangat panjang.
3. Memerlukan bekisting dan waktu pengerasan beton.
4. Rentan mengalami retak apabila kualitas pelaksanaan kurang baik.

Dengan berbagai kelebihan tersebut, jembatan beton menjadi salah satu jenis jembatan yang paling banyak digunakan pada konstruksi jalan dan jembatan di

Indonesia karena materialnya mudah diperoleh, biaya konstruksi relatif ekonomis, serta memiliki daya tahan yang baik terhadap kondisi lingkungan.

c. Jembatan Komposit (*Composite Bridge*)

Jembatan komposit adalah jenis jembatan yang menggunakan kombinasi dua material berbeda yang bekerja secara bersama-sama dalam menahan pembebanan. Material yang paling umum digunakan pada sistem komposit adalah baja dan beton, di mana baja berfungsi menahan gaya tarik sedangkan beton berfungsi menahan gaya tekan. Kombinasi kedua material tersebut menghasilkan struktur yang lebih efisien, kuat, dan ekonomis dibanding penggunaan satu jenis material saja.

Pada konstruksi jembatan komposit, elemen baja dan beton dihubungkan menggunakan penghubung geser (*Shear Connector*) sehingga kedua material dapat bekerja secara monolit dalam menahan beban. Sistem ini banyak digunakan pada jembatan modern karena mampu meningkatkan kapasitas struktur tanpa memerlukan dimensi penampang yang terlalu besar.

Menurut Badan Standardisasi Nasional dalam SNI 2847:2019 dan SNI 1729:2020, struktur komposit memanfaatkan kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja untuk menghasilkan sistem struktur yang efisien dan memiliki kapasitas tinggi. Beton ditempatkan pada bagian yang dominan menerima gaya tekan, sedangkan baja digunakan pada bagian yang menerima gaya tarik sehingga masing-masing material bekerja sesuai karakteristik kekuatannya.

Contoh paling umum dari jembatan komposit adalah penggunaan :

1. Gelagar baja dengan pelat lantai beton,
2. Balok baja komposit dengan slab beton bertulang,
3. serta Struktur box girder komposit.

Pada sistem tersebut, pelat beton bekerja menahan gaya tekan akibat lentur, sedangkan gelagar baja bekerja menahan gaya tarik. Kombinasi ini menghasilkan peningkatan kekakuan dan kapasitas lentur struktur dibanding sistem non-komposit.

Menurut W. F. Chen dan Lian Duan dalam *Bridge Engineering Handbook*, sistem komposit mampu meningkatkan kapasitas struktur secara signifikan tanpa penambahan dimensi yang besar. Hal tersebut terjadi karena interaksi antara baja dan beton menghasilkan distribusi tegangan yang lebih efisien sehingga struktur

menjadi lebih kuat dan lebih ringan dibanding struktur beton penuh (Chen & Duan, 2014).

Jembatan komposit memiliki beberapa kelebihan dibanding jenis jembatan lainnya. Penggunaan baja memungkinkan struktur memiliki kekuatan tarik tinggi dan berat yang relatif ringan, sedangkan beton memberikan kekakuan dan ketahanan terhadap korosi serta pengaruh lingkungan. Kombinasi keduanya menghasilkan sistem struktur yang efisien untuk berbagai jenis bentang jembatan.

Kelebihan jembatan komposit antara lain :

1. Memiliki efisiensi struktur yang tinggi.
2. Memanfaatkan kekuatan tarik baja dan kekuatan tekan beton secara optimal.
3. Memiliki kapasitas lentur dan kekakuan yang lebih baik.
4. Berat struktur relatif lebih ringan dibanding beton penuh.
5. Pelaksanaan konstruksi relatif lebih cepat.

Meskipun memiliki banyak kelebihan, jembatan komposit juga memiliki beberapa kekurangan. Sistem sambungan antara baja dan beton memerlukan penghubung geser yang dirancang dengan baik agar tidak terjadi kegagalan slip antara kedua material. Selain itu, elemen baja tetap memerlukan perlindungan terhadap korosi terutama pada lingkungan yang agresif.

Kekurangan jembatan komposit antara lain :

1. Memerlukan detail sambungan yang lebih kompleks.
2. Membutuhkan penghubung geser (shear connector) yang kuat.
3. Elemen baja rentan terhadap korosi apabila tidak dilindungi.
4. Pelaksanaan konstruksi membutuhkan pengawasan yang lebih teliti.

Dengan berbagai kelebihan tersebut, jembatan komposit menjadi salah satu sistem struktur yang banyak digunakan pada pembangunan jembatan modern karena mampu menghasilkan struktur yang kuat, efisien, dan ekonomis.

2.2.2. Klasifikasi Jembatan Berdasarkan Sistem Struktur

Sistem struktur jembatan meliputi gelagar, rangka, lengkung, gantung, dan cable-stayed. Setiap sistem memiliki karakteristik distribusi gaya yang berbeda sehingga mempengaruhi analisis dan desain struktur.

a. Jembatan Gelagar (*Girder Bridge*)

Jembatan gelagar (*girder bridge*) merupakan salah satu jenis jembatan yang paling umum digunakan, dimana elemen utama penahan beban berupa balok memanjang (gelagar) yang menahan beban lentur akibat beban lalu lintas.

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2015), jembatan gelagar adalah struktur jembatan yang menggunakan balok sebagai elemen utama untuk menyalurkan beban dari lantai kendaraan ke tumpuan.

Karakteristik:

1. Sederhana dan umum digunakan
2. Cocok untuk bentang pendek–menengah

b. Jembatan Rangka (*Truss Bridge*)

Jembatan rangka (*truss bridge*) adalah jenis jembatan yang menggunakan susunan batang-batang yang membentuk rangka segitiga sebagai elemen utama penahan beban. Struktur ini dirancang agar gaya yang bekerja didistribusikan secara efisien melalui elemen tarik dan tekan.

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2015), jembatan rangka merupakan struktur jembatan yang terdiri dari batang-batang lurus yang dihubungkan pada titik buhul (*joint*) dan membentuk sistem segitiga untuk menahan beban.

Karakteristik:

1. Efisien menahan gaya tarik dan tekan
2. Cocok untuk bentang menengah–panjang

c. Jembatan Lengkung (*Arch Bridge*)

Jembatan lengkung (*arch bridge*) adalah jenis jembatan yang menggunakan bentuk lengkungan sebagai elemen utama penahan beban. Struktur ini bekerja dengan cara menyalurkan beban melalui gaya tekan sepanjang lengkungan menuju tumpuan.

Menurut Chen & Duan (2014), struktur lengkung sangat efisien untuk material yang kuat dalam tekan seperti beton dan batu.

Karakteristik:

1. Menahan beban dengan gaya tekan
2. Bentuk Estetis

d. Jembatan Gantung (*Suspension Bridge*)

Jembatan gantung (*suspension bridge*) adalah jenis jembatan di mana struktur lantai kendaraan (*deck*) digantung pada kabel utama (*main cable*) melalui kabel-kabel vertikal (*hanger*). Kabel utama tersebut ditopang oleh menara (*tower/pylon*) dan diikat pada sistem angkur (*anchorage*) di kedua ujung jembatan.

Sistem ini memungkinkan jembatan gantung untuk menjangkau bentang yang sangat panjang dengan efisiensi material yang tinggi, karena sebagian besar beban dipikul dalam bentuk gaya tarik oleh kabel.

Menurut Nazmy & Abdel-Ghaffar (1990), jembatan gantung sangat sensitif terhadap beban angin dan getaran.

Karakteristik:

1. Bentang sangat panjang
2. Fleksibel terhadap beban

e. Jembatan *Cable-Stayed*

Jembatan *cable-stayed* adalah jenis jembatan di mana dek (lantai jembatan) ditopang langsung oleh kabel-kabel (*stay cable*) yang dihubungkan ke menara (*pylon*). Berbeda dengan jembatan gantung, pada sistem ini kabel tidak menggunakan kabel utama dan angkur besar, melainkan langsung menghubungkan dek dengan menara.

Jembatan ini banyak digunakan untuk bentang menengah hingga panjang karena memiliki efisiensi struktur dan estetika yang baik.

Karakteristik:

1. Lebih kaku dibanding jembatan gantung
2. Efisien untuk bentang panjang

2.2.3. Klasifikasi Jembatan Berdasarkan Fungsi

Klasifikasi jembatan berdasarkan fungsi ditentukan oleh jenis lalu lintas atau peruntukan yang dilayani oleh jembatan tersebut. Fungsi ini sangat mempengaruhi perencanaan struktur, terutama dalam hal pembebanan, dimensi, serta tingkat keamanan yang harus dipenuhi.

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2015), fungsi jembatan berkaitan erat dengan jenis beban yang bekerja serta standar desain yang digunakan dalam perencanaan.

a. Jembatan Jalan Raya (*Highway Bridge*)

Jembatan jalan raya (*highway bridge*) adalah jembatan yang dirancang untuk melayani lalu lintas kendaraan bermotor seperti mobil penumpang, truk, bus, dan sepeda motor. Jenis jembatan ini merupakan jembatan yang paling banyak digunakan dalam sistem transportasi darat karena berfungsi menghubungkan jaringan jalan yang terputus oleh sungai, lembah, rel kereta api, maupun hambatan lainnya. Keberadaan jembatan jalan raya sangat penting dalam mendukung mobilitas masyarakat, distribusi barang, serta pertumbuhan ekonomi suatu wilayah.

Menurut Badan Standardisasi Nasional dalam SNI 1725:2016, jembatan jalan raya harus dirancang agar mampu menahan berbagai jenis pembebanan yang bekerja selama umur layanan struktur. Perencanaan jembatan harus memperhatikan aspek kekuatan, stabilitas, keamanan, kenyamanan, serta ketahanan terhadap pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas yang terus meningkat.

Jembatan jalan raya memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu :

1. Dirancang untuk menahan beban lalu lintas kendaraan bermotor.
2. Mengacu pada standar pembebanan jembatan seperti SNI 1725:2016.
3. Memiliki lebar jalur yang disesuaikan dengan klasifikasi jalan dan volume lalu lintas.
4. Dirancang untuk memberikan keamanan dan kenyamanan bagi pengguna jalan.

Dalam perencanaannya, jembatan jalan raya harus mampu menahan berbagai jenis beban yang bekerja pada struktur. Beban utama yang diperhitungkan meliputi:

1. Beban kendaraan seperti truk, mobil, dan kendaraan berat lainnya.
2. Beban dinamis akibat getaran dan pengaruh pergerakan kendaraan.
3. Beban rem dan gaya tumbukan kendaraan.
4. Beban angin, gempa, dan pengaruh lingkungan lainnya.

Menurut SNI 1725:2016, pembebanan kendaraan pada jembatan diperhitungkan menggunakan beban lajur dan beban truk yang mewakili kondisi lalu lintas aktual di lapangan. Selain itu, faktor dinamis juga diperhitungkan karena kendaraan yang bergerak dapat menimbulkan getaran dan peningkatan gaya pada struktur jembatan.

Jembatan jalan raya memiliki beberapa kelebihan dibanding jenis jembatan lainnya. Keberadaan jembatan ini sangat membantu memperlancar transportasi darat sehingga mobilitas masyarakat dan distribusi barang menjadi lebih efektif dan efisien. Selain itu, jembatan jalan raya juga merupakan jenis jembatan yang paling umum digunakan karena dapat diterapkan pada berbagai kondisi medan dan klasifikasi jalan.

Kelebihan jembatan jalan raya antara lain :

1. Mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi barang.
2. Menjadi sarana transportasi utama pada jaringan jalan.
3. Dapat digunakan untuk berbagai jenis kendaraan.
4. Paling umum digunakan dalam infrastruktur transportasi.

Di Indonesia, sebagian besar jembatan yang dibangun merupakan jembatan jalan raya, baik pada jalan nasional, jalan provinsi, maupun jalan daerah. Contohnya adalah jembatan yang menghubungkan antarwilayah perkotaan, jalan lintas provinsi, serta jalan nasional yang memiliki volume lalu lintas tinggi.

Dengan demikian, jembatan jalan raya memiliki peranan penting dalam mendukung konektivitas wilayah dan perkembangan infrastruktur transportasi sehingga perencanaannya harus memenuhi standar keamanan dan pelayanan yang berlaku.

b. Jembatan Kereta Api (*Railway Bridge*)

Jembatan kereta api (*railway bridge*) adalah jembatan yang dirancang khusus untuk melayani jalur rel kereta api dengan karakteristik pembebanan yang lebih besar dibanding jembatan jalan raya. Struktur jembatan kereta api harus mampu menahan beban gandar (*axle load*) yang tinggi, getaran, serta pengaruh dinamis akibat pergerakan kereta dengan kecepatan tertentu. Oleh karena itu, jembatan kereta api umumnya memiliki tingkat kekakuan dan stabilitas struktur yang lebih tinggi dibanding jembatan kendaraan biasa.

Menurut E. C. Hambly dalam *Bridge Deck Behaviour*, jembatan kereta api dirancang dengan mempertimbangkan pengaruh pembebanan berulang dan getaran dinamis yang terjadi akibat lintasan kereta. Beban tersebut dapat menimbulkan tegangan siklik yang mempengaruhi umur layanan struktur apabila tidak direncanakan dengan baik (Hambly, 1991).

Karakteristik utama jembatan kereta api antara lain :

1. Menahan beban terpusat dari roda kereta api.
2. Menerima beban dinamis tinggi akibat kecepatan kereta.
3. Memiliki tingkat kekakuan struktur yang tinggi.
4. Memerlukan kestabilan struktur yang baik untuk menjaga kenyamanan dan keamanan perjalanan kereta.

Dalam perencanaannya, jembatan kereta api harus memperhitungkan beberapa jenis pembebanan utama, yaitu :

1. Beban gandar (axle load) dari roda kereta.
2. Beban dinamis akibat kecepatan kereta.
3. Getaran yang ditimbulkan selama operasi kereta.
4. Beban rem dan gaya longitudinal lainnya.

Beban gandar pada jembatan kereta api umumnya lebih besar dibanding kendaraan jalan raya sehingga elemen struktur seperti gelagar dan rangka jembatan harus memiliki kapasitas yang tinggi. Selain itu, pengaruh getaran dan resonansi juga menjadi faktor penting dalam perencanaan karena dapat mempengaruhi kenyamanan serta kestabilan struktur.

Jembatan kereta api memiliki beberapa kelebihan, antara lain :

1. Memiliki kapasitas angkut yang besar.
2. Memiliki stabilitas struktur yang tinggi.
3. Mampu melayani transportasi massal secara efisien.
4. Memiliki umur layanan yang panjang apabila dipelihara dengan baik.

Namun demikian, jembatan kereta api juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu :

1. Biaya konstruksi relatif tinggi.
2. Membutuhkan tingkat presisi yang tinggi dalam perencanaan dan pelaksanaan.
3. Pemeliharaan struktur harus dilakukan secara berkala.
4. Sensitif terhadap penurunan atau deformasi struktur.

Di Indonesia, jembatan kereta api banyak digunakan pada jalur utama perkeretaapian untuk menghubungkan lintasan yang terhalang sungai, jalan raya,

maupun lembah. Struktur jembatan ini harus dirancang dengan standar keamanan tinggi karena berhubungan langsung dengan keselamatan transportasi massal.

c. Jembatan Pejalan Kaki (*Pedestrian Bridge*)

Jembatan pejalan kaki (*pedestrian bridge*) adalah jembatan yang dirancang khusus untuk melayani pejalan kaki dan kendaraan ringan seperti sepeda. Jembatan ini biasanya dibangun untuk meningkatkan keselamatan pengguna jalan dengan memisahkan jalur pejalan kaki dari lalu lintas kendaraan bermotor. Selain berfungsi sebagai sarana penyeberangan, jembatan pejalan kaki juga sering dirancang sebagai elemen estetika pada kawasan perkotaan.

Menurut W. F. Chen dan Lian Duan dalam *Bridge Engineering Handbook*, jembatan pejalan kaki harus dirancang tidak hanya berdasarkan kekuatan struktur, tetapi juga mempertimbangkan aspek kenyamanan pengguna, getaran akibat langkah kaki, serta nilai estetika struktur (Chen & Duan, 2014).

Karakteristik utama jembatan pejalan kaki antara lain :

1. Memiliki pembebanan yang relatif lebih kecil dibanding jembatan kendaraan.
2. Lebih menekankan aspek kenyamanan dan keselamatan pengguna.
3. Desain struktur sering mempertimbangkan nilai estetika dan arsitektur.
4. Memiliki dimensi yang lebih ramping dan ringan.

Beban utama yang bekerja pada jembatan pejalan kaki meliputi :

1. Beban manusia (*uniform load*).
2. Beban dinamis akibat langkah kaki.
3. Beban angin dan pengaruh lingkungan lainnya.

Walaupun beban yang diterima relatif kecil, pengaruh getaran akibat langkah pejalan kaki perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan ketidaknyamanan pengguna apabila frekuensi getaran mendekati frekuensi alami struktur.

Jembatan pejalan kaki memiliki beberapa kelebihan, yaitu :

1. Meningkatkan keselamatan pejalan kaki.
2. Mengurangi konflik antara kendaraan dan pejalan kaki.
3. Dapat menjadi elemen estetika kota.
4. Membantu meningkatkan kenyamanan akses penyeberangan.

Namun demikian, jembatan pejalan kaki juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain :

1. Memerlukan ruang tambahan untuk akses tangga atau ramp.
2. Membutuhkan perawatan agar tetap aman dan nyaman digunakan.
3. Efektivitas penggunaan tergantung pada lokasi dan aksesibilitas.

Di kawasan perkotaan, jembatan pejalan kaki sering dibangun di area dengan volume lalu lintas tinggi seperti jalan arteri, kawasan komersial, terminal, dan stasiun. Selain sebagai fasilitas keselamatan, desain jembatan pejalan kaki modern juga sering menjadi ikon arsitektur suatu kota.

2.3 Komponen Struktur Jembatan

Struktur jembatan secara umum terdiri dari dua bagian utama, yaitu struktur atas (*superstructure*) dan struktur bawah (*substructure*). Kedua bagian ini bekerja secara sistematis untuk menyalurkan beban dari kendaraan hingga ke tanah dasar.

Menurut Chen & Duan (2014), sistem struktur jembatan secara umum dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu struktur atas (*superstructure*), struktur bawah (*substructure*), dan elemen pendukung lainnya.

2.3.1. Struktur Atas (*Superstructure*)

Struktur atas adalah bagian jembatan yang secara langsung menerima beban lalu lintas, baik beban mati maupun beban hidup, kemudian menyalurkannya ke struktur bawah melalui sistem perletakan.

Menurut Hibbeler (2015), struktur atas bekerja dominan terhadap gaya lentur, geser, dan torsi akibat beban kendaraan.

Komponen Struktur Atas:

a. Pelat Lantai (*Deck Slab*)

Pelat lantai (*deck*) merupakan salah satu komponen utama dari struktur atas (*superstructure*) jembatan yang berfungsi sebagai permukaan tempat kendaraan melintas. Pelat lantai menerima langsung beban lalu lintas dan meneruskannya ke elemen struktur di bawahnya, seperti gelagar.

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2015), pelat lantai dirancang untuk menahan beban kendaraan serta mendistribusikan beban tersebut secara merata ke sistem struktur utama jembatan.

Fungsi:

1. Menyediakan jalur bagi kendaraan dan pengguna jalan.
2. Menerima beban kendaraan, pejalan kaki, dan beban tambahan lainnya.
3. Menyalurkan beban ke gelagar utama dan melintang.
4. Berperan dalam meningkatkan kekakuan sistem jembatan secara keseluruhan.

Karakteristik:

1. Umumnya terbuat dari beton bertulang
 2. Dirancang terhadap beban lentur dan geser
- b. Gelagar Utama (*Main Girder*)

Gelagar utama (*main girder*) adalah elemen struktur utama pada jembatan yang berfungsi menahan dan menyalurkan beban dari lantai kendaraan (*deck*) ke struktur bawah, yaitu pier dan abutment. Gelagar ini merupakan komponen paling dominan dalam sistem struktur atas (*superstructure*) karena memikul sebagian besar beban lentur. Gelagar Melintang (*Cross Girder / Diaphragm*).

Dalam konteks evaluasi kinerja jembatan, gelagar utama menjadi fokus utama karena elemen ini sangat menentukan kapasitas daya dukung dan tingkat keamanan struktur.

Fungsi:

1. Menahan beban lentur (*bending moment*) akibat beban mati dan beban hidup
 2. Menyalurkan beban dari deck ke tumpuan (*bearing, pier, dan abutment*)
 3. Menahan gaya geser (*shear force*) yang terjadi sepanjang bentang
 4. Menjaga kestabilan struktur jembatan secara keseluruhan
 5. Berperan dalam distribusi beban bersama balok melintang (*cross beam/diaphragm*)
- c. Gelagar Melintang (*Cross Beam / Diaphragm*)

Gelagar melintang atau *cross beam (diaphragm)* merupakan elemen struktur yang dipasang melintang terhadap arah gelagar utama pada jembatan. Elemen ini berfungsi sebagai penghubung antar gelagar utama sehingga membentuk sistem struktur yang lebih kaku dan stabil.

Menurut pedoman perencanaan jembatan, diaphragm berperan penting dalam menjaga kestabilan lateral serta mendistribusikan beban secara merata ke seluruh gelagar utama (Kementerian PUPR, 2015).

Fungsi:

1. Beban yang tidak merata pada pelat lantai akan disalurkan ke beberapa gelagar utama melalui gelagar melintang.
2. Dengan adanya pengaku melintang, struktur menjadi lebih kaku terhadap deformasi.
3. Mencegah terjadinya tekuk lateral (*lateral buckling*) pada gelagar utama, khususnya pada jembatan baja.
4. Membantu mengurangi lendutan yang berlebihan akibat beban kendaraan.

d. Trotoar

Trotoar jembatan adalah bagian dari struktur atas jembatan yang diperuntukkan bagi pejalan kaki dan terletak di sisi kiri dan/atau kanan lantai kendaraan (*deck*). Trotoar berfungsi sebagai jalur khusus yang terpisah dari lalu lintas kendaraan guna menjamin keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan.

Dalam sistem struktur jembatan, trotoar termasuk elemen pelengkap (*secondary structure*), namun tetap memiliki kontribusi terhadap pembebanan dan kinerja keseluruhan jembatan.

Fungsi:

1. Menyediakan jalur aman bagi pejalan kaki
2. Memisahkan lalu lintas kendaraan dan pejalan kaki
3. Meningkatkan keselamatan pengguna jembatan.
4. Menambah nilai pelayanan dan kenyamanan jembatan
5. Sebagai elemen pelindung (*buffer zone*) terhadap kendaraan

Menurut Hambly (1991), kegagalan struktur atas sering terjadi akibat kelelahan material (*fatigue*) dan retak akibat beban berulang (*repeated loading*).

2.3.2. Struktur Bawah (*Substructure*)

Struktur bawah (*substructure*) adalah bagian dari jembatan yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas (*superstructure*) ke tanah dasar atau lapisan tanah pendukung. Struktur bawah memegang peranan penting dalam menjamin kestabilan dan keamanan jembatan secara keseluruhan.

Struktur ini dirancang untuk menahan berbagai jenis beban, baik vertikal maupun horizontal, serta harus mampu beradaptasi dengan kondisi tanah dan lingkungan setempat. Menurut Bowles (1997), stabilitas struktur bawah sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik tanah pendukung.

Struktur bawah memiliki beberapa fungsi utama, yaitu:

1. Menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah dasar
2. Menjamin kestabilan jembatan terhadap gaya vertikal dan lateral
3. Menahan tekanan tanah dan gaya hidrolis (khususnya pada jembatan sungai)
4. Menjaga posisi dan keseimbangan struktur jembatan

Struktur bawah jembatan terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu:

a. *Abutment*

Abutment atau kepala jembatan merupakan bagian dari struktur bawah (*substructure*) jembatan yang berfungsi sebagai penopang ujung struktur atas (*superstructure*) sekaligus sebagai penahan tanah timbunan di belakangnya. *Abutment* menerima dan menyalurkan beban dari gelagar jembatan ke pondasi, kemudian diteruskan ke tanah dasar secara aman.

Selain itu, *abutment* juga berfungsi sebagai elemen transisi antara jembatan dan jalan pendekat, sehingga harus mampu mengakomodasi perbedaan penurunan (*settlement*) antara struktur jembatan dan tanah timbunan.

Secara umum, fungsi utama *abutment* adalah sebagai berikut:

1. Menopang beban vertikal dari struktur atas (beban mati dan beban hidup).
2. Menahan tekanan lateral tanah timbunan di belakang *abutment*.
3. Menahan gaya horizontal seperti gaya rem kendaraan, gaya gempa, dan gaya angin.
4. Menyalurkan seluruh beban ke pondasi dan tanah dasar.
5. Menjaga stabilitas oprit (jalan pendekat) agar tidak mengalami longsor atau penurunan berlebih.

Abutment terdiri dari beberapa elemen utama, yaitu:

1. Dinding *Abutment* (*Stem Wall*), bagian vertikal yang menahan tanah timbunan dan menerima beban dari struktur atas.

2. Pelat Dudukan (*Bearing Seat*), tempat perletakan bearing (perletakan jembatan) yang menghubungkan struktur atas dengan abutment.
3. Sayap (*Wing Wall*), struktur samping yang berfungsi menahan tanah timbunan agar tidak longsor ke arah samping.
4. *Backwall*, dinding belakang yang berfungsi sebagai pembatas antara struktur jembatan dan timbunan.
5. Fondasi *Abutment*, bagian paling bawah yang menyalurkan beban ke tanah, dapat berupa fondasi dangkal atau fondasi dalam (tiang pancang/bored pile).

b. Pilar (*Pier*)

Pilar (*pier*) adalah bagian dari struktur bawah (*substructure*) jembatan yang terletak di antara dua bentang dan berfungsi sebagai penopang antara struktur atas (*superstructure*). Pilar menerima beban dari gelagar jembatan dan meneruskannya ke fondasi, kemudian disalurkan ke tanah dasar.

Pada jembatan yang melintasi sungai, pilar biasanya berada di tengah aliran, sehingga selain menerima beban struktur, juga harus mampu menahan pengaruh hidraulika seperti arus air dan gerusan (*scour*).

Fungsi utama pilar dalam struktur jembatan adalah:

1. Menopang beban vertikal dari struktur atas (beban mati dan beban hidup).
2. Membagi bentang jembatan menjadi beberapa segmen agar lebih efisien secara struktural.
3. Menyalurkan beban ke fondasi dan tanah dasar.
4. Menahan gaya horizontal seperti gaya gempa, angin, dan gaya rem kendaraan.
5. Menahan pengaruh gaya hidrodinamis akibat aliran sungai.

Secara umum, pilar terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu:

1. Kepala Pilar (*Pier Cap*), bagian atas pilar yang berfungsi sebagai dudukan gelagar dan tempat perletakan (bearing).
2. Badan Pilar (*Pier Shaft/Column*), bagian vertikal yang menyalurkan beban dari pier cap ke fondasi.

3. Fondasi Pilar, struktur bawah yang menyalurkan beban ke tanah, dapat berupa fondasi dangkal atau fondasi dalam seperti tiang pancang atau bored pile.
4. Pelindung Pilar (*Cutwater*) (opsional), bagian berbentuk runcing pada pilar untuk mengurangi tekanan arus air dan meminimalkan gerusan.

c. Pondasi

Pondasi jembatan adalah bagian dari struktur bawah (*substructure*) yang berfungsi untuk menyalurkan seluruh beban dari struktur atas (*superstructure*), abutment, dan pilar ke tanah dasar secara aman. Pondasi harus direncanakan agar mampu mendukung beban tanpa mengalami kegagalan daya dukung, penurunan berlebih (*excessive settlement*), maupun ketidakstabilan lainnya.

Pada jembatan yang melintasi sungai, pondasi memiliki peran yang sangat penting karena harus mampu beradaptasi terhadap kondisi tanah yang bervariasi serta pengaruh lingkungan seperti aliran air, gerusan (*scour*), dan fluktuasi muka air.

Fungsi utama pondasi pada jembatan meliputi:

1. Menyalurkan beban struktur ke tanah dasar secara merata.
2. Menjamin stabilitas struktur terhadap gaya vertikal, horizontal, dan momen.
3. Mengontrol penurunan (*settlement*) agar tetap dalam batas yang diizinkan.
4. Menahan gaya lateral akibat gempa, angin, dan tekanan tanah.
5. Mengamankan struktur terhadap pengaruh gerusan Mengamankan struktur terhadap pengaruh gerusan (*scouring*).

2.3.3. Sistem Perletakan (*Bearing*)

Bearing adalah elemen yang terletak di antara superstructure dan substructure yang berfungsi untuk menyalurkan beban sekaligus mengakomodasi pergerakan struktur.

Fungsi bearing pada jembatan meliputi:

1. Meneruskan beban vertikal
2. Mengakomodasi rotasi akibat lendutan
3. Menampung pergerakan akibat temperatur, susut, dan creep

Jenis bearing:

1. *Elastomeric bearing* (karet)
2. Pot bearing
3. *Spherical bearing*

Menurut AASHTO (2012), pemilihan bearing harus mempertimbangkan kapasitas beban, rotasi, serta pergerakan longitudinal struktur.

2.3.4. Sambungan Siar Muai (*Expansion Joint*)

Expansion joint adalah elemen yang memungkinkan pergerakan longitudinal jembatan akibat perubahan temperatur dan beban lalu lintas.

Fungsi utama pada jembatan meliputi:

1. Mengakomodasi pemuaian dan penyusutan
2. Mencegah kerusakan pada deck
3. Menjaga kenyamanan kendaraan

Menurut FHWA (2010), kerusakan *expansion joint* merupakan salah satu penyebab utama gangguan kenyamanan dan penurunan umur layanan jembatan.

2.3.5. Interaksi Struktur Jembatan

Struktur jembatan merupakan sistem terpadu yang terdiri dari superstructure, substructure, dan bearing system yang saling berinteraksi.

Menurut Chen & Duan (2014), kekakuan relatif antar elemen sangat mempengaruhi distribusi gaya dalam struktur. Ketidakseimbangan kekakuan dapat menyebabkan konsentrasi tegangan yang berpotensi menimbulkan kerusakan lokal.

2.4 Pembebanan Jembatan

2.4.1 Standar Pembebanan

Pembebanan jembatan merupakan aspek fundamental dalam perencanaan dan evaluasi struktur jembatan karena seluruh elemen struktur dirancang berdasarkan kombinasi beban yang bekerja selama umur rencana. Menurut SNI 1725:2016, pembebanan jembatan harus mempertimbangkan berbagai jenis beban yang bekerja secara statis maupun dinamis untuk menjamin keamanan, kenyamanan, dan keandalan struktur.

Menurut Chen & Duan (2014), analisis beban pada jembatan tidak hanya mempertimbangkan besar beban, tetapi juga sifat beban yang berubah terhadap waktu, interaksi kendaraan–struktur, serta pengaruh lingkungan.

2.4.2 Klasifikasi Beban pada Jembatan

Pembebanan jembatan merupakan aspek penting dalam perencanaan dan evaluasi struktur jembatan, karena seluruh elemen struktur harus mampu menahan kombinasi beban yang bekerja selama umur layan. Penentuan beban mengacu pada standar perencanaan jembatan yang berlaku di Indonesia, seperti SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan.

a. Beban Mati (*Dead Load*)

Beban mati adalah beban permanen yang berasal dari berat sendiri seluruh elemen struktur jembatan serta komponen tambahan yang melekat secara tetap selama umur layan jembatan. Beban ini bekerja secara terus-menerus dan nilainya relatif konstan.

Dalam perencanaan jembatan, beban mati merupakan dasar utama dalam analisis struktur karena selalu ada dan mempengaruhi seluruh sistem struktur, baik struktur atas maupun struktur bawah.

Komponen beban mati meliputi:

1. Berat sendiri struktur utama (gelagar, pelat lantai, diafragma)
2. Struktur bawah (abutment, pier)
3. Perkerasan jalan
4. Trotoar dan railing
5. Utilitas (pipa, kabel, dll)

Beban mati dihitung berdasarkan volume dan berat jenis material yang digunakan, seperti beton bertulang, baja, atau aspal.

Secara umum, beban mati dihitung dengan persamaan:

$$DL = \gamma \times V$$

Keterangan:

1. DL = beban mati (kN)
2. γ = berat jenis material (kN/m³)
3. V = volume elemen (m³)

Menurut Hibbeler (2015), beban mati bersifat konstan dan menjadi komponen dominan dalam analisis struktur jembatan.

b. Beban Hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban yang bekerja pada jembatan akibat aktivitas yang bersifat sementara dan berubah-ubah selama umur layan struktur. Beban ini terutama berasal dari lalu lintas kendaraan, pejalan kaki, serta beban bergerak lainnya yang melintasi jembatan.

Berbeda dengan beban mati yang bersifat permanen, beban hidup memiliki variasi dalam besar, posisi, dan waktu terjadinya, sehingga menjadi salah satu faktor kritis dalam perencanaan dan evaluasi struktur jembatan.

Jenis beban hidup meliputi:

1. Beban kendaraan (truk, mobil)
2. Beban pejalan kaki
3. Beban dinamis akibat pergerakan kendaraan

Dalam standar SNI, beban hidup biasanya dimodelkan dalam bentuk :

1. Beban lajur "D"
2. Beban truk "T"

Beban ini juga mempertimbangkan faktor kejut (*impact factor*) akibat getaran kendaraan. Menurut Nowak & Collins (2012), beban lalu lintas merupakan beban kritis dalam evaluasi kapasitas jembatan karena sifatnya yang variatif dan berulang.

c. Beban Dinamis pada Jembatan

Beban dinamis adalah beban yang bekerja pada struktur jembatan dengan besar, arah, atau titik kerja yang berubah terhadap waktu. Beban ini menimbulkan respons struktur berupa getaran, percepatan, dan gaya inersia yang tidak terjadi pada beban statis.

Berbeda dengan beban statis, beban dinamis dapat menyebabkan efek tambahan seperti resonansi, kelelahan material (*fatigue*), dan peningkatan tegangan akibat faktor kejut.

Jenis-Jenis Beban Dinamis pada Jembatan:

1. Beban Lalu Lintas Dinamis (*Dynamic Traffic Load*)
2. Beban Gempa (*Seismic Load*)
3. Beban Angin Dinamis (*Dynamic Wind Load*)
4. Beban Tumbukan (*Impact Load*)

2.4.3 Kombinasi Pembebanan

Beban hidup adalah beban yang bekerja pada jembatan akibat aktivitas yang bersifat sementara dan berubah-ubah selama umur layan struktur. Beban ini terutama berasal dari lalu lintas kendaraan, pejalan kaki, serta beban bergerak lainnya yang melintasi jembatan.

Dalam perencanaan jembatan di Indonesia, kombinasi pembebanan mengacu pada standar SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, yang mengatur faktor beban dan kombinasi yang harus dipenuhi.

Tujuan utama penerapan kombinasi pembebanan adalah:

1. Menjamin keamanan struktur terhadap kondisi terburuk
2. Mengantisipasi kemungkinan beban bekerja bersamaan
3. Menghindari kegagalan struktur akibat beban ekstrem
4. Menentukan dimensi elemen struktur yang optimal dan ekonomis

Beberapa prinsip dasar dalam kombinasi pembebanan:

1. Tidak semua beban maksimum terjadi secara bersamaan
2. Setiap jenis beban memiliki faktor beban (*load factor*)
3. Kombinasi disusun berdasarkan kondisi paling kritis
4. Mempertimbangkan beban tetap (*dead load*) dan beban variabel (*live load*, dll)

Secara umum, kombinasi pembebanan pada jembatan dibagi menjadi beberapa kondisi sebagai berikut:

a. Kombinasi Beban Layan (*Serviceability Limit State / SLS*)

Kombinasi Beban Layan atau *Serviceability Limit State (SLS)* adalah kondisi batas yang digunakan untuk memastikan bahwa struktur jembatan tetap berfungsi dengan baik selama masa layan tanpa mengalami gangguan yang dapat mempengaruhi kenyamanan pengguna, estetika, maupun keawetan struktur.

Berbeda dengan *Ultimate Limit State (ULS)* yang berfokus pada keamanan terhadap keruntuhan, SLS lebih menitikberatkan pada:

1. Pembatasan lendutan (*deflection*)
2. Pengendalian retak (*crack control*)
3. Pembatasan getaran (*vibration*)

Tabel 2.1 Kombinasi Beban Layan (SLS)

Kombinasi	DL	SDL	LL	WL	TU	Keterangan
Layan I	1,0	1,0	1,0	0,30	1,0	Operasi normal
Layan II	1,0	1,3	1,0	-	-	Kontrol slip
Layan III	1,0	0,8	1,0	-	-	Kontrol retak
Layan IV	1,0	-	1,0	0,7	-	Kolom

b. Kombinasi Beban *ULTIMATE LIMIT STATE (ULS)*

Ultimate Limit State (ULS) atau Kondisi Batas Ultimit adalah kondisi pembebanan yang digunakan untuk memastikan bahwa struktur jembatan memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan beban maksimum yang mungkin terjadi tanpa mengalami keruntuhan.

ULS berfokus pada keamanan struktural, terutama terhadap:

1. Kegagalan material (leleh atau patah)
2. Keruntuhan lentur (*bending failure*)
3. Geser (*shear failure*)
4. Torsi
5. Stabilitas struktur (*buckling/instabilitas*)

Jika SLS menilai “masih nyaman atau tidak”, maka ULS menilai “masih aman atau tidak”.

Tujuan utama analisis ULS adalah:

1. Menjamin keamanan struktur terhadap beban ekstrem
2. Mencegah keruntuhan total atau parsial jembatan
3. Menentukan kapasitas maksimum elemen struktur
4. Menjadi dasar desain penampang (dimensi dan tulangan)

Beban yang digunakan dalam kombinasi ULS meliputi:

1. Beban Mati (DL) seperti : Berat sendiri struktur, Aspal, trotoar, utilitas
2. Beban Hidup (LL), seperti : Beban kendaraan rencana, Beban pejalan kaki

3. Beban Tambahan, seperti : Gaya rem (*braking force*), Gaya sentrifugal (pada jembatan lengkung), Beban tumbukan (*impact*), Beban angin (*wind load*), Beban gempa (*earthquake load*), Tekanan tanah (*earth pressure*)

Tabel 2.2 Kombinasi pembebanan Ultimate Limit State (ULS) berdasarkan SNI 1725:2016 pada perencanaan jembatan

No	Jenis Kombinasi Beban	Persamaan Kombinasi ULS	Keterangan
1	Kombinasi dasar (gravitasi)	$1.2D + 1.6L$	Kombinasi utama beban mati dan beban hidup kendaraan
2	Kombinasi dengan beban angin	$1.2D + 1.0L + 1.0W$	Digunakan untuk kondisi beban angin signifikan
3	Kombinasi dengan gempa	$1.2D + 1.0L + 1.0E$	Digunakan untuk analisis kondisi seismik
4	Kombinasi beban rem (<i>braking</i>)	$1.2D + 1.6L + 1.0TB$	TB = gaya rem kendaraan
5	Kombinasi sentrifugal (jembatan lengkung)	$1.2D + 1.6L + 1.0CF$	CF = gaya sentrifugal akibat tikungan
6	Kombinasi temperatur	$1.2D + 1.0L + 1.0T$	T = pengaruh perubahan suhu
7	Kombinasi lengkap (kondisi kritis)	$1.2D + 1.6L + 1.0W + 1.0E$	Digunakan untuk evaluasi kondisi ekstrem tertentu

Keterangan Simbol:

D = Beban mati (Dead Load)
 L = Beban hidup (Live Load)
 W = Beban angin (Wind Load)
 E = Beban gempa (Earthquake Load)
 TB = Gaya rem (Braking Force)
 CF = Gaya sentrifugal
 T = Beban temperatur

2.4.4 Distribusi Beban pada Struktur Jembatan

Aliran beban pada jembatan terjadi secara bertahap dari struktur atas ke struktur bawah hingga tanah dasar.

Skema distribusi beban:

1. Beban kendaraan (LL) → deck slab
2. Deck slab → gelagar utama
3. Gelagar utama → bearing
4. Bearing → abutment/pier
5. Abutment/pier → fondasi
6. Fondasi → tanah dasar

Menurut Hambly (1991), distribusi beban sangat dipengaruhi oleh kekakuan elemen struktur dan sistem sambungan antar komponen.

2.4.5 Prinsip Analisis Pembebanan

Tahapan analisis pembebanan jembatan adalah:

1. Identifikasi seluruh jenis beban
2. Penentuan nilai beban sesuai SNI
3. Penerapan faktor dinamis (IM)
4. Penyusunan kombinasi beban
5. Analisis gaya dalam (momen, geser, aksial)
6. Evaluasi kapasitas struktur

Menurut Troitsky (1994), ketepatan dalam penentuan beban merupakan faktor paling kritis dalam desain jembatan karena langsung mempengaruhi keamanan struktur.

2.5 Evaluasi Kinerja Struktur Jembatan

Evaluasi kinerja struktur jembatan merupakan proses penilaian untuk menentukan tingkat keamanan, kelayakan, dan kemampuan layanan suatu jembatan dalam menahan beban yang bekerja selama umur rencana. Menurut AASHTO (2012), evaluasi jembatan tidak hanya berfokus pada kekuatan struktur, tetapi juga mencakup aspek layanan, durabilitas, dan keselamatan pengguna.

Dalam konteks rekayasa struktur, evaluasi kinerja dilakukan untuk mengidentifikasi apakah jembatan masih memenuhi kriteria desain atau telah mengalami penurunan kapasitas akibat kerusakan, usia, atau peningkatan beban lalu lintas. Menurut Chen & Duan (2014), evaluasi jembatan menjadi bagian penting dalam manajemen infrastruktur karena sebagian besar jembatan eksisting mengalami degradasi seiring waktu.

2.5.1 Tujuan Evaluasi Kinerja Jembatan

Evaluasi kinerja struktur jembatan dilakukan dengan tujuan:

1. Menilai kondisi aktual struktur jembatan
2. Menentukan tingkat kerusakan dan degradasi material
3. Menilai kapasitas struktur terhadap beban rencana
4. Menentukan kebutuhan perbaikan atau perkuatan
5. Menjamin keselamatan pengguna jalan

Menurut FHWA (Federal Highway Administration, 2010), evaluasi jembatan merupakan langkah penting dalam program pemeliharaan untuk mencegah kegagalan struktur secara tiba-tiba.

2.5.2 Parameter Evaluasi Kinerja Struktur

Dalam evaluasi struktur jembatan, beberapa parameter utama yang digunakan adalah:

a. Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan beban tanpa mengalami keruntuhan.

Secara umum diperiksa melalui:

1. Tegangan maksimum
2. Momen lentur
3. Gaya geser
4. Kapasitas aksial

Menurut Hibbeler (2015), struktur dianggap aman apabila tegangan yang terjadi masih lebih kecil dari tegangan izin material.

b. Lendutan (*Deflection*)

Lendutan adalah perubahan bentuk struktur akibat beban.

Rumus umum lendutan balok sederhana:

$$\Delta = \left(\frac{5qL^4}{384I} \right)$$

Keterangan :

Δ = lendutan (mm)

q = beban merata (kN/m)

L = panjang bentang (m)

E = modulus elastisitas

I = momen inersia

Menurut Nilson, Darwin & Dolan (2010), lendutan berlebih dapat mengganggu kenyamanan pengguna dan mengindikasikan penurunan kekakuan struktur.

c. Retak (*Cracking*)

Retak merupakan indikator utama kerusakan pada struktur beton.

Jenis retak:

1. Retak lentur
2. Retak geser
3. Retak akibat susut (*shrinkage*)

Menurut ACI 224R, lebar retak harus dikontrol agar tidak mempengaruhi durabilitas dan kekuatan struktur.

d. Korosi Tulangan

Korosi terjadi akibat reaksi kimia antara baja tulangan dan lingkungan (air, oksigen, dan klorida).

Dampak korosi:

1. Penurunan luas penampang baja
2. Penurunan kapasitas struktur
3. Retak dan spalling beton

Menurut Mangat & Elgarf (1999), korosi merupakan salah satu penyebab utama kegagalan jangka panjang pada jembatan beton bertulang.

e. Getaran dan Kenyamanan (*Vibration Serviceability*)

Getaran berlebih dapat mengurangi kenyamanan pengguna jalan. Menurut ISO 10137, struktur jembatan harus memiliki tingkat getaran yang tidak mengganggu kenyamanan manusia.

2.5.3 Metode Evaluasi Struktur Jembatan

a. Inspeksi Visual

Inspeksi visual dilakukan untuk mengidentifikasi kerusakan fisik seperti:

1. Retak
2. Penurunan (*settlement*)

3. Korosi
4. Kerusakan sambungan

Menurut FHWA (2010), inspeksi visual merupakan metode paling dasar namun sangat penting dalam evaluasi awal.

b. Analisis Struktur

Analisis struktur dilakukan untuk menghitung gaya dalam seperti:

1. Momen lentur
2. Gaya geser
3. Gaya aksial

Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan kapasitas penampang.

c. *Load Rating* (Penilaian Beban)

Load rating adalah metode untuk menentukan kemampuan jembatan dalam memikul beban tertentu. Menurut AASHTO (2012), *load rating* digunakan untuk menentukan apakah jembatan masih aman untuk lalu lintas eksisting atau perlu pembatasan beban.

d. Pengujian Material

Pengujian dapat dilakukan dengan:

- a. *Core drill* beton
- b. Uji kuat tekan
- c. *Rebar scanning*
- d. *Hammer test* (NDT)

Menurut Neville (2011), pengujian material sangat penting untuk mengetahui kualitas aktual beton di lapangan.

2.6 Perkuatan Struktur Jembatan

Perkuatan struktur jembatan merupakan upaya untuk meningkatkan kapasitas, kekakuan, dan umur layanan struktur yang telah mengalami penurunan kinerja akibat faktor usia, kerusakan, peningkatan beban lalu lintas, maupun pengaruh lingkungan. Menurut Chen & Duan (2014), perkuatan dilakukan apabila kapasitas struktur eksisting tidak lagi memenuhi persyaratan desain atau standar yang berlaku.

Menurut AASHTO (2012), strategi perkuatan harus mempertimbangkan kondisi struktur, tingkat kerusakan, efisiensi biaya, serta kemudahan pelaksanaan di lapangan.

2.6.1 Tujuan Perkuatan Struktur

Perkuatan struktur jembatan merupakan suatu upaya teknis yang dilakukan untuk meningkatkan kapasitas, kinerja, serta umur layan suatu struktur yang telah mengalami penurunan kondisi akibat berbagai faktor, seperti beban berlebih, degradasi material, perubahan fungsi, maupun pengaruh lingkungan. Dalam konteks evaluasi kinerja jembatan, perkuatan menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan dengan pembangunan ulang struktur secara keseluruhan.

Secara umum, tujuan utama perkuatan struktur jembatan dapat dijabarkan sebagai berikut:

a. Meningkatkan Kapasitas Daya Dukung Struktur

Salah satu tujuan utama perkuatan adalah untuk meningkatkan kapasitas struktur dalam menahan beban, baik beban mati maupun beban hidup. Seiring dengan peningkatan volume dan beban kendaraan, banyak jembatan eksisting yang tidak lagi memenuhi persyaratan pembebanan terbaru.

Perkuatan dilakukan agar struktur mampu memenuhi standar pembebanan terkini, seperti yang diatur dalam SNI 1725:2016. Menurut Badan Standardisasi Nasional (2016), struktur jembatan harus dirancang untuk menahan kombinasi beban yang telah diperbarui sesuai perkembangan lalu lintas dan kondisi lingkungan.

b. Memperpanjang Umur Layan Struktur (*Service Life Extension*)

Struktur jembatan mengalami penurunan kinerja akibat faktor usia, kelelahan material (*fatigue*), korosi, serta pengaruh lingkungan. Perkuatan dilakukan untuk memperpanjang umur layanan tanpa harus mengganti seluruh struktur.

Menurut *American Association of State Highway and Transportation Officials* (2017), rehabilitasi dan perkuatan struktur merupakan strategi penting dalam manajemen aset infrastruktur untuk menjaga keberlanjutan layanan jembatan.

c. Memperbaiki Kerusakan Struktur

Kerusakan pada elemen struktur seperti retak pada beton, korosi pada baja, atau penurunan pada fondasi dapat mengurangi kapasitas dan keamanan jembatan. Perkuatan dilakukan untuk memperbaiki atau mengkompensasi kerusakan tersebut.

Menurut *American Concrete Institute* (2014), metode perbaikan dan perkuatan harus mempertimbangkan jenis kerusakan, tingkat keparahan, serta mekanisme kegagalan yang mungkin terjadi pada struktur.

d. Menyesuaikan dengan Perubahan Fungsi atau Beban

Dalam beberapa kasus, jembatan mengalami perubahan fungsi, misalnya dari jalan lokal menjadi jalan arteri, sehingga beban yang diterima meningkat. Perkuatan diperlukan untuk menyesuaikan kapasitas struktur terhadap kebutuhan baru tersebut.

Perubahan standar desain dan peningkatan kelas jalan juga menjadi alasan dilakukannya perkuatan agar struktur tetap memenuhi persyaratan teknis yang berlaku (SNI 1725:2016).

e. Meningkatkan Kinerja Struktural dan Layan

Selain kekuatan, aspek kinerja layan seperti lendutan, getaran, dan retak juga menjadi pertimbangan dalam perkuatan. Struktur yang mengalami lendutan berlebih atau getaran yang tidak nyaman perlu diperkuat agar tetap memenuhi batas layan (*serviceability limit state*).

f. Meningkatkan Keamanan dan Keandalan Struktur

Perkuatan bertujuan untuk mengurangi risiko kegagalan struktur yang dapat membahayakan pengguna. Dengan meningkatkan faktor keamanan, struktur menjadi lebih andal dalam menghadapi kondisi ekstrem seperti gempa, banjir, dan beban berlebih.

Konsep keandalan struktur (*structural reliability*) menekankan pentingnya probabilitas kegagalan yang rendah selama umur rencana (AASHTO, 2017).

g. Efisiensi Biaya dan Waktu

Dibandingkan dengan pembangunan ulang, perkuatan struktur umumnya membutuhkan biaya dan waktu yang lebih kecil. Hal ini menjadikan perkuatan sebagai solusi yang lebih efisien, terutama untuk jembatan yang masih layak secara umum.

Menurut World Road Association (2018), strategi perkuatan dan rehabilitasi merupakan bagian penting dalam pengelolaan infrastruktur yang berkelanjutan dan ekonomis.

2.6.2 Prinsip Dasar Perkuatan Struktur

Perkuatan struktur harus memenuhi prinsip-prinsip berikut:

1. Kesesuaian material antara struktur lama dan bahan perkuatan
2. Transfer beban yang efektif antara elemen lama dan baru
3. Tidak menambah beban berlebih pada struktur eksisting
4. Kemudahan pelaksanaan dan pemeliharaan

Menurut Holloway & Teng (2008), keberhasilan perkuatan sangat bergantung pada kualitas ikatan (bonding) antara material lama dan material tambahan.

2.6.3 Metode Perkuatan Struktur Jembatan

a. Perkuatan dengan *Jacketing* Beton

Perkuatan dengan *Jacketing* Beton merupakan salah satu metode rehabilitasi struktur yang dilakukan dengan menambahkan lapisan beton baru pada elemen struktur eksisting seperti kolom, pier, balok, maupun gelagar jembatan. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas struktur, memperbesar dimensi penampang, serta memperbaiki kinerja elemen struktur yang mengalami penurunan kapasitas akibat umur layanan, kerusakan, atau peningkatan pembebanan.

Pada metode ini, beton baru dicor mengelilingi elemen struktur lama dan dihubungkan menggunakan tulangan tambahan serta *Adhesive Anchor* agar beton lama dan beton baru dapat bekerja secara monolit. Penambahan dimensi penampang menyebabkan luas beton dan luas tulangan meningkat sehingga kapasitas tekan, lentur, dan geser struktur menjadi lebih besar dibanding kondisi eksisting.

Menurut M. J. N. Priestley dkk. dalam *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, metode *Jacketing* merupakan salah satu teknik perkuatan yang efektif untuk meningkatkan kapasitas kolom terhadap pembebanan gempa karena mampu meningkatkan kekuatan, daktilitas, dan kekakuan struktur secara signifikan (Priestley et al., 1996).

Perkuatan dengan jacketing beton memiliki beberapa fungsi utama, antara lain :

1. Meningkatkan kapasitas tekan dan geser struktur.
2. Menambah kekakuan elemen struktur.
3. Mengurangi lendutan dan deformasi struktur.
4. Melindungi tulangan eksisting dari korosi dan kerusakan lingkungan.
5. Memperpanjang umur layanan struktur.

Pada konstruksi jembatan, metode jacketing beton umumnya diterapkan pada:

1. kolom jembatan,
2. pier,
3. abutment,
4. gelagar,
5. dan elemen struktur yang mengalami kerusakan atau penurunan kapasitas.

Keunggulan utama metode ini adalah pelaksanaannya relatif mudah karena menggunakan material beton dan tulangan yang umum digunakan dalam pekerjaan konstruksi. Selain itu, material yang dibutuhkan mudah diperoleh sehingga metode ini menjadi salah satu alternatif perkuatan yang ekonomis dan banyak diterapkan pada rehabilitasi jembatan.

Kelebihan metode *Jacketing* Beton antara lain :

1. Merupakan metode konvensional yang mudah diterapkan.
2. Material mudah diperoleh di lapangan.
3. Mampu meningkatkan kapasitas struktur secara signifikan.
4. Dapat meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur.
5. Biaya pelaksanaan relatif ekonomis dibanding penggantian struktur baru.

Meskipun demikian, metode jacketing beton juga memiliki beberapa kekurangan. Penambahan lapisan beton baru akan meningkatkan berat sendiri struktur sehingga dapat menambah beban mati pada elemen jembatan. Selain itu, pekerjaan pengecoran dan pemasangan tulangan membutuhkan waktu pelaksanaan yang relatif lebih lama dibanding metode perkuatan modern seperti FRP (*Fiber Reinforced Polymer*).

Kekurangan metode jacketing beton antara lain :

1. Menambah berat struktur eksisting.
2. Membutuhkan waktu pengerjaan yang relatif lama.
3. Memerlukan pekerjaan bekisting dan pengecoran.
4. Membutuhkan pengawasan mutu beton yang baik.
5. Memerlukan ikatan yang kuat antara beton lama dan beton baru.

Agar perkuatan bekerja secara optimal, permukaan beton eksisting biasanya dibersihkan dan dikasarkan terlebih dahulu sebelum dilakukan pemasangan tulangan tambahan dan pengecoran beton baru. Penggunaan *Adhesive Anchor* atau *Chemical Anchor* juga diperlukan untuk memastikan tulangan baru dapat terikat kuat dengan beton eksisting sehingga struktur bekerja secara monolit.

Dengan berbagai kelebihan tersebut, metode jacketing beton masih menjadi salah satu metode perkuatan yang paling banyak digunakan pada rehabilitasi jembatan dan bangunan beton bertulang karena efektif meningkatkan kapasitas serta memperpanjang umur layanan struktur.

b. Penambahan Pelat Baja (*Steel Plate Bonding*)

Penambahan pelat baja (*Steel Plate Bonding*) merupakan salah satu metode perkuatan struktur yang dilakukan dengan menempelkan pelat baja pada bagian tarik elemen struktur beton menggunakan perekat epoxy, baut ankur, atau kombinasi keduanya. Metode ini banyak digunakan pada balok, gelagar jembatan, dan pelat lantai yang mengalami penurunan kapasitas lentur akibat peningkatan beban, kerusakan struktur, maupun penurunan mutu material.

Prinsip kerja metode ini adalah meningkatkan kapasitas tarik pada daerah tarik elemen struktur sehingga tegangan tarik pada beton dapat dikurangi. Pelat baja yang dipasang pada bagian bawah balok atau gelagar akan bekerja membantu tulangan tarik dalam menahan momen lentur sehingga kapasitas struktur meningkat.

Menurut D. J. Oehlers dan M. A. Bradford dalam *Composite Steel and Concrete Structural Members*, penambahan pelat baja pada elemen beton bertulang dapat meningkatkan kapasitas lentur struktur sekitar 20–40% tergantung pada dimensi pelat, sistem sambungan, dan kondisi struktur eksisting (Oehlers & Bradford, 1995).

Pada metode *Steel Plate Bonding*, pelat baja biasanya dipasang pada :

1. bagian bawah balok,
2. sisi gelagar,
3. atau daerah yang mengalami tegangan tarik terbesar.

Sebelum pemasangan pelat baja, permukaan beton harus dibersihkan dan diratakan agar ikatan antara beton dan pelat baja menjadi optimal. Perkat epoxy digunakan untuk menghasilkan ikatan yang kuat sehingga pelat baja dan beton dapat bekerja secara bersama dalam menahan pembebanan.

Fungsi utama metode penambahan pelat baja antara lain :

1. Meningkatkan kapasitas lentur struktur.
2. Mengurangi tegangan tarik pada beton.
3. Mengurangi lendutan elemen struktur.
4. Memperbaiki kinerja struktur akibat kerusakan atau perubahan fungsi bangunan.
5. Memperpanjang umur layanan struktur.

Metode ini banyak digunakan pada rehabilitasi jembatan karena pelaksanaannya relatif cepat dan tidak memerlukan perubahan dimensi struktur yang besar. Selain itu, pemasangan pelat baja dapat dilakukan tanpa membongkar struktur eksisting sehingga gangguan terhadap lalu lintas dapat diminimalkan.

Kelebihan metode *Steel Plate Bonding* antara lain :

1. Efektif meningkatkan kapasitas lentur struktur.
2. Pelaksanaan relatif cepat dan sederhana.
3. Tidak memerlukan penambahan dimensi struktur yang besar.
4. Dapat diterapkan pada berbagai jenis elemen beton bertulang.
5. Cocok digunakan untuk rehabilitasi jembatan eksisting.

Meskipun memiliki banyak kelebihan, metode ini juga memiliki beberapa kekurangan. Pelat baja rentan mengalami korosi apabila terpapar lingkungan lembab atau agresif sehingga memerlukan perlindungan tambahan seperti pelapisan anti karat atau pengecatan berkala. Selain itu, kegagalan ikatan antara pelat baja dan beton dapat terjadi apabila kualitas pemasangan kurang baik.

Kekurangan metode steel plate bonding antara lain :

1. Rentan terhadap korosi.

2. Membutuhkan perlindungan tambahan seperti pengecatan anti karat.
3. Kualitas ikatan sangat bergantung pada pemasangan epoxy.
4. Dapat terjadi kegagalan lekat (debonding) antara pelat baja dan beton.
5. Membutuhkan pengawasan mutu pelaksanaan yang baik.

Dalam penerapannya pada struktur jembatan, metode ini sering digunakan untuk meningkatkan kapasitas lentur gelagar yang mengalami penurunan kinerja akibat peningkatan volume lalu lintas atau kerusakan struktur. Dengan pemasangan yang baik, metode steel plate bonding dapat menjadi solusi rehabilitasi yang efektif dan ekonomis untuk memperpanjang umur layanan jembatan.

c. Perkuatan dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) merupakan material komposit yang terdiri dari serat penguat (*Fiber Reinforcement*) dan resin sebagai matriks pengikat. Serat yang digunakan umumnya berupa serat karbon (*Carbon Fiber*), serat kaca (*Glass Fiber*), dan serat aramid (*Aramid Fiber*).

Menurut L. C. Hollaway dan J. G. Teng dalam *Strengthening and Rehabilitation of Civil Infrastructures Using FRP*, FRP merupakan salah satu material yang sangat efektif untuk perkuatan struktur beton karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi sehingga mampu meningkatkan kapasitas struktur tanpa menambah berat sendiri secara signifikan (Hollaway & Teng, 2008).

FRP terdiri dari dua komponen utama, yaitu :

1. Serat penguat (*Fiber Reinforcement*) yang berfungsi memberikan kekuatan tarik tinggi.
2. Resin matriks yang berfungsi mengikat serat dan mentransfer tegangan antarserat.

Jenis FRP yang paling umum digunakan dalam perkuatan struktur antara lain:

1. CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

CFRP menggunakan serat karbon sebagai material penguat. Jenis ini memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang sangat tinggi sehingga banyak digunakan pada struktur yang memerlukan peningkatan kapasitas besar.

2. GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*)

GFRP menggunakan serat kaca sebagai penguat. Material ini memiliki harga yang lebih ekonomis dibanding CFRP namun tetap memiliki ketahanan korosi dan kekuatan yang baik.

Dalam penerapannya pada struktur jembatan, FRP biasanya dipasang pada :

1. bagian bawah balok atau gelagar untuk meningkatkan kapasitas lentur,
2. sisi balok untuk meningkatkan kapasitas geser,
3. serta pada kolom untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas struktur.

Metode pemasangan FRP dilakukan dengan menempelkan lembaran atau pelat FRP menggunakan perekat epoxy pada permukaan beton yang telah dibersihkan dan dipersiapkan terlebih dahulu. Setelah terpasang, FRP akan bekerja bersama struktur eksisting dalam menahan pembebanan.

Fungsi utama penggunaan FRP dalam perkuatan struktur antara lain :

1. Meningkatkan kapasitas lentur dan geser struktur.
2. Memperbaiki retak pada elemen beton.
3. Meningkatkan kekakuan dan daktilitas struktur.
4. Melindungi struktur dari korosi dan pengaruh lingkungan.
5. Memperpanjang umur layanan struktur.

Metode perkuatan menggunakan FRP memiliki beberapa kelebihan dibanding metode konvensional. Material FRP memiliki berat yang sangat ringan sehingga tidak menambah beban mati struktur secara signifikan. Selain itu, FRP memiliki kekuatan tarik tinggi dan tahan terhadap korosi sehingga cocok digunakan pada lingkungan agresif seperti daerah pantai atau wilayah dengan kelembaban tinggi.

Kelebihan FRP antara lain :

1. Memiliki berat yang ringan.
2. Memiliki kekuatan tarik yang tinggi.
3. Tahan terhadap korosi dan bahan kimia.
4. Mudah diaplikasikan pada berbagai bentuk struktur.
5. Tidak memerlukan perubahan dimensi struktur yang besar.
6. Pelaksanaan relatif cepat.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, penggunaan FRP juga memiliki beberapa kekurangan. Harga material FRP relatif lebih mahal dibanding metode

perkuatan konvensional seperti jacketing beton atau pelat baja. Selain itu, material FRP sensitif terhadap suhu tinggi sehingga memerlukan perlindungan tambahan terhadap api atau panas berlebih.

Kekurangan FRP antara lain :

1. Biaya material relatif mahal.
2. Sensitif terhadap suhu tinggi dan api.
3. Membutuhkan kualitas pemasangan yang baik.
4. Ketergantungan pada kualitas perekat epoxy.
5. Memerlukan tenaga kerja yang terampil.

Dengan berbagai keunggulan tersebut, FRP menjadi salah satu metode perkuatan modern yang banyak digunakan pada rehabilitasi jembatan dan bangunan beton bertulang karena mampu meningkatkan kapasitas struktur secara efektif tanpa menambah berat struktur secara signifikan.

2.6.4 Pemilihan Metode Perkuatan

Pemilihan metode perkuatan harus mempertimbangkan:

1. Tingkat kerusakan struktur
2. Jenis material struktur eksisting
3. Kondisi lingkungan
4. Biaya dan waktu pelaksanaan
5. Kemudahan konstruksi

Menurut AASHTO (2012), metode perkuatan yang dipilih harus memberikan peningkatan kapasitas yang signifikan tanpa mengganggu fungsi jembatan.

2.6.5 Evaluasi Efektivitas Perkuatan

Setelah dilakukan perkuatan, perlu dilakukan evaluasi untuk memastikan bahwa struktur telah memenuhi kriteria desain.

Parameter evaluasi meliputi:

1. Peningkatan kapasitas lentur dan geser
2. Penurunan lendutan
3. Pengurangan retak
4. Peningkatan umur layanan

Menurut Chen & Duan (2014), evaluasi pasca-perkuatan sangat penting untuk memastikan keberhasilan metode yang diterapkan.