

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Menurut Siswanto (1999), jembatan dapat diklasifikasikan menjadi bermacam-macam jenis/tipe menurut fungsi, keberadaan, material yang dipakai, jenis lantai kendaraan dan lain-lain. Klasifikasi jembatan menurut material yang digunakan dibedakan atas bahan yang dominan dipergunakan, terutama bahan sebagai struktur utama bangunan atas, jembatan ditinjau dari material yang digunakan adalah jembatan kayu (*log bridge*), jembatan baja (*steel bridge*), jembatan beton (*concrete bridge*), jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*), jembatan komposit (*composite bridge*), jembatan bambu, jembatan pasangan batu kali/bata. Struktur jembatan mempunyai berbagai macam tipe, baik dilihat dari bahan strukturnya maupun dari bentuk strukturnya. Masing-masing tipe struktur jembatan cocok digunakan untuk kondisi yang berbeda. Menurut Satyarno (2003), sesuai dengan perkembangan, bentuk jembatan berubah dari yang sederhana menjadi yang sangat kompleks. Berikut jenis-jenis jembatan berdasarkan bentuk struktur konstruksinya terdapat jembatan gelagar biasa, jembatan portal, jembatan rangka, jembatan gantung, jembatan kabel penahan, jembatan busur, jembatan pelat, jembatan kantilever, jembatan terapung dan jembatan kombinasi. Sedangkan berdasarkan kegunaannya terdapat jembatan pejalan kaki, jembatan jalan raya, jembatan kereta api, jembatan berfungsi ganda dimana sisi atas dan bawah digunakan untuk melintasi dengan objek yang berbeda dan jembatan khusus untuk keperluan lainnya seperti saluran irigasi.

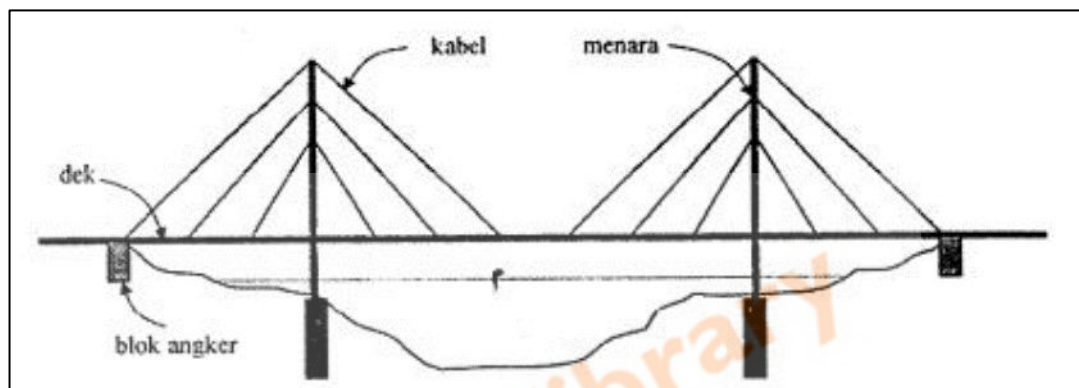
2.2. Jembatan *Cable Stayed*

Jembatan *cable stayed* adalah salah satu dari beberapa tipe jembatan bentang panjang. Jembatan yang mengandalkan kabel sebagai penahan beban jembatan diperuntukan bagi lintasan antar wilayah yang biasanya terpisah oleh sungai, lembah ataupun di atas tanah datar.

Jembatan *cable stayed* sudah dikenal sejak lebih dari 200 tahun yang lalu (Walther, 1988) pada awal era tersebut umumnya dibangun dengan menggunakan kabel vertikal dan miring seperti Dryburgh Abbey Footbridge di Skotlandia yang dibangun pada tahun 1817.

Pada umumnya jembatan *cable stayed* menggunakan gelagar baja, rangka, beton atau beton pratekan sebagai gelagar utama (Zarkasi dan Rosliansjah, 1995).

Struktur jembatan ini terdiri dari gabungan berbagai komponen struktural seperti pilar, kabel dan dek jembatan. Dek jembatan digantung dengan kabel prategang yang diangkur pada pilar. Dengan demikian, semua gaya-gaya gravitasi maupun lateral yang bekerja pada dek jembatan akan ditransfer ke tanah melalui kabel dan pilar. Kabel akan menerima gaya tarik sedangkan pilar memikul gaya tekan yang sangat besar disamping efek lentur lainnya (Yuskar dan Andi, 2005).



Gambar 2.1 Gambaran Umum Jembatan *Cable Stayed*

Sumber: buku “Jembatan” Cetakan ke-4 oleh Supriyadi dan Muntohar (2007)

Jembatan *cable stayed* mempunyai beberapa keuntungan antara lain seperti berikut ini (Fadly Sutrisno, 2010).

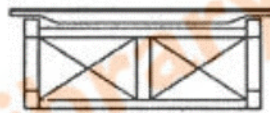
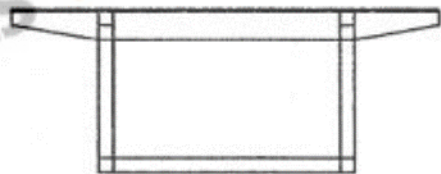
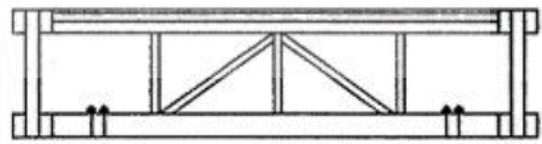
1. Kabel lurus memberikan kekakuan yang lebih besar dari kabel melengkung. Disamping itu, analisis non-linier tidak perlu dilakukan untuk geometri kabel lurus.
2. Kabel diangkur pada lantai jembatan dan menimbulkan gaya aksial tekan pada dek yang menguntungkan secara ekonomis dan teknis.
3. Tiap–tiap kabel penggantung lebih pendek dari panjang jembatan secara keseluruhan dan dapat diganti satu persatu.

2.3. Bagian-bagian Jembatan *Cable Stayed*

Dalam jembatan *cable stayed* ini memiliki tipe dan bentuk baik tipe pada dek, menara/*pylon*, kabel maupun pada blok ankur.

2.3.1. Gelagar (*Deck*)

Menurut Podolny dan Scalzi, (1976), Bentuk gelagar jembatan *cable stayed* sangat bervariasi namun yang paling sering digunakan ada dua jenis yaitu *stiffening truss* dan *solid web*. Pada awal perkembangan jembatan *cable stayed* modern, *stiffening truss* banyak digunakan tetapi sekarang sudah mulai ditinggalkan dan jarang digunakan dalam desain, karena mempunyai banyak kekurangan. Kekurangannya adalah membutuhkan pabrikasi yang besar, perawatan yang relatif sulit, dan kurang menarik dari segi estetika. Meskipun demikian dapat digunakan sebagai gelagar dengan alasan yang memiliki sifat aero dinamik yang baik. Dalam keadaan jembatan jalan raya disatukan dengan jembatan jalan rel dan biasanya menggunakan *deck* ganda yang bertingkat, *stiffening truss* dapat dipertimbangkan sebagai elemen utama *deck* (Supriyadi dan Muntohar, 2007:205). Berikut adalah contoh gambar *stiffening truss*

| Tipe Jembatan | Tipikal potongan melintang |
|--------------------------|--|
| Jalan raya |  |
| Jalan raya dan jalan rel |  |
| Jalan raya dan jalan rel |  |

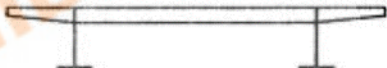
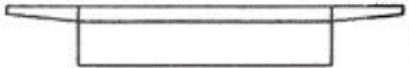
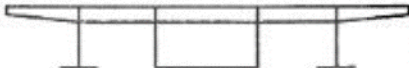
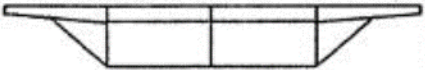
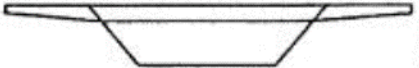

Gambar 2.2 Gelagar *stiffening truss*

Sumber: Buku “Jembatan” Cetakan ke-4 oleh Supriyadi dan Muntohar (2007)

Gelagar yang tersusun dari *solid web* yang terbuat dari baja atau beton cenderung terbagi atas dua tipe yaitu:

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

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 sangat cocok untuk jembatan yang mengalami torsi 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* mempunyai masalah seperti pada *truss* berupa perawatan terhadap korosi yang relatif mahal meskipun biaya konstruksinya lebih murah. 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 (Supriyadi dan Muntohar, 2007:206). Berikut adalah gambar gelagar *solid web*:

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

Gambar 2.3 Gelagar *solid web*

Sumber: Buku “Jembatan” Cetakan ke-4 oleh Supriyadi dan Muntohar (2007)

Solid web yang terbuat dari beton *precast* mempunyai banyak keuntungan (Zarkasi dan Rosliansjah, 1995) antara lain:

1. Struktur dek beton cenderung untuk tidak bergetar dan dapat berbentuk aerodinamis yang menguntungkan,
2. Komponen gaya horizontal pada kabel akan mengaktifkan gaya tekan pada sistem dek dimana beton sangat cocok untuk menahan gaya desak,
3. Beton mempunyai berat yang sangat besar sehingga perbandingan beban hidup dan beban mati menjadi kecil, sehingga perbandingan lendutan akibat beban hidup dan beban mati tidak terlalu besar,
4. Pemasangan bangunan atas dan kabel yang relatif mudah dengan teknik prestressing masa kini, prefabrikasi, segmental dan mempunyai kandungan lokal yang tinggi,
5. Pemeliharaan lebih mudah karena beton tidak berkarat seperti baja.

Pengalaman dalam perancangan jembatan *cable stayed* (Troitsky, 1977) menunjukkan bahwa tinggi gelagar dapat digunakan antara $1/15 - 1/18$ panjang panel atau $1/100 - 1/200$ panjang bentang utama. Sedangkan menurut Leonart (dalam Zarkasi dan Rosliansjah, 1995), perbandingan antara tinggi gelagar dengan bentang utama jembatan sangat tergantung pada rasio lendutan maksimum akibat beban hidup dan beban mati, dan memberikan nilai yang ekonomis jika nilainya berkisar antara $1/10 - 1/90$. Khusus untuk jembatan *cable stayed* beton dengan sistem kabel dua bidang, pada kolom ujung tidak menunjukkan gejala aerodinamis yang mengkhawatirkan bila memenuhi persyaratan:

$$B \geq 10H \text{ atau } B \geq L/30 \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

B = lebar jembatan

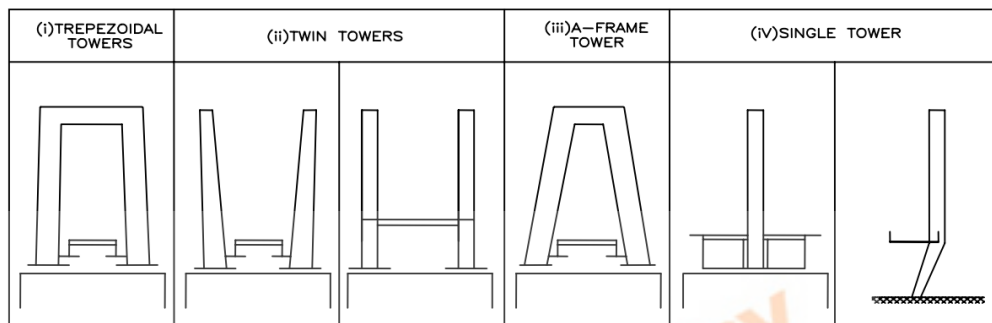
H = tinggi gelagar

L = panjang bentang

Untuk jembatan baja yang relatif ringan dan bentang diatas 400 meter sehingga cenderung mudah bergetar, persyaratan diatas masih berlaku namun sebaiknya digantung ke menara bentuk A dan harus mempunyai $B \geq 1/25$.

2.3.2. Menara (*Pylon*)

Pylon (menara) jembatan *cable stayed* berfungsi untuk menahan beban mati dan hidup yang bekerja pada struktur, tiang dapat dibuat berongga dari konstruksi baja maupun beton. Pemilihan menara sangat dipengaruhi oleh konfigurasi kabel, estetika, dan kebutuhan perencanaan serta pertimbangan biaya. Bentuk-bentuk menara dapat berupa rangka portal trapezoid, menara kembar, menara A, atau menara tunggal (Supriyadi dan Muntohar, 2007:204).



Gambar 2.4 Jenis-jenis *Pylon*

Sumber: Troitsky, 1972.

Menurut Troitsky (1977:33), tinggi *pylon* adalah:

$$H \geq L/6 \dots \dots \dots (2)$$

$$H = n \times a \times \tan 25^\circ \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

L = bentang jembatan

n = jumlah kabel

a = jarak kabel antar gelagar

H = tinggi pylon

Sedangkan menurut Gimsing (2012:353)

$$H = 0,291L \dots \dots \dots (4)$$

Menurut Podolny (1976), tinggi menara ditentukan dari beberapa hal seperti tipe sistem kabel, jumlah kabel dan perbandingan estetika dalam tinggi menara dan panjang bentang, untuk itu direkomendasikan perbandingan antara bentang terpanjang dan tinggi menara antara 0,19 – 0,25.

2.3.3. Kabel

2.3.3.1. Sistem Kabel

Sistem kabel merupakan salah satu hal mendasar dalam perencanaan jembatan *cable stayed*. Kabel digunakan untuk menopang gelagar diantara dua tumpuan dan memindahkan beban tersebut ke menara/*pylon*. Beberapa jenis kabel yang berbeda digunakan pada jembatan *cable stayed*, bentuk dan konfigurasiya tergantung pada susunannya. Dalam satu helai biasanya terdiri dari tujuh kawat, dengan diameter antara 3 sampai 7 mm. Kabel merupakan bagian yang paling penting dalam desain jembatan *cable stayed*, karena berfungsi menyalurkan beban mati dari struktur atas (lantai jembatan) menuju ke *pylon*/menara (Walther, 1988). Sistem jembatan *cable stayed* berdasarkan penempatan susunan kabelnya memiliki beberapa variasi. Susunan kabel merupakan pokok persoalan dalam desain jembatan *cable stayed*. Tidak hanya berefek pada kekuatan struktur jembatan tetapi juga metode pelaksanaan dan biaya. Susunan kabel dari jembatan *cable stayed* diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Tatanan Kabel Transversal

Tatanan kabel transversal terhadap arah sumbu longitudinal dapat dibuat satu atau dua bidang dan sebaliknya ditempatkan secara simetri. Ada juga perencana yang menggunakan tiga bidang, tetapi sampai sekarang belum diterapkan di lapangan (Supriyadi dan Muntohar, 2007). Tatanan kabel transversal dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.

a. Sistem satu bidang

Sistem ini sangat menguntungkan dari segi estetika karena tidak terjadi kabel bersilangan yang terlihat oleh pandangan sehingga penampilan struktur terlihat indah. Pada sistem satu bidang, kabel ditempatkan di tengah-tengah dek menyebabkan torsi akibat beban lalu lintas yang tidak simetri dan tiupan angin. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan dek kaku berupa gelagar kotak (*box girder*) yang mempunyai kekuatan torsi yang sangat besar. Penempatan menara yang mengikuti bidang kabel di tengah dek mengurangi lebar lantai kendaraan sehingga perlu dilakukan penambahan lebar sampai batas minimum yang dibutuhkan. 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

Sistem dua bidang merupakan jembatan yang mempunyai penggantung dengan dua bidang dapat berupa bidang vertikal sejajar atau dua bidang miring yang pada sisi atas lebih sempit. Penggunaan bidang miring dapat menimbulkan masalah pada lalu lintas yang melewati jembatan tersebut karena melewati diantara dua bidang kabel, terlebih bila jembatan mempunyai bentang yang relatif pendek atau menengah. Kemiringan kabel akan sangat curam sehingga mungkin diperlukan pelebaran dek jembatan.

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 kabel dua bidang (**Gambar 2.6**). 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 dan tinggi. Untuk bentang yang lebih pendek kabel tunggal mungkin sudah cukup untuk menahan beban rencana.

a. *Harp Pattern*

Pada pola susunan *harp* (kecapi), susunan kabelnya dibuat saling berdekatan dan sejajar dengan meletakkannya pada titik yang berbeda pada tiang seperti pada **Gambar 2.7**, jika ditinjau dari parameter biaya, pola susunan *cable stayed* seperti ini tidak efisien untuk jembatan bentang panjang. Hal ini dikarenakan membutuhkan banyak baja untuk kabelnya, sehingga memberi tekanan lebih pada

lantai jembatan, dan mengakibatkan momen lengkung pada tiang. Penyusunan kabel yang sejajar memberikan penampilan yang menarik untuk susunan *harp* (kecapi) (Bernard et al 1988). Kebutuhan akan tiang yang lebih tinggi merupakan salah satu kekurangan dari jenis susunan ini pada jembatan *cable stayed*.

b. *Fan Pattern*

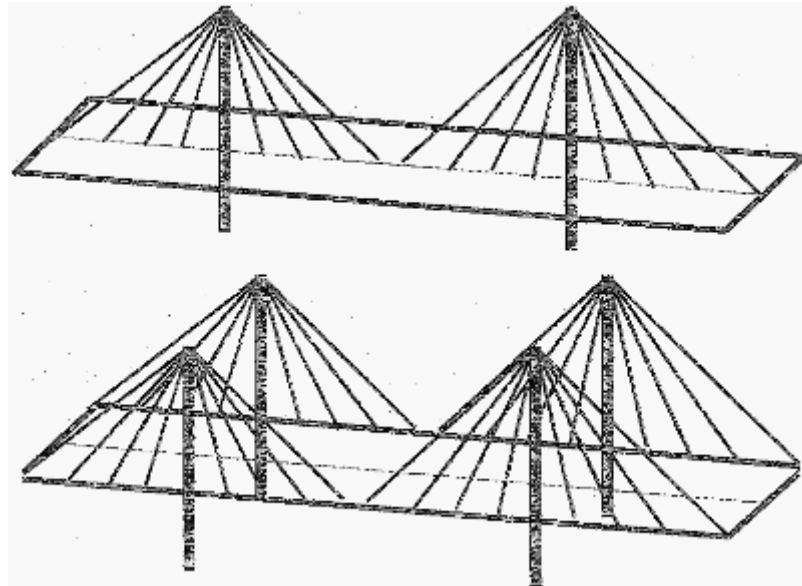
Ada beberapa literatur yang menyebut pola ini dengan pola radial (melingkar), namun disini disebut pola *fan* (kipas). Susunan pola ini, semua kabel dihubungkan pada satu titik di puncak tiang seperti pada **Gambar 2.8**. Secara relatif, tinggi kemiringan dari kabel menghasilkan potongan melintang yang lebih kecil dibandingkan dengan pola *harp* (kecapi). Selain itu, gaya horizontal kabel pada lantai jembatan pada susunan ini lebih kecil dari tipe *harp* (kecapi) (Bernard et al., 1988). Dengan menambah jumlah kabel, berat pada puncak tiang menjadi bertambah dan juga rumit dalam pemasangan kabel. Susunan tipe *fan* (kipas) hanya cocok untuk bentang menengah dengan jumlah kabel yang terbatas.

c. *Semi Harp Pattern*

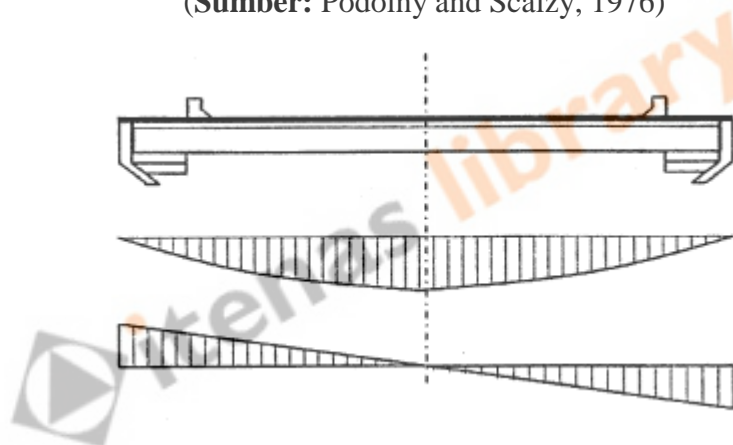
Beberapa jembatan *cable stayed* yang modern di dunia telah dibangun menggunakan pola *semi harp* guna efisiensi. Pola ini merupakan modifikasi dari pola *harp* dan *fan*. Seperti pada **Gambar 2.9**, pada susunan pola ini, kabel dihubungkan pada bagian atas tiang yang lebih tinggi dengan saling berdekatan (Bernard et al., 1988). Susunan pola *semi harp* mempunyai penampilan yang lebih baik dibandingkan *fan pattern*.

d. *Asymmetric pattern*

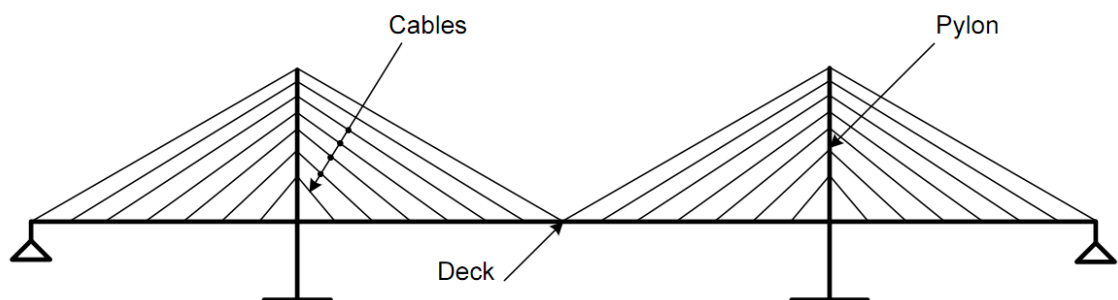
Akibat kondisi peta bumi dan jarak ruang memanjang seringkali mengharuskan untuk mendesain jembatan melewati rintangan dengan satu bentang, tanpa memungkinkan untuk menyeimbangkan struktur dengan bagian belakang yang menonjol seperti pada **Gambar 2.10**. Pada kasus ini akan sangat membantu jika mengadopsi tali kekang dari jembatan tipe penggantung, dengan ciri pemusatan dari jangkar kabel. Pilihan dari landaian pada bagian belakang tali tergantung dari kondisi geologi dan geoteknikal (Walther, 1988).



Gambar 2.5 Tatanan Kabel Transversal Satu Bidang dan Dua Bidang
(Sumber: Podolny and Scalzy, 1976)

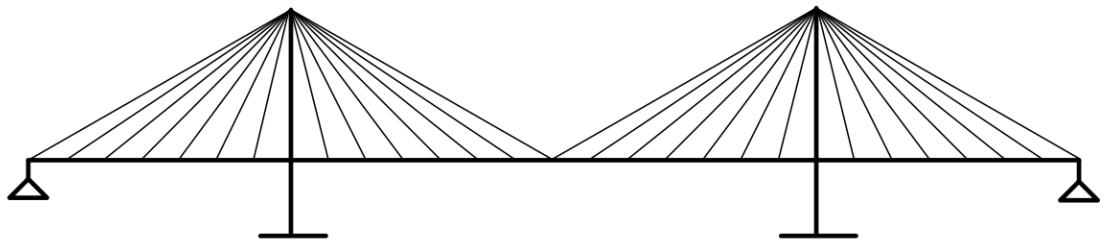


Gambar 2.6 Diagram Momen dan Gaya Geser Akibat Beban Mati pada Gelagar
dengan Penggantung Dua Bidang (Walther, 1988)



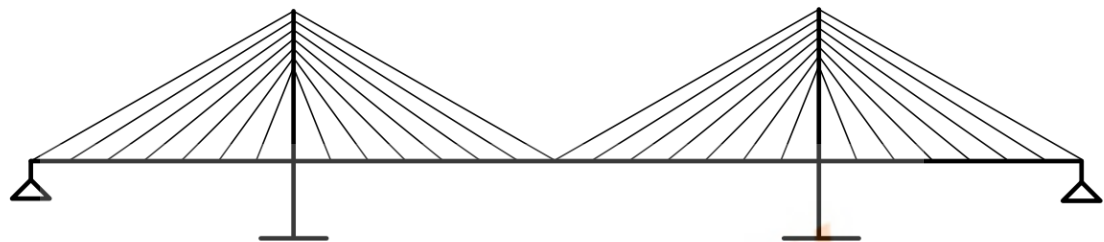
Gambar 2.7 Harp Pattern (Pola Kecapi)

(Sumber: Walther, 1988)



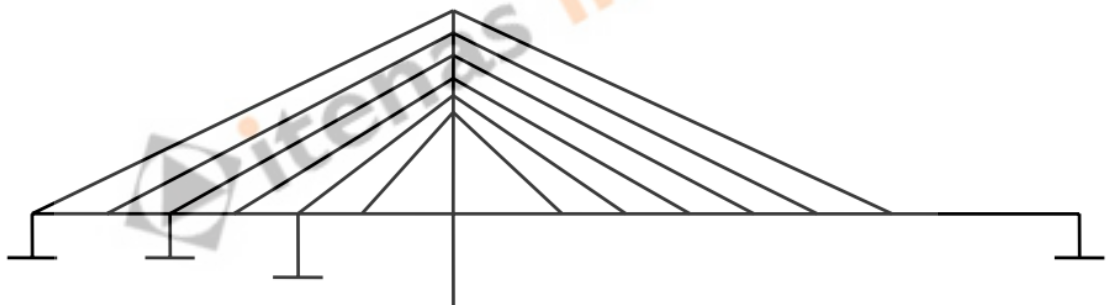
Gambar 2.8 *Fan Pattern* (Pola Kipas)

(Sumber: Walther, 1988)



Gambar 2.9 *Semi Harp Pattern* (Pola Setengah Kecapi)

(Sumber: Walther, 1988)



Gambar 2.10 *Asymmetric pattern* (pola tidak simetris)

(Sumber: Walther, 1988)

2.3.3.2. Jenis Kabel

Sebuah kabel dapat terdiri dari satu atau lebih tali struktural, untai struktural (*strand structural*), lilitan untai terkunci (*locked coil strand*), atau untai kawat paralel (*parallel wire strand*). Sebuah *strand* selain jenis *parallel wire strand*, terbuat dari kawat yang dibentuk spiral di sekitar sebuah kawat pusat di satu atau lebih lapisan simetris dan diproduksi di USA berdasarkan standar spesifikasi ASTM A-586. Pemilihan jenis kabel tergantung pada segi pelaksanaan, struktur, dan keuangan. Saat

ini, jenis ruji kabel yang umum dan sering digunakan menurut Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel adalah:

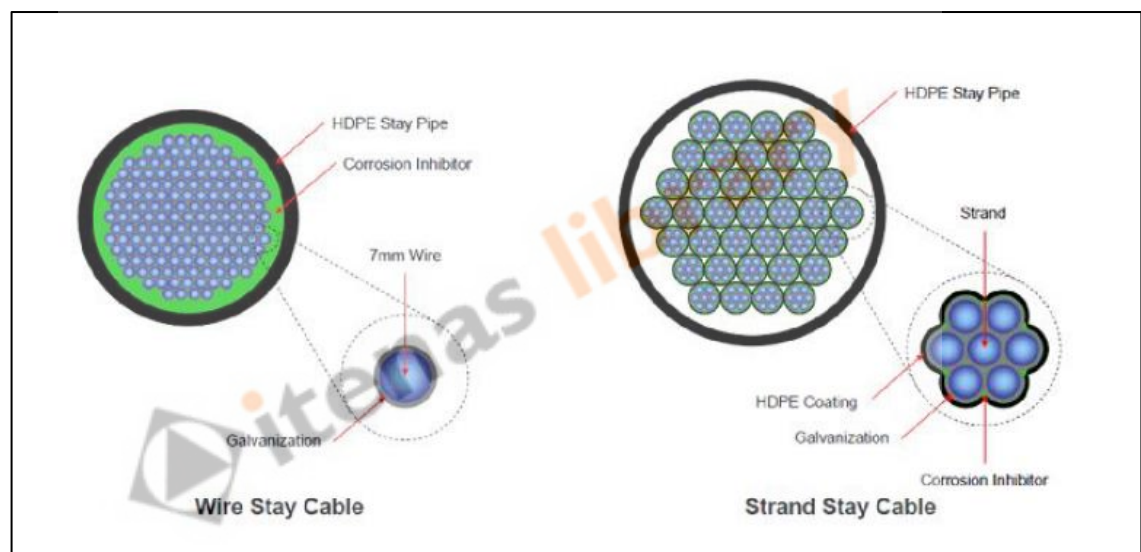
1. *Parallel Wire Cables*

Parallel wire Cable terdiri dari kawat bulat galvanis berdiameter 5 mm sampai 7 mm berbentuk *hexagonal*, dengan suatu *helix* panjang. Kawat tersebut kemudian biasanya dibungkus oleh *High Density polyethylene (HDPE) tube*.

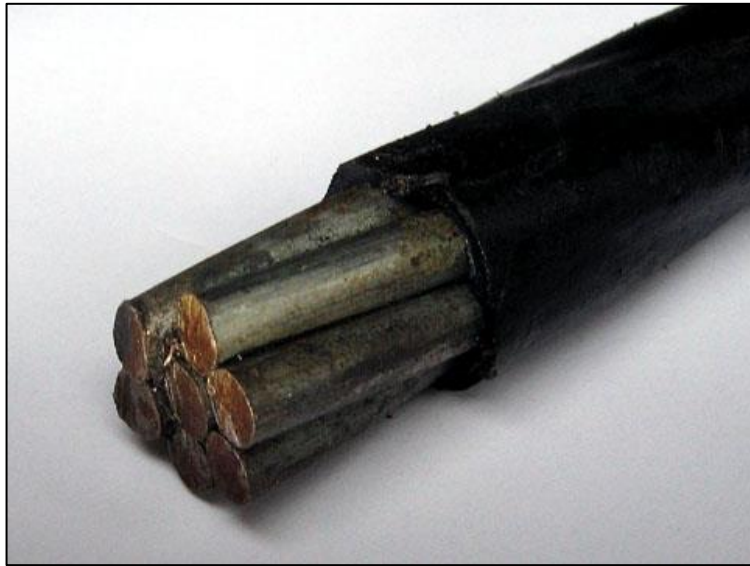
2. *Parallel Strand Cables*

Kabel ini terdiri dari beberapa *strand*. *Strand-strand* tersebut selanjutnya dipasang secara paralel. Setiap kabel dapat terdiri dari beberapa *strand* antara lain sebesar 7, 19, 37, 61, 91, atau 127 buah.

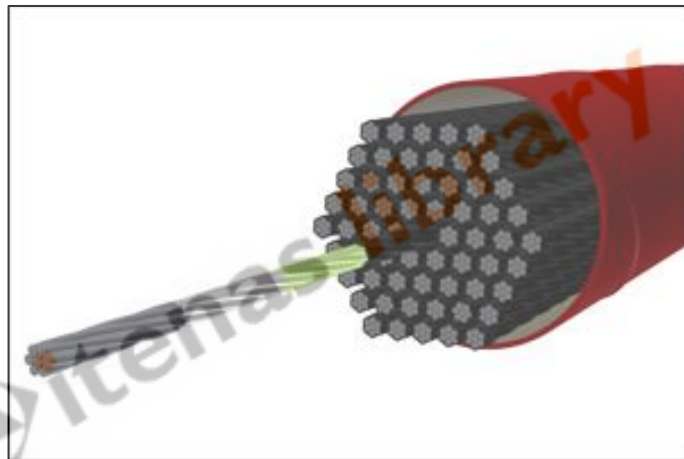
Gambar jenis-jenis kabel yang sering digunakan bias dilihat pada **Gambar 2.11**



Gambar 2.11 Jenis Kabel




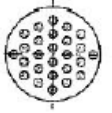
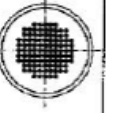
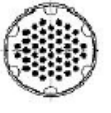
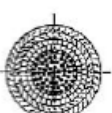
Gambar 2.12 *Wire Stayed Cable*



Gambar 2.13 *Strand Stayed Cable*

Spesifikasi dari kabel yang digunakan pada jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada **Tabel 2.1**:

Tabel 2.1 Jenis-jenis Kabel

| Jenis Kabel |  Coupled bars 7 \varnothing 36 Steel 855/1030 |  Uncoupled bars 26 \varnothing 18 |  Parallel wires 128 \varnothing 7 |  Strands 27 \varnothing 15 15 mm |  Locked-coil cables |
|---|---|--|--|--|--|
| Tendons | Bars \varnothing 26.5, 32, 36 mm | Bars \varnothing 16 mm | Wire \varnothing 6, 7 mm | Strand \varnothing 0.5, 0.6, 0.7 of 7 twisted wires | Wire with different profiles \varnothing 2.9-7 mm |
| 0.2% proof stress, $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²) | 835 - 1080 | 1350 | 1470 | 1570 ~ 1670 | - |
| Ultimate tensile strength, β_z (N/mm ²) | 1030 - 1230 | 1500 | 1670 | 1770 ~ 1870 | 1000 ~ 1300 |
| Fatigue | | | | | |
| $\Delta\sigma$ (N/mm ²) | 80 | - | 350 | 300 ~ 320 | 120 ~ 150 |
| σ_{max}/β_z | 0.6 | - | 0.45 | 0.5 ~ 0.45 | 0.45 |
| Modulus of elasticity, E (N/mm ²) | 210 000 | 210 000 | 205 000 | 190 000 ~ 200 000 | 180 000 ~ 165 000 |
| Failure Load kN | 7339 | 7624 | 7467 | 7634 | 7310 |

(Sumber: Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

2.4. Kriteria Perencanaan

Dalam perencanaan jembatan *cable stayed*, terdapat beberapa literatur yang digunakan sebagai penunjang, antara lain:

1. SNI 1725:2016 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan
2. Surat Edaran Menteri PUPR 2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel

2.4.1. Pembebanan Struktur

Jembatan Jalan Raya (*Highway Bridges*) adalah jembatan yang direncanakan untuk memikul beban lalu lintas kendaraan baik kendaraan berat maupun ringan. Jembatan jalan raya ini menghubungkan antara jalan satu ke jalan lainnya.

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel, aksi atau pembebanan yang terjadi pada struktur jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada **Tabel 2.2** berikut

Tabel 2.2 Aksi yang Terjadi Pada Jembatan *Cable Stayed*

| No. | Aksi Permanen | Aksi Variabel | Aksi Accidental |
|-----|-------------------------------------|---|---|
| 1 | Berat sendiri struktur & Beban mati | Beban kendaraan | Gaya tumbukan kapal atau <i>drifter</i> |
| 2 | Gaya prategang | Gaya kejut kendaraan | Gaya tumbukan kendaraan |
| 3 | Susut dan rangkai beton | Tekanan lateral tanah akibat kendaraan | Aksi gempa (seismik) |
| 4 | Gaya hanyutan air | Beban pejalan kaki (termasuk beban lajur sepeda motor) | Gaya dinamik <i>rupture</i> ruji kabel |
| 5 | Penurunan fondasi | Gaya pengereman kendaraan | |
| | | Beban angin | |
| | | Tekanan air (termasuk tekanan air mengalir dan beban ombak) | |
| | | Efek temperatur | |
| | | Tahanan friksi perletakan | |
| | | Gaya <i>rupture</i> statis ruji kabel | |
| | | Efek penggantian ruji kabel | |

Sumber: Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel

Dimana aksi permanen adalah beban tetap yang pasti terjadi pada jembatan, Aksi variabel adalah beban yang besarnya dapat berubah tergantung waktu, dan aksi *accidental* adalah beban jika terjadi kecelakaan pada jembatan tersebut.

Standar pembebanan yang digunakan di Indonesia saat ini adalah SNI 1725:2016. Standar ini menetapkan ketentuan pembebanan dan aksi-aksi lainnya yang akan digunakan dalam perencanaan jembatan jalan raya termasuk jembatan pejalan kaki dan bangunan - bangunan sekunder yang terkait dengan jembatan.

1. Beban Permanen

Beban permanen terdiri dari berat sendiri (*self weight*) dan beban mati tambahan (*super imposed dead load*). Masing-masing komponen beban permanen didefinisikan sebagai berikut.

a. Berat sendiri (*self weight*)

Berat sendiri struktur jembatan harus merupakan keseluruhan berat dari semua komponen struktural, dimana berat oleh volume elemen struktur dan masa jenis dari

material struktur. Pada umumnya, material yang digunakan untuk jembatan adalah beton dan baja, dimana berat jenis untuk tiap jenis material diberikan pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Berat Jenis Material

| No. | Bahan | Berat isi (kN/m ³) | Kerapatan massa (kg/m ³) |
|-----|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Lapisan permukaan beraspal (<i>bituminous wearing surfaces</i>) | 22,0 | 2245 |
| 2 | Besi tuang (<i>cast iron</i>) | 71,0 | 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>asphalt concrete</i>) | 22,0 | 2245 |
| 6 | Beton ringan (<i>low density</i>) | 12,25-19,6 | 1250-2000 |
| 7 | Beton $f'_c < 35$ MPa | 22,0-25,0 | 2320 |
| | $35 < f'_c < 105$ MPa | $22 + 0,022 f'_c$ | $2240 + 2,29 f'_c$ |
| 8 | Baja (<i>steel</i>) | 78,5 | 7850 |
| 9 | Kayu (ringan) | 7,8 | 800 |
| 10 | Kayu keras (<i>hard wood</i>) | 11,0 | 1125 |

b. Beban Mati Tambahan (*Super Imposed Dead Load*)

Beban mati tambahan mencakup semua peralatan, utilitas, dan komponen non-struktural yang terdapat pada jembatan, lapisan penutup permukaan, dan rencana pelebaran dan penambahan penutup permukaan jalan. Besar beban mati tambahan dapat berubah selama umur jembatan. Pada umumnya, lapisan penutup permukaan jalan jembatan menggunakan perkerasan aspal yang memiliki berat jenis 2,2 ton/m³ dan direncanakan setebal 50 mm untuk pelapisan dikemudian hari.

c. Pengaruh Prategang

Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen-komponen yang terkekang pada bangunan statis tak tentu pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan dan batas ultimit.

d. Susut dan Rangkak

Pengaruh rangkak dan penyusutan lebih diperhitungkan dalam perencanaan jembatan beton. Susut dan rangkak menyebabkan momen, geser, dan reaksi ke dalam komponen bertahan. Penyebab gaya-gaya tersebut umumnya diperkecil dengan retakan beton dan baja leleh.

e. Gaya Hanyutan Air

Gaya hanyutan air tidak diperhitungkan karena gaya ini bekerja pada pilar/*abutment*

f. Penurunan Fondasi

Gaya akibat penurunan fondasi tidak diperhitungkan karena gaya ini bekerja pada pilar/*abutment*.

2. Beban Hidup

a. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” terdiri atas beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT) dapat dilihat pada **Gambar 2.14**. Dengan beban terbagi rata (BGT) mempunyai intensitas q kPa dengan besaran q tergantung pada panjang total yang di bebani L yaitu sebagai berikut:

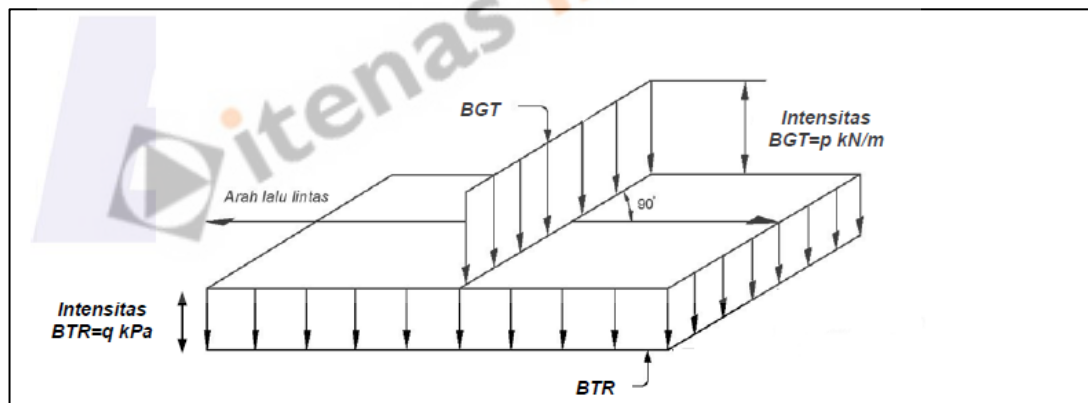
$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m; } q = 9,0 \text{ kPa} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{Jika } L > 30 \text{ m; } q = 9,0 (0,5 + 15/L) \text{ kPa} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

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

L = adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter)



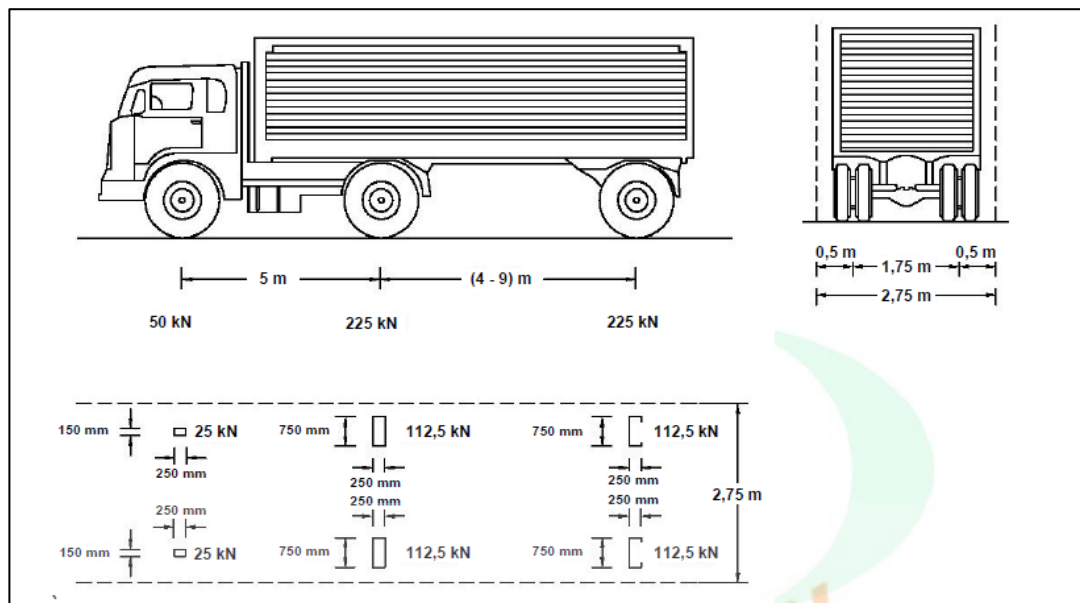
Gambar 2.14 Beban “T” (TD)

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Dengan besar beban intensitas p adalah 49 kN/m.

b. Beban Truk “T” (TT)

Pembeban truk terdiri atas kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat gandar. Berat dari tiap-tiap gandar disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak

antara 2 gandar dapat diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 meter seperti pada **Gambar 2.15**



Gambar 2.15 Beban Truk “T” (TT)

c. Beban Rem (TB)

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

1. 25% dari berat gandar truk desain atau;
2. 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR

Gaya rem tersebut harus ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati sesuai pasal 8.2 Pada SNI Pembebanan Jembatan yang berisi lalu lintas dengan arah yang sama, Gaya ini harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm di atas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan.

d. Beban Pejalan Kaki (TP)

Semua komponen trotoar yang lebih lebar dari 600 mm harus direncanakan untuk memikul pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan pada masing-masing lajur kendaraan.

3. Beban Akibat Lingkungan

a. Beban Angin Kendaraan (EW_s)

Tekanan angin yang ditentukan diasumsikan disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam. Untuk jembatan atau bagian

jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 10.000 mm diatas permukaan tanah atau permukaan air, kecepatan angin rencana (V_{DZ}) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{DZ} = 2,5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \dots\dots\dots(7)$$

Keterangan:

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

V_{10} = adalah kecepatan angin pada elevasi 10.000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana (km/jam). V_{10} diperoleh dari grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang, survei angin pada lokasi jembatan, dan jika tidak ada data yang lebih baik perencana dapat mengasumsikan bahwa $V_{10} = V_B = 90$ km/jam hingga 126 km/jam.

V_B = adalah kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm

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

V_0 = adalah kecepatan gesekan angin yang merupakan karakteristik meteorologi, sebagaimana ditentukan dalam **Tabel 2.4** untuk berbagai macam tipe permukaan di hulu jembatan (km/jam)

Z_0 = adalah panjang gesekan di hulu jembatan, yang merupakan karakteristik meteorologi, ditentukan pada **Tabel 2.4** (mm)

Tabel 2.4 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 (mm) | 70 | 1000 | 2500 |

Tekanan angin rencana dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \dots\dots\dots(8)$$

Keterangan:

P_B adalah tekanan angin dasar seperti yang ditentukan dalam **Tabel 2.5**

Tabel 2.5 Tekanan Angin Dasar

| Komponen bangunan atas | Angin tekan (MPa) | Angin hisap (MPa) |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Rangka, kolom, dan pelengkung | 0,0024 | 0,0012 |
| Balok | 0,0024 | N/A |
| Permukaan datar | 0,0019 | N/A |

b. Beban Angin Kendaraan (EW_1)

Tekanan angin rencana harus dikerjakan baik pada struktur jembatan maupun pada kendaraan yang melintasi jembatan. Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan.

c. Beban Gempa

Terdapat dua metode dalam menganalisis beban gempa, yaitu metode statis ekuivalen dan metode analisa beban gempa dinamis. Dalam analisa beban gempa dinamis, digunakan data respon spektrum gempa yang sesuai dengan lokasi jembatan yang akan direncanakan. Data respons spektrum tersebut diperoleh dari web resmi Kementerian Pekerjaan Umum Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan untuk wilayah Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan dengan kondisi tanah sedang (asumsi) dengan *output* berupa data perbandingan percepatan dan periode yang kemudian akan dianalisa oleh program MIDAS *Civil*.

2.4.2. Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Tabel 2.6 Kombinasi dan Faktor Beban

| Keadaan Batas | MA MS TA PR PL SH | TD TT TB TR TP | EU | EW _S | EW _L | BF | EUn | TG | ES | Gunakan Salah Satu | | |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------|------|-----------------|-----------------|------|-----------|---------------|---------------|--------------------|------|------|
| | | | | | | | | | | EQ | TC | TV |
| Kuat I | γ_p | 1,80 | 1,00 | - | - | 1,00 | 0,50/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Kuat II | γ_p | 1,40 | 1,00 | - | - | 1,00 | 0,50/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Kuat III | γ_p | - | 1,00 | 1,40 | - | 1,00 | 0,50/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Kuat IV | γ_p | - | 1,00 | - | - | 1,00 | 0,50/1,20 | - | - | - | - | - |
| Kuat V | γ_p | - | 1,00 | 0,40 | 1,00 | 1,00 | 0,50/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Ekstrem I | γ_p | γ_{EQ} | 1,00 | - | - | 1,00 | - | - | - | 1,00 | - | - |
| Ekstrem II | γ_p | 0,50 | 1,00 | - | - | 1,00 | - | - | - | - | 1,00 | 1,00 |
| Daya Layan I | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,30 | 1,00 | 1,00 | 1,00/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Daya Layan II | 1,00 | 1,30 | 1,00 | - | - | 1,00 | 1,00/1,20 | - | - | - | - | - |
| Daya Layan III | 1,00 | 0,80 | 1,00 | - | - | 1,00 | 1,00/1,20 | γ_{TG} | γ_{ES} | - | - | - |
| Daya Layan IV | 1,00 | - | 1,00 | 0,70 | - | 1,00 | 1,00/1,20 | - | 1,00 | - | - | - |
| Fatik (TD dan TR) | - | 0,75 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Keterangan:

MS = beban mati komponen struktural dan nonstruktural jembatan

MA = beban mati perkerasan dan utilitas

TA = gaya horisontal akibat tekanan tanah

PL = gaya-gaya yang terjadi pada struktur jembatan yang disebabkan oleh proses pelaksanaan, termasuk semua gaya yang terjadi akibat perubahan statika yang terjadi pada konstruksi segmental

PR = prategang

SH = gaya akibat susut/rangkak

TD = beban lajur "D"

TT = beban truk "T"

- TB = gaya akibat rem
 TR = gaya sentrifugal
 TP = beban pejalan kaki
 EU = beban arus dan hanyutan
 EW_s = beban angin pada struktur
 EW_l = beban angin pada kendaraan
 BF = gaya friksi
 ET = gaya akibat temperatur gradien
 EF = gaya apung
 SE = beban akibat penurunan
 EQ = gaya gempa
 TC = gaya akibat tumbukan kendaraan
 TV = gaya akibat tumbukan kapal

2.4.3. Kontrol Kekuatan Struktur

2.4.3.1. Kontrol Gelagar Prategang

1. Tegangan yang terjadi

a. Setelah konstruksi

Tegangan ijin tekan beton:

$$f_a = 0,4f'_c \dots\dots\dots(9)$$

Tegangan ijin tarik beton:

$$f_b = 0,60 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(10)$$

2. Lendutan yang terjadi

Berdasarkan Surat Edaran Menteri PUPR 2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel syarat lendutan izin untuk jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada **Gambar 2.16**.

Lendutan yang terjadi pada dek jembatan harus lebih kecil dari

- $L/400$ untuk penampang baja dan komposit;
- $L/800$ untuk penampang beton.

Gambar 2.16 Lendutan Izin untuk Jembatan *Cable Stayed*

Sumber: Surat Edaran Menteri PUPR 2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel

3. Momen yang terjadi

Momen ultimit pada *box girder* akibat kombinasi beban harus lebih kecil dari kapasitas momen.

$$\text{Momen Ultimit pada box girder} \leq \phi Mn \dots \dots \dots (11)$$

2.4.3.2. Kontrol Kabel

Menurut Surat Edaran Menteri PUPR 2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel gaya awal pada ruji kabel untuk setiap kondisi pelaksanaan dan pembebanan harus memenuhi keadaan batas lain sebagai berikut:

- $f_{as} \leq 0,45 f_{Pu}$ *strand* untuk keadaan batas daya layan;
- $f_{as} \leq 0,60 f_{Pu}$ *strand* untuk keadaan batas ultimit, yang umumnya aman bila keadaan daya layan terpenuhi

Keterangan:

f_{as} = Gaya akhir pada ruji kabel

f_{Pu} = Tegangan putus

2.5. Tahap-tahap Perencanaan

2.5.1. Perencanaan Gelagar Memanjang

Gelagar memanjang berfungsi menahan beban pelat lantai, beban perkerasan, beban lalu lintas “D” dan beban air hujan, kemudian beban-beban tersebut disalurkan ke gelagar utama/melintang. Adapun langkah-langkah perencanaannya adalah:

1. Gelagar memanjang menggunakan *box girder*
2. Menentukan profil yang digunakan dan mutunya
3. Menghitung pembebanan

- a. Beban mati, berupa berat sendiri profil dan beban perkerasan
- b. Beban hidup, berupa beban “T” dan beban air hujan, analisa dan penyebarannya terhadap gelagar memanjang
4. Analisa struktur (momen dan gaya lintang) yang paling menentukan
5. Cek kapasitas dan kekakuan

2.5.2. Perencanaan kabel

Dalam perencanaan dimensi kabel untuk jembatan *cable stayed*, digunakan jenis paralel VSL 7-wire strand. Ada 2 jenis kabel paralel VSL 7-wire strand yaitu ASTM A 416-74 grade 270 dan Euronorme 138-79 dengan spesifikasi yang tertera pada tabel

Tabel 2.7 Spesifikasi Kabel

| Standard | ASTM A 416-74 grade 270 | Euronorme 138-79 |
|--|--------------------------------------|------------------|
| Ø (mm) | 15.2 | 15.7 |
| As (mm ²) | 140 | 150 |
| f _u (f _{ijin} = 0.7 f _u) (MPa) | 1860 (1488) | 1770 (1416) |
| Ukuran angker | 7, 12, 19, 31, 37, 61, dan 91 strand | |

Jarak antar kabel untuk jembatan *cable stayed* mempunyai ketentuan sebagai berikut:

1. Gelagar Baja = 15 m – 25 m
2. Gelagar Beton = 5 m – 10 m

Dimensi kabel didekati dengan persamaan berikut (Gimsing, 1983):

$$A_{sc} = \frac{(W\lambda + P) \cos \theta}{\frac{0.8 \times f_u \times \sin 2\theta}{2} \times \gamma a} \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan

- A_{sc} = luas penampang kabel (m²)
 W = beban mati dan hidup merata (kN/m)
 λ = jarak antar angker kabel pada gelagar (m)
 P = beban terpusat (kN)
 θ = sudut kabel terhadap horizontal
 f_u = tegangan ultimit kabel (kN/m²)
 γ = berat jenis kabel (77,01 kN/m³)
 a = jarak mendatar dari pylon ke angker kabel pada gelagar (m)

2.5.3. Perencanaan Pylon

Perhitungan dimensi *pylon* berdasarkan pada besarnya gaya aksial tekan total kabel untuk satu sisi kolom vertikal *pylon*. Gaya aksial tekan total kabel ini dibandingkan dengan mutu beton *pylon* yang digunakan sehingga didapatkan rumus sebagai berikut:

$$A_{\text{Perlu}} = \frac{T}{f'_c} \dots \dots \dots (13)$$

Dari luasan perlu yang didapatkan, dapat ditentukan dimensi *pylon* dengan rumus berikut ini:

$$h = 1,5 \times b \dots \dots \dots (14)$$

Keterangan :

A_{perlu} = luasan penampang *pylon* yang diperlukan

T = Gaya aksial total kabel pada *pylon*

f'_c = mutu beton

b = lebar penampang

h = tinggi penampang

2.6. Studi Literatur

Studi literatur adalah mencari referensi teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Studi literatur yang dilakukan oleh penulis yaitu dengan melakukan pencarian terhadap berbagai sumber tertulis jurnal atau tugas akhir terdahulu yang relevan dengan permasalahan yang dikaji.

Berikut ini terdapat studi literatur mengenai perencanaan jembatan *cable stayed* dengan sistem satu bidang berupa jurnal yang ditulis oleh Saudara Muhammad Hudri, Khadavi, dan Robby Permata mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Bung Hatta dengan judul “Analisa Struktur *Jembatan Cable Stayed* Pasupati”. Jurnal ini berisi tentang data-data yang dapat dijadikan referensi oleh penulis dalam mendesain jembatan yang serupa. Berikut data-data tersebut:

- a. Tipe Jembatan : *Box girder* dengan *cable stayed*
- b. Panjang Jembatan : 303,3 meter, terdiri dari beberapa bentang
dimana panjang bentang utama
(*main span*) 106,5 meter.
- c. Lebar Jembatan : 30,93 meter sampai 39,94 meter
- d. Tinggi *pylon* : 53 meter

- e. Jumlah *cable stayed* : 9 buah pada sisi timur jembatan dan (5x2) buah pada sisi barat jembatan
- f. Kabel *strand* : Mengacu pada ASTM A416 7 *wire low relaxation strands*, dengan diameter *strand* = 0,6" (15,2 mm), Luas penampang *strand* = 143.3 mm², Kuat Tarik putus (f_{Pu}) = 1860 MPa
- g. Kuat tekan untuk girder dan *pylon* : 41,5 MPa
- h. Tendon di gelagar arah longitudinal : 19 *strand*
- i. Tendon di slab arah transversal : 4 *strand*
- j. Baja Tulangan Non-Prategang : $\phi \leq 12$ mm BJTP-24 (f_y)
= 240 MPa, $\phi \geq 12$ mm BJTD-40 (f_y) = 400 MPa

Selain literatur tentang perencanaan jembatan *cable stayed* sistem satu bidang, terdapat juga perencanaan jembatan *cable stayed* dengan sistem dua bidang berupa tugas akhir yang ditulis oleh Saudara Hendri mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh November dengan judul “Desain Jembatan *Cable Stayed* Malang Sari – Banyuwangi dengan *Two Vertical Plane System*”. Tugas akhir ini berisi tentang data-data yang dapat dijadikan referensi oleh penulis dalam mendesain jembatan yang serupa. Berikut data-data tersebut:

- a. Bentang jembatan : ± 231 meter dengan bentang tengah 135 meter
- b. Gelagar memanjang : *box girder* dan *ribs*
- c. Gelagar melintang : baja IWF
- d. Lebar jalan : 7 meter (2/2 UD)
- e. Struktur *pylon* : beton bertulang dengan $f'_c = 50$ MPa
- f. *Railing* : profil baja bulat, ukuran profil dianalisis oleh SAP 2000
- g. *Stud* : diameter 22 dengan $f_u = 400$ MPa

Data-data tersebut menjadi referensi penulis dalam mendesain jembatan *cable stayed* dalam tugas akhir ini.