

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai perkuatan rangka pada jembatan rel kereta api rangka baja tipe *warren* sedikit dilakukan di Indonesia. Rasidi dkk. (2017) melakukan penelitian analisis perkuatan jembatan rangka baja menggunakan dua buah model perkuatan prategang eksternal yaitu prategang eksternal tanpa batang penyokong dan prategang ekstrenal menggunakan batang penyokong. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa jembatan rangka baja soekarno-hatta (suhat) dengan dianalisis menggunakan *STAAD Pro* didapatkan lendutan sebesar 11,72 cm dengan lendutan maksimum izin 6 cm. Dapat diketahui pula bahwa dengan model perkuatan prategang eksternal tanpa batang penyokong didapatkan besar lendutan memenuhi syarat aman yaitu sebesar 58,489 mm sedangkan untuk model perkuatan prategang eksternal dengan penyokong didapatkan besar lendutan yang memenuhi syarat aman juga yaitu sebesar 54,649 mm.

Simatupang dkk. (2016) mengkaji mengenai pengaruh perkuatan sambungan menggunakan profil baja ringan C-75 tipe G-550 yang dilakukan dua macam analisis yaitu analisis secara numerik dan eksperimen. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa jembatan hasil analisis numerik secara umum mengalami peningkatan kekuatan dan lendutan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimen. Dapat diketahui pula bahwa penambahan profil sebagai perkuatan pada bagian sambungan terbukti dapat meningkatkan kekuatan struktur dan memperkecil lendutan secara signifikan.

Menurut Handayani (2013), yang telah melakukan penelitian mengenai evaluasi dan perbaikan struktur jembatan rangka baja dengan menggunakan metode evaluasi jembatan secara analitis yang terdiri dari pemeriksaan visual di lapangan, pengukuran dimensi, dan pengujian mutu baja yang kemudian dimodelkan dengan menggunakan SAP2000 dan peroleh kuat perlu (R_u) masing-masing batang. Dari penelitian ini didapatkan bahwa penyebab kegagalan jembatan dikarenakan faktor pelaksanaan yang kurang tepat yaitu belum mencapai gaya tarik maksimum. Dalam penelitian tersebut diusulkan perbaikan jembatan dengan memberi dua buah plat

penguat yang dilas pada ujung batang dan dilubangi sesuai dengan posisi lubang baut yang ada agar tidak terjadi pergeseran baut.

Indarto dkk. (2017) melakukan penelitian mengenai analisis perilaku dinamik struktur atas Jembatan Mahakam IV MYC Samarinda. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui perilaku dinamik struktur jembatan Mahakam IV MYC Samarinda apabila diberi beban gempa. Peneliti melakukan pemodelan menggunakan *software* SAP2000 dalam pemodelan tiga dimensi serta melakukan penggantian tumpuan dari rol menjadi sendi dengan pemeriksaan struktur menggunakan IBC2003 dan LRFD yang kemudian hasilnya dibandingkan. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan perilaku dinamik dan kemampuan kapasitas dari profil memenuhi persyaratan dan dinyatakan aman.

Menurut Yudhistira (2014), prediksi penurunan kapasitas struktur atas jembatan rangka baja dengan metode *Artificial Neural Network (AAN)*. Penelitian ini bertujuan untuk menjadikan metode AAN pengembangan dari metode *Bridge Management System (BMS)* yang biasa digunakan sebagai metode inspeksi dan pemeliharaan jembatan. Persamaan hasil pemodelan AAN dibentuk dari kumpulan *input* berupa faktor-faktor yang mengurangi kapasitas jembatan dan *output* berupa nilai *rating factor* dengan studi kasus pada tiga jembatan yaitu Jembatan Lubuk Jambi, Kampar Kanan, dan Batang Nilau yang berada di Provinsi Riau. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa persamaan empiris hasil pemodelan pada ketiga jembatan memberikan konsistensi data yang cukup baik dengan nilai *error* maksimum tidak melebihi 10% sehingga persamaan empiris cukup *valid* dan akurat.

Menurut Syafirra (2018), yang telah mengkaji efek beban gempa dua arah dan tiga arah terhadap kapasitas struktur jembatan *warren* dengan melakukan pemodelan jembatan rangka baja menggunakan *software* ABAQUS *Student Edition* yang selanjutnya dilakukan analisis nilai eigen agar mendapatkan dua nilai *mode shape* terbesar. Setelah analisis nilai eigen dilakukan analisis dinamis dengan *time history analysis* (analisis riwayat waktu) dengan pemodelan dilakukan secara dua dan tiga dimensi. Hasil analisis menunjukkan bahwa akibat bertambahnya arah gempa dari dua arah menjadi tiga arah meningkatkan tegangan pada batang dekat tumpuan sendi sebesar 5,9303% serta penurunan modulus elastisitas jembatan

sebesar 2,5641%, sehingga analisis jembatan menggunakan gempa dua arah sudah cukup.

Budio dkk. (2009) melakukan penelitian mengenai prosentase penurunan lendutan model jembatan rangka baja akibat penggunaan kabel prategang internal tipe segitiga dengan dilakukan pengujian dalam dua kondisi yaitu kondisi sebelum ditambahkan prategang dan kondisi kedua ditambahkan prategang internal tipe segitiga. Penelitian ini membandingkan hasil pengujian laboratorium dan hasil pengujian secara teoritis menggunakan *software* StaadPro 2004 tiga dimensi. Pada penelitian ini besarnya gaya prategang yang menghasilkan lendutan terkecil baik berupa lendutan ke atas maupun lendutan sebesar 484,714 kg sedangkan prosentase penurunan lendutan yang terjadi berkisar antara 1,786% sampai 10,345% dari gaya prategang acuan pertama 242,357 kg.

Hadi dan Leo (2018) melakukan penelitian mengenai analisis perbandingan kekuatan jembatan rangka baja dengan metode prategang eksternal ditinjau dari bentuk trase kabel prategang dengan membandingkan model jembatan sebelum kekuatan dengan model kekuatan menggunakan 5 bentuk trase kabel prategang yang berbeda-beda menggunakan *software* SAP2000.

Menurut Zulkarnain (2013), yang telah melakukan penelitian mengenai pengujian model jembatan rangka baja dengan kekuatan prategang eksternal yang dipasang pada bawah struktur model jembatan. Pemodelan jembatan merupakan miniatur dari jembatan rangka bentang 60 m dengan tinggi 6 meter dengan perbandingan skala 1:20 yang kemudian dilakukan pembebanan menggunakan alat *Mecanical Loading Test Machine*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pemberian *prestressing* pada struktur jembatan rangka dapat mereduksi lendutan, meningkatkan daya layan serta menghemat dimensi batang struktur rangka baja.

Menurut Taurus (2013), yang telah mengkaji mengenai kinerja jembatan rangka baja yang diperkuat dengan GFRP (*Glass Fiber-Reinforced Polymer*) pada Jembatan Noenebu Provinsi Nusa Tenggara Timur yang telah mengalami penurunan mutu yang ditandai retak pada plat beton dengan tujuan penelitian membandingkan kinerja pelat lantai jembatan sebelum dan setelah diperkuat dengan GFRP. Penelitian ini membandingkan hasil defleksi antara pengujian lapangan dengan menggunakan *static loading test* dan analisis *software* SAP2000

dengan hasil pengurangan defleksi tanpa perkuatan dibandingkan dengan setelah perkuatan GFRP pada analisis SAP2000 dan perhitungan manual yaitu sebesar 2,0212% dan -0,17557%.

Dari beberapa penelitian diatas, perkuatan pada jembatan rangka baja dilakukan dengan banyak model dan metode. Pada penelitian ini perkuatan dilakukan dengan memperbesar penampang dan penggantian elemen yang lemah pada *frame* jembatan rel kereta api rangka baja tipe *warren* yang didahului dengan melakukan evaluasi jembatan dengan menggunakan pembebanan peta gempa 2017 yang mengacu pada Pembebanan pada Jembatan (SNI 1725:2016) untuk mendapatkan lendutan dan *displacement* dengan menggunakan pemodelan SAP2000 V.20.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Baja

Baja merupakan logam perpaduan antara besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Menurut Dewobroto (2015), material baja lebih unggul apabila ditinjau dari segi kekuatan, kekakuan dan daktilitas. Kelebihan material baja apabila dibandingkan dengan beton atau kayu adalah karena baja merupakan material buatan pabrik, sehingga memiliki kontrol produksi yang baik, dan akibatnya keluaran mutunya terjaga. Material baja memiliki kekuatan yang tinggi apabila dibandingkan dengan beratnya sehingga dapat menghasilkan elemen struktur yang terlihat langsing. Cara ini sangat efektif apabila kondisi lapangan tidak memungkinkan atau mahal apabila dibuat perancah. Umumnya ini efektif pada proyek jembatan.

2.2.2. Jembatan

Jembatan merupakan suatu konstruksi yang dibangun untuk menghubungkan jalan melalui suatu rintangan yang berada lebih rendah. Rintangan ini biasanya jalan lain berupa jalan air atau jalan lalu lintas biasa. Jika jembatan tersebut menyebrangi jalan lalu lintas biasa maka dinamakan *viaduct*. Jembatan dapat dibagi dalam beberapa golongan sebagai berikut:

- a. Jembatan Tetap.
- b. Jembatan dapat digerakkan.

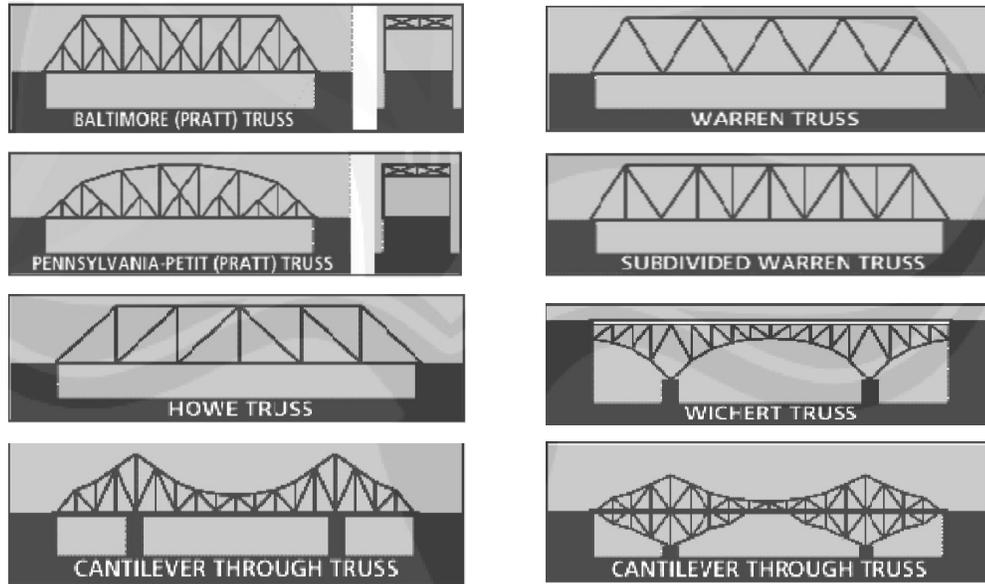
Kedua golongan tersebut dipergunakan untuk lalu lintas kereta api dan lalu lintas biasa (Struyk dan Veen, 1995).

Sejarah perkembangan jembatan dari berbagai bentuk dan bahan yang digunakan dari yang paling sederhana hingga konstruksi jembatan yang paling mutakhir sejalan dengan waktu sejarah peradaban manusia. Supriyadi dan Muntohar (2007) menyebutkan bahwa jembatan pada awalnya hanya sebatang pohon yang ditumbangkan untuk menyebrangi sungai hingga penggunaan beton dan baja dengan berbagai tipe dan metode pelaksanaannya. Secara umum struktur jembatan terbagi menjadi 3 bagian utama, yaitu struktur atas (*upper structure*), struktur bawah (*sub structure*) dan fondasi jembatan. Struktur atas jembatan terdiri atas plat kendaraan, diafragma, gelagar, dan trotoar. Sedangkan struktur bawah berupa pangkal jembatan (*abutment*) dan pilar (*pier*) yang kemudian beban disalurkan ke fondasi.

2.2.3. Jembatan Rangka

Menurut Satyarno (2003), jembatan rangka tersusun dari struktur rangka yang biasanya berasal dari bahan baja yang disusun dengan menyambungkan beberapa batang dengan baut atau las sehingga membentuk pola – pola segitiga. Jembatan rangka biasa digunakan pada bentang 20 meter sampai 375 meter.

Jembatan rangka baja merupakan struktur jembatan yang terangkai dari batang – batang baja yang dihubungkan satu sama lain yang membentuk sebuah rangka. Beban atau muatan yang diterima struktur rangka ini akan didistribusikan secara merata ke batang – batang baja sebagai gaya tarik dan tekan melalui titik buhul (Asiyanto, 2008). Banyak model jembatan rangka yang biasa digunakan dilapangan diantaranya sebagai berikut.



Gambar 2. 1 Model Jembatan Rangka (Satyarno, 2003)

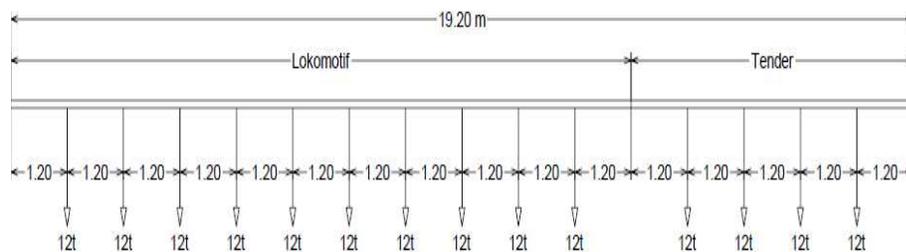
2.2.4. Pembebanan Jembatan

Pembebanan pada jembatan yang diperhitungkan dalam penelitian ini adalah beban-beban yang bekerja pada jembatan, yaitu beban utama dan beban tambahan. Beban utama meliputi, beban mati baik berat sendiri maupun berat material tambahan, beban hidup yang pada penelitian ini adalah beban gerak kereta api sedangkan beban tambahan meliputi, beban rem, beban angin, dan beban gempa.

a. Beban Hidup

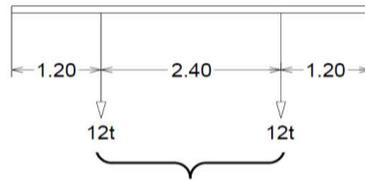
Beban hidup yang terjadi pada penelitian ini merupakan muatan gerak dari susunan kereta api yang berdasarkan Rencana Muatan 1921 (RM-1921). Skema pembebanan Rencana Muatan 1921 (RM-1921) sebagai berikut.

- 1) Sebagai muatan gerak dianggap suatu susunan kereta api terdiri dari 2 lokomotif pakai tender seperti skema berikut.



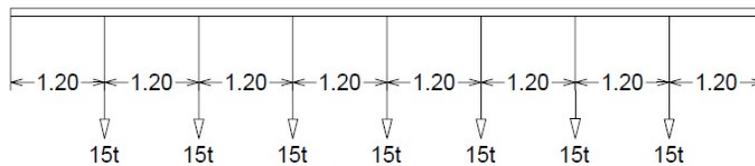
Gambar 2. 2 Jumlah berat gandar 168 ton atau 87.5 ton/m (RM-1921)

- 2) Jika dengan kereta/gerbong yang jumlahnya tidak tertentu seperti skema berikut.



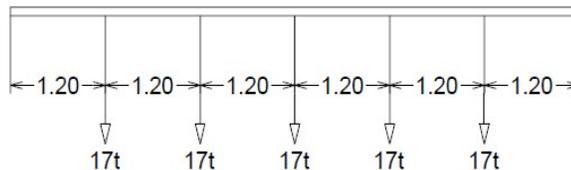
Gambar 2. 3 Jumlah berat gandar 24 ton atau 5 ton/m (RM-1921)

- 3) Jika ada 6 atau 7 gandar yang dapat tempat dalam hitungan maka berat gandar harus ditambah menjadi 15 ton seperti skema berikut.



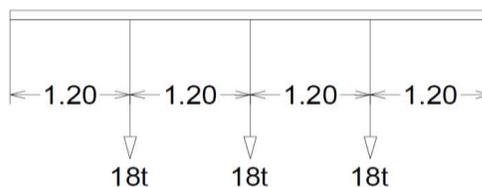
Gambar 2. 4 Jika ada 6 atau 7 gandar yang dapat tempat perhitungan (RM-1921)

- 4) Jika ada 5 gandar yang dapat tempat dalam hitungan maka berat gandar harus ditambah menjadi 17 ton seperti skema berikut.



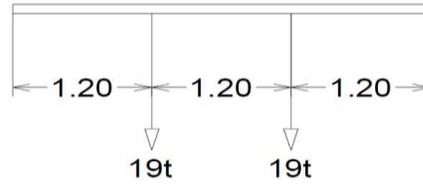
Gambar 2. 5 Jika ada 5 gandar yang dapat tempat perhitungan (RM-1921)

- 5) Jika ada 3 gandar yang dapat tempat dalam hitungan maka berat gandar harus ditambah menjadi 18 ton seperti skema berikut.



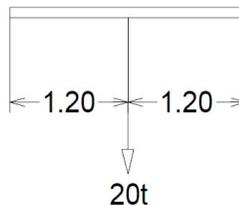
Gambar 2. 6 Jika ada 3 gandar yang dapat tempat perhitungan (RM-1921)

- 6) Jika ada 2 gandar yang dapat tempat dalam hitungan maka berat gandar harus ditambah menjadi 19 ton seperti skema berikut.



Gambar 2. 7 Jika ada 2 gandar yang dapat tempat perhitungan (RM-1921)

- 7) Jika ada 1 gandar yang dapat tempat dalam hitungan maka berat gandar harus ditambah menjadi 20 ton seperti skema berikut.



Gambar 2. 8 Jika ada 1 gandar yang dapat tempat perhitungan (RM-1921)

Pada rencana muatan gerak tersebut selalu dipilih hasil yang paling berbahaya. Susunan lokomotif (L), *tender/carier* (C) dan gerbong/*wagon* (W) dapat dikombinasikan untuk mendapatkan pengaruh yang paling maksimum sebagai berikut:

- a) L-C-L-C-W-W
 - b) L-C-C-L-W-W
 - c) C-L-L-C-W-W
 - d) C-L-C-L-W-W
- b. Beban Mati

Beban mati adalah semua beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan atau bagian jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsur tambahan.

Tabel 2. 1 Berat Jenis Bahan (PM No.60, 2012)

Material	Berat Jenis (kN/m^3)
Baja, Baja Cor	78,50
Besi Cor	72,50

Tabel 2. 1 Berat Jenis Bahan (PM No.60, 2012) (Lanjutan)

Material	Berat Jenis (kN/m ³)
Kayu	8,00
Beton	24,00
Aspal Anti Air	11,00
<i>Ballast Gravel</i> /Batu Pecah	19,00

c. Beban Kejut

Beban kejut diperoleh dengan mengalikan faktor i terhadap beban kereta. Perhitungan paling sederhana untuk faktor i adalah dengan menggunakan sebagai berikut:

- 1) Untuk rel pada alas balas,

$$i = 0,1 + \frac{25}{50 + L} \dots\dots\dots(2.1)$$

- 2) Untuk rel pada perletakan kayu,

$$i = 0,2 + \frac{25}{50 + L} \dots\dots\dots(2.2)$$

- 3) Untuk rel secara langsung pada baja,

$$i = 0,3 + \frac{25}{50 + L} \dots\dots\dots(2.3)$$

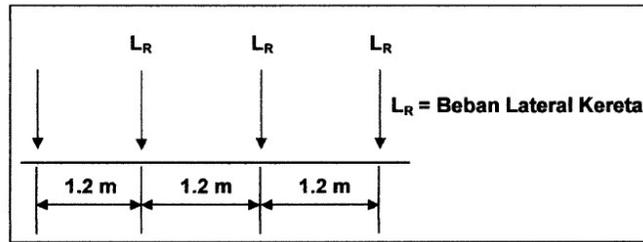
dimana,

 i = faktor kejut

L = panjang bentang (m)

d. Beban Kereta Lateral

Beban lateral kereta adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.10. Beban bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel, secara horisontal. Besaran adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif atau kereta listrik/diesel.



Gambar 2. 9 Beban lateral kereta (PM No.60, 2012)

e. Beban Sentrifugal, C

Beban sentrifugal diperoleh dengan mengalikan faktor α terhadap beban kereta. Beban bekerja pada pusat gaya berat kereta pada arah tegak lurus rel secara horisontal.

$$\alpha = \frac{V^2}{127 R} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana,

α = koefisien beban sentrifugal

V = kecepatan maks. Kereta (km/jam)

R = radius tikungan (m)

f. Beban Rem dan Traksi

Beban rem dan traksi adalah akibat percepatan dan perlambatan dari kereta. Beban ini bekerja pada rel dan tumpuan struktur sebagai beban merata sepanjang rel dalam bidang horisontal.

Besarnya beban rem adalah,

$$B = \frac{1}{6} \text{ beban lokomotif} + \frac{1}{10} \text{ beban kereta (semua kereta termuati penuh) } \dots\dots (2.5)$$

g. Beban Rel Longitudinal

Beban rel longitudinal pada dasarnya adalah 10 kN/m dan maksimum besarnya adalah 2000 kN. Beban ini bekerja pada level dasar dari rel, paralel dengan as jembatan. Maka, besarnya beban rel longitudinal:

$$L_F = L \times \text{Beban rel longitudinal (10 kN/m)} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana,

L = bentang jembatan

h. Beban Angin

Beban angin bekerja tegak lurus rel, secara horisontal, tipikal nilainya adalah sebagai berikut.

- 1) 3.0 kN/m^2 pada areal proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya. Namun demikian, 2.0 kN/m^2 , pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai.
- 2) 1.5 kN/m^2 pada areal kereta dan jembatan, dengan kereta di atasnya, pengecualian 1.2 kN/m^2 untuk jembatan selain gelagar dek/rasuk atau jembatan komposit, sedangkan 0.8 kN/m^2 untuk areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin.

i. Beban Suhu

Temperatur pada jembatan perlu diperhitungkan, hal ini dimaksudkan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada balok baja akibat adanya perbedaan suhu di permukaan profil atas dan bawah (temperatur *gradient*). Sehingga, beban suhu dapat digunakan untuk menghitung muai panjang jembatan, dengan koefisien muai panjang baja normal sebesar $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

2.2.5. Penurunan Kapasitas Struktur Jembatan Rangka Baja

Setiap struktur pasti akan mengalami penurunan kapasitas yang berbanding lurus dengan bertambahnya usia dari struktur tersebut, salah satunya adalah struktur jembatan. Penurunan kapasitas pada struktur jembatan disebabkan oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal yang dimaksud adalah menurunnya kapasitas struktur yang disebabkan oleh penurunan mutu dari material itu sendiri. Pada struktur rangka baja, mutu dari material baja akan mengalami penurunan tegangan yang disebabkan oleh ketahanan/*fatigue* yang diakibatkan oleh beban yang berulang-ulang serta terus menerus dalam periode dan waktu tertentu. Akibat dari beban tersebut maka tegangan ultimit material baja akan menurun. Penurunan kapasitas struktur juga dapat disebabkan oleh faktor eksternal. Faktor eksternal dapat terjadi akibat tumbukan kendaraan yang mengakibatkan perubahan bentuk pada elemen, pengaruh cuaca yang dapat mengakibatkan korosi, serta pengaruh getaran yang mengakibatkan longgarnya baut pada sambungan.

Pada Pedoman Pemeriksaan Jembatan BMS (1992) terdapat 5 kerusakan utama pada struktur jembatan rangka yang mengakibatkan penurunan kapasitas struktur rangka baja. Berikut adalah keusakan tersebut.

1. Penurunan mutu dari cat dan galvanisi
2. Karat
3. Kerusakan pada elemen-elemen baja
4. Ikatan/sambungan yang longgar
5. Keretakan.

2.2.6. Perkuatan Jembatan

Perkuatan jembatan merupakan kegiatan untuk mengembalikan kapasitas muat jembatan sebagaimana kondisi desain awal jembatan (No.004/BM/2009 tentang Pemeriksaan Jembatan Rangka Baja). Secara umum metode perkuatan untuk struktur beton pada struktur atas jembatan dapat dibagi menjadi dua, yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif didefinisikan sebagai metode perkuatan yang berdasarkan redistribusi yang dimasukkan secara sengaja pada gaya dalam struktur sehingga perkuatan dapat dicapai secara redistribusi gaya. Sedangkan metode pasif dapat didefinisikan sebagai metode perkuatan yang mengakibatkan redistribusi dari gaya-gaya dalam struktur tetapi redistribusi itu sendiri bukan prinsip utama pada metode ini.

Perkuatan dengan memperbesar penampang dan penggantian elemen yang lemah merupakan salah satu metode perkuatan pada jembatan. Dengan memperbesar penampang akan didapatkan momen inersia penampang yang lebih besar sehingga akan meningkatkan kekakuan statis dan dinamis struktur.