

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Umum

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 mengenai jalan dan jembatan, jembatan adalah struktur yang terletak di atas permukaan air atau tanah. Dari pernyataan ini, dapat disimpulkan bahwa jembatan berperan sebagai fasilitas penunjang konektivitas, memungkinkan percepatan mobilitas dari satu wilayah ke wilayah lainnya karena adanya rintangan.

Jembatan secara umum merupakan suatu konstruksi yang bertujuan untuk menghubungkan dua wilayah yang terpisah oleh lembah, sungai, danau, jalan raya, dan rintangan lainnya. Sebelum merencanakan sebuah jembatan terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan, seperti aspek kebutuhan lalu lintas, aspek teknis, dan aspek estetika (Supriyadi & Muntohar A., 2007). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa jembatan adalah infrastruktur krusial dalam sistem transportasi yang memfasilitasi dan mempercepat pergerakan barang dari sumber produksi ke pasar, serta pergerakan individu dari satu tempat ke tempat lain.

Dalam merencanakan pembangunan jembatan, ada beberapa data yang harus dikumpulkan sebelum memasuki tahap konstruksi. Data ini digunakan sebagai panduan sebelum mengambil keputusan. Contoh data yang penting termasuk lokasi eksisting, topografi, lingkungan sekitar, dan kondisi tanah dasar. Pemilihan lokasi juga harus mempertimbangkan kondisi lalu lintas di sekitarnya karena jembatan bertujuan untuk melayani aliran lalu lintas dengan efisien, kecuali dalam keadaan tertentu.

Perencanaan dan desain juga harus mempertimbangkan aspek fungsional seperti kebutuhan transportasi, persyaratan teknis, dan aspek estetika dari sudut pandang arsitektur (Supriyadi & Muntohar, 2007). Selain itu, klasifikasi jembatan juga harus mempertimbangkan bahan konstruksi, analisis struktural, karakteristik jembatan, bentuk struktur, posisi jalur kendaraan, lokasi, dan rentang jembatan. Dengan demikian, berbagai klasifikasi jembatan bertujuan untuk memudahkan proses perencanaan dan pembangunan di lapangan.

2.2 Klasifikasi Jembatan

Klasifikasi berbagai jenis jembatan berdasarkan tujuan penggunaannya, lokasi, bahan konstruksi, dan struktur telah mengalami banyak penyesuaian dan perubahan seiring dengan kemajuan peradaban dan teknologi. Pada awalnya, jembatan pertama yang dibangun oleh manusia menggunakan batang pohon sebagai alat untuk menyeberangi sungai dan lembah. Namun, saat ini, prinsip dan tujuan pembangunan jembatan dapat dimodifikasi dengan berbagai fitur dan pertimbangan yang lebih canggih.

Agar pengembangan ilmu tentang jembatan menjadi lebih terorganisir, sejumlah ahli telah mengelompokkan jembatan berdasarkan kesamaan aspek tertentu. Beberapa dari klasifikasi jembatan ini dapat dilihat dalam Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Jembatan

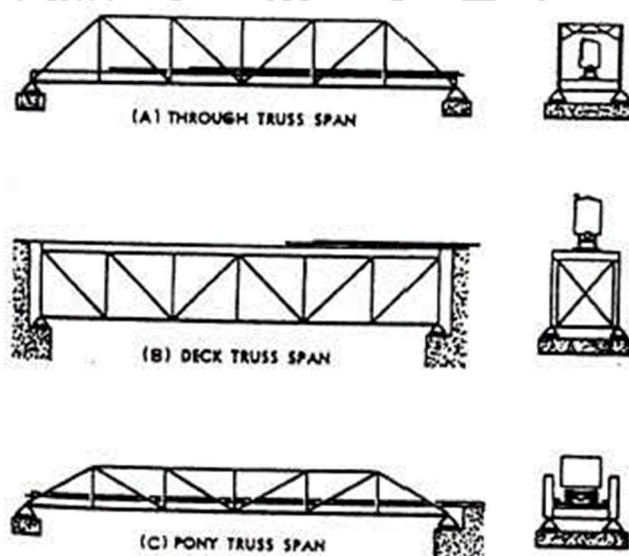
Klasifikasi	Jenis Jembatan
Fungsi	1. Jembatan jalan raya (<i>Highway bridge</i>)
	2. Jembatan pejalan kaki (<i>pedestrian bridge</i>)
	3. Jembatan jalan kereta api (<i>Railway bridge</i>)
Lokasi	1. Jembatan di atas lembah
	2. Jembatan di atas sungai, danau, atau laut
	3. Jembatan di atas jalan yang ada (<i>Flyover</i>)
	4. Jembatan di dermaga (<i>Jetty</i>)
	5. Jembatan di atas saluran irigasi/drainase (<i>Culvert</i>)
Material Konstruksi	1. Jembatan beton (<i>Concrete bridge</i>)
	2. Jembatan beton prategang (<i>Prestressed concrete bridge</i>)
	3. Jembatan baja (<i>Steel bridge</i>)
	4. Jembatan komposit (<i>Composite bridge</i>)
	5. Jembatan kayu (<i>Log bridge</i>)
Tipe Struktur	1. Jembatan rangka (<i>Truss bridge</i>)
	2. Jembatan pelengkung (<i>Arch bridge</i>)
	3. Jembatan gantung (<i>Suspension bridge</i>)
	4. Jembatan kabel (<i>Cable stayed bridge</i>)
	5. Jembatan pelat (<i>Slab bridge</i>)
	6. Jembatan pelat berongga (<i>voided slab bridge</i>)
	7. Jembatan gelagar (<i>Girder Bridge</i>)

	8. Jembatan kantilever (<i>Cantilever bridge</i>)
Panjang Bentang	1. Bentang pendek (<i>Small span bridge</i>), panjang bentang hingga 15 m
	2. Bentang sedang (<i>Medium span bridge</i>), panjang bentang hingga 75 m
	3. Bentang menengah, panjang bentang antara 50-150 m
	4. Bentang panjang, panjang bentang > 150 m
Sambungan Antar Bentang (Interspan Relation)	1. Simply supported bridges
	2. <i>Cantilever bridges</i>
	3. <i>Continuous bridges</i>
Geometri Jembatan	1. <i>Straight bridges</i>
	2. <i>Curved bridges</i>
	3. <i>Skewed bridges</i>
Position-Movable	1. <i>Bescule bridge</i>
	2. <i>Lift bridges</i>
	3. <i>Swing bridge</i>

Sumber: Buku Jembatan (Supriyadi dkk, 2007)

2.3 Tipe Jembatan Berdasarkan Posisi Dek

Setiap jenis truss memiliki karakteristik dan kegunaannya masing-masing. Pemilihan jenis truss sangat bergantung pada faktor-faktor seperti lokasi, tujuan penggunaan jembatan, dan spesifikasi desain yang dibutuhkan. Berdasarkan tipe deknya jembatan dibagi menjadi 3 yaitu :



Gambar 2. 1 Tipe jembatan berdasarkan posisi deck

1. *Through Truss* (Truss Truss Melintasi):

Pada tipe ini, truss terletak di atas dek jembatan dan membentang melintasi jalan atau sungai. Konfigurasi truss ini memberikan ketinggian yang lebih besar di atas jalan atau air, memungkinkan kapal atau kendaraan tinggi untuk melintasi di bawahnya. Ciri khasnya adalah bahwa jalan atau rel kereta api berjalan melalui bagian tengah dari truss.

2. *Deck Type Truss* (Truss Tipe Dek):

Pada jenis ini, struktur truss berada di bawah dek jembatan. Truss ini berfungsi untuk menopang beban dari atas dan mengalirkannya ke fondasi jembatan. Tipe ini memberikan profil lebih rendah, dan umumnya digunakan pada jembatan dengan tinggi yang terbatas di atas jalan atau sungai.

3. *Half Through Truss / Pony Truss* (Truss Setengah Melintasi):

Jenis ini merupakan kombinasi dari dua tipe sebelumnya. Bagian tengah dari jembatan memiliki konfigurasi truss yang membentang, sementara bagian sisi memiliki struktur truss tipe dek. Struktur ini memberikan ketinggian yang sedang, memungkinkan kapal atau kendaraan tinggi untuk melintasi di bawahnya di bagian tengah, sambil mempertahankan profil yang lebih rendah di bagian sisi.

2.4 Jembatan Pejalan Kaki (*Pedestrian Bridge*)

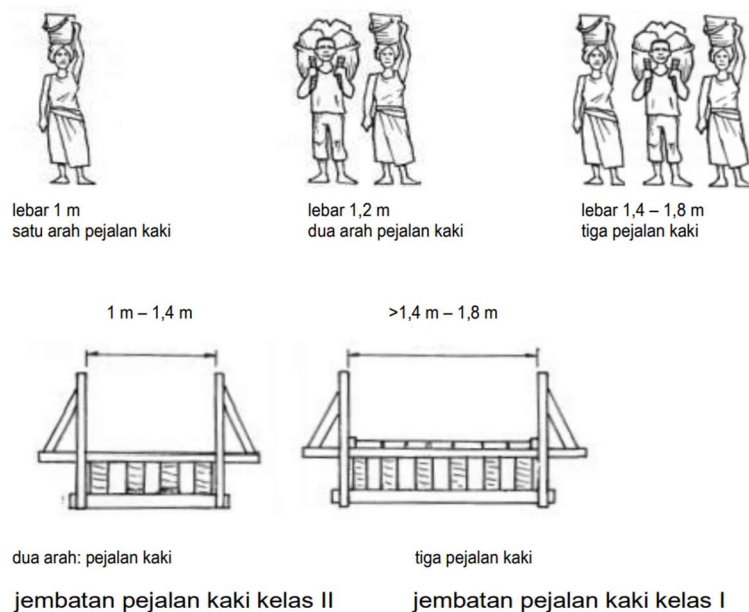
Jembatan penyeberangan pejalan kaki adalah jenis jembatan yang didesain untuk memfasilitasi penyeberangan pejalan kaki dari satu sisi jalan ke sisi yang lain. Untuk memenuhi fungsi ini, jembatan pejalan kaki harus dirancang dengan konstruksi yang memungkinkan pemeliharaan mudah, memiliki struktur yang kokoh, dan dilengkapi dengan pagar (*railing*) yang memadai untuk memastikan aspek-aspek keselamatan, keamanan, kenyamanan, aksesibilitas, keindahan, serta interaksi sosial dapat terpenuhi dalam proses pembangunan jembatan ini.

Perencanaan pembangunan jembatan pejalan kaki disesuaikan dengan ketersediaan lahan yang ada. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum tentang Pedoman Perencanaan, Penyediaan, dan Pemanfaatan Prasarana dan

Sarana Jaringan Pejalan Kaki di Kawasan Perkotaan (2014), kebutuhan ruang untuk jalur pejalan kaki ditetapkan berdasarkan ukuran tubuh manusia yang lengkap berpakaian, yaitu selebar 45 cm untuk tebal tubuh sebagai sisi pendeknya. Selain itu, penetapan angka lebar bahu sepanjang 60 cm sebagai sisi panjangnya.

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung untuk Pejalan Kaki (2010), tingkat lalu lintas harus diidentifikasi secara lengkap dan detail sebagai dasar penentuan lebar lantai yang diperlukan dan beban hidup pada jembatan yang kemudian akan menentukan biaya konstruksi. Penentuan lebar yang dianjurkan untuk jalan masuk pada tipe-tipe tingkat lalu lintas diantaranya sebagai berikut.

- Lebar 1,00 m s.d. 1,40 m untuk pejalan kaki dua arah (Jembatan Pejalan Kaki Kelas II)
- Lebar 1,40 m s.d. 1,80 m untuk tiga pejalan kaki yang berjalan beriringan (Jembatan Pejalan Kaki Kelas I).
- Lebar tersebut hanya memberikan akses satu arah pada beberapa tipe lalu lintas. Penampang melintang jembatan pejalan kaki untuk berbagai macam pengguna disesuaikan dengan lebar yang disajikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 2 Penampang melintang jembatan pejalan kaki

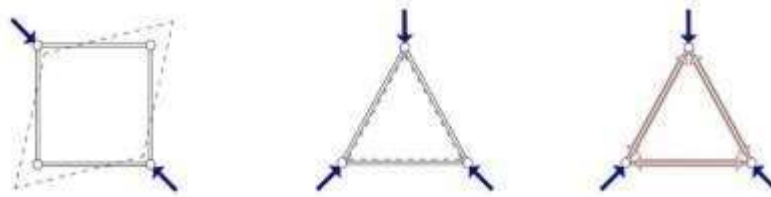
2.5 Jembatan Rangka Batang

Jembatan rangka batang adalah tipe jembatan di mana elemen-elemen struktural dihubungkan dalam konfigurasi segitiga. Elemen-elemen utama dari rangka ini terikat bersama dengan balok melintang dan memanjang, mampu menanggung dan mendistribusikan gaya tarik, tekan, atau kombinasi dari keduanya sebagai respons terhadap beban statis maupun dinamis.

Material yang digunakan dalam pembuatan jembatan rangka batang dapat berupa kayu, besi, baja, atau beton prategang. Keunggulan dari jembatan rangka batang terletak pada strukturnya yang kokoh, kuat, ringan, ekonomis, dan proses pengerjaannya dapat dilakukan dengan merakit segmen-segmen tertentu.

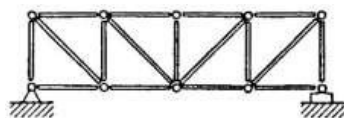
2.5.1 Triangulasi

Sistem rangka batang sebagai struktur pemikul beban bekerja dengan prinsip penyusunan elemen-elemen menjadi konfigurasi segitiga. Struktur segitiga ini menghasilkan stabilitas tinggi, sehingga deformasi yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan perubahan panjang batang akibat beban. Pada struktur dengan bentuk bujur sangkar atau segi empat, pemberian beban dapat menyebabkan keruntuhan. Struktur segi empat cenderung mengalami deformasi yang besar, membuatnya tidak stabil, dan sudut antara dua batang berubah secara signifikan. Ketidakstabilan pada struktur segi empat tidak dapat diperbaiki dengan memperpanjang batang karena deformasi akan tetap terjadi saat diberi beban. Dalam prinsip struktur rangka batang, penting bahwa beban harus terfokus pada titik-titik hubung sehingga elemen batang mengalami tekanan dan tarikan, dan momen dianggap sebagai 0 (nol). Penggunaan segitiga dalam triangulasi memberikan keuntungan karena segitiga memiliki sifat kestabilan intrinsik yang tinggi. Dengan merancang struktur jembatan rangka menggunakan segitiga, desainer dapat mencapai distribusi beban yang baik, mengurangi deformasi yang tidak diinginkan, dan meningkatkan daya tahan terhadap gaya lateral seperti angin atau gempa. Ilustrasi konfigurasi sistem rangka batang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

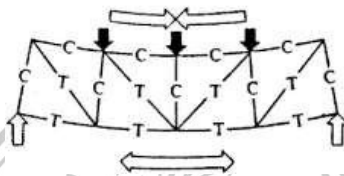


Gambar 2. 3 Konfigurasi Sistem Rangka Stabil dan Tidak Stabil

2.5.1 Konfigurasi



(a) Konfigurasi segitiga kaku



(b) Hanya Gaya tarik atau tekan yang timbul didalam batang pada rangka batang yang setiap batangnya dihubungkan secara sendi apabila beban hanya bekerja pada titik terhubung

Gambar 2. 4 Struktur Rangka dari Sekumpulan Konfigurasi Segitiga

Dalam sub bab sebelumnya, telah dijelaskan bahwa penyusunan rangka batang dalam konfigurasi segitiga dapat menghasilkan struktur yang stabil. Dengan prinsip ini, penggunaan triangulasi rangka batang pada bangunan dapat memperkuat dan memperkokoh bentuk geometri apapun dengan cara memperbesar ukuran segitiga tersebut.

Proses konfigurasi rangka batang melibatkan modifikasi bentuk rangka dan mungkin penambahan atau pengurangan elemen batang. Tujuan dari penambahan atau pengurangan batang pada struktur rangka batang adalah untuk meminimalkan lendutan tanpa mengorbankan kekuatan struktur. Hal ini memastikan bahwa jembatan tetap kokoh dan tidak runtuh ketika terkena beban. Penting untuk diingat bahwa struktur akan mengalami keruntuhan jika beban diterapkan secara langsung pada struktur yang belum stabil. Oleh karena itu, konfigurasi yang tepat sangat penting untuk memastikan stabilitas struktur rangka batang pada jembatan. Stabilitas struktur dapat diatur dengan menggunakan persamaan stabilitas rangka.

$$2J = M + 3 \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

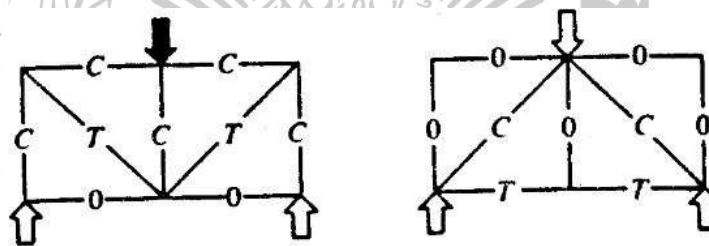
J : Nodal (*joint*)

M : Batang (*member*)

2.5.2 Gaya Batang

Gaya-gaya di setiap batang dalam rangka batang dapat dianalisis menggunakan persamaan dasar keseimbangan. Gaya dalam batang adalah reaksi yang timbul dalam batang sebagai respons terhadap gaya eksternal yang bekerja pada struktur rangka batang. Gaya dalam batang sering disebut juga sebagai gaya-gaya internal, di mana gaya-gaya ini direpresentasikan dengan nilai positif untuk menunjukkan gaya tarik, dan nilai negatif untuk menunjukkan gaya tekan.

Secara lebih spesifik, gaya dalam batang yang mengarah menjauh dari titik buhul disebut gaya tarik, sementara gaya dalam batang yang mengarah mendekati titik buhul disebut gaya tekan.



Gambar 2. 5 Distribusi Gaya Batang Struktur Rangka Batang

2.5.3 Komponen Struktur Jembatan Rangka

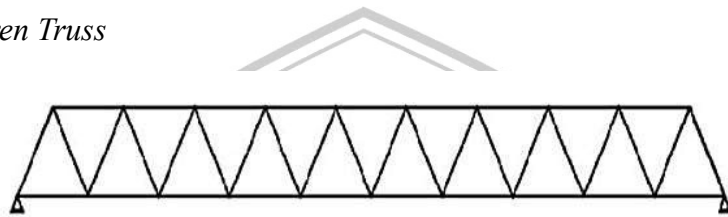
Struktur rangka (*truss*) adalah kumpulan elemen yang dihubungkan untuk membentuk ikatan yang kuat. Elemen-elemen ini bertindak sebagai komponen penahan beban pada struktur. Secara umum, elemen-elemen ini diatur sedemikian rupa sehingga membentuk pola segitiga.

Dalam konteks jembatan rangka, terdapat tiga tipe utama berdasarkan lokasi *deck chord* dan *top chord*, yaitu *through type truss*, *pony type truss*, dan *deck type truss*. Sebelum melakukan pembagian lebih spesifik terkait dengan tipe-tipe tersebut, setiap jembatan dapat dibagi menjadi dua komponen utama, yaitu struktur atas (*superstructure*) dan struktur bawah (*substructure*).

2.5.4 Tipe Jembatan Rangka

Jembatan rangka batang memiliki beragam tipe yang berkembang seiring perkembangan bahan material dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, para ahli dalam bidang ilmu jembatan terus mengembangkan dan mencetuskan berbagai ide serta konsep konfigurasi struktur untuk berbagai jenis tipe jembatan rangka batang. Beberapa jenis konfigurasi jembatan yang terkenal dan banyak digunakan meliputi:

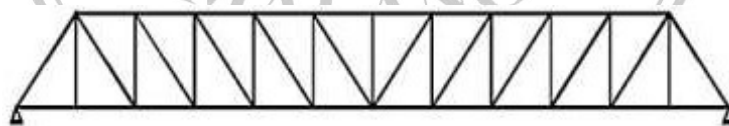
1. *Warren Truss*



Gambar 2. 6 Jembatan Tipe Warren

Tipe jembatan rangka ini memiliki struktur utama berbentuk trapesium yang terdiri dari serangkaian bentuk segitiga sama sisi atau segitiga sama kaki, tanpa adanya batang vertikal dalam rangka tersebut. Beberapa batang diagonal akan mengalami tekanan, sementara yang lain mengalami tarikan. Tipe jembatan rangka ini sangat umum digunakan dalam jembatan rangka di Indonesia karena efisiensi strukturnya yang tinggi dalam hal berat material dan kapasitas beban yang dapat ditanggung oleh jembatan. Sistem struktur ini juga diimplementasikan dalam desain jembatan *Nawasena Bridge*.

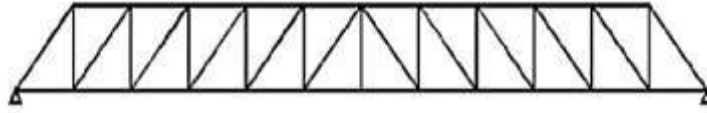
2. *Pratt Truss*



Gambar 2. 7 Jembatan Tipe Howe

Tipe jembatan rangka ini terdiri dari elemen vertikal dan diagonal yang cenderung miring ke bawah dan bertemu pada titik tengah bagian bawah batang jembatan. Elemen diagonal dalam rangka jenis ini menanggung gaya tarik, sementara elemen vertikalnya menanggung gaya tekan.

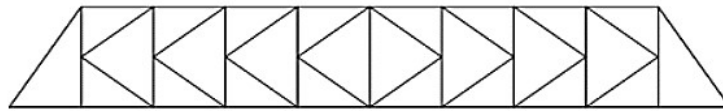
3. Howe Truss



Gambar 2. 8 Jembatan Tipe Howe

Tipe jembatan rangka Howe Truss terdiri dari elemen vertikal dan diagonal yang miring ke atas. Konfigurasi struktur dan distribusi gaya pada rangka tipe Howe berkebalikan dengan struktur jembatan tipe Pratt yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada rangka tipe ini, elemen diagonal menerima gaya tekan sementara elemen vertikal menerima gaya tarik.

4. K-Truss



Gambar 2. 9 Jembatan Tipe K-Truss

Jembatan rangka tipe K-Truss terdiri dari elemen vertikal dan dua elemen diagonal miring yang membentuk pola rangka seperti huruf "K". Jenis jembatan ini juga dikenal dengan sebutan K-Truss. Jembatan K-Truss sangat cocok untuk bentang yang panjang karena elemen pendek dalam susunannya dapat mengurangi risiko tekukan. Walaupun lendutannya biasanya lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi lain, kekurangan dari tipe jembatan ini terletak pada berat strukturnya. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa jembatan rangka tipe ini cenderung membutuhkan lebih banyak material, baik untuk struktur jembatan itu sendiri maupun untuk sambungannya.

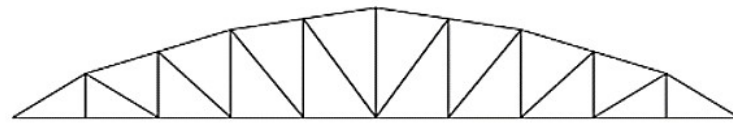
5. Baltimore Truss



Gambar 2. 10 Jembatan Tipe Baltimore

Tipe jembatan rangka ini secara konseptual memiliki penerimaan gaya tekan dan tarik yang sama dengan struktur rangka tipe Pratt. Perbedaannya dengan tipe Pratt terletak pada tambahan elemen bracing diagonal dan vertikal di bagian bawah. Penambahan elemen ini bertujuan untuk mengatasi gaya tekan dan mengendalikan defleksi atau lendutan yang terjadi. Namun, seperti prinsip dasar lainnya, semakin banyak elemen yang ditambahkan, maka jembatan juga akan semakin berat.

6. *Parker Truss*

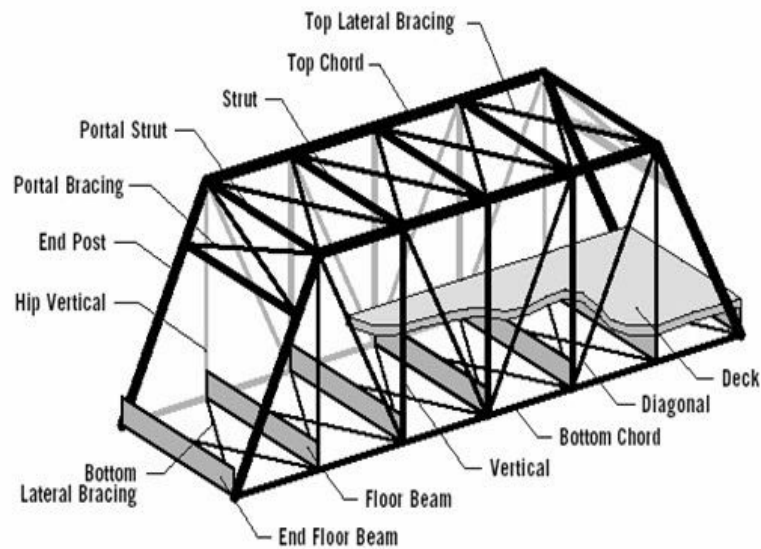


Gambar 2. 11 Jembatan Tipe Parker

Tipe jembatan rangka ini merupakan variasi dan modifikasi dari tipe Pratt. Perbedaan utamanya terletak pada rangka utama bagian atas jembatan yang tidak berjajar sejajar dengan bagian bawahnya, membentuk lengkungan mirip truss unta. Tipe ini menggunakan lebih sedikit material dibandingkan dengan tipe Pratt, tetapi proses konstruksinya lebih kompleks karena variasi bentuk yang diaplikasikan pada rangka jenis ini. Selain tipe-tipe rangka yang telah dijelaskan sebelumnya, terdapat juga susunan geometri rangka lain yang umum digunakan.

2.5.4.1 Struktur Atas Jembatan Rangka (*Superstructure*)

Struktur atas merupakan bagian struktur yang menerima beban secara langsung dari beban lalu lintas yang lewat di atasnya. Komponen-komponen struktur atas jembatan rangka batang disajikan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2. 12 Komponen Struktur Jembatan Rangka

Struktur atas jembatan terbagi menjadi beberapa bagian diantaranya:

1. Lantai Kendaraan
Lantai kendaraan memiliki fungsi sebagai penahan beban kendaraan dan lewatan ketika lalu lintas berjalan.
2. Gelagar
Gelagar berfungsi untuk mendistribusikan beban secara longitudinal dan direncanakan untuk menahan lendutan. Gelagar pada jembatan terbagi menjadi dua jenis yaitu gelagar memanjang dan gelagar melintang.
3. Ikatan-ikatan
Ikatan-ikatan berfungsi untuk menahan gaya arah lateral pada struktur rangka yang diakibatkan oleh beban angin. Ikatan-ikatan juga biasa disebut sebagai diafragma, bracing, ataupun batang ikatan angin.
4. Struktur pelengkap pada struktur jembatan diantaranya adalah seperti sebagai berikut.
 - a. *Expansion Joint*
Expansion joint berfungsi sebagai peredam getaran dan benturan yang muncul akibat beban pada lantai/permukaan jembatan.
 - b. *Separator/Kerb*

Kerb berfungsi sebagai pemisah lantai kendaraan dengan trotoar serta memisahkan dua arus yang berlawanan.

c. Railings

Railing merupakan pegangan jembatan pada tepi kanan dan kiri jembatan. *Railing* berfungsi sebagai sandaran yang berguna untuk memberikan keamanan dan keselamatan pengguna jalan.

5. Perletakan Jembatan (*Bearing Pad Structure*)

Bearing pad juga dikenal umum sebagai elastomer atau bantalan jembatan. Elastomer berfungsi sebagai alat peredam benturan antara rangka jembatan dengan pondasi. Elastomer terbuat dari material karet mutu tinggi agar mampu mengakomodir beban yang diterima dan meneruskannya dengan halus dan seragam kepada substruktur

2.5.4.2 Struktur Bawah Jembatan Rangka (*Substructure*)

Struktur bawah jembatan merupakan bagian struktur yang menerima beban dari struktur atas lalu menyalurkannya ke pondasi dan disalurkan dari pondasi ke tanah. Struktur bawah jembatan terbagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Oprit Jembatan/Jalan Pendekat

Oprit terbentuk dari timbunan tanah di area belakang kepala jembatan dan berfungsi sebagai konektor ruas jalan dengan lantai jembatan.

2. Pelat Injak

Pelat injak adalah konstruksi dari beton yang fungsinya untuk menyamaratakan beban karena lalu lintas kendaraan dan letaknya berada di ujung-ujung jembatan. Pelat injak mampu mengurangi tekanan tanah terhadap dinding kepala jembatan.

3. Bangunan Pengaman Jembatan

Bangunan pengaman jembatan berfungsi sebagai pengaman jembatan terhadap pengaruh aliran air sungai baik secara langsung maupun tidak langsung.

4. Kepala Jembatan (*Abutment*)

Abutment adalah bagian bangunan pada ujung jembatan yang berfungsi sebagai *support* bangunan di atasnya dan terkadang juga berfungsi sebagai dinding penahan tanah.

5. Pilar Jembatan (*Pier*)

Pilar jembatan berfungsi layaknya kepala jembatan namun letaknya berada di antara kedua kepala jembatan.

6. Pondasi

Pondasi berfungsi untuk menerima beban-beban yang bekerja dari substruktur lalu kemudian beban tersebut disalurkan ke tanah.

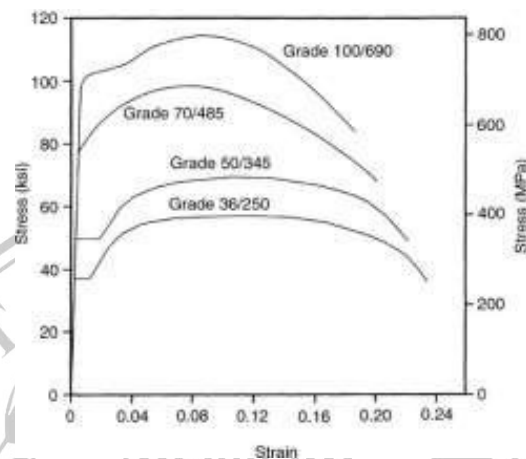
2.6 Material Baja Pada Jembatan

Dalam perencanaan struktur jembatan, penting untuk memenuhi standar kekuatan, kekakuan, dan daktilitas. Kriteria-kriteria ini menjadi dasar dalam memilih material untuk spesifikasi teknis. Saat ini, baja adalah material yang sering digunakan dalam konstruksi karena memiliki sifat struktural yang baik dan kekuatan yang tinggi, baik dalam kondisi tarik maupun tekan. Walaupun berat jenisnya tinggi, perbandingan antara kekuatan dengan beratnya masih seimbang. Bentuk elemen baja dipengaruhi oleh metode yang digunakan dalam pembentukannya. Ada dua metode pembentukan baja, yaitu proses penggilingan dalam kondisi dipanaskan (*hot-rolling*) dan proses pembentukan dalam kondisi dingin (*cold-forming*).

Keuntungan menggunakan baja sebagai material struktur adalah selain memiliki kekuatan besar dalam menahan gaya tarik dan tekan, juga memiliki sifat-sifat menguntungkan seperti kemudahan pemasangan, bentuk yang seragam, dan tingkat daktilitas yang tinggi untuk mencegah kegagalan struktur secara tiba-tiba. Namun, dalam implementasinya, pemilihan baja juga memiliki beberapa kelemahan seperti terbatasnya variasi bentuk selama proses pabrikasi, biaya mobilisasi material yang cukup tinggi, dan potensi penurunan kekuatan pada kondisi termal tertentu.

2.6.1 Sifat Mekanis Baja

Material baja yang digunakan harus memenuhi berbagai persyaratan, termasuk mutu, tegangan leleh (F_y), dan tegangan tarik (F_u). Batasan nilai mutu dan tegangan pada desain material tidak boleh melebihi standar yang telah ditetapkan, mengacu pada pedoman-pedoman yang berlaku di Indonesia.

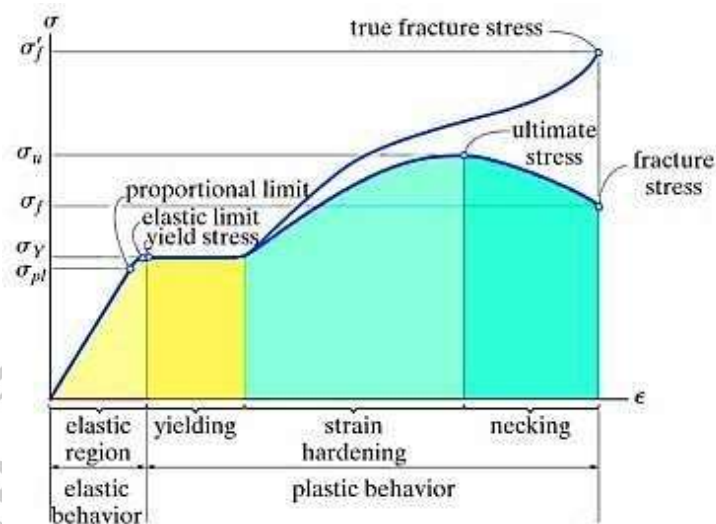


Gambar 2.13 Kurva Stress-Strain Beberapa Kelas Material Baja

Secara umum, karakteristik material baja dapat diukur berdasarkan kurva *engineering stress-strain* yaitu kurva σ - ϵ yang umum dipakai dalam perencanaan rekayasa. Kurva ini juga biasa disebut kurva tegangan dan regangan baja. Kurva ini didapatkan melalui konversi data pengujian (P - Δ) dengan data geometri (A dan L) pada kondisi awal. Berdasarkan kurva tersebut maka dapat ditentukan parameter-parameter yang dijelaskan pada gambar berikut ini

Kurva *engineering stress-strain* selanjutnya disebut juga sebagai kurva σ - ϵ atau kurva tegangan-regangan. Pada kurva tersebut, segmen OA berupa garis lurus yang kemiringannya adalah modulus elastis ($E = \sigma/\epsilon$) atau konstanta numerik yang menunjukkan besarnya kekakuan elastis. Kondisi pada nilai tertentu dapat dikatakan elastis jika deformasinya tidak permanen dan dapat kembali ke kondisi awalnya jika beban dihilangkan. Oleh karena itu, dalam kebanyakan kasus, batas elastis dianggap setara dengan batas proporsional. Ketika batas elastis tercapai, material akan mengalami deformasi plastis atau inelastis, yang berarti deformasi akan bersifat permanen. Kurva σ - ϵ berasal dari hasil pengujian di mana titik

regangan leleh tidak terlihat dengan jelas. Oleh karena itu, diperlukan pembuatan garis bantu baru sejajar dengan OA, dengan offset sebesar 0,2% (0,002), hingga memotong kurva σ - ϵ di titik F_y . Pada titik inilah, tegangan leleh atau kekuatan leleh disepakati.



Gambar 2. 14 Kurva σ - ϵ Tipikal Baja Konstruksi

Karakteristik dan perilaku material baja konstruksi pada dasarnya serupa, terutama dalam kondisi elastis. Perbedaan akan terlihat ketika kondisi inelastis, khususnya saat terjadi leleh (yielding). Oleh karena itu, perbedaan mutu baja ditentukan oleh kekuatan leleh (F_y) dan kekuatan tarik (F_u) dari materialnya. Fenomena leleh (yield) memainkan peran penting dalam daktilitas struktur dan dapat menyebabkan redistribusi tegangan selama kondisi inelastis. Oleh karena itu, penggunaan baja mutu tinggi yang memiliki batas leleh terbatas harus dihindari pada bagian yang berisiko tinggi mengalami inelastis seperti akibat gempa. Berdasarkan prinsip ini, analisis plastis dibatasi pada baja dengan kekuatan hingga 450 MPa saja (sesuai dengan AISC 2010 dan AASHTO 2017).

Material baja memiliki modulus elastisitas senilai 200.000 MPa, dan tangen modulus kondisi strain-hardening adalah sekitar 1/30 kali kondisi elastisitasnya, yaitu 670 MPa. Kurva tegangan-regangan khusus mewakili baja mutu biasa dimana kondisi leleh terlihat jelas sebagai segmen horizontal pada kurva. Oleh karena itu, kondisi elastis dibatasi sampai tegangan leleh F_y . Jika suatu material mengalami kondisi tegangan yang konstan, perubahan yang terjadi terbatas pada

peningkatan regangan hingga mencapai titik awal terjadinya strain-hardening. Dalam situasi ini, ketika beban diteruskan, tegangan pada material akan terus meningkat hingga mencapai nilai leleh maksimum, yang umumnya dikenal sebagai kuat tarik atau kuat batas (ultimate) F_u . Pada titik ini, nilai tegangan mencapai puncak sebelum material mengalami deformasi yang signifikan.

Dalam konteks perencanaan struktural, sifat mekanis dari material baja menjadi sangat kritis, dan untuk memastikan keamanan serta kehandalan struktur, persyaratan minimum harus dipenuhi. Oleh karena itu, referensi yang terdapat pada tabel di bawah ini menjadi panduan untuk memverifikasi bahwa sifat mekanis dari material baja tersebut sesuai dengan standar yang telah ditetapkan dalam perencanaan struktural

Tabel 2. 2 Mutu Material Baja

Jenis Baja	Tegangan Putus Minimum, F_u (MPa)	Tegangan Leleh Minimum, F_y (MPa)	Peregangan Minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Sumber: AASHTO 2017

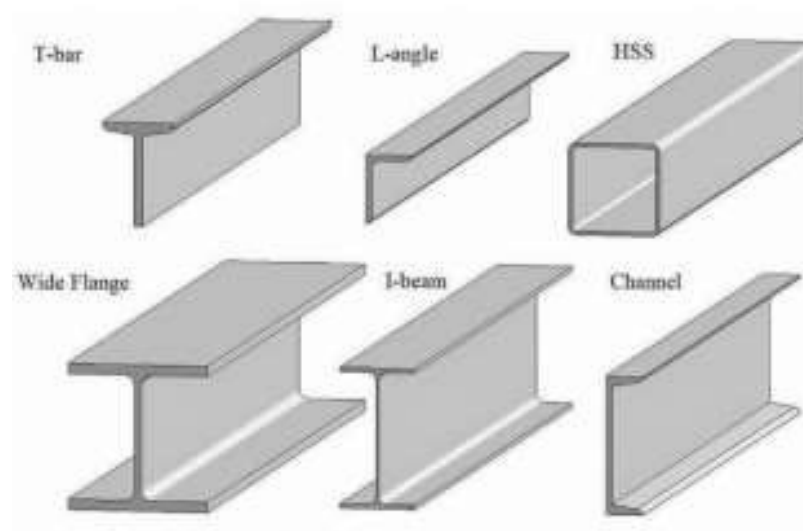
Tabel 2. 3 Sifat Mekanis Baja

Indikator	Nilai
Modulus Elastisitas (E)	200000 MPa
Modulus Geser (G)	80000 MPa
Angka Poisson (ν)	0.3
Koefisien Pemuaian (α)	12×10^{-6} per °C

Sumber: AASHTO 2017

2.6.2 Properti Penampang Baja

Properti penampang yang digunakan dalam perencanaan struktur jembatan dapat berasal dari tabel yang disediakan oleh produsen baja dan disesuaikan dengan beberapa tipe bentuk penampang (*cross section*) baja profil yang sering digunakan dalam konstruksi maupun fabrikasi seperti tertera pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 15 Profil Material Baja

2.7 Analisis Struktur Jembatan Rangka Baja

Pada perencanaan "*Nawasena Bridge*", seluruh kriteria desain jembatan disesuaikan dengan peraturan dan pedoman yang berlaku di Indonesia terkait pembangunan jembatan rangka baja. Ini mencakup analisis pembebanan dan kontrol-kontrol yang diperlukan agar jembatan dapat dianggap siap digunakan. Beberapa kriteria perencanaan yang harus dipenuhi meliputi dimensi jembatan, lokasi penempatan, posisi lantai kendaraan, pembebanan, dan jenis sambungan yang digunakan dalam jembatan.

Penting untuk mencatat bahwa dalam struktur jembatan berbahan baja, mutu dari material baja memainkan peran kunci dalam menentukan kapasitas penampang serta dalam perencanaan komponen-komponen struktur. Dalam perencanaan untuk "*Nawasena Bridge*", standar dan peraturan yang digunakan untuk menganalisis struktur rangka termasuk AASHTO 2017, SNI 1729:2020 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, dan SNI 1725:2016.

2.7.1 Batang Tarik (*Tension Member*)

Batang tarik pada jembatan memiliki peran sebagai elemen struktural yang mampu menanggung beban tarik sejajar dengan sumbunya. Dalam struktur baja,

batang tarik efektif dalam menyalurkan beban. Selain itu, mereka dirancang untuk menghindari kemungkinan kegagalan akibat gaya pada kondisi normal.

Secara umum, baja memiliki kemampuan yang baik dalam menahan gaya tarik maupun tekan. Namun, dari segi teori, baja cenderung lebih unggul dalam menahan gaya tarik daripada tekan. Batang tarik dibagi menjadi dua kategori berdasarkan AASHTO 2017 dan Bridge Engineering Handbook Second Edition: yaitu kekuatan tarik nominal berdasarkan penampang kasar (gross section yielding) dan kekuatan tarik nominal berdasarkan fraktur pada penampang efektif (net section fracture). Dalam perencanaan, nilai terkecil dari kekuatan tarik nominal ini yang diambil.

2.7.1.1 Kuat Tarik Nominal pada Kondisi Leleh Penampang Bruto

$$Pr = \phi_y P_{ny} = \phi F_y A_g \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

F_y : Tegangan leleh baja (MPa)

A_g : Luas penampang bruto pada batang (mm²)

ϕ_y : Faktor tahanan untuk kondisi leleh, dapat diambil sebesar 0,95

Adanya faktor konsentrasi tegangan yang bekerja pada batang beberapa kali lebih besar dari tegangan rencana sehingga dapat diatasi dengan sifat daktilitas material pada tegangan leleh F_y . Perilaku tersebut menyebabkan tegangan tidak merusak lubang dan hanya menyebabkan deformasi saat tegangan leleh tercapai. Teori inilah yang menyebabkan redistribusi tegangan (gaya) ke bagian lubang baut dianggap belum meleleh.

- Kuat Tarik Nominal Kondisi Leleh pada Penampang Efektif

$$Pr = \phi_u P_{nu} = \phi_u F_u A_n R_p U \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

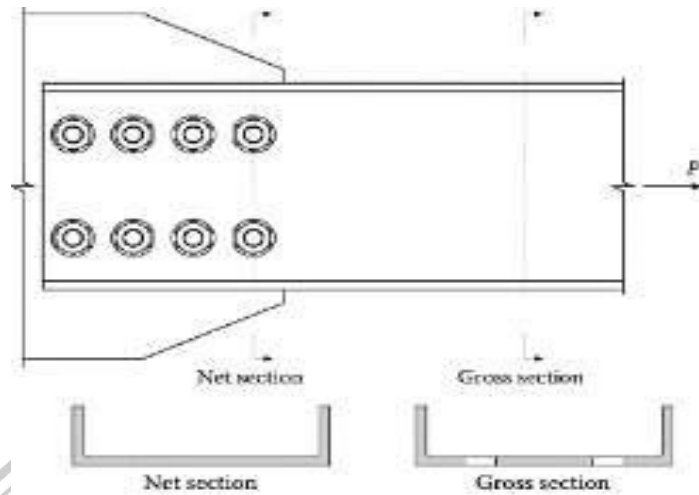
F_u : Tegangan tarik putus baja (MPa)

A_n : Luas penampang bersih (netto) dikurangi luas lubang (mm²)

R_p : Faktor reduksi untuk lubang baut, dimana 0,9 pada kondisi ulir baut masuk area lubang baut dan 1,0 untuk kondisi ulir baut tidak masuk area lubang.

U : Faktor Shear Lag

ϕ_u : Faktor tahanan untuk kondisi fraktur 0,80



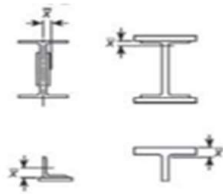


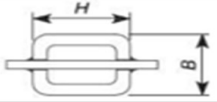
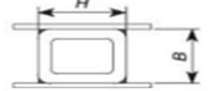
Gambar 2. 16 Tinjauan Kapasitas Tarik pada Penampang Bruto dan Netto

Kekuatan tarik yang terjadi pada penampang yang berlubang (di daerah sambungan) dimungkinkan oleh karakteristik mekanis dari baja yang mengalami pengerutan tegangan (*strain-hardening*), yang dipicu oleh peningkatan tegangan yang terfokus di sekitar lubang. Oleh karena itu, dalam menentukan pola kegagalan, digunakan nilai F_u . Hal ini mengakibatkan faktor tahanan yang dibutuhkan juga menjadi berbeda.

2.7.1.2 Faktor Shear Lag

Faktor shear lag (U) dalam batang tarik diterapkan untuk mengantisipasi ketidaksempurnaan selama proses penyambungan. Ketidaksempurnaan ini menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata, dengan titik-titik tertentu mengalami konsentrasi tegangan yang dapat mengurangi kinerja batang tarik. Besar atau kecilnya efek shear lag pada batang tarik tergantung pada jenis sambungan yang digunakan. Pemilihan sambungan juga mempertimbangkan kemudahan implementasi dan biaya produksi. Berikut adalah faktor shear lag (U) untuk batang tarik sesuai dengan AASHTO 2017 dan SNI 1729:2020 (2020).

Tabel 2. 4 Faktor Shear Lag (U) pada Batang Tarik

No.	Kasus	Faktor Shear Lag (U)	Contoh
1	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik disalurkan secara langsung ke setiap elemen profil melintang melalui sarana penyambungan atau las (kecuali seperti pada kasus no. 4, 5, dan 6).	$U = 1,0$	-
2	Semua komponen struktur tarik kecuali pelat dan PSB, dimana beban tarik disalurkan ke beberapa elemen tetapi tidak semua dari elemen profil melintang melalui sarana penyambung atau las longitudinal dalam kombinasi dengan luas transversal (secara alternatif untuk W, M, S, dan HP pada kasus no. 7).	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$	
3	Semua komponen struktur tarik dimana beban tarik hanya disalurkan melalui las transversal ke beberapa elemen tetapi tidak semua dari elemen profil melintang.	$U = 1,0$ dan $A_n =$ Luas dari elemen yang disambung langsung	-
4	Pelat dimana beban tarik disalurkan hanya melalui las longitudinal.	$L \geq 2w \dots U = 1,0$ $2w > L > 1,5 \dots U = 0,87$ $1,5w > L \geq w \dots U = 0,75$	
5	PSB bundar dengan sebuah pelat buhul konsentrik tunggal.	$L > 1,3D \dots U = 1,0$ $D < L < 1,3D \dots U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$ $\bar{x} = \frac{D}{\pi}$	
6	PSB Persegi Dengan sebuah pelat buhul konsentris tunggal	$L \geq H \dots U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B + H)}$	
	Dengan dua sisi pelat buhul	$L \geq H \dots U = 1 - \frac{\bar{x}}{L}$ $\bar{x} = \frac{B^2}{4(B + H)}$	
7	Bentuk W, M, S, HP, atau T memotong dari bentuk-bentuk ini (jika U dihitung dalam kasus 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	$bf \geq \frac{2}{3}d \dots U = 0,90$ $bf < \frac{2}{3}d \dots U = 0,85$ $U = 0,70$	-
8	Siku tunggal dan ganda (jika U dihitung dalam kasus no. 2, nilai yang lebih besar diizinkan untuk digunakan).	$U = 0,80$ $U = 0,60$	-

L = panjang sambungan (mm) ; w = lebar pelat (mm) ; \bar{x} = eksentrisitas sambungan (mm) ; B = lebar keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur 90° terhadap bidang sambungan (mm) ; H = tinggi keseluruhan dari komponen struktur PSB persegi, diukur pada bidang sambungan (mm).

Sumber: SNI 1729:2020

2.7.1.3 Batasan Rasio Kelangsingan Batang Tarik

Baja dengan mutu dan kekuatan yang sangat tinggi memungkinkan pembuatan batang dengan dimensi yang sangat ramping. Secara teoritis, pembatasan rasio kelangsingan biasanya hanya diterapkan pada batang tekan, karena kelangsingan relevan saat batang tekan mengalami tekukan. Namun, sesuai dengan AASHTO 2017, tetap disarankan untuk mempertimbangkan rasio kelangsingan, karena struktur yang sangat ramping cenderung lebih rentan terhadap getaran dan guncangan, yang dapat mengakibatkan ketidaknyamanan selama proses penggunaan bangunan. Ini adalah pembatasan yang berlaku untuk Rasio Kelangsingan Batang Utama.

$$\frac{L}{r} < 200 \dots \dots \dots (2.4)$$

a. Batasan Rasio Kelangsingan Batang Sekunder

$$\frac{L}{r} < 240 \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana:

L : Panjang batang (mm)

r : Jari-jari girasi penampang (mm)

2.7.2 Batang Tekan (*Compression Member*)

Batang tekan dalam struktur jembatan berfungsi sebagai elemen struktural yang menerima beban tekan yang terpusat pada titik sentral batang atau titik berat penampang (ujung-ujung). Namun, karena sulit untuk mencapai pemasangan yang sangat presisi, seringkali terjadi eksentrisitas pada batang yang menghasilkan momen pada batang. Eksentrisitas ini biasanya kecil dan dapat diabaikan dalam struktur batang, sehingga prosedur desain tetap dapat diterapkan.

Penentuan kapasitas batang tekan berbeda dengan batang tarik. Batang tarik menggunakan parameter material F_u dan F_y , sementara batang tekan hanya menggunakan F_y . Selain dari bahan itu, penentuan kapasitas batang tekan juga dipengaruhi oleh parameter lain seperti konfigurasi fisik (panjang batang) dan geometri dari potongan batang tekan. Oleh karena itu, batang tekan memiliki rasio kelangsingan yang harus dipertimbangkan untuk mencegah tekukan lokal dan

tekukan global. Klasifikasi untuk membedakan antara penampang yang ramping dan tidak ramping diatur dalam AASHTO 2017.

2.7.2.1 Batasan Rasio Kelangsingan Batang Tekan

Rasio kelangsingan batang merupakan salah satu parameter kunci dalam perencanaan dan juga menjadi batasan kinerjanya. Dalam perencanaan, parameter yang memegang peran penting adalah luas penampang, pengaruh bentuk penampang terhadap kekakuan lentur (I_{min}), serta panjang batang yang ditumpu, yang diatur dengan panjang efektif (KL). Berikut adalah batasan rasio kelangsingan untuk batang tekan menurut AASHTO 2017.

a. Untuk Batang Utama

$$\frac{KL}{r} \leq 120 \dots\dots\dots(2.6)$$

b. Untuk Batang Sekunder

$$\frac{KL}{r} \leq 140 \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

K : Faktor panjang efektif batang

Buckled shape of column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	
	Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0	
End condition code							Rotation fixed and translation fixed Rotation free and translation fixed Rotation fixed and translation free Rotation free and translation free

Gambar 2. 17 Faktor Panjang Efektif Batang Tekan

2.7.2.2 Klasifikasi Penampang Batang Tekan

Perilaku tekuk pada batang tekan merupakan salah satu aspek penting yang harus dipertimbangkan secara cermat dalam perencanaan dan analisis struktural. Dalam menghadapi beban tekannya, batang-batang ini dapat mengalami dua jenis perilaku tekuk utama: tekuk lokal (local buckling) dan tekuk global (global buckling). Keduanya memiliki implikasi yang signifikan terhadap integritas struktur secara keseluruhan dan harus dihindari agar struktur dapat berfungsi sesuai dengan yang direncanakan dan aman dari potensi kegagalan.

Untuk mengatasi risiko ini, standar seperti AASHTO 2017 dan SNI 1729:2015 memberikan panduan yang jelas tentang klasifikasi penampang batang menjadi tiga kategori: kompak (compact), tidak kompak (non-compact), dan langsing (slender). Klasifikasi ini didasarkan pada evaluasi rasio antara lebar dan tebal penampang (b/t), yang mencerminkan karakteristik geometris dan mekanis dari batang tersebut. Selain itu, standar tersebut juga menetapkan nilai batasan yang sesuai untuk masing-masing kategori, yang menjadi acuan penting dalam perencanaan struktural.

Selain klasifikasi penampang batang berdasarkan perilaku tekuk lokal dan global, faktor-faktor lain seperti material yang digunakan, kondisi lingkungan, dan metode fabrikasi juga dapat memengaruhi perilaku struktural secara keseluruhan. Misalnya, pemilihan material yang tepat dengan sifat mekanis yang sesuai sangat penting dalam mengurangi risiko deformasi atau kegagalan yang disebabkan oleh beban tekuk. Begitu pula, kondisi lingkungan tempat struktur berada, seperti suhu, kelembaban, dan kemungkinan terkena korosi, harus dipertimbangkan dalam perencanaan agar memastikan keandalan jangka panjang. Selain itu, metode fabrikasi yang benar dan pengendalian kualitas yang ketat juga berperan penting dalam memastikan keakuratan dimensi dan integritas struktural batang-batang tersebut. Dengan mempertimbangkan semua faktor ini secara holistik, para insinyur dan perencana struktur dapat merancang sistem yang tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga mampu bertahan dalam lingkungan operasionalnya dengan baik.

Tabel 2. 5 Rasio Tebal terhadap Lebar pada Elemen Tanpa Pengaku

No.	Kasus	Rasio Tebal Terhadap Lebar	Batasan Rasio Tebal Terhadap Lebar	Contoh
1	Sayap dari profil I canai panas, pelat yang diproyeksikan dari profil I canai panas; kaki berdiri bebas dari sepasang siku disambung dengan kontak menerus, sayap dari kanal, dan sayap dari T.	b/t	$0,56 \sqrt{E/Fy}$	
2	Sayap dari profil I tersusun dan pelat atau kaki siku yang diproyeksikan dari profil I tersusun.	b/t	$0,64 \sqrt{\frac{k_c E}{Fy}}^{(a)}$	
3	Kaki dari siku tunggal, kaki dari siku ganda dengan pemisah, dan semua elemen tak diperkaku tak-diperkaku lainnya.	b/t	$0,45 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
4	Stem dari T	b/t	$0,75 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
5	Badan dari profil I simetris ganda dan kanal	b/t	$1,49 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
6	Dinsing PSB persegi dan boks dari ketebalan merata	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
7	Pelat penutup sayap dan pelat diafragma antara deretan sarana penyambung atau las	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
8	Semua elemen diperkaku lainnya	b/t	$1,40 \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	
9	PSB bulat	b/t	$0,11 \frac{E}{Fy}$	

Sumber: SNI 1729:2020

2.7.2.3 Kuat Tekan Nominal (*Compressive Resistance*)

Perencanaan kapasitas batang tekan bergantung pada profil yang dianalisis berdasarkan klasifikasi penampangnya, yaitu apakah penampang tersebut kompak atau non-kompak. Perilaku penampang dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu tekuk lentur (*flexural buckling*), tekuk torsi (*torsional buckling*), dan tekuk lentur-torsi (*flexural-torsional buckling*). Berikut ini adalah panduan umum untuk perencanaan kapasitas batang tekan sesuai dengan AASHTO 2017.

2.7.3 Batang Lentur (*Flexural Member*)

Batang lentur, juga dikenal sebagai anggota lentur, bertanggung jawab untuk menanggung beban tegak lurus dari batang atau anggota lain yang ditempatkan secara horizontal. Ini menghasilkan perilaku lentur yang lebih dominan, menghasilkan dua jenis gaya pada penampang akibat gaya yang bekerja, yaitu tekan di atas garis gaya dan tarik di bawah garis gaya. Pada balok baja yang memiliki sifat elastis, ketika diberi beban, geometri akan mengalami perubahan, tetapi setelah beban dilepas, geometri akan kembali ke bentuk semula. Hal ini disebut sebagai kondisi elastis. Namun, pada kondisi plastis, perilaku berbeda. Jika batang diberi beban hingga mencapai kondisi plastis, maka batang akan mengalami deformasi dan tidak akan kembali ke posisi semula.

Gaya dalam struktur rangka batang pada dasarnya terdiri dari gaya aksial, yaitu gaya tarik dan tekan. Gaya lentur umumnya sangat kecil dan sering diabaikan. Gaya aksial tekan ditunjukkan dengan warna merah dalam diagram, sementara gaya aksial tarik ditunjukkan dengan warna biru.

2.8 Sambungan (*Connection*)

Jembatan baja adalah suatu struktur yang terdiri dari berbagai elemen primer dan sekunder yang terhubung melalui sambungan di setiap titik pertemuan antar elemen tersebut. Fungsi utama dari sambungan ini adalah untuk mentransfer gaya-gaya yang timbul akibat beban yang bekerja pada jembatan. Secara umum, sambungan harus mematuhi prinsip-prinsip keamanan, kehandalan, kemudahan

dalam proses fabrikasi dan pemasangan, serta efisiensi dalam penggunaan material (Tehuriko, 2017).

Pada jembatan baja, terdapat beberapa jenis sambungan yang umum digunakan, termasuk sambungan paku keling (*rivet connection*), sambungan baut (*bolt connection*), dan sambungan las (*welding connection*). Jembatan rangka baja pejalan kaki "*Nawasena Bridge*" direncanakan menggunakan sambungan baut, dengan penjelasan lebih lanjut seperti yang diuraikan pada subbab berikutnya.

2.8.1 Sambungan Baut

Sambungan baut merupakan jenis penyambungan yang umum digunakan dalam konstruksi jembatan saat ini dibandingkan dengan teknik penyambungan lainnya. Dalam sambungan baut, digunakan baut berkualitas tinggi yang memiliki mutu dua kali lebih tinggi dibandingkan dengan baut standar. Penggunaan sistem sambungan baut dipilih karena lebih mudah untuk dipantau dan memberikan hasil yang lebih dapat diandalkan. Walaupun tetap ada beberapa poin penting yang harus diperhatikan dalam sambungan baut seperti *overloading*, *over turning*, dan kerusakan akibat korosi (Teruhiko, 2017)

Baut adalah perangkat penyambung yang memiliki kepala berbentuk segi enam dan badan silinder dengan ulir, dimana badannya memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan dengan kepala baut. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, penggunaan baut memiliki metode pemasangan yang relatif sederhana, memungkinkan untuk penyesuaian jika terjadi kesalahan, dan dapat direncanakan untuk menyambung hingga 4 kali ukuran diameter baut. Oleh karena itu, faktor-faktor ini telah mengubah pandangan terhadap penggunaan paku keling sebagai alat sambung. Dalam penerapannya di lapangan, baut dapat digunakan untuk membuat sambungan permanen, sambungan yang dapat bergerak, atau sambungan sementara yang dapat dibongkar.



Gambar 2. 18 Sambungan Baut Pada Baja

Terdapat berbagai variasi tipe sambungan baut yang dapat digunakan. Namun, salah satu tipe baut mutu tinggi yang memenuhi standar ASTM adalah tipe A325, yang akan digunakan dalam perencanaan ini. Baut ini memiliki keunggulan karena terbuat dari baja karbon.

2.8.2 Persyaratan Umum Sambungan Baut

Dalam perencanaan sambungan baut, terdapat sejumlah persyaratan khusus yang telah diatur oleh peraturan AISC 360-16 dan AASHTO 2017, seperti yang akan diuraikan dalam sub-bab berikut ini.

2.8.2.1 Persyaratan Jarak Sambungan

Jarak antara baut pada sambungan terdiri dari dua tipe, yaitu jarak tepi minimum dan jarak minimum antar baut. Kedua ukuran ini dihitung untuk perancangan pelat sambungan pada jembatan. Penentuan jarak-jarak ini mempertimbangkan kapasitas perencanaan pelat sambungan serta profil yang memegang kekuatan geser, tumpu, dan tahanan baut.

a. Persyaratan Jarak Tepi Minimum dan Maksimum

Tabel 2. 6 Persyaratan Jarak Tepi Minimum Baut

Diameter Baut (mm)	Jarak Tepi Minimum (mm)
M16	22
M20	26
M22	28
M24	30
M27	34
M30	38
M36	46
> M36	1.25d

Sumber: AASHTO 2017

Dan untuk jarak maksimum tepi baut untuk jembatan adalah 8 kali tebal pelat terkecil atau 127 mm (5 in).

b. Persyaratan Jarak Antar Baut

Kriteria minimal spasi (s) pada jembatan sesuai dengan AASHTO 2017 adalah $s \geq 3d$. Ketentuan ini tidak hanya bertujuan untuk memastikan

keamanan, tetapi juga untuk mempermudah proses pemasangan di lapangan. Sementara itu, batasan maksimal spasi (s) adalah $s \leq 12t$ min (tebal pelat terendah) atau maksimum $24t$. Dari hasil perhitungan tersebut, digunakanlah dimensi yang memiliki nilai paling minimal.

2.8.2.2 Persyaratan Lubang Baut

Berdasarkan panduan AASHTO 2017, persyaratan untuk lubang pada baut dibagi menjadi empat kelompok, yaitu standar, kebesaran (oversized), slot pendek (short slot), dan slot panjang (long slot). Tabel 2.7 dibawah memberikan standar diameter lubang baut yang sesuai dengan jenis lubang baut.

Tabel 2. 7 Standarisasi Diameter Lubang Baut

Diameter Baut (mm)	Standard Diameter (mm)	Oversize Diameter (mm)	Slot-Pendek (b x h)	Slot-Panjang (b x h)
M16	18	20	18x22	18x40
M20	22	24	22x26	22x50
M22	24	28	24x30	24x55
M24	27	30	27x32	27x60
M27	30	35	30x37	30x67
M30	33	38	33x40	33x75
M36	d+3	d+8	(d+3) x (d+10)	(d+3) x 2.1/2d

Sumber: AASHTO 2017

2.8.2.3 Tipe Sambungan Baut dan Kekuatan Baut

Dari berbagai jenis sambungan dan beban yang bekerja pada sambungan, pada dasarnya, gaya yang mempengaruhi sambungan terdiri dari gaya geser, tarik, dan kombinasi tarik dan geser. Oleh karena itu, sambungan dapat diklasifikasikan sebagai sambungan tipe geser, sambungan tipe tarik, dan sambungan interaksi tarik dan geser. Adapun respons baut terhadap beban gaya geser terbagi menjadi dua mekanisme, yaitu slip-kritis dan tumpu.

2.8.2.3.1 Sambungan Baut Tipe Geser (*Shear Failure*)

Rancangan untuk sambungan baut tipe geser tergantung pada gaya geser yang bekerja pada penampang. Jenis sambungan tipe geser bergantung pada

bidang geser (*shear plane*) dari sambungan serta ketebalan pelat sambung yang dianalisis.

Secara umum, kekuatan geser dari sambungan dengan drat atau ulir di luar bidang geser adalah $0,6A_nF_{ub}$. Namun, jika drat atau ulir berada di dalam bidang geser, kekuatan sambungan geser akan berkurang sekitar 20% (*Bridge Engineering Handbook, Edisi Kedua, Fundamental, 2014*).

2.8.2.3.2 Sambungan Baut Tipe Tarik (Tension Failure)

Sambungan jenis tarik adalah tipe sambungan yang biasanya memanfaatkan elemen tambahan antara elemen-elemen yang akan disambungkan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah dengan menambahkan elemen end plate di ujung sambungan. Sambungan tipe tarik (*tension connection*) mengandalkan daya tahan ulir baut dan mur, serta kekuatan tahanan dari kepala baut. Menurut AASHTO 2017, kekuatan tarik baut adalah $0,76A_nF_{ub}$, seperti yang diperlihatkan dalam gambar di bawah ini.

2.9 Pembebanan Jembatan

Pembebanan merujuk pada penerimaan gaya eksternal yang bekerja secara langsung maupun tidak langsung pada sebuah struktur. Untuk menentukan besaran dan distribusi pembebanan pada struktur, diperlukan asumsi dan pendekatan yang sesuai dengan kondisi nyata serta realistis. Setelah besaran beban pada setiap elemen struktur dihitung dan diestimasi, kombinasi pembebanan paling dominan harus ditentukan.

Dalam proses perencanaan, penentuan pembebanan disesuaikan dengan standar yang berlaku, seperti SNI 1725:2016 mengenai Pembebanan untuk Jembatan dan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 02/SE/M/2010 tentang Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung untuk Pejalan Kaki. Pembebanan mencakup beban yang diestimasi akan bekerja pada struktur jembatan dan kemudian dikombinasikan dengan faktor-faktor beban eksternal sehingga jembatan dapat berfungsi sesuai dengan kapasitasnya ketika digunakan.

Perencanaan jembatan harus memastikan bahwa struktur mampu menahan beban pada batas yang telah ditetapkan untuk mencapai target pembangunan yang memperhatikan aspek kinerja dan keamanan. Sesuai dengan SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, ada beberapa jenis beban yang perlu diperhitungkan, antara lain:

1. Beban Tetap/Beban Permanen

Beban tetap adalah beban yang diakibatkan oleh berat sendiri dari struktur itu sendiri. Ini mencakup beban mati (berat sendiri rangka), beban mati tambahan, beban akibat susut dan rangkai, serta tekanan uplift tanah. Berikut adalah beberapa batasan yang diatur dalam menentukan beban tetap pada perencanaan struktur jembatan:

- Beban mati akibat berat sendiri dari material yang digunakan dalam struktur jembatan.
- Beban mati tambahan akibat berat dari elemen non-struktur yang bekerja, dengan nilai berdasarkan berat isi bahan yang digunakan.
- Beban akibat susut dan rangkai tidak diperhitungkan.
- Tekanan uplift tanah tidak diperhitungkan karena perencanaan dan perhitungan terbatas pada bagian struktur atas jembatan saja.

Tabel 2. 8 Berat Jenis pada Beban Tetap/Permanen

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (Kg/m ³)
1	Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing coarse</i>)	22	2245
2	Besi tuang (<i>cast iron</i>)	71	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (<i>compacted sand, silt or clay</i>)	17.2	1755
4	Kerikil dipadatkan (<i>rolled gravel, macadam or ballast</i>)	18.8 - 22.7	1920 - 2315
5	Beton aspal (<i>asphalts concrete</i>)	22	2245
6	Beton ringan (<i>light concrete</i>)	12.25 - 19.60	1250 - 2000
7	Beton	$F_c' \leq 35 \text{ MPa}$	2320 2240
		$35 \leq F_c' \leq 150 \text{ MPa}$	+ 2.29 F_c'
8	Baja (<i>steel</i>)	78.5 7.8	7850
9	Kayu (<i>wood</i>)	11	800
10	Kayu keras (<i>hard wood</i>)		1125

Sumber: SNI 1725:2016

2. Beban Sementara

Beban sementara timbul ketika suatu struktur mengalami beban hanya dalam kondisi atau periode tertentu. Beban ini bersifat berpindah-pindah dan disebabkan oleh faktor eksternal struktural. Beban ini juga tidak hanya bekerja pada satu titik tertentu, melainkan merata di seluruh struktur. Beban sementara meliputi beban pelaksanaan, beban lalu lintas, beban akibat perubahan suhu, beban angin, gesekan saat penempatan, dan beban akibat gempa.

Berikut adalah beberapa penjelasan tentang penentuan beban sementara untuk perencanaan struktur jembatan:

- Beban pelaksanaan adalah beban pada saat proses pelaksanaan konstruksi.
- Beban lalu lintas yang diperhitungkan adalah beban pejalan kaki sesuai fungsi dari jembatan yang akan direncanakan.
- Beban aksi lingkungan yang diperhitungkan adalah beban angin.
- Gaya gesek perletakan yang diperhitungkan karena perencanaan dibatasi hanya gaya gesekan yang terjadi sebagai jembatan pejalan kaki.

3. Beban Khusus

Beban Khusus hanya diperhitungkan pada situasi-situasi tertentu, seperti saat menghitung tegangan dan regangan jembatan. Beban Khusus terdiri dari beban akibat gaya prategang dan beban akibat tumbukan.

- Beban akibat gaya prategang tidak diperhitungkan karena perencanaan struktur jembatan tidak termasuk struktur prategang.
- Beban akibat gaya tumbukan tidak diperhitungkan karena perencanaan jembatan diasumsikan terletak pada area yang terbebas dari tumbukan.

Dengan demikian, beban sementara dan khusus harus diperhitungkan dengan cermat sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik dari struktur jembatan yang akan direncanakan.

2.9.1 Beban Tetap

2.9.2.1 Berat Sendiri

Berat Sendiri adalah berat dari bagian elemen-elemen struktural yang dipikulnya seperti berat dari material struktur rangka, pelat sambung, dan alat sambung, maupun elemen non-struktural yang dianggap tetap. Adapun faktor beban yang dapat digunakan untuk berat sendiri (MS) disajikan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. 9 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Bahan	Faktor Kombinasi Beban		
		Keadaan batas Layan	Keadaan batas Biasa	Ultimit Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Alumunium	1,00	1,10	0,90
	Beton Pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton Dicor Ditempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

Sumber: SNI 1725:2016

2.9.2.2 Beban Mati Tambahan/Utilitas

Beban mati tambahan merujuk pada beban dari semua komponen non-struktural pada sebuah jembatan, seperti pagar, lantai, trotoar, dan sebagainya. Besarnya beban ini dapat bervariasi selama masa penggunaan jembatan. Berikut adalah faktor-faktor pembebanan yang terkait dengan beban mati tambahan/utilitas (MA) yang dijelaskan pada Tabel dibawah ini.

Tabel 2. 10 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Bahan	Faktor Kombinasi Beban		
		Keadaan batas Layan	Keadaan batas Biasa	Ultimit Terkurangi
Tetap	Umum	1,00	2,00	0,70
	Khusus (terawasi)	1,00	1,40	0,80

Catatan (*) : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas

Sumber: SNI 1725:2016

2.9.2 Beban Sementara / Beban Hidup

Beban sementara yang telah direncanakan untuk bekerja pada jembatan rangka baja pejalan kaki meliputi beban pelaksanaan, beban dari pejalan kaki, dan beban yang diakibatkan oleh kondisi lingkungan.

2.9.2.1 Beban Pelaksanaan

Beban pelaksanaan adalah beban yang disebabkan oleh metode pelaksanaan pekerjaan jembatan di lapangan. Beban ini berkaitan dengan beban aksi lainnya sehingga beban ini harus dikombinasikan dengan faktor beban yang telah ditentukan. Faktor beban tetap pelaksanaan disajikan dalam Tabel dibawah.

Tabel 2. 11 Faktor Beban untuk Beban Pelaksanaan

Tipe Beban	Bahan	Faktor Kombinasi Beban		
		Keadaan batas Layan	Keadaan batas Biasa	Ultimit Terkurangi
Tetap	Beban Pelaksanaan	1,00	1,00	1,00

Sumber: SNI 1725:2016

2.9.2.2 Beban Pejalan Kaki

Beban lalu lintas adalah beban yang melintasi lantai jembatan. Pada perencanaan jembatan ini, beban rencana berupa beban pejalan kaki didesain sebesar 500 kg/m.

2.9.3 Beban Khusus (Beban Aksi Lingkungan)

Dalam perencanaan jembatan ini, pembebanan akibat faktor lingkungan termasuk beban yang diinduksi oleh angin. Perhitungan besarnya beban rencana disesuaikan dengan ketentuan yang terdapat dalam peraturan SNI 1725:2016.

2.9.3.1 Beban Angin

Tekanan angin pada jembatan harus direncanakan berdasarkan kecepatan angin dasar (VB) yang berkisar antara 90 hingga 126 km/jam. Beban angin diasumsikan terdistribusi secara merata pada seluruh permukaan yang terpapar angin. Luas area yang dihitung mencakup seluruh komponen, termasuk sistem lantai dan railing, yang dianggap tegak lurus terhadap arah angin. Namun, area yang memiliki kontribusi beban angin yang sangat kecil dapat diabaikan dalam perencanaan..

2.9.4 Faktor Kombinasi Pembebanan

Tabel 2. 12 Faktor Kombinasi Pembebanan

Keadaan Bebas	<i>MS</i> <i>MA</i> <i>TA</i> <i>PR</i> <i>PL</i> <i>SH</i>	<i>TT</i> <i>TD</i> <i>TB</i> <i>TR</i> <i>TP</i>	<i>EU</i>	<i>EW_s</i>	<i>EW_L</i>	<i>BF</i>	<i>Eun</i>	<i>TG</i>	<i>ES</i>	Digunakan Salah Satu		
										<i>EQ</i>	<i>TC</i>	<i>TV</i>
Kuat I	γ_p	1.8	1	-	-	1.0	0.5/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_p	1.4	1	-	-	1.0	0.5/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_p	-	1	1.4	-	1.0	0.5/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_p	-	1	-	-	1.0	0.5/1.2	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_p	-	1	0.4	-	1.0	0.5/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	1.0 γ_p	γ_{EQ}	1	-	-	1.0	-	-	-	1	-	-
Ekstrem II	$-\gamma_p$	0.5	1	-	-	1.0	-	-	-	-	1	1
Daya Lay. I	-	-	-	-	-	1.0	1/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Lay. II	1.0	1.0	1	0.3	1.0	1.0	1/1.2	-	-	-	-	-
Daya Lay. III	1.0	1.3	1	-	-	1.0	1/1.2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Lay. IV	1.0	0.8	1	-	-	1.0	1/1.2	-	1.0	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	1.0	-	1	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 2. 13 Ketentuan Penggunaan Keadaan Batas

Keadaan Bebas	Penjelasan
Kuat I	Kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya tang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai.
Kuat II	Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kendaraan khusus yang ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin.
Kuat III	Kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenai beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.

Kuat IV	Kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar.
Kuat V	Kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam
Ekstrem I	Kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup yEQ yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan.
Ekstrem II	Kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup berkurang dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir, atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat tumbukan kendaraan (TC). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasikan dengan beban akibat tumbukan kendaraan dan tumbukan kapal.
Daya Layan I	Kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhitungkan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam.
Daya Layan II	Kombinasi pembebanan yang ditujukan untuk mencegah terjadinya pelelehan pada struktur baja dan selip pada sambungan akibat beban kendaraan.
Daya Layan III	Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada area memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan jembatan beton segmental.
Daya Layan IV	Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak.
Fatik (TD dan TR)	Kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas.

Sumber: SNI 1725:2016

Nawasena Bridge telah memilih berbagai kombinasi faktor pembebanan dari keadaan batas desain Kuat I, Kuat III, dan Daya Layan I sesuai dengan persyaratan perencanaan jembatan. Alasan pemilihan jenis keadaan batas ini didasarkan pada pertimbangan fungsionalitas kombinasi keadaan batas tersebut, yang dapat dijelaskan sebagai berikut.

- a. Kuat I : Untuk mendesain elemen struktur rangka utama jembatan.
- b. Kuat II : Untuk mendesain struktur sekunder jembatan, yaitu ikatan lateral (bracing).
- c. Daya Layan I : Untuk menentukan kelayakan jembatan pada kondisi Service Limit State (SLS) yang pada halini didasarkan pada kontrol lendutan jembatan.

Tabel 2. 14 Pembebanan pada Jembatan

Spesifikasi Beban	Beban Yang Bekerja	Faktor Kombinasi Beban		
		Kuat I	Kuat II	Kuat III
Beban Permanen	Mati Rangka	1,1	1,1	1,0
	Mati Sambungan	1,1	1,1	1,0
	Mati Tambahan Lantai	2,0	2,0	1,0
	Mati Tambahan Utilitas	1,3	1,3	1,0
Beban Sementara	Pejalan Kaki	1,8	-	1,0
	Pelaksanaan	1,0	1,0	1,0
Beban Khusus	Beban Angin	-	1,4	1,0

Sumber: SNI 1725:2016

2.10 Ketentuan Lendutan (*Deflection*)

Dalam perencanaan struktur jembatan, terdapat sejumlah persyaratan tambahan yang harus memenuhi standar yang berlaku. Beberapa dari ketentuan-ketentuan tersebut dijelaskan pada subbab-subbab berikut.

Salah satu persyaratan adalah bahwa lendutan pada jembatan harus dianalisis secara menyeluruh, baik pada balok maupun rangka secara keseluruhan. Selanjutnya, berikut adalah persyaratan untuk batas lendutan yang diperlukan untuk jembatan dengan struktur rangka baja sesuai peraturan yang berlaku.

- a. Untuk jembatan berupa balok di atas dua tumpuan atau gelagar menerus; $L/800$ (L = bentang jembatan).
- b. Untuk jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki; $L/1000$ (L = bentang jembatan).
- c. Untuk jembatan yang memiliki jalur pejalan kaki dengan intensitas pejalan kaki yang padat; $L/1200$ (L = bentang jembatan).
- d. Untuk jembatan berupa balok kantilever ujung pada jembatan; L