

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian Jembatan

Jembatan adalah suatu konstruksi atau bangunan yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah yang dalam, alur sungai, danau, saluran irigasi, jalan kereta api, jalan raya yang melintang tidak sebidang dan lain-lain. Secara umum jembatan mempunyai 3 bagian utama, yaitu konstruksi bagian atas (*superstructure*), konstruksi bagian bawah (*substructure*), dan pondasi (*foundation*).

Konstruksi bagian atas (*superstructure*) adalah bagian jembatan yang berfungsi untuk menerima beban secara langsung. Beban-beban tersebut meliputi beban sendiri, beban mati, beban mati tambahan, beban lalu-lintas kendaraan, beban pejalan kaki, dan beban-beban lain yang berada di atas jembatan tersebut. Konstruksi bagian bawah (*substructure*) ialah bagian jembatan yang berguna untuk mendukung konstruksi *superstructure*, sedangkan pondasi (*foundation*) merupakan bagian jembatan yang berperan untuk memikul keseluruhan dari beban jembatan. Secara umum jembatan dapat digolongkan menjadi beberapa jenis, yaitu :

1. Berdasarkan lokasi
 - a. Jembatan di atas jalan (*fly over*)
 - b. Jembatan di atas sungai atau danau
 - c. Jembatan di atas lembah
 - d. Jembatan di dermaga (*jetty*)
 - e. Jembatan di atas saluran irigasi atau drainase (*culvert*)
2. Berdasarkan fungsi
 - a. Jembatan jalan raya (*highway bridge*)
 - b. Jembatan pejalan kaki atau penyeberangan (*pedestrian bridge*)
 - c. Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*)

3. Berdasarkan bahan konstruksi
 - a. Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*)
 - b. Jembatan komposit (*composite bridge*)
 - c. Jembatan kayu (*log bridge*)
 - d. Jembatan baja (*steel bridge*)
 - e. Jembatan beton (*concrete bridge*)
4. Berdasarkan tipe struktur
 - a. Jembatan pelengkung (*arch bridge*)
 - b. Jembatan plat (*slab bridge*)
 - c. Jembatan cantilever (*cantilever bridge*)
 - d. Jembatan plat berongga (*voided slab bridge*)
 - e. Jembatan gelagar (*girder bridge*)
 - f. Jembatan rangka (*truss bridge*)
 - g. Jembatan kabel (*cable stayed bridge*)
 - h. Jembatan gantung (*suspension bridge*)

3.2 Bentuk Dan Tipe Jembatan

Kemajuan pengetahuan dan teknologi dibidang jembatan sejalan dengan kemajuan peradaban manusia (Supriyadi dan Muntohar, 2007). Secara umum bentuk dan tipe jembatan dapat diklasifikasikan dalam beberapa tipe, di antaranya adalah jembatan lengkung-batu (*stone arch bridge*), jembatan rangka (*truss bridge*), jembatan beton (*concrete bridge*), jembatan gantung (*suspension bridge*), dan jembatan kabel tetap (*cable stayed*).

3.2.1 Jembatan Lengkung (*arch bridge*)

Jembatan pelengkung dari bahan batu, telah ditemukan pada masa lampau, di masa Babylonia. Pada perkembangannya jembatan jenis ini semakin banyak ditinggalkan. Saat ini jembatan pelengkung lebih sering dibuat dengan bahan konstruksi beton atau baja. Contoh jembatan lengkung dapat dilihat pada Gambar 3.1 sebagai berikut.

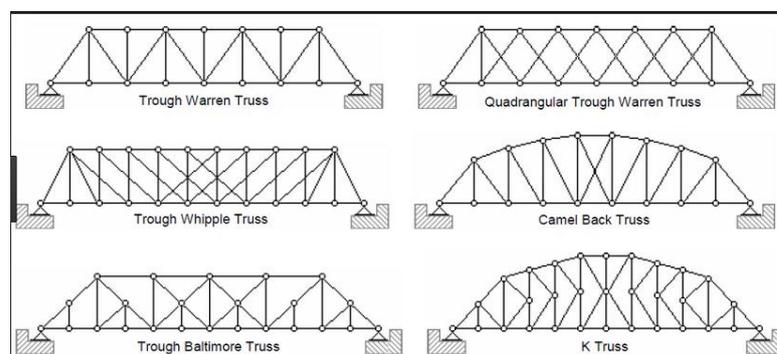


Gambar 3. 1 Jembatan Lengkung (Jembatan Palu 4) di Kota Palu

(Sumber : www.kompasiana.com)

3.2.2 Jembatan Rangka (*truss bridge*)

Jembatan rangka dapat terbuat dari bahan kayu atau logam. Jembatan rangka kayu (*wooden truss*) termasuk tipe klasik yang sudah banyak tertinggal mekanika bahannya. Jembatan rangka kayu, hanya terbatas untuk mendukung beban yang tidak terlalu besar. Pada perkembangannya setelah ditemukan bahan baja, tipe rangka menggunakan rangka baja, dengan berbagai macam bentuk. Contoh jembatan rangka dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Jembatan Rangka

(Sumber : www.khammal.blogspot.co.id)

3.2.3 Jembatan Gantung (*suspension bridge*)

Jembatan gantung sering digunakan untuk jembatan bentang panjang. Pertimbangan pemakaian tipe jembatan ini adalah dapat dibuat untuk bentang panjang tanpa pilar di tengahnya. Jembatan gantung terdiri atas pelengkung penggantung dan batang penggantung (*hanger*) dari kabel baja, dan bagian yang lurus berfungsi mendukung lalu lintas (dek jembatan).

Selain bentang utama, biasanya jembatan gantung mempunyai bentang luar (*side span*) yang berfungsi untuk mengikat/mengangkerkan kabel utama pada blok angker. Walaupun pada kondisi tertentu terdapat keadaan dimana kabel utama dapat langsung diangkerkan pada ujung jembatan dan tidak memungkinkan adanya bentang luar, bahkan kadangkala tidak membutuhkan dibangunnya pilar. Contoh jembatan gantung dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



Gambar 3. 3 Jembatan Gantung (*Golden Gate Bridge*) di Amerika Serikat
(Sumber : www.khabuka.blogspot.co.id)

3.2.4 Jembatan Beton (*concrete bridge*)

Jembatan beton merupakan jembatan yang konstruksinya terbuat dari material utama bersumber dari beton. Dewasa ini, dengan kemajuan teknologi

beton dimungkinkan untuk memperoleh bentuk penampang yang beragam. Bahkan dalam kenyataan sekarang jembatan beton ini tidak hanya berupa beton konvensional, tetapi telah dikembangkan berupa jembatan prategang. Contoh jembatan beton dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



Gambar 3. 4 Jembatan Beton Masang Gadang A di Padang

(Sumber : www.datajembatan.com)

3.2.5 Jembatan Kabel Tetap (*cable stayed bridge*)

Jembatan kabel tetap (*cable stayed*) adalah jembatan yang menggunakan kabel-kabel berkekuatan tinggi sebagai penggantung yang menghubungkan gelagar dengan menara. Jembatan *Cable-Stayed* terdiri atas sistem struktur yang meliputi suatu dek *orthotropic* dan balok gelagar menerus yang didukung oleh penunjang yang sangat kokoh, dan juga bentuk kabel yang dibentang miring dan dihubungkan ke menara sebagai pondasi utamanya. Pada umumnya jembatan *cable stayed* menggunakan gelagar baja, rangka, beton, atau beton patekan sebagai gelagar utama. Pemilihan bahan gelagar tergantung pada ketersediaan bahan, metode

pelaksanaan dan harga konstruksi. Contoh jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3. 5 Jembatan *Cable Stayed* Bareleng di Batam

(Sumber : www.aprekecil.blogspot.co.id)

3.3 Jembatan Kabel Tetap (*Cable Stayed Bridge*)

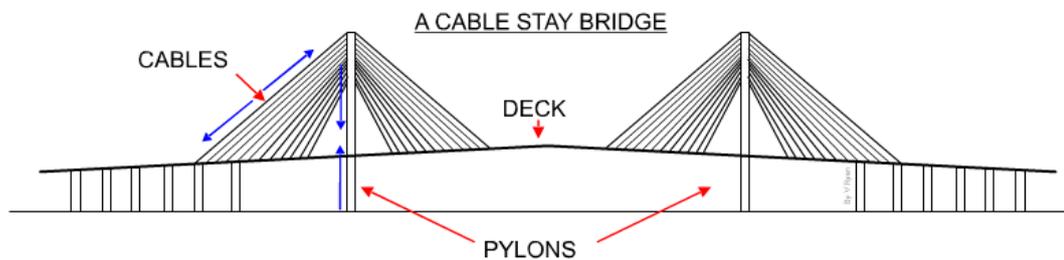
Cable-Stayed merupakan salah satu teknologi yang sangat baik dalam membuat sebuah jembatan yang memiliki bentang panjang. Jembatan *Cable-Stayed* adalah struktur yang mempunyai sederetan kabel linear dan memikul elemen horizontal kaku (misalnya balok atau rangka batang). Jembatan *Cable-Stayed* terdiri atas struktur yang meliputi suatu dek *orthotropic* dan balok gelagar menerus yang didukung oleh penunjang yang sangat kokoh, dan juga bentuk kabel yang dibentang miring dan dihubungkan ke menara sebagai pondasi utamanya.

Untuk jembatan dengan bentang yang cukup panjang diperlukan struktur kabel (*Cable-Stayed*) yang berfungsi sebagai pilar-pilar penghubung dalam memikul sebagian besar dari beban jembatan yang kemudian dilimpahkan ke pondasi atau menara. Maksud pengembangan teknologi kabel ialah merangkai bentang-bentang pendek menjadi satu bentang panjang yang dapat menghasilkan

kekuatan penopang yang lebih kuat untuk memikul berat jembatan itu sendiri ataupun lalu lintas yang melewati jembatan tersebut.

3.4 Komponen Jembatan *Cable Stayed*

Pada jembatan *cable stayed* terdapat tiga komponen utama dalam sistem struktur jembatan kabel. Komponen-komponen tersebut adalah sistem kabel, gelagar, dan menara atau *pylon*. Untuk lebih jelasnya, komponen-komponen jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada Gambar 3.6 sebagai berikut.



Gambar 3. 6 Komponen-Komponen Jembatan *Cable Stayed*

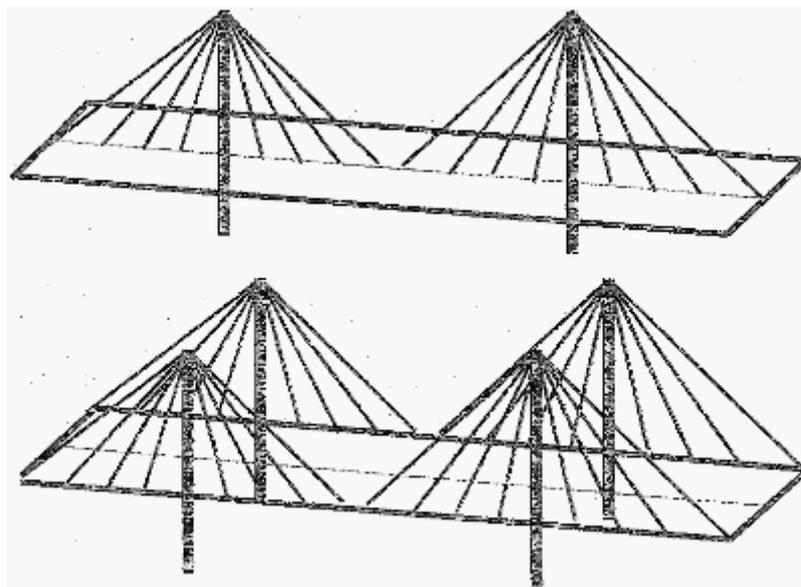
(Sumber : www.4muda.com)

3.5.1 Sistem Kabel

Sistem kabel menjadi satu hal yang mendasar dalam perencanaan jembatan *cable stayed*. Kabel digunakan untuk menopang gelagar diantara dua tumpuan dan memindahkan beban tersebut ke menara. Secara umum sistem kabel dapat dilihat sebagai tatanan kabel transversal dan longitudinal. Pemilihan tatanan kabel didasarkan atas berbagai hal karena akan memberikan pengaruh yang berlainan terhadap perilaku struktur terutama pada bentuk menara dan tampang gelagar. Selain itu, pemilihan tatanan kabel juga berpengaruh pada metode pelaksanaan, biaya, dan arsitektur jembatan.

1. Tatanan Kabel Transversal

Tatanan kabel transversal terhadap arah sumbu longitudinal jembatan dapat dibuat satu atau dua bidang dan sebaliknya yang ditempatkan secara simetri. Ada juga perencana yang menggunakan tiga bidang kabel sampai sekarang belum dapat diterapkan di lapangan. Bentuk tatanan kabel transversal dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Tatanan Kabel Transversal Satu Bidang dan Dua Bidang

(Sumber: www.thesis.binus.ac.id)

a. Sistem Satu Bidang

Sistem ini sangat menguntungkan dari segi estetika karena tidak terjadi kabel bersilangan yang terlihat oleh pandangan sehingga terlihat penampilan struktur yang indah. Kabel ditempatkan ditengah-tengah dek dan membatasi dua arah jalur lalu lintas. Untuk jembatan bentang panjang biasanya memerlukan menara yang tinggi menyebabkan lebar menara di bawah dek sangat besar. Secara umum jembatan yang sangat panjang atau sangat lebar tidak cocok dengan penggantung kabel satu bidang.

b. Sistem Dua Bidang

Penggantung dengan dua bidang dapat berupa dua bidang vertikal sejajar atau dua bidang miring yang pada sisi atas lebih sempit. Penggunaan bidang miring dapat menimbulkan masalah pada lalu lintas yang lewat diantara dua bidang kabel, terlebih jika jembatan memiliki bentang yang relatif pendek atau menengah.

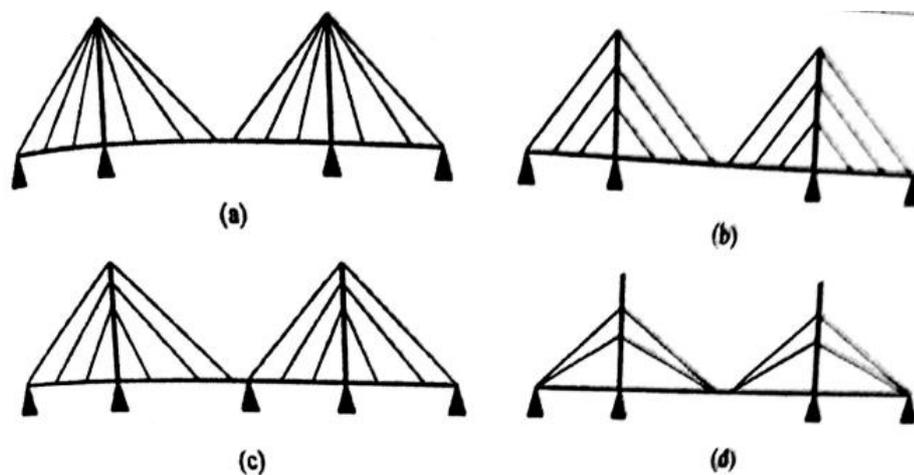
c. Sistem Tiga Bidang

Pada perencanaan jembatan yang sangat lebar atau membutuhkan jalur lalu lintas yang banyak, akan ditemui torsi yang sangat besar bila menggunakan sistem kabel satu bidang dan momen lentur yang besar pada

tengah balok melintang bila menggunakan sistem dua bidang. Kejadian ini menyebabkan gelagar sangat besar dan menjadi tidak ekonomis lagi. Penggunaan penggantung tiga bidang dapat mengurangi torsi, momen lentur, dan gaya geser yang berlebihan. Penggunaan penggantung tiga bidang sampai saat ini masih berupa inovasi dan baru sampai pada tahap desain (Walther,1988).

2. Tatanan Kabel Longitudinal

Tatanan kabel longitudinal jembatan mempunyai banyak variasi tergantung pada pengalaman perencana menentukan perbandingan antara bentang dengan tinggi menara. Untuk bentang yang lebih pendek, kabel tunggal mungkin sudah cukup untuk menahan beban rencana. Untuk bentang utama yang panjang dan bentang tidak simetris yang menggunakan angker, variasi tatanan kabel tidak cukup dengan kebutuhan secara teknis tetapi harus menghasilkan konfigurasi dasar tatanan kabel longitudinal yaitu, *radiating*, *harp*, *fan*, dan *star*. Bentuk tatanan kabel longitudinal dapat dilihat pada Gambar 3.8 sebagai berikut.



Gambar 3. 8 Tatanan Kabel Longitudinal

(Sumber : Supriyadi dan Muntohar, 2007)

a. Tipe *Radiating*

Merupakan sebuah susunan dimana kabel dipusatkan pada ujung atas menara dan disebar sepanjang bentang pada gelagar. Kelebihan tipe ini adalah kemiringan rata-rata kabel cukup besar sehingga komponen gaya

horizontal tidak terlalu besar. Kabel yang terkumpul di atas kepala menara akan menyulitkan dalam perencanaan dan pendetailan sambungan.

b. Tipe *Harp*

Terdiri atas kabel-kabel penggantung yang dipasang sejajar dan disambungkan ke menara dengan ketinggian yang berbeda-beda. Susunan kabel yang sejajar memberikan efek estetika yang sangat indah namun terjadi lentur yang sangat besar pada menara.

c. Tipe *Fan*

Merupakan sebuah susunan dimana kabel disebar pada bagian atas menara dan pada dek sepanjang bentang, sehingga menghasilkan susunan kabel yang tidak sejajar. Penyebaran kabel pada menara akan memudahkan pendetailan tulangan.

d. Tipe *Star*

Pada tipe ini, memiliki bentuk yang berlawanan dengan tipe radiating dimana kabel terpusat pada gelagar. Bentuk ini memberikan efek estetika yang baik namun menyulitkan pendetailan sambungan pada gelagar. Dukungan antara dua tumpuan tetap jembatan hanya ada pada pertemuan kabel sehingga momen lentur yang akan terjadi menjadi lebih besar.

3. Kabel sebagai Elemen Struktural

Pada jembatan *cable stayed*, kabel merupakan salah satu elemen utama yang harus memiliki keamanan terhadap kegagalan *fatigue* serta ancaman korosi. Beban *fatigue* pada jembatan terjadi karena adanya beban transien yang bekerja. Pemilihan penggunaan tipe kabel tergantung pada property mekanikal yang dibutuhkan (modulus elastis, kekuatan tarik ultimit, durabilitas, dll) disamping pertimbangan ekonomis (Zamad, 2017). Kabel yang digunakan pada jembatan *cable stayed* memiliki beberapa jenis, yaitu :

a. *Spiral Strand*

Kabel jenis ini terdiri dari beberapa kawat berbentuk lingkaran yang diberikan puntiran sedemikian rupa agar tercipta homogenitas dalam memikul gaya. Berikut gambar kabel jenis *spiral strand*.

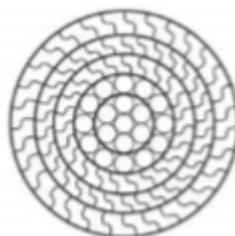


Gambar 3. 9 Kabel Jenis *Spiral Strand*

(Sumber : Gimsing & Georgakis, 2012)

b. *Locked Coil Strand*

Kabel jenis ini memiliki inti kawat (*wire core*) dan terdiri dari beberapa lapisan (*layer*). Kawat ini diuntai sedemikian rupa dengan cara melapiskan inti kawat hingga mencapai diameter yang dibutuhkan. Kabel jenis *locked coil strand* dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut.

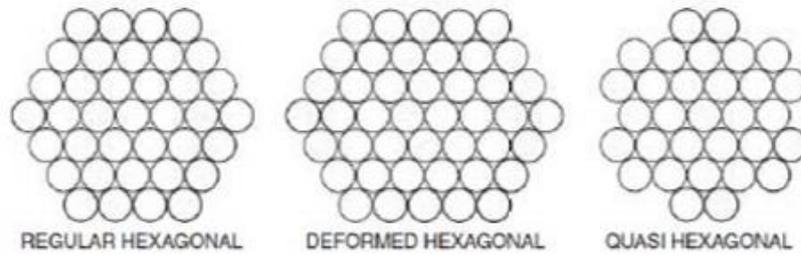


Gambar 3. 10 Kabel Jenis *Locked Coil Strand*

(Sumber : Gimsing & Georgakis, 2012)

c. *Parallel-Wire Strand*

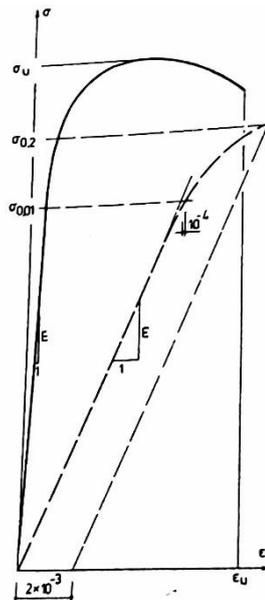
Kabel dengan jenis *parallel-wire strand* terdiri dari beberapa kawat bulat galvanis berdiameter 5 mm hingga 7 mm berbentuk *hexagonal*, dengan suatu *helix* panjang. Kawat tersebut dibungkus oleh lapisan *high density polyethylene (HDP) tube*. Bentuk *parallel-wire strand* dapat dilihat pada Gambar 3.11 sebagai berikut.



Gambar 3. 11 Kabel Jenis *Parallel-Wire Strand*

(Sumber : Gimsing & Georgakis, 2012)

Diagram tegangan-regangan pada tipikal kabel diberikan oleh Gimsing dan Georgakis (2012) seperti pada Gambar 3.12. Dalam pemilihan kabel, beberapa properti mekanikal yang perlu diperhatikan adalah modulus elastisitas (E_c), 0,2% tegangan handal (*proof stress*, $f_{cb,0.2}$), batas proporsional tegangan (*limit of proportionality* (0,01% *stress*, $f_{cb,0.01}$)), kekuatan tarik batas (f_{cbu}), dan perpanjangan total saat putus (ϵ_{cbu}) (Gimsing dan Georgakis, 2012).



Gambar 3. 12 Tipikal Kurva Tegangan-Regangan Kabel

(Sumber : Gimsing dan Georgakis, 2012)

4. Non-Linear Pada Kabel

Akibat berat sendiri kabel, menyebabkan terjadinya deformasi sepanjang kabel yang cukup besar sehingga mengurangi kekakuan kabel. Ketidaklinearan kabel terjadi ketika beban yang didukung bertambah dan *sag* pada kabel berkurang sehingga *chord* kabel akan bertambah. Untuk menempatkan kabel sebagai

komponen yang linear maka modulus kabel harus diidealisasikan. Modulus elastis ideal akan diperoleh melalui suatu penurunan rumus dengan memperhatikan kabel miring pada Gambar 3.13 yang pada ujung bawah diberi perletakan sendi dan pada ujung atas diberi perletakan bergerak. Akibat gaya F , kabel akan berbentuk seperti rantai yang digantung, dimana $L > l$ dan L adalah panjang kabel antara dua dukungan sedangkan l adalah jarak kedua tumpuan. Jika F menjadi sangat besar (*infinite*), kabel akan menjadi lurus, ujung C akan berpindah ke C_1 seperti terlihat pada Gambar 3.13. Mengenai masalah *sag* bahwa tegangan konstan pada elemen kabel dapat dijabarkan dengan persamaan berikut (Troitsky, 1988).

$$E_i = \frac{E_e}{l + \left[\frac{(\gamma L)^2}{12\sigma^3} \right] E_e}$$

Dimana,

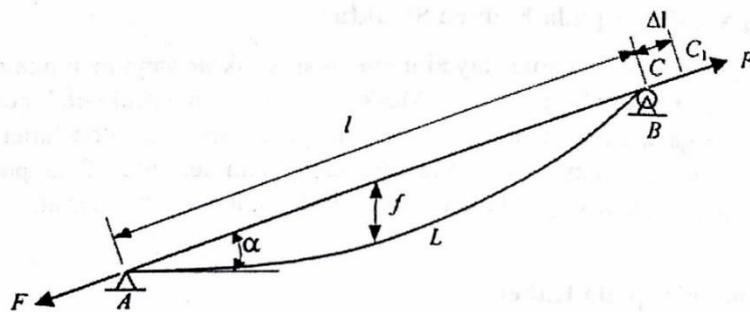
E_i : modulus elastisitas idealisasi (GPa)

E_e : modulus elastisitas kabel (GPa)

γ : berat jenis kabel (kN/m^3)

σ : tegangan ijin kabel (Mpa)

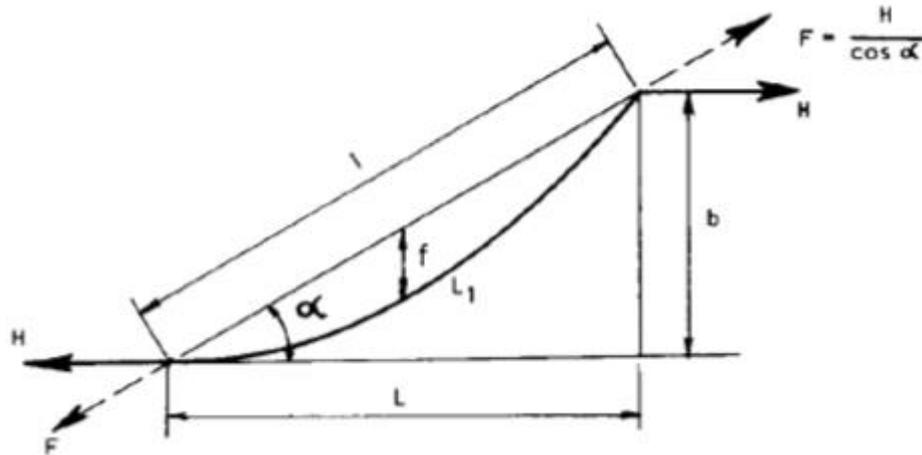
L : panjang aktual kabel (m)



Gambar 3. 13 Perilaku Kabel yang Dipasang Miring pada Tumpuan Sederhana

(Sumber : Troitsky, 1988)

Lendutan (*sag*) atau yang dinotasikan f pada Gambar 3.13 diketahui besarnya dengan melihat kurva *catenary* pada Gambar 3.14. Kurva tersebut dapat diperkirakan dengan meninjau panjang kurva parabola dibawah ini.



Gambar 3. 14 Kurva Parabola

(Sumber : Troitsky, 1988)

5. Jarak antar Kabel

Jarak antar kabel maksimum tergantung pada beberapa parameter, khususnya lebar dan bentuk dek. Jika dek dari baja atau beton komposit, pelaksanaan konstruksi dapat diselesaikan dengan *corbeling out*, jarak kabel yang sangat rapat tidak memberikan keuntungan yang besar. Sebagai ketentuan umum, jarak kabel yang bisa digunakan adalah 15 m sampai 25 m. Jika dek dari beton, desain jarak kabel dapat digunakan 5 m sampai 10 m (Walther, 1988).

Perbandingan jarak antar kabel atau panjang panel yang diperoleh dari struktur yang sudah ada (Troitsky, 1977) memberikan nilai optimum sebagai berikut.

- a. Untuk bentang tengah 130 m – 150 m, direkomendasikan panjang panel 20 m.
- b. Untuk bentang tengah yang lebih kecil, panjang panel antara 15 m – 17 m.

- c. Untuk bentang tengah yang lebih dari 170 m panjang panel sebesar 30 m.

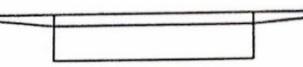
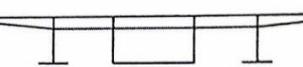
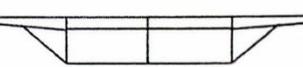
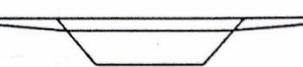
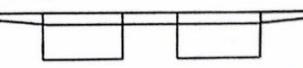
Panel tengah berbeda dengan panel lainnya karena tidak tertekan oleh komponen horisontal gaya kabel dan dimungkinkan menggunakan panjang panel tengah yang lebih besar. Pengalaman memberikan bahwa panjang panel tengah 20% - 30% lebih panjang dari panel lainnya (Supriyadi dan Muntohar, 2007)

3.5.2 Gelagar

Bentuk gelagar jembatan *cable stayed* sangat bervariasi, namun yang paling sering digunakan ada dua yaitu *stiffening truss* dan *solid web* (Podolny and Scalzi, 1976). *Stiffening truss* digunakan untuk struktur baja dan *solid web* digunakan untuk struktur baja dan beton, baik beton bertulang maupun beton prategang.

Gelagar yang tersusun dari *solid web* yang terbuat dari baja atau beton cenderung terbagi atas dua tipe (Gambar 3.15), yaitu :

- gelagar pelat (*plate girder*), dapat terdiri atas dua atau banyak gelagar,
- gelagar box (*box girder*), dapat terdiri atas satu atau susunan *box* yang dapat berbentuk persegi panjang atau trapesium.

	Susunan	Tipikal potongan melintang
Tipe gelagar utama	Gelagar I Kembar	
	Gelagar box persegi	
	Kombinasi gelagar box (tengah) - gelagar I individual (tepi)	
	Kombinasi gelagar box seluler kembar individual dan sloping struts	
	Gelagar box trapezoidal individual	
	Gelagar box persegi kembar	

Gambar 3. 15 Gelagar Solid Web

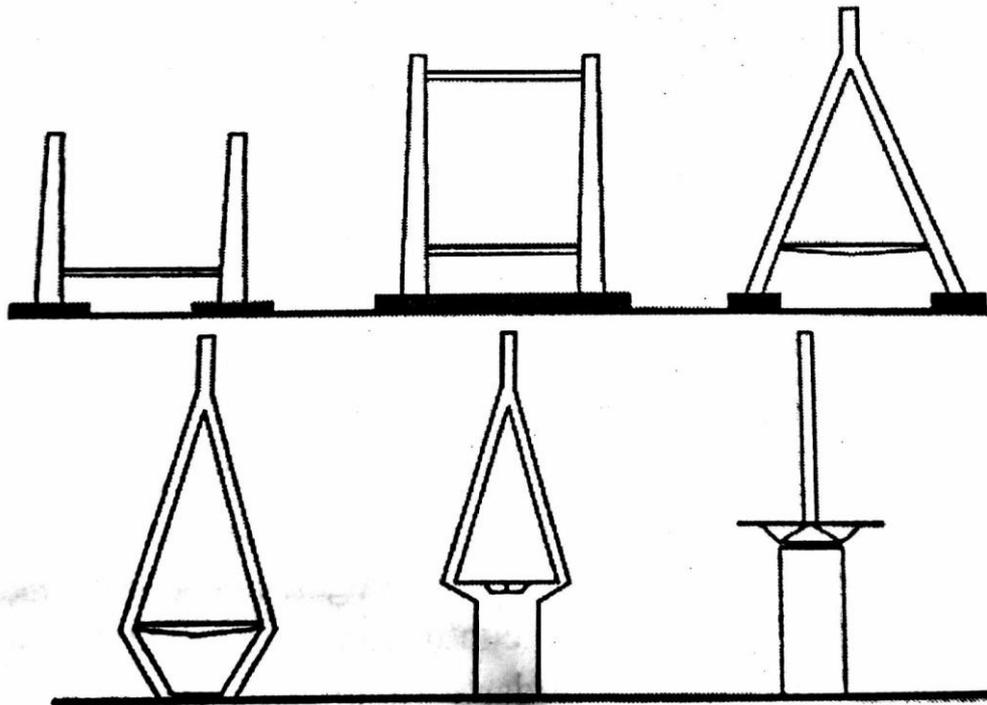
(Sumber : Muntohar dan Supriyadi, 2007)

Susunan dek yang tersusun dari gelagar pelat tidak memiliki kekakuan torsi yang besar sehingga tidak dapat digunakan untuk jembatan yang bentangnya panjang dan lebar atau jembatan yang direncanakan hanya menggunakan satu bidang kabel penggantung. Dek jembatan yang menggunakan satu atau susunan *box* akan memiliki kekakuan torsi yang sangat besar sehingga cocok untuk jembatan yang mengalami torsi yang sangat besar. Jembatan yang menggunakan satu bidang kabel penggantung biasanya menggunakan gelagar *box* tunggal, sedangkan jembatan yang lebar menggunakan susunan gelagar *box*. Gelagar pelat atau *box* yang terbuat dari baja mempunyai masalah seperti pada *truss* berupa perawatan terhadap korosi yang relatif mahal.

Perkembangan teknologi beton yang sangat cepat membuat baja mulai ditinggalkan dan beralih ke gelagar beton yang dapat berupa beton *precast* atau cetak setempat. Gelagar beton umumnya berupa gelagar *box* tunggal yang diberi pengaku lateral pada jarak tertentu.

3.5.3 Menara

Pemilihan bentuk menara sangat dipengaruhi oleh konfigurasi kabel, estetika, dan kebutuhan perencanaan serta pertimbangan biaya (Muntohar dan Supriyadi, 2007). Bentuk-bentuk menara dapat berupa rangka portal *trapezoidal*, menara kembar, menara A, atau menara tunggal yang dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Bentuk-Bentuk Menara

(Sumber: Zarkasi dan Roliansjah, 1995)

3.5 Gaya-Gaya Dalam (Respon Struktur)

Bangunan teknik sipil pada umumnya terbuat dari struktur beton, kayu, baja, dan lain-lain. Dalam pembuatan struktur-struktur tersebut perlu diketahui dimensi dari setiap elemen struktur, seperti balok, kolom, pelat, dan sebagainya. Untuk menentukan dimensi-dimensi dari elemen struktur tersebut, diperlukan gaya dalam.

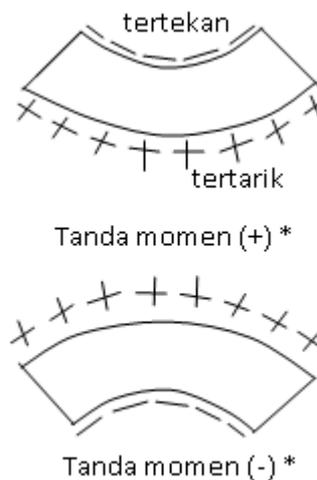
Gaya dalam merupakan gaya yang melawan gaya luar yang timbul dari kekuatan bahan konstruksi. Gaya dalam dapat berupa gaya aksial, momen, deformasi, dan lain-lain.

3.5.1 Gaya Aksial

Gaya aksial merupakan gaya yang bekerja searah dan berlawanan dengan garis kerja sumbu elemen (Dewobroto, 2013). Apabila salah satu ujung batang ditempatkan beban terpusat yang bekerja pada arah sumbu aksial, sedangkan di ujung lainnya ditahan maka terjadilah deformasi aksial. Jika diberikan gaya tarik, batang akan bertambah panjang, sebaliknya jika batang diberikan gaya tekan maka akan menjadi pendek.

3.5.2 Momen

Momen terjadi apabila sebuah gaya bekerja memiliki jarak tertentu dari titik yang akan menahan momen. Besarnya momen adalah hasil kali antara gaya dengan jarak. Momen sendiri memiliki arah-arah yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan tanda terhadap arah-arah momen tersebut. Jika momen tersebut membuat sebuah balok melentur sehingga serat atas tertekan dan serat bawah tertarik maka momen tersebut diberi tanda (+), begitu juga sebaliknya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.17 berikut.



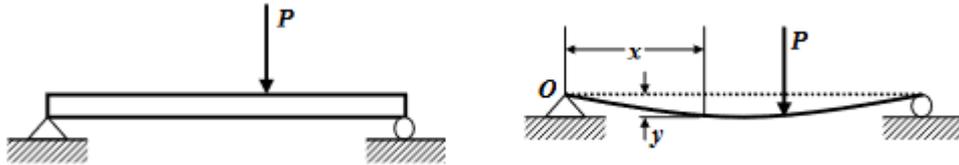
Gambar 3. 17 Tanda Arah Momen
(Sumber: www.mekanika-teknik.blogspot.co.id)

3.5.3 Defleksi

Defleksi adalah suatu keadaan dimana sebuah balok mengalami perubahan kedudukan akibat adanya pembebanan *vertical*. Defleksi dapat diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok. Pada gelagar sebuah jembatan defleksi maksimum (δ_{maks}) dapat ditentukan dengan rumus AISC sebagai berikut:

$$\delta_{\text{maks}} = \frac{1}{360} \times L \quad (3.1)$$

Bentuk balok sebelum dan sesudah mengalami deformasi dapat dilihat pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Defleksi Pada Balok

(Sumber: <http://bambangpurwantana.staff.ugm.ac.id/KekuatanBahan>)

3.6 Pembebanan

Perencanaan jembatan perlu memperhitungkan beban-beban yang akan terjadi. Beban-beban yang akan diterima harus direncanakan sesuai peraturan dan standar yang ada karena akan mempengaruhi dimensi dan struktur jembatan. Pembebanan dalam perencanaan jembatan di Indonesia mengacu pada Standar Pembebanan Untuk Jembatan (SNI 1725-2016). Berdasarkan SNI 1725-2016, aksi-aksi (beban, perpindahan, dan pengaruh lainnya) dikelompokkan menurut sumbernya, antara lain adalah:

1. aksi tetap,
2. aksi sementara (beban lalu lintas),
3. aksi lingkungan, dan
4. aksi-aksi lainnya.

3.6.1 Aksi Tetap (*Permanent Actions*)

Aksi tetap merupakan beban permanen yang diterima oleh struktur jembatan selama masa layan. Dalam penelitian ini aksi tetap terdiri atas berat sendiri struktur dan beban mati tambahan.

1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktur, ditambah dengan elemen non struktur yang dianggap tetap. Berat sendiri dihitung berdasarkan berat isi dan kerapatan massa (unit weights and mass densities) seperti Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Berat Isi untuk Beban Mati

No.	Bahan	Berat Satuan isi (kN/m ²)	Kerapatan Massa (Kg/m ³)
1	Lapisan permukaan aspal	22,0	2245
2	Besi tuang	71,0	7240
2	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1755
3	Kerikil dipadatkan	18,8-22,7	1920-2315
4	Aspal beton	22,0	2245
5	Beton ringan	12,25-19,6	1250-2000
6	Beton ($f'c < 35$ MPa)	22,0-25,0	2320
7	Beton ($35 < f'c < 105$ MPa)	$22 + 0,022 f'c$	$2240 + 2,29 f'c$
8	Baja	78,5	7850
9	Kayu ringan	7,8	800
10	Kayu Keras	11,0	1125

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non struktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan. Beban mati contohnya dapat berupa lapisan kembali permukaan aspal (*overlay*) setebal 50 mm dengan γ_{aspal} sebesar 25 kN/m³.

3.6.2 Aksi Sementara (*Transient Action*)

Aksi sementara (*transient action*) adalah aksi akibat pembebanan sementara dan bersifat berulang-ulang. Berikut yang termasuk dalam aksi sementara adalah.

1. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur “*D*” dan beban truk “*T*”. Beban lajur “*D*” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “*D*” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Beban truk “*T*” adalah satu kendaraan berat dengan 3 as yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap as terdiri dari dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk “*T*” diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

a. Beban Lajur “*D*”

Beban lajur “*D*” adalah susunan beban pada setiap jalur lalu lintas yang terdiri dari beban terbagi rata sebesar q kPa dan beban garis “*p*”. Besar beban q tergantung pada panjang total L yang dibebani dan dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

untuk $L \leq 30$ m, maka $q = 9,0$ kPa

untuk $L > 30$ m, maka $q = 9,0 (0,5 + 15/L)$ kPa

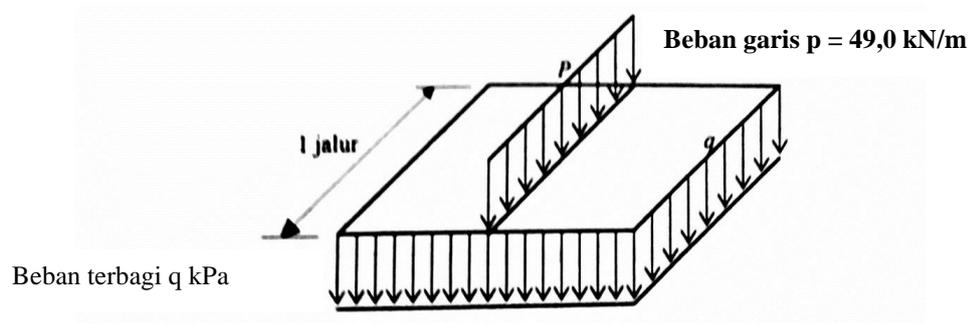
Dimana,

q = intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan
(kPa)

L = panjang total jembatan yang dibebani (meter)

(SNI 1725-2016, Pasal 8.3.1).

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas p adalah 49,0 kN/m (SNI 1725-2016, Pasal 8.3.1). Penyebaran beban lajur “*D*” dapat dilihat pada Gambar 3.19 sebagai berikut.



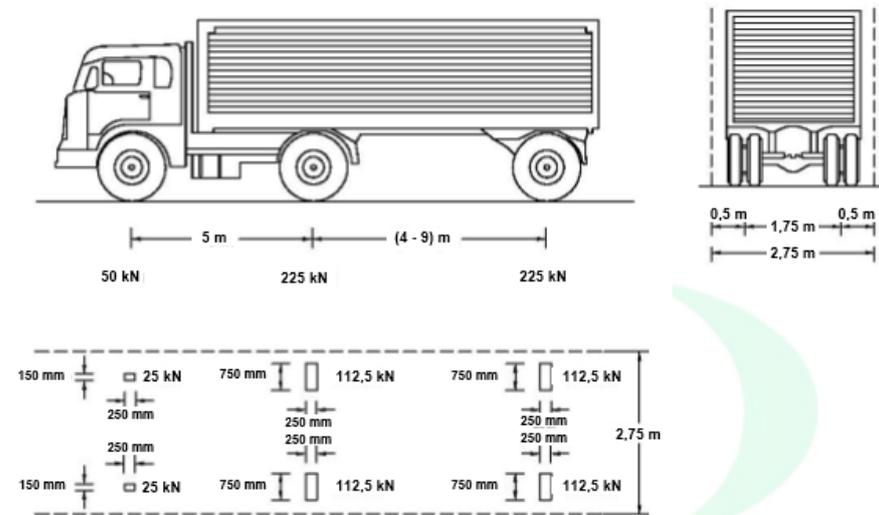
Gambar 3. 19 Beban Lajur "D"

(Sumber:Supriyadi dan Muntohar,2007)

Beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen-komponen BTR dan BGT dari beban "D" pada arah melintang harus sama.

b. Beban Truk "T"

Pembebanan truk "T" terdiri dari kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat as. Berat dari masing-masing as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 as tersebut bisa diubah-ubah antara 4,0 m sampai 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Persebaran beban truk "T" dapat dilihat pada Gambar 3.20 berikut.

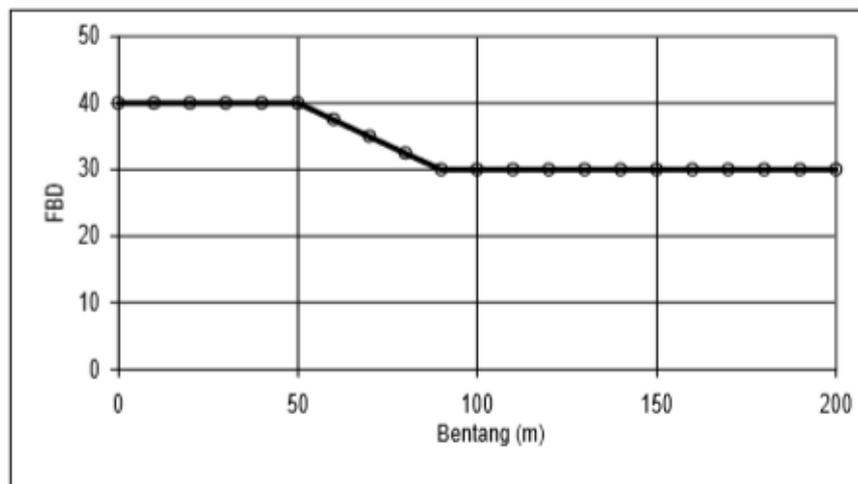


Gambar 3. 20 Pembebanan Truk "T"

(Sumber: SNI 1725-2016)

c. Faktor Beban Dinamis

Faktor beban dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan. Besarnya FBD tergantung kepada frekuensi dasar dari suspensi kendaraan, biasanya antara 2 sampai 5 Hz untuk kendaraan berat, dan frekuensi dari getaran lentur jembatan. Untuk perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen. Besarnya BGT dari pembebanan lajur "D" dan beban roda dari pembebanan truk "T" harus cukup untuk memberikan terjadinya interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan. Besarnya nilai tambah dinyatakan dalam fraksi dari beban statis. FBD ini diterapkan pada keadaan batas daya layan dan batas ultimit. Beban garis FBD dapat dilihat pada Gambar 3.21 berikut.



Gambar 3. 21 Faktor Beban Dinamis (FBD)

(Sumber: SNI 1725-2016)

Catatan :

Untuk bentang sederhana LE = panjang bentang aktual (3.2)

Untuk bentang menerus LE = $\sqrt{L_{rata-rata} - L_{maks}}$ (3.3)

Keterangan :

$L_{rata-rata}$ = panjang bentang rata-rata dari bentang-bentang menerus.

L_{maks} = panjang bentang maksimum dari bentang-bentang menerus.

2. Gaya Rem

Gaya rem harus ditempatkan di semua lajur rencana sesuai dengan SNI 1725-2016 Pasal 8.2 dan yang berisi lalu lintas dengan arah yang sama. Gaya ini harus diasumsikan untuk dapat bekerja secara horizontal diatas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Beban gaya rem harus diambil yang terbesar dari :

- a. 25% dari berat gandar truk desain, atau
- b. 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata (BTR)

3. Beban Angin

a. Tekanan Angin Horizontal

Tekanan angin diasumsikan disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam. Beban angin harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Luas area yang diperhitungkan adalah luas area dari semua komponen, termasuk sistem lantai dan *railing* yang diambil tegak lurus terhadap arah angin. Arah ini harus divariasikan untuk mendapatkan pengaruh yang paling berbahaya terhadap struktur jembatan atau komponen-komponennya. Luasan yang tidak memberikan kontribusi dapat diabaikan dalam perencanaan.

Untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 10000 mm di atas permukaan tanah atau permukaan air, kecepatan angin rencana (V_{DZ}) harus dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{DZ} = 2,5 V_0 \frac{V_{10}}{V_B} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (3.4)$$

Keterangan:

V_{DZ} = Kecepatan angin rencana pada elevasi rencana, Z (km/jam)

V_{10} = kecepatan angin pada elevasi 10000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana (km/jam)

V_B = Kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 10000 mm yang akan menghasilkan tekanan seperti yang disebutkan dalam SNI 1725-2016 pasal 9.6.1.1 dan pasal 9.6.2

Z = Elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari permukaan air dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm)

V_0 = Kecepatan gesekan angin yang merupakan karakteristik meteorologi, sebagaimana ditentukan dalam Tabel 3.2 untuk berbagai macam tipe permukaan di hulu jembatan (km/jam)

Z_0 = Panjang gesekan di hulu jembatan yang merupakan karakteristik meteorologi ditentukan pada Tabel 3.2 (mm)

V_{10} dapat diperoleh dari:

- 1) Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang.
- 2) Survei angin pada lokasi jembatan.
- 3) Jika tidak ada data yang lebih baik, perencanaan dapat mengasumsikan bahwa $V_{10} = V_B = 90$ s/d 126 km/jam.

Tabel 3. 2 Nilai V_0 dan Z_0 untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
V_0 (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Z_0	70	1000	2500

b. Beban Angin pada Struktur

Arah angin rencana harus diasumsikan horizontal, kecuali ditentukan lain dalam SNI 1725-2016 Pasal 9.6.3. Jika tidak ada data yang lebih tepat, tekanan angin rencana dalam MPa dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_D = P_B \frac{V_{DZ}^2}{V_B} \quad (3.5)$$

Keterangan:

P_B = Tekanan angin dasar seperti yang ditentukan dalam Tabel 3.3
(MPa)

Tabel 3. 3 Tekanan Angin Dasar

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

Gaya total beban angin tidak boleh diambil kurang dari 4,4 kN/mm pada bidang tekan dan 2,2 kN/mm pada bidang hisap pada struktur rangka dan pelengkung, serta tidak kurang dari 4,4 kN/mm pada baok atau gelagar.

3.7 Analisis Gempa Dinamik

Gempa merupakan salah satu faktor yang perlu diperhitungkan terhadap struktur jembatan. Arah gempa yang paling berbahaya adalah gempa horizontal sejajar sumbu longitudinal dan tegak lurus sumbu longitudinal jembatan. Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh, namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa dengan kemungkinan terlampaui 7 % dalam 75 tahun.

Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (R) dengan rumus sebagai berikut:

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \quad (3.6)$$

Keterangan:

E_Q = Gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} = Koefisien respons gempa statis

R = Faktor modifikasi respons

W_t = berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai (kN)

3.7.1 Spektrum Respon

Spektrum respon adalah suatu spektrum yang disajikan dalam bentuk grafik antara periode getar struktur T lawan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman dan gempa tertentu. Respon-respon maksimum dapat berupa simpangan maksimum (*spektrum displacement*), kecepatan maksimum (*spektrum velocity*),

atau percepatan maksimum (*spektrum acceleration*). Terdapat dua macam respon spektrum yang ada yaitu spektrum elastik dan spektrum inelastik. Spektrum elastik adalah suatu spektrum yang didasarkan atas respon elastik struktur, sedangkan spektrum inelastik (disebut juga disain spektrum respon) adalah spektrum yang dilakukan *scale down* dari spektrum elastik dengan nilai daktilitas tertentu. Nilai spektrum dipengaruhi oleh periode getar, rasio redaman, tingkat daktilitas, dan jenis tanah.

Spektrum respon di permukaan tanah ditentukan dari 3 (tiga) nilai percepatan puncak yang mengacu pada peta gempa Indonesia dengan probabilitas terlampaui 7 % dalam 75 tahun (PGA, S_s, dan S₁), serta nilai faktor amplifikasi F_{PGA}, F_a, dan F_v. Rumusan spektrum respon adalah sebagai berikut.

$$A_s = F_{PGA} \times PGA \quad (3.7)$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s \quad (3.8)$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 \quad (3.9)$$

Keterangan:

A_s = percepatan gempa

F_{PGA} = faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait terkait percepatan pada batuan dasar

PGA = percepatan puncak batuan dasar sesuai peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7 % dalam 75 tahun

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

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

S_s = parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode pendek (T = 0,2 detik) dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

- S_1 = parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode 1 detik dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun
- F_a = faktor amplifikasi periode pendek
- F_v = faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik

Koefisien situs F_a dan F_v mengikuti Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 4 Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 0,2 Detik (F_{PGA}/F_a)

Kelas Situs	PGA \leq 0,1 $S_s \leq 0,25$	PGA = 0,2 $S_s = 0,5$	PGA = 0,3 $S_s = 0,75$	PGA = 0,4 $S_s = 1,0$	PGA $>$ 0,5 $S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
SF	SS				

Tabel 3. 5 Nilai Faktor Amplifikasi Untuk Periode 1 Detik (F_v)

Kelas Situs	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
SD	2,4	2	1,8	1,6	1,5
SE	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
SF	SS				

Keterangan:

- SA = batuan keras
- SB = batuan
- SC = tanah keras
- SD = tanah sedang
- SE = tanah lunak
- SF = tanah khusus

1. Koefisien Respon Gempa Elastik

- a. Untuk periode yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons gempa elastik, C_{sm} , harus diambil dari persamaan berikut:

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s \quad (3.10)$$

- b. Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s ($T_0 \leq T \leq T_s$), spektrum respons percepatan desain (C_{sm}), sama dengan S_{DS} ($C_{sm} = S_{DS}$).
- c. Untuk periode lebih besar dari T_s , koefisien respons gempa elastik (C_{sm}) diambil berdasarkan persamaan berikut:

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \quad (3.11)$$

Keterangan:

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

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

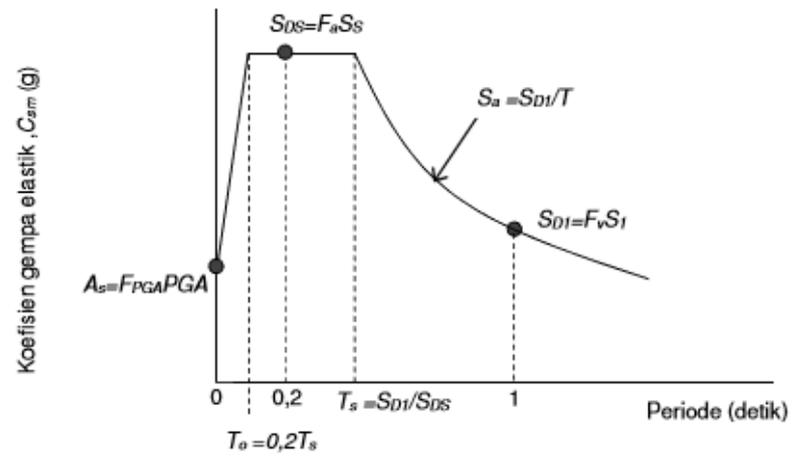
T = periode getar fundamental struktur

T_0 = periode getar fundamental struktur pada awal S_{DS}

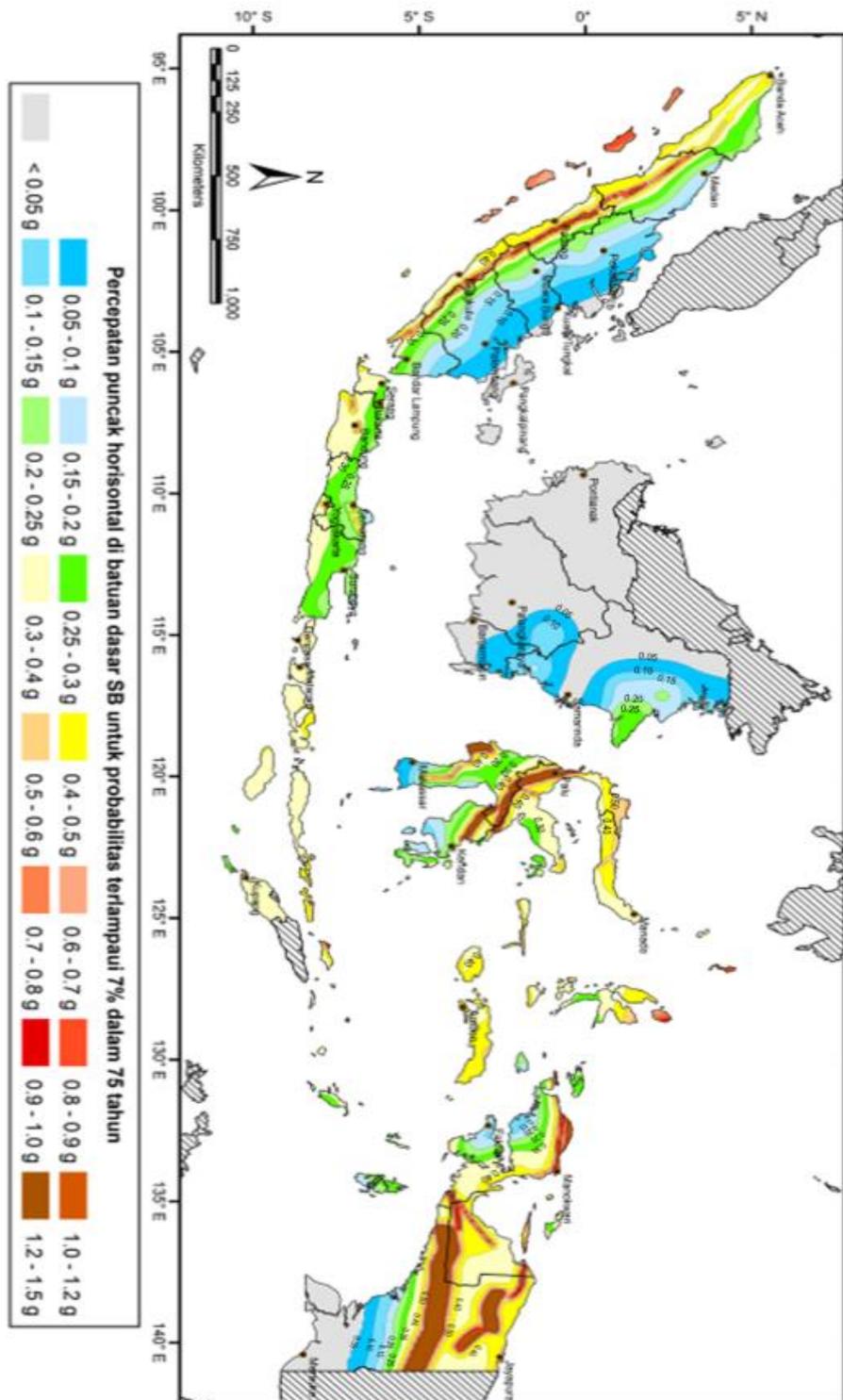
T_s = periode getar fundamental struktur pada akhir S_{DS}

$$T_0 = 0,2 \times \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.12)$$

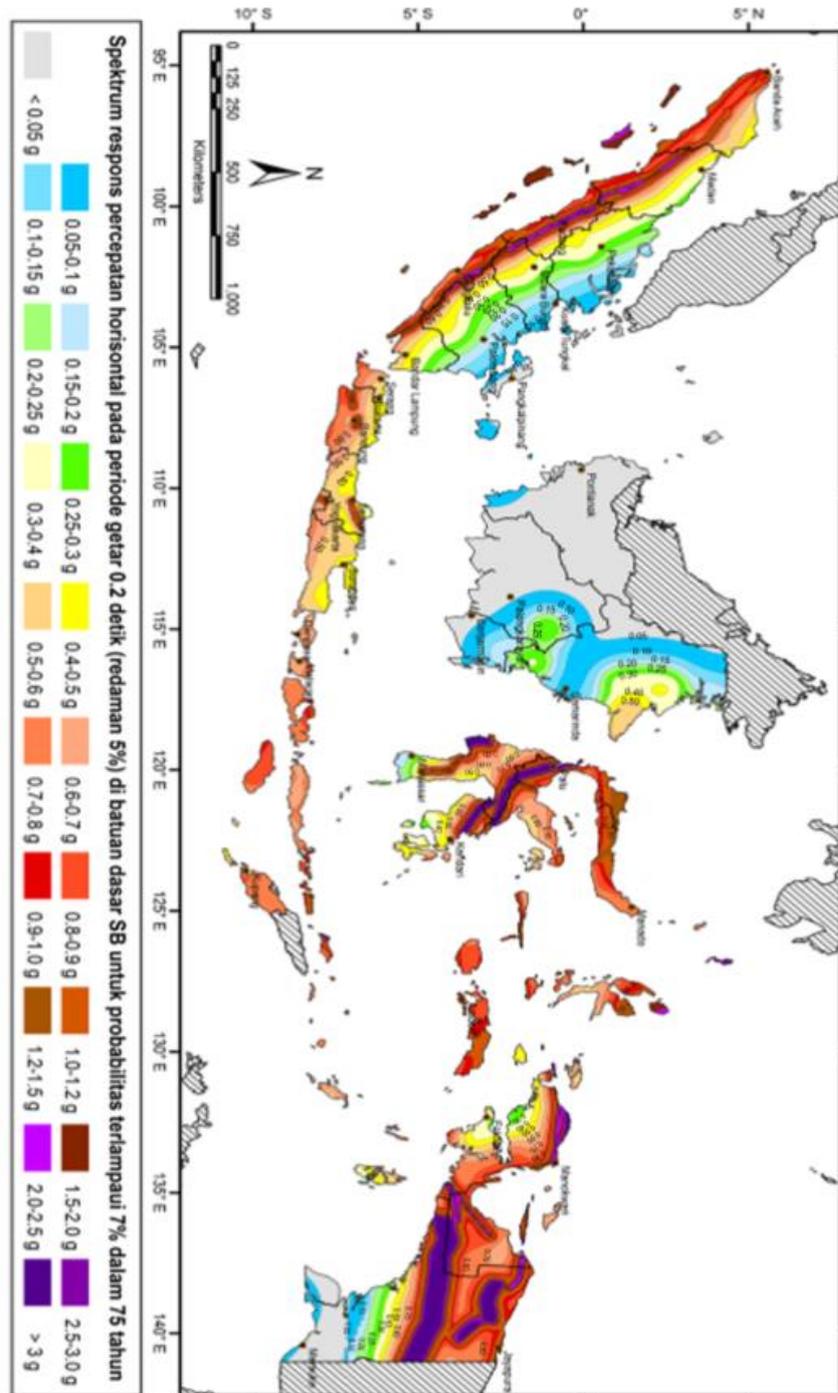
$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.13)$$



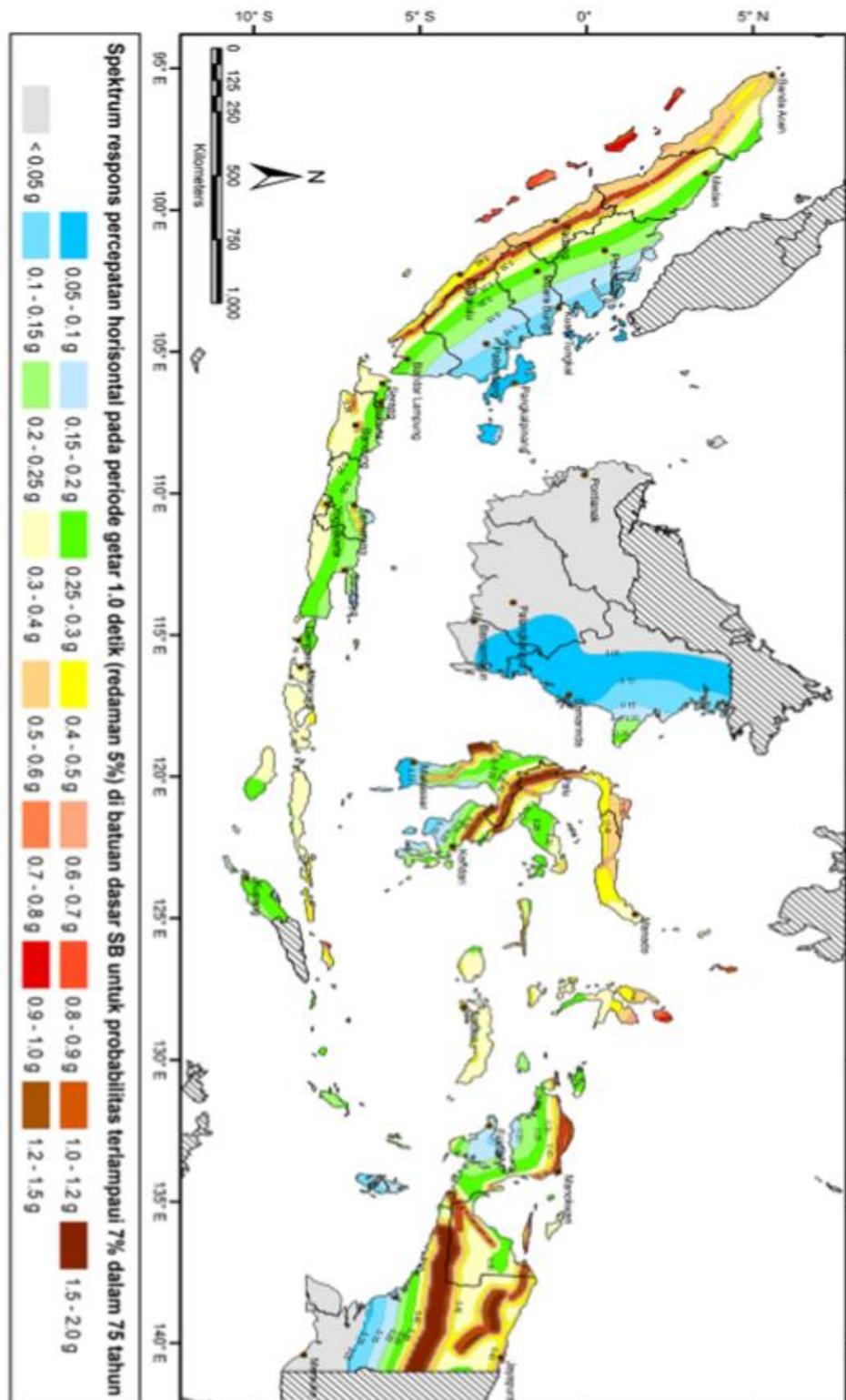
Gambar 3. 22 Spektrum Respons Desain
(Sumber: RSNI3 2833:201X)



Gambar 3.23 PGA untuk Probabilitas Terlampaui 7 % dalam 75 Tahun
(Sumber: RSN3 2833:201X)



Gambar 3.24 Peta Respon Spektra Percepatan 0,2 Detik
(Sumber: RSNI3 2833:201X)



Gambar 3. 25 Peta Respon Spektra Percepatan 1 Detik

(Sumber: RSNI3 2833:201X)

3.8 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban didasarkan pada beberapa kemungkinan tipe yang berbeda dari aksi yang bekerja bersamaan. Dalam analisis ini digunakan kombinasi pembebanan sebagai berikut.

Kombinasi I	: 1,3 MS + 2 MA + 1,8 D + 1,8 TB
Kombinasi II	: 1,3 MS + 2 MA + 1,4 D + 1,4 TB
Kombinasi III	: 1,3 MS + 2 MA + 1,4 EW
Kombinasi IV	: 1,3 MS + 2 MA
Kombinasi V	: 1,3 MS + 2 MA + 0,4 EW
Kombinasi VIA	: 1,3 MS + 2 MA + 0,5 D + 0,5 TB + EQX
Kombinasi VIB	: 1,3 MS + 2 MA + 0,5 D + 0,5 TB + EQY

3.9 Perencanaan Struktur Baja

Perencanaan struktur atas jembatan dalam penelitian ini menggunakan struktur baja profil I dengan metode LRFD yang dibantu *software* SAP2000. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan manual untuk kontrol hasil analisis dan desain program SAP2000 yang mengacu pada RSNI T-03-2005.

3.9.1 Kekuatan Penampang

1. Komponen Struktur Batang Desak

Komponen struktur tekan dapat terdiri dari profil tunggal atau profil tersusun yang digabung dengan menggunakan pelat kopel. Syarat kestabilan dalam mendesain komponen struktur tekan sangat perlu diperhatikan, karena adanya bahaya tekuk (*buckling*) pada komponen-komponen tekan langsing (Dewobroto, 2016). Berdasarkan RSNI T-03-2005 struktur yang memikul gaya tekan aksial terfaktor harus memenuhi:

$$N_u \leq \phi N_n$$

Perbandingan kelangsingan:

a. Kelangsingan elemen penampang (Tabel 4 RSNI T-03-2005) $< \lambda_r$ (3.14)

b. Kelangsingan komponen struktur tekan, $\lambda = \frac{Lk}{r} \leq 140$ (3.15)

Kuat tekan akibat tekuk lentur (N_n) ditentukan sebagai berikut:

$$N_n = 0,66\lambda_c^2 \times A_g \times f_y \text{ untuk } \lambda_c \leq 1,5 \quad (3.16)$$

$$N_n = \frac{0,88}{\lambda_c} \times A_g \times f_y \text{ untuk } \lambda_c > 1,5 \quad (3.27)$$

$$\lambda_c = \frac{L_k}{r \times \pi} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (3.18)$$

$$L_k = k_c \times L \quad (3.19)$$

Keterangan:

A_g = luas penampang bruto (mm^2)

f_y = tegangan leleh (MPa)

λ_c = parameter kelangsingan

k_c = faktor panjang tekuk untuk komponen struktur jembatan rangka

E = modulus elastisitas bahan baja (MPa)

L = panjang batang (mm)

L_k = panjang batang tekuk (mm)

untuk faktor panjang tekuk dapat dilihat pada Gambar 3.26 berikut.

	Kolom Tiek Bergoyang			Kelom Bergoyang		
Bentuk tekuk						
Faktor panjang efektif (k)	0.70	0.85	1.00	1.2	2.2	2.2
Simbol untuk keadaan penahan ujung	 = Rotasi terjepit, translasi terjepit	 = Rotasi bebas, translasi terjepit	 = Rotasi terjepit, translasi bebas	 = Rotasi bebas, translasi bebas		

Gambar 3. 26 Faktor Panjang Tekuk

(Sumber: RSNI T-03-2005)

Tabel 3. 6 Faktor Reduksi Kekuatan untuk Keadaan Batas Ultimit

Situasi Rencana	Faktor Reduksi (ϕ)
a. Lentur	0,90
b. Geser	0,90
c. Aksial Tekan	0,85
d. Aksial Tarik	
1. Terhadap Kuat Tarik Leleh	0,90
2. Terhadap Kuat Tarik <i>Fraktur</i>	0,75
e. Penghubung Geser	0,75
f. Sambungan Baut	0,75
g. Hubungan Las	
1. Las Tumpul Penetrasi Penuh	0,90
2. Las Sudut dan Las Tumpul Penetrasi Sebagian	0,75

2. Komponen Struktur Lentur

Berdasarkan RSNI T-03-2005 suatu komponen struktur yang memikul momen lentur terhadap sumbu kuat, harus memenuhi:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (3.20)$$

Keterangan:

M_u = momen lentur terfaktor (Nmm)

M_n = momen lentur nominal (Nmm)

Momen lentur nominal harus memenuhi syarat di bawah ini:

a. Penampang Kompak

Penampang yang memenuhi $\lambda \leq \lambda_p$, kuat lentur nominal penampang:

$$M_n = M_p = f_y \cdot Z \quad (3.21)$$

b. Penampang Tidak Kompak

Penampang yang memenuhi $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$, kuat lentur nominal penampang:

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \times \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (3.22)$$

$$M_r = (f_y - f_r) \times S \quad (3.23)$$

c. Penampang Langsing

Pelat sayap yang memenuhi $\lambda \geq \lambda_r$, kuat lentur nominal penampang adalah:

$$M_n = M_r \times \left(\frac{\lambda_r}{\lambda}\right)^2 \quad (3.24)$$

1) Pelat badan yang memenuhi $\lambda \geq \lambda_r$, kuat lentur nominal penampang adalah:

$$M_n = K_g \times S \times f'_{cr} \quad (3.25)$$

$$K_g = 1 - \left(\frac{a_r}{1200 + 300 \times a_r}\right) \times \left(\frac{h}{t_w} \times \frac{2550}{\sqrt{f'_{cr}}}\right) \quad (3.26)$$

f'_{cr} ditentukan dengan syarat:

a) Elemen struktur yang memenuhi $\lambda_G \leq \lambda_p$

$$f'_{cr} = f_y \quad (3.27)$$

b) Elemen struktur yang memenuhi $\lambda_p \leq \lambda_G \leq \lambda_r$

$$f'_{cr} = C_b \times f_y \times \left(1 - \frac{\lambda_G - \lambda_p}{2(\lambda_r - \lambda_p)}\right) \leq f_y \quad (3.28)$$

c) Elemen yang memenuhi $\lambda_r \leq \lambda_G$ (3.29)

$$f'_{cr} = f'_{c} \times \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_G}\right)^2 \quad (3.30)$$

$$f_c = \frac{c_b \times f_y}{2} \leq f_y \quad (3.31)$$

$$C_b = \frac{12,5 \times M_{max}}{2,5M_{max} + 3MA + 4MB + 3MC} \leq 2,3 \quad (3.32)$$

Keterangan:

M_p = momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh disebut juga momen lentur plastis penampang (Nmm)

M_r = momen batas tekuk (Nmm)

S = modulus penampang elastis (mm^3)

Z = modulus penampang plastis (mm^3), dengan asumsi $Z = 1,1 \times S$

λ_p = parameter kelangsingan untuk penampang kompak

λ_r = parameter kelangsingan untuk penampang tidak kompak

λ_G = faktor kelangsingan berdasarkan tebal pelat sayap yang

didapat dari $\frac{b_f}{2xt_f}$ dimana b_f adalah lebar plat sayap (mm) dan t_f

adalah tebal plat sayap (mm)

f_r = tegangan tekan residual pada pelat sayap

= 70 MPa untuk penampang digilas (panas)

= 110 MPa untuk penampang dilas

f_{cr} = tegangan kritis (MPa)

a_r = perbandingan luas pelat badan terhadap pelat sayap tekan

C_b = faktor pengali momen

M_{max} = momen maksimum absolut pada bentang yang

ditinjau serta M_A , M_B , dan M_c adalah masing-masing momen

absolut pada $\frac{1}{4}$ bentang, tengah bentang, dan $\frac{3}{4}$ bentang

komponen struktur yang ditinjau

3. Tekuk Lateral

Kuat lentur nominal suatu penampang harus mampu menahan pengaruh tekuk lateral. Berdasarkan RSNI T-03-2005 tekuk lateral dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

a. Bentang Pendek

Untuk komponen struktur yang memenuhi $L \leq L_p$ kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah:

$$M_n = M_p \quad (3.33)$$

b. Bentang Menengah

Komponen struktur yang memenuhi $L_p \leq L \leq L_r$, kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah:

$$M_n = C_b \left(M_r + (M_p - M_r) \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right) \leq M_p \quad (3.34)$$

c. Bentang Panjang

Komponen struktur yang memenuhi $L \geq L_r$ kuat nominal komponen struktur terhadap lentur adalah:

$$M_n = M_{cr} \leq M_p \quad (3.35)$$

Keterangan:

L = panjang bentang diantara dua pengekang lateral terhadap *displacement* lateral dari sayap tekan, atau diantara dua pengekang untuk menahan potongan terhadap *twist* (mm)

Rumus-rumus perhitungan panjang bentang untuk pengekan lateral dapat dilihat pada Gambar 3.27 berikut.

Profil	L_p	L_r
Profil-I dan kanal ganda	$1,76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}}$ <p>dengan</p> $r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$r_y \left[\frac{X_1}{f_c} \right] \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 f_c^2}}$ <p>dengan</p> $f_L = f_y - f_r$ $X_1 = \frac{\pi}{S} \sqrt{\frac{EGJ}{2}}$ $X_2 = 4 \left(\frac{S}{GJ} \right)^2 \frac{I_w}{I_y}$
Profil kotak pejal atau berongga	$0,13E_r \frac{\sqrt{JA}}{M_p}$	$2Er_y \frac{\sqrt{JA}}{M_p}$

Gambar 3. 27 Panjang Bentang Untuk Pengekan Lateral

(Sumber: RSNI T-03-2005)

$$f_L = f_y - f_r \quad (3.36)$$

$$J = \sum \frac{1}{3} \times (b \times t^3) \quad (3.37)$$

$$I_w = I_y \times \left(\frac{h}{2} \right)^2 \quad (3.38)$$

$$G = \frac{E}{(2 \times (1 + \nu))} \quad (3.39)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas baja (MPa)

I_y = Inersia pada sumbu y (mm^4)

G = modulus geser baja (MPa)

I_w = konstanta *warping* (mm^6)

J = konstanta torsi (mm^4)

r_y = jari-jari girasi pada sumbu y (mm)

4. Interaksi aksial dan Lentur

Komponen struktur yang mengalami momen lentur dan gaya aksial harus direncanakan memenuhi ketentuan berikut:

untuk $\frac{N_u}{\phi_c N_n} \geq 0,2$:

$$\frac{N_u}{\phi_c N_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (3.40)$$

Untuk $\frac{N_u}{\phi_c N_n} < 0,2$:

$$\frac{N_u}{2 \phi_c N_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (3.41)$$

Keterangan:

N_u = gaya aksial (tarik atau tekan) terfaktor (N)

N_n = kuat nominal penampang (N)

Φ_c = faktor reduksi kekuatan komponen tekan

M_{ux} = momen lentur terfaktor terhadap sumbu x

M_{uy} = momen lentur terfaktor terhadap sumbu y

M_{nx} = kuat nominal lentur penampang terhadap sumbu x (Nmm)

M_{ny} = kuat nominal lentur penampang terhadap sumbu y (Nmm)

Φ_b = faktor reduksi kuat lentur