BAB II
LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Jembatan merupakan struktur bangunan yang menghubungkan lintasan terputus oleh adanya sungai, danau, selat, saluran, jalan ataupun perlintasan lainnya. Dilihat dari fungsi tersebut, jembatan dapat dikategorikan sebagai salah satu prasarana transportasi yang sangat penting dalam memperlancar pergerakan lalu lintas.

Secara umum struktur jembatan dibagi menjadi dua yaitu struktur atas yang menerima beban langsung yang meliputi berat sendiri, beban mati, beban mati tambahan, beban lalu lintas kendaraan, gaya rem, beban pejalan kaki dan sebagainya, struktur bawah yang berfungsi memikul seluruh beban struktur atas dan beban lainnya yang ditimbulkan oleh tekanan tanah, aliran air, gesekan pada tumpuan dan sebagainya. Struktur atas atau biasa disebut bangunan atas terdiri atas trotoar, pelat lantai kendaraan, balok utama (girder) dan balok diafragma. Adapun bangunan bawah berupa sistem pondasi seperti abutment dan pilar. Kesatuan struktur yang sempurna antara struktur atas dan bawah jembatan akan memberikan pelayanan transportasi yang memadai sesuai dengan nilai desain jembatan itu sendiri.

2.2. Jembatan *Cable Stayed*

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel, jembatan *cable stayed* adalah struktur yang mempunyai sederetan kabel lurus dan memikul elemen horizontal kaku seperti balok, rangka atau *box*. Jembatan *cable stayed* terdiri dari sistem struktur berupa gelagar menerus yang didukung oleh tumpuan berupa kabel yang di bentang miring dan dihubungkan ke menara sebagai penahan utama. Pada tahap konstruksi, besarnya gaya-gaya dalam, tidak boleh melampaui kapasitas penampang dan pada tahap akhir pembebanan, perpindahan

titik puncak menara dan lendutan lantai jembatan harus memenuhi yang disyaratkan.

Kelebihan jembatan cable stayed yaitu kuat terhadap gaya tarik aksial akibat pembebanan lalu lintas. Sedangkan kelemahan jembatan cable stayed yaitu lemah terhadap gaya tekan dan momen akibat gaya angin. Adapun tiga keadaan batas dalam interaksi antara kabel, gelagar lantai, dan menara sebagai berikut :

1. Gelagar lantai sangat kaku.

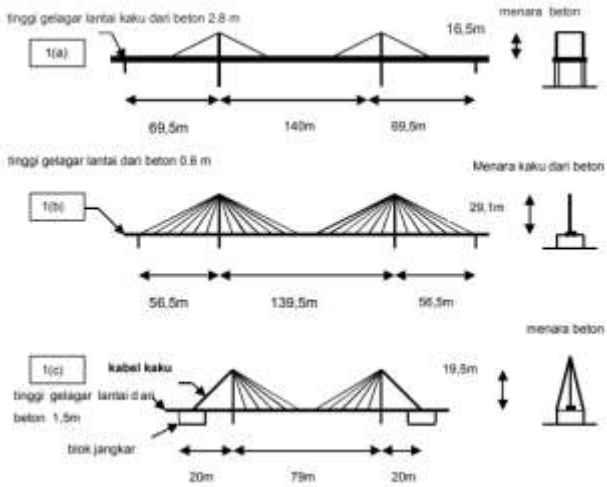
   Gelagar lantai sangat kaku dengan jumlah kabel terbatas sebagai perletakan elastis yang tidak mungkin di bangun pilar. Menara relatif langsing tidak mempertimbangkan tinggi karena hanya memikul momen lentur yang kecil sebagaimana yang terlihat di Gambar 2.1a.

2. Menara sangat kaku.

   Menara yang memikul momen arah memanjang dengan gelagar relatif langsing yang memikul momen arah melintang terutama bila jarak antara kabel dibuat berdekatan sebagaimana yang terlihat di Gambar 2.1b.

3. Kabel sangat kaku

   Kabel sebagai elemen stabilitas structural. Bentang samping umumnya dibuat lebih pendek dari setengah bentang utama agar kabel tidak kehilangan gaya tarik sebagaimana yang terlihat di Gambar 2.1c.



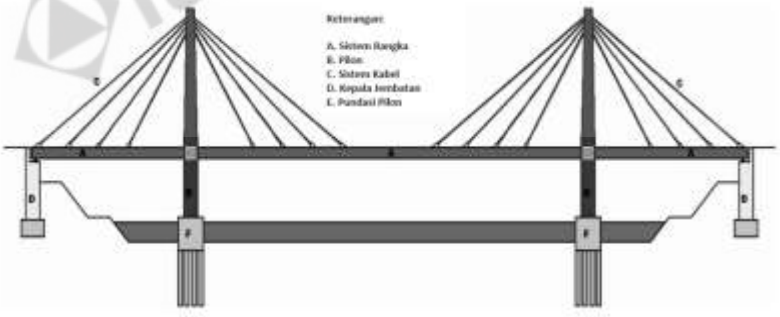
Gambar 2. 1 Contoh tipikal untuk tiga keadaan batas perencanaan

(Sumber: Perencanaan Teknis Jembatan Cable Stayed oleh Redrik Irawan, Lanneke Tristanto, dan Tommy Virlanda WN 2011)

Perpindahan beban dari puncak menara harus diusahakan sekecil mungkin dan masih dalam toleransi. Demikian pula dengan lendutan pada lantai jembatan. Dengan dicapainya lendutan yang kecil maka bidang momen dari gelagar jembatan menjadi optimum dan sedapat mungkin dapat dicapai kondisi momen positif hampir sama dengan momen negatif pada setiap peralihan tumpuan kabel. Kondisi tersebut dapat dicapai dengan mengaplikasikan gaya axial secara bertahap pada kabel. Sehingga pada jembatan dengan sistem beruji kabel, metode konstruksi akan menentukan tahapan analisis.

2.3. Komponen Jembatan *Cable Stayed*

Komponen jembatan *cable stayed* terdiri atas gelagar, kabel dan menara atau pilon. Masing-masing komponen mempunyai berbagai tipe dan bentuk sesuai fungsinya. Setiap komponen jembatan *cable stayed* saling berhubungan satu sama lain. Kabel memikul beban dari gelagar yang menahan jalan raya beserta lalu lintasnya. Beban dari kabel tersebut selanjutnya disalurkan ke menara dan dilimpahkan ke fondasi jembatan. Di bawah ini akan diuraikan beberapa tipe dan bentuk dari komponen jembatan *cable stayed*.



Gambar 2. 2 Komponen-komponen jembatan cable stayed

Sumber : SEM PUPR 19/SE/M/2017 tentang Pemeliharaan Jembatan Beruji Kabel (*Cable Stayed*) Tipe Rangka Baja Untuk Pejalan Kaki

2.3.1. Pilon

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel, perencanaan menara merupakan hal yang sangat penting dan mendasar yang akan

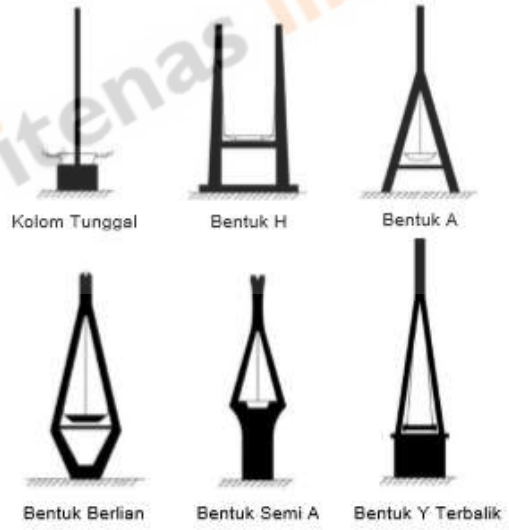
mempengaruhi estetika, keekonomisan serta perilaku struktur dari jembatan. Menara menahan tekanan tinggi karena memikul hampir semua berat sendiri dan beban hidup yang berada pada struktur. Menara akan menerima gaya dari gelagar yang disalurkan melalui kabel.

Pemakaian beton pada menara akan membuat menara mengalamai gaya tekan yang besar. Perencanaan menara beton lebih rumit dari menara baja karena memerlukan pemeriksaan analisis kedua, karena beton mempunyai hubungan perilaku tegangan-regangan yang tidak linear.

Kolom menara yang terdiri dari profil baja yag dibungkus dalam beton ummnya bersifat linear. Untuk kondisi pelaksanaan di Indonesia, lebih aman menggunakan bahan baja atau komposi baja-beton untuk struktur menara.

Bentuk dasar menara jembatan *cable stayed* ada beberapa macam, seperti ditampilkan pada **Gambar 2.3** di bawah. Pemilihan bentuk menara ditentukan oleh konfigurasi kabel, bentang jembatan, dan aspek estetika.

itenas library



Gambar 2. 3 Bentuk dasar menara jembatan cable stayed

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Menurut Troisky (1977), penentuan tinggi menara sebagai berikut.

$H \geq {}^{L}/_{6}$ …….(2.1)

$H = n \times a \times \tan 25^{o}$ ……..(2.2)

Keterangan :

L = Bentang jembatan

n = Jumlah kabel

a = Jarak kabel antar gelagar

H = Tinggi pilon

Sedangkan menurut Gimsing (2012), rumus untuk tinggi menara adalah :

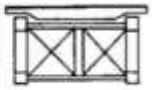
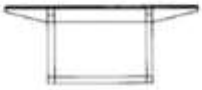
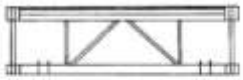
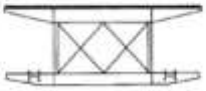
$H = 0{,}291L$……...……(2.3)

Menurut Podolny (1976), rekomendasi perbandingan antara tinggi menara dan bentang terpanjang antara $0{,}19 - 0{,}25$. Dalam pemilihan bentuk pilon juga harus mempertimbangkan hal lain seperti kondisi struktur jembatan yang menghubungkan kedua sisi daratan yakni sungai ataupun laut yang merupakan alur pelayaran sehingga selama pembangunan pilar jembatan arus dihindari terjadinya hambatan terhadap lintas kapal di alur pelayaran.

2.3.2. Gelagar

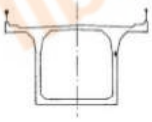
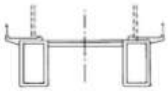
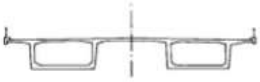
Gelagar jembatan merupakan elemen yang memiliki nilai kekakuan yang dapat menerima beban jembatan terutama kapasitas lentur lantai jembatan. Pengukuran jumlah kabel penggantung dapat mengakibatkan kebutuhan penampang gelagar jembatan semakin besar. Kekakuan dari gelagar jembatan ditentukan oleh dimensi gelagar jembatan. Semakin besar penampang gelagar jembatan maka berat sendiri struktur lantai semakin besar.

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel, bentuk gelagar jembatan *cable stayed* terdiri dari tiga jenis yaitu rangka pengaku baja (**Gambar 2.4**), *solid web* beton (**Gambar 2.5**), dan *solid web* baja (**Gambar 2.6**). Pada awal perkembangan jembatan *cable stayed modern*, *stiffening truss* banyak digunakan tetapi saai ini sudah jarang digunakan karena membutuhkan pabrikasi yang besar, perawatan yang relatif sulit, dan kurang menarik dari segi estetika.

No	Tipe jembatan	Penampang jembatan
1	Jalan raya	
2	Jalan raya dan kereta api	
3	Jalan raya dan kereta api	
4	Jalan raya dan kereta api	

Gambar 2. 4 Gelagar jembatan dengan rangka pengaku

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

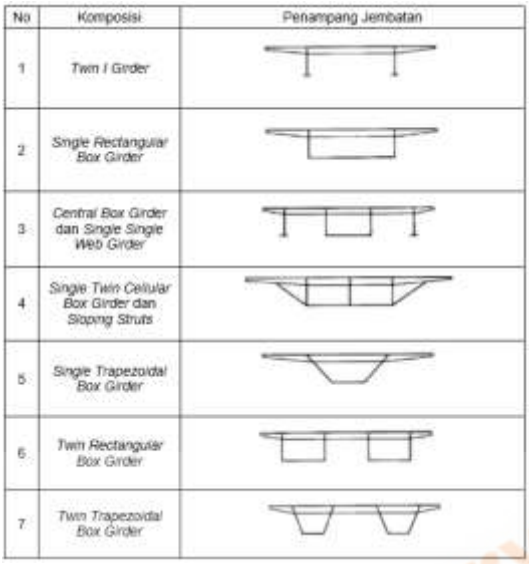
No	Komposisi	Penampang Jembatan
1	*Single Box Girder*	
2	*Twin Box Girder*	
3	*Twin Box Girder*	
4	*Multiple Box Girder*	
5	*Twin Trapezoidal Box Girder*	

Gambar 2. 5 Gelagar jembatan dengan solid web beton

Gelagar yang tersusun dari *solid web* yang terbuat dari baja atau beton dapat berupa :

a) Gelagar pelat (*plate girder*), terdiri atas dua atau banyak gelagar;

b) Gelagar box (*box girder*), terdiri atas satu atau susunan *box* yang dapat berbentuk persegi panjang atau *trapezium*;



No	Komposisi	Penampang Jembatan
1	Twin I Girder	
2	Single Rectangular Box Girder	
3	Central Box Girder dan Single Single Web Girder	
4	Single Twin Cellular Box Girder dan Sloping Struts	
5	Single Trapezoidal Box Girder	
6	Twin Rectangular Box Girder	
7	Twin Trapezoidal Box Girder	

Gambar 2. 6 Gelagar jembatan dengan solid web baja

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Material struktur atas dapat terbuat dari beton, baja dan komposit. Struktur atas terbuat dari beton biasanya digunakan untuk bentang sampai dengan 350 meter dengan pertimbangan biaya pelaksanaan yang lebih murah. Sedangkan bentang yang lebih panjang, pemakaian beton pada gelagar jembatan akan menyebabkan pertambahan berat sendiri yang pada akhirnya akan mempengaruhi dimensi elemen jembatan yang lain seperti kabel, menara, dan fondasi.

Menurut Troitsky (1977), tinggi gelagar dapat digunakan antara 1/15 – 1/18 panjang panel atau 1/100 – 1/200 panjang bentang utama. Sedangkan menurut Leondhart (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. Untuk jembatan *cable stayed* beton dengan sistem kabel dua bidang pada kolom ujung tidak menunjukkan gejala aerodinamis yang mengkhawatirkan bila memenuhi persyaratan :

$$B \geq 10H \; atau \; B \geq {}^{L}/_{30} \quad \text{.....(2.4)}$$

Keterangan :

B = Lebar jembatan

H = Tinggi gelagar

L = Panjang jembatan

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 $B \geq {}^{1}/_{25}$.

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel, besaran berikut dapat digunakan sebagai perkiraan awal untuk memperkirakan berat gelagar lantai jembatan *cable stayed* :

- Gelagar baja : $2{,}5 - 3{,}5$ kN/m^2, misalnya *box* baja, rangka baja;
- Gelagar komposit baja-beton : $6{,}5 - 8{,}5$ kN/m^2, misalnya box dengan *flens* beton dan badan dari komponen rangka baja;
- Gelagar beton : $10 - 15$ kN/m^2, misalnya *box* beton.

itenas library

2.3.3. Kabel

Kabel (*stays*) merupakan elemen jembatan yang menghubungkan antara pilon dan gelagar. Kabel penggantung menyalurkan beban-beban yang terjadi pada gelagar menuju menara yang diterukan ke fondasi. Jembatan *cable stayed* terdiri dari dua bagian kabel yaitu kabel *backstayd* dan kabel *midstay*.

Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015, keuntungan dari penggunaan ruji kabel sebagai berikut :

a) Ruji kabel berfungsi sebagai perletakan elastis/pegas dengan jumlah banyak yang akan mereduksi lentur memanjang dalam lantai selama pelaksanaan dan setelah jembatan beroperasional, sehingga pelaksanaan secara segmental kantilever bebas menjadi ekonomis tanpa ada keperluan penyangga tambahan.

b) Penampang ruji kabel lebih kecil dibandingkan struktur dengan kabel terkonsentrasi sehingga mempermudah pemasangan dan pengangkuran kabel.
c) Pergantian ruji kabel yang relative mudah, menjadi alternatif terhadap cara perlindungan kabel terhadap korosi.

2.3.3.1 Konfigurasi Kabel

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015, berkaitan dengan bidang penempatan kabel, umumnya digunakan 3 (tiga) sistem bidang (**Gambar 2.7**) yaitu :

a) Sistem satu bidang/ *single plane*

Sistem kabel satu bidang digunakan untuk jembatan dengan lebar yang relatif kecil serta jumlah lajur lalu lintas yang genap. Keuntungan dari sistem satu bidang yaitu dari segi estetika karena tidak terjadi kabel bersilangan yang terlihat oleh pandangan sehingga terlihat penampilan struktur yang indah. Kabel ditempatkan di tengah-tengah gelagar dan membatasi dua arah jalur lalu lintas yang dapat menyebabkan torsi pada gelagar menjadi besar akibat beban lalu lintas yang tidak simetri dan tiupan angin. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan gelagar kotak (*box girder*) yang mempunyai kekakuan torsi yang besar.

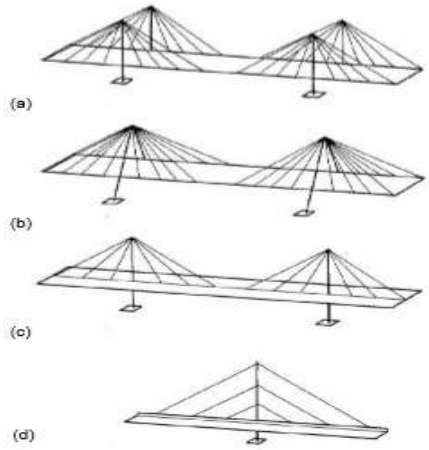
b) Sistem dua bidang

Sistem kabel dua bidang dapatberupa dua bidan vertikal sejajar atau dua bidang miring yang pada sisi atas lebih sempit. Kelemahan sistem dua bidang dapat menimbulkan masalah pada lalu lintas yang lewat diantara dua bidang kabel jika jembatan mempunyai bentang yang relatif pendek. Kemiringan kabel yang curam diperlukan pelebaran dek jembatan.

c) Sistem tiga atau lebih bidang

Sistem tiga atau lebih bidang biasanya digunakan untuk jembatan dengan lantai yang sangat lebar. Tipe jembatan dengan jumlah bidang kabel tiga atau lebih ini jarang digunakan. Namun, karena jumlah bidang

yang banyka maka memiliki keunggulan yaitu bermanfaat untuk mengurani gaya dalam penampang kabel.



Gambar 2. 7 Jembatan dengan kabel satu bidang (c, d) dan dua bidang (a, b)
(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Kabel yang digunakan memencar dari menara, ke sisi luar dan dalam jembatan. Pemencaran kabel dari puncak menara dapat dipilih beberapa cara pengaturan letak kabel arah memanjang jembatan, antara lain seperti ditampilkan pada **Gambar 2.8** di bawah ini.

a) Kabel tunggal (*Mono*);

   Kabel tunggal hanya menggunakan satu kabel pada pilon. Pola ini biasanya digunakan untuk jembatan-jembatan bentang pendek.

b) Bentuk sejajar (*Harp*);

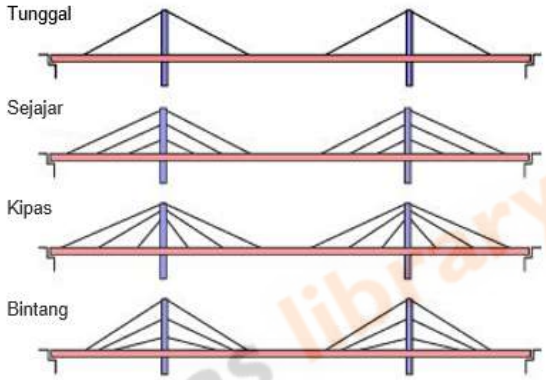
   Sistem kabel sejajar satu dengan yang lainnya, sehingga pertemuan antara kabel dan menara terjadi pada ketinggian yang berbeda-beda. Kelebihan tersebut memudahkan detail penyambungannya. Secara estetis bentuk ini sangat menarik, akan tetapi bentuk ini akan menimbulkan momen lentur yang cukup besar pada menara. Bentuk kabel *harp* dapat dipakai untuk jembatan dengan bentang utama sampai 200 meter.

c) Bentuk kipas (*Fan*);

Bentuk kipas merupakan modifikasi terhadap bentuk *harp*, letak anchor-anchornya dibagi secara merata pada bagian puncak menara sehingga penempatan kabel menjadi lebih mudah.

d) Bentuk bintang (*Star*).

Sistem kabel dipasang secara parallel pada pilon, kemudian dihubungkan pada satu titik pada bagian gelagar. Sistem ini berbanding terbalik dengan bentuk kipas. Sistem ini juga umumnya digunakan untuk jembatan *cable stayed* bentang pendek.



Gambar 2. 8 Pengaturan kabel jembatan cable stayed

(Sumber : Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

2.3.3.2 Jenis Kabel

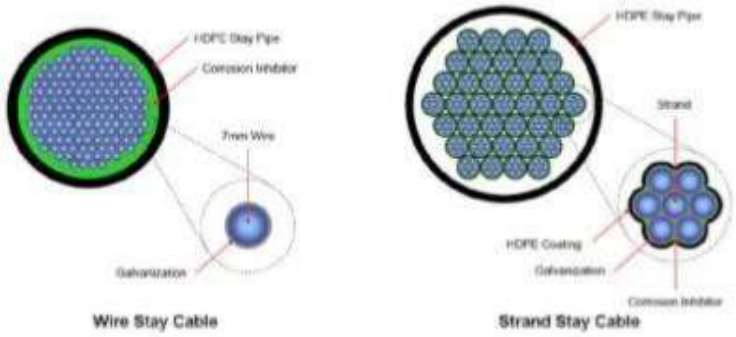
Jembatan *cable stayed* mempunyai jenis-jenis kabel yang digunakan sebagai penyangga utama. Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015, jenis-jenis kabel yang umum dan sering digunakan sebagai berikut :

a) *Parallel Wire Cables*

Parallel Wire Cables terdiri dari kawat bulat galvanis berdiameter 5 mm sampai 7 mm berbentuk *hexagonal*, dengan suatu *helix* panjang. Kawat tersebut kemudian dibungkus oleh High Density Polyethylene (HDPE) tube (Gambar 2.9).

b) *Parallel Strand Cables*

Kabel ini terdiri dari beberapa *strand. Strand-strand* tersebut selanjutnya dipasang secara parallel. Setiap kabel terdiri dari beberapa *strand* antara lain sebesar 7, 19, 37, 61, 91, atau 127 buah (**Gambar 2.9**).



Gambar 2. 9 Jenis-jenis kabel

(Sumber : Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Jenis-jenis kabel yang digunakan pada jembatan *cable stayed* dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2. 1 Jenis-jenis kabel

Jenis Kabel					
Tendons	*Bars* ϕ26.5, 32, 36 mm	*Bars* ϕ 16 mm	*Wire* ϕ 6, 7 mm	*Strand* ϕ 0.5, 0.6, 0.7 of 7 *twisted wires*	*Wire with different profiles* ϕ2 9-7 mm
0.2% proof stress, $\sigma_{0.2}$ (N/mm²)	835 1080	1350	1470	1570 ~ 1670	-
Ultimate tensile strength, β_z (N/mm²)	1030 1230	1500	1670	1770 ~ 1870	1000 ~ 1300
Fatigue					
$\Delta\sigma$ (N/mm²)	80	-	350	300 ~ 320	120 ~ 150
$\sigma max/\beta_z$	0.6	-	0.45	0.5 ~ 0.45	0.45
Modulus of elasticity, E (N/mm²)	210 000	210 000	205 000	180 000 ~ 200 000	180 000 ~ 165 000
Failure Load kN	7339	7624	7467	7634	7310

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

2.3.3.3 Angkur Kabel

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015, angkur pada jembatan *cable stayed* berfungsi sebagai dudukan vertikal bagi gelagar sehingga berfungsi menerima hamper semua beban vertikal yang bekerja. Karen itu tegangan yang diijinkan terjadi pada angkur jembatan *cable stayed* adalah relatif kecil.

Secara umum, tipe angkur pada jembatan *cable stayed* dapat dibagi menjadi dua yaitu :

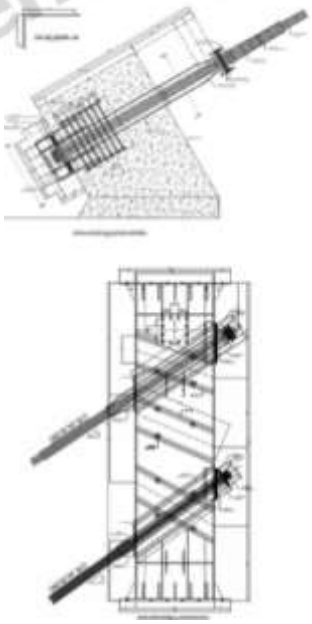
a) Angkur hidup

   Angkur hidup terletak di ujung kabel ketika dilakukan pemberian tegangan. Angkur hidup biasanya diletakkan di menara jembatan terdapat pada **Gambar 2.10**.

b) Angkur mati

   Angkur mati terletak di ujung kabel ketika tidak dilakukan pemberian tegangan. Angkur mati biasanya diletakkan di gelagar jembatan terdapat pada **Gambar 2.10**.

itenas library

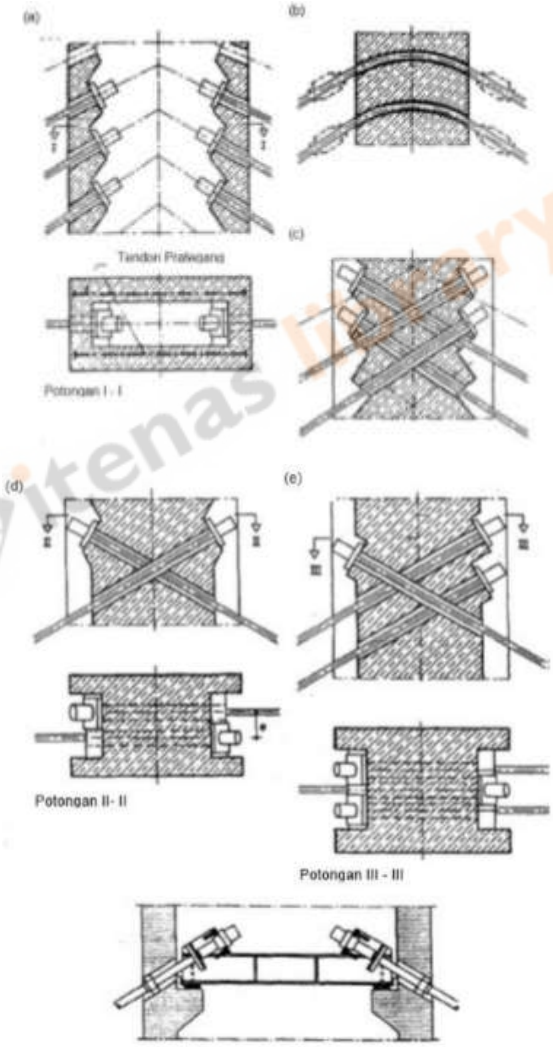


Gambar 2. 10 Angkur mati (atas) dan angkur hidup (bawah)
(Sumber : Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015, pengangkuran juga dilakukan pada menara dan gelagar jembatan.

a) Pengangkuran pada menara

Bagian dari kabel yang masuk ke dalam menara ditempatkan di dalam suatu pipa pengarah / *guide pipe* dari konstruksi baja menembus dari sisi *main span* ke sisi *side span* dan sebaliknya. Ada beberapa alternatif pengangkuran pada menara sebagaimana disajikan pada **Gambar 2.11**.

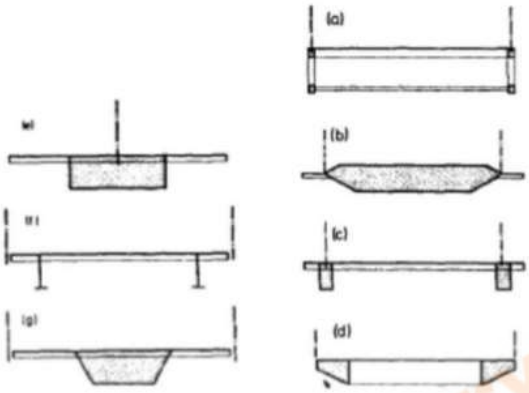


Gambar 2. 11 Alternatif pengangkuran pada menara

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

b) Pengangkuran pada gelagar jembatan

Pada kasus tertentu, ruji kabel dapat diangkurkan langsung ke elemen utama dari gelagar jembatan, sedangkan pada kasus yang lain, angkur diletakkan di luar elemen utama sehingga perlu *bracket* khusus untuk menyalurkan gaya ke elemen utama gelagar jembatan.



Gambar 2. 12 Lokasi angkur pada gelagar jembatan

(Sumber **:** Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat No. 08/SEM/2015 tentang Pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel)

Gambar 2. 13 Contoh angkur kabel pada gelagar

2.4. Kriteria Perencanaan Jembatan *Cable Stayed*

Dalam perencanaan jembatan *cable stayed*, terdapat beberapa literatur sebagai penunjang pemodelan struktur jembatan, sebagai berikut :

1. SNI 1725:2016 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan.

2. Surat Edaran Menteri PUPR 2015 tentang pedoman Perencanaan Teknis Jembatan Beruji Kabel.
3. Perencanaan Teknis Jembatan *Cable Stayed* disusun oleh Redrik Irawan, Lanneke Tristanto, Tommy Virlanda WN, Desember, 2011.

2.5. Pembebanan Struktur Jembatan

Dalam penelitian ini pembebanan jembatan *cable stayed* menggunakan peraturan SNI 1725:2016. Berikut uraian pembebanan yang direncanakan pada penelitian ini.

2.5.1. Beban Permanen

Berat 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 (MS)

Berat sendiri adalah berat bagian elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya, ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Adapun faktor beban yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2. 2 Faktor beban untuk berat sendiri

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ^{S}_{MS})		Keadaan Batas Ultimit (γ^{U}_{MS})	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton dicor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

b) Beban mati tambahan (MA)

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan. Adapun faktor beban mati tambahan diberikan pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2. 3 Faktor beban untuk beban mati tambahan

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ^{S}_{MA})		Keadaan Batas Ultimit (γ^{U}_{MA})	
	Keadaan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00[1]	2,00	0,70
	Khusus (terawasi)	1,00	1,40	0,80
Catatan [1] : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas				

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2.5.2. Beban Hidup

Beban hidup pada jembatan meliputi beban kendaraan diperkirakan akan melewati bangunan struktur atas jembatan. Spesifikasinya terdapat dibawah ini.

1. Beban lajur lalu lintas

   Lajur lalu lintas rencana harus disusun sejajar dengan sumbu memanjang. Jumlah maksimum lajur lalu lintar yang digunakan untuk berbagai lebar jembatan bisa dilihat dalam **Tabel 2.4**.

Tabel 2. 4 Jumlah lajur lalu lintas rencana

Tipe Jembatan (1)	Lebar Bersih Jembatan (2) (mm)	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n)
Satu Lajur	$3000 \le w < 5250$	1
Dua Arah, tanpa Median	$5250 \le w < 7500$	2
	$7500 \le w < 10{,}000$	3
	$10{,}000 \le w < 12{,}500$	4
	$12{,}500 \le w < 15{,}250$	5
	$w \ge 15{,}250$	6
Dua Arah, dengan Median	$5500 \le w \le 8000$	2
	$8250 \le w \le 10{,}750$	3
	$11{,}000 \le w \le 13{,}500$	4
	$13{,}750 \le w \le 16{,}250$	5
	$w \ge 16{,}500$	6
Catatan (1) : Untuk jembatan tipe lain, jumlah lajur lalu lintas rencana harus ditentukan oleh instansi yang berwenang.		
Catatan (2) : Lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak antara kerb/rintangan/median dan median untuk banyak arah.		

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2. Beban lajur “D” (TD)

   Beban lajur “D” terdiri atas beban terbagi rata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT). Adapun faktor beban yang digunakan untuk beban lajur “D” dapat dilihat pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2. 5 Faktor beban lajur "D"

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^{S})	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TD}^{U})
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai q kP$_a$ dengan besaran q tergantung pada panjang total yang dibebani L yaitu seperti berikut :

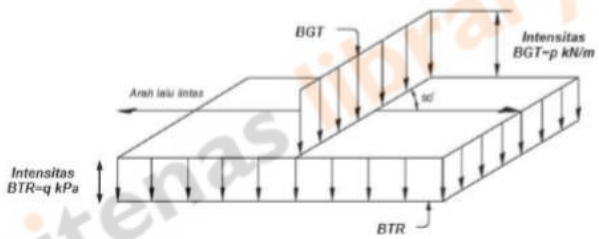
Jika $L \leq 30$ m : q = 9,0 kP$_a$……(2.5)

Jika $L > 30$ m : q = 9,0 $(0{,}5 + \frac{15}{L})$ kP$_a$……...(2.6)

Keterangan :

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

L = panjang total jembatan yang dibebani.



Gambar 2. 14 Beban lajur "D"

(Sumber : SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

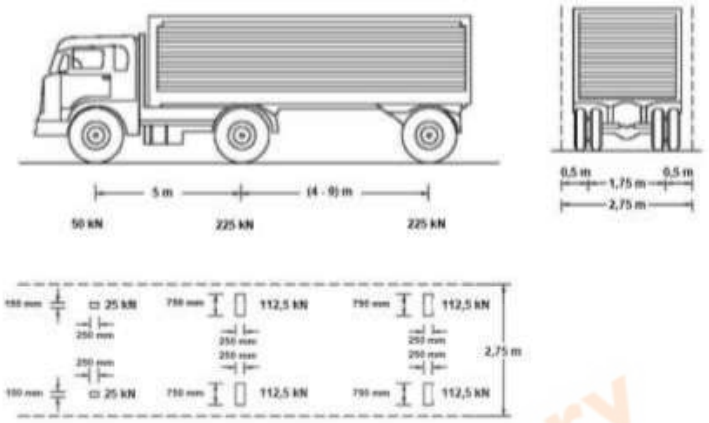
3. Beban truk

Pembebanan truk "T" terdiri atas kendaraan truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan dan berat ganda dapat dilihat dalam Gambar 2.15. Berat dari tiap-tiap gandar disebarkan menjadi dua beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara dua gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 meter sampai dengan 9,0 meter untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Adapun faktor beban untuk beban "T" dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2. 6 Faktor beban truk

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^{S})	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TT}^{U})
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)



Gambar 2. 15 Pembebanan truk 500 kN

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

4. Beban rem (TB)

   Gaya rem harus diambil terbesar dari :

   - 25% dari berat gandar truk desain atau;
   - 5% dari berat truk renvcana ditambah beban lajur terbagi rata BTR.

   Berdasarkan SNI 1725:2016, Beban rem harus ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati sesuai dengan Pasal 8.2 dan berisi lalu lintas dengan arah yang sama. Gaya rem diasumsikan bekerja secara horizontal pada jarak 1800 milimeter diatas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan.

5. Beban pejalan kaki (TP)

   Berdasarkan SNI 1725:2016, semua komponen trotoar yang lebih dari 600 milimeter harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan pada masing-masing lajur kendaraan. Jika ada kemungkinan trotoar berubah fungsi di masa depan menjadi lajur

kendaraan, maka beban hidup kendaraan harus diterapkan pada jarak 250 milimeter dari tepi dalam parapet untuk perencanaan komponen jembatan lainnya. Dalam hal ini, factor beban dinamis tidak perlu dipertimbangkan.

2.5.3. Beban Akibat Aksi Lingkungan

Berikut uraian beban akibat aksi lingkungan :

1. Beban angin arah horizontal

   Dalam SNI 1725:2016 tentang pembebanan jembatan, Tekanan angin diasumsikan disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam.

   Beban angin harus diasumsikan terdistrubusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 1000 milimeter diatas permukaan tanah atau permukaan air, kecepatan angin rencana, V_{DZ}, harus dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

   $V_{DZ} = 2{,}5V_o \left(\frac{V_{10}}{V_B}\right) \ln \left(\frac{Z}{Z_o}\right)$.....(2.7)

   Keterangan :

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

   V_{10} = kecepatan angin pada elevasi 1000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana (km/jam).

   V_B = kecepatan angi rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm.

   Z = elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari dimana beban angin dihitung (Z > 1000 mm).

   V_o = kecepatan gesekan angin, yang merupakan karakteristik meteorologi (km/jam).

   Z_o = panjang gesekan di hulu jembatan, yang merupakan karakteristik meteorologi.

   V_{10} dapat 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 s/d 126 km/jam.

Tabel 2. 7 Nilai V_o dan Z_o 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

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2. Beban angin pada struktur (EW_S)

Arah angin rencana harus diasumsikan horizontal,. Dengan tidak adanya data yang lebi tepat, tekanan angin rencana dalam MPa dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan berikut :

$P_D = P_B(\frac{V_{DZ}}{V_B})^2$……..…….(2.8)

Keterangan :

P_B = tekanan angin dasar seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.8 (MPa)

Tabel 2. 8 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

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

3. Beban angin pada kendaraan (EW_l)

Berdasarkan SNI 1725:2016, tekanan angin harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 180 mm diatas permukaan jalan. Jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka komponen yang bekerja tegak lurus maupun parallel terhadap kendaraan untuk berbagai sudut serang dapat diambil seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.9 dimana arah sudut serang ditentukan tegak lurus terhadap arah permukaan kendaraan.

Tabel 2. 9 Komponen beban angin yang bekerja pada kendaraan

Sudut	Komponen tegak lurus	Komponen sejajar
derajat	N/mm	N/mm
0	1,46	0,00
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2.6. **Kombinasi Pembebanan**

Kombinasi pembebanan merupakan faktor yang berfungsi untuk menghasilkan kondisi ektrem akibat beban yang bekerja. Faktor dan kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2. 10 Kombinasi beban 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	γp	1,80	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γp	1,40	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γp	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γp	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	γp	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γp	γ_{EQ}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,00	-	-
Ekstrem II	γp	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(Sumber **:** SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan)

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.

Beban Transien

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

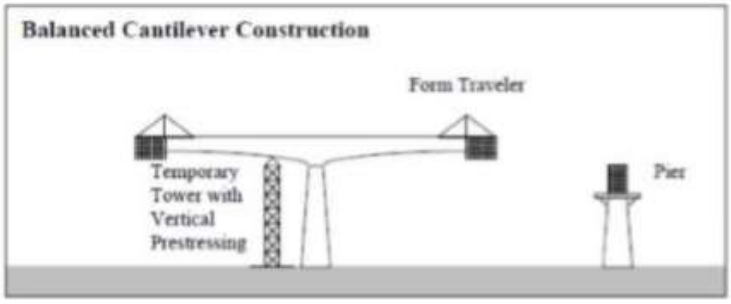
TC = gaya akibat tumbukan kendaraan

TV = gaya akibat tumbukan kapal

2.7. Metode Konstruksi Jembatan Bertahap

Metode konstruksi jembatan pada penelitian ini menggunakan metode kesetimbangan kantilever. Metode kesetimbangan kantilever merupakan metode pembangunan jembatan dengan memanfaatkan efek kantilever seimbangnya sehingga struktur dapat berdiri sendiri. **Gambar 2.16** menunjukkan tahap konstruksi yang terjadi pada *Balanced Cantilever* Konstruksi.

itenas library



Gambar 2. 16 Konstruksi metode kesetimbangan kantilever

Dalam kasus jembatan dengan *box girder*, segmen ini perlu dibangun sebelum proses kantilever untuk menyediakan platform yang bekerja dar *traveler* dapat dimulai. Dalam metode kesetimbangan kantilever terdapat bebarapa jenis metode konstruksi sebagai berikut.

a) Metode kesetimbangan kantilever dengan *launching gantry*

Balok yang digunakan untuk metode ini adalah hasil *precast* dan bukan hasil pengecoran in situ. Pada metode ini digunakan satu buah *gantry* atau lebih yang digunakan sebagai peluncur segmen-segmen *box girder* yang ada.

Adapun kelebihan metode ini sebagai berikut :

- Tidak mengganggu lalu lintas yang ada di bawah pengerjaan jembatan tersebut.
- Tidak memerlukan perancah.
- Tidak memerlukan banyak tenaga kerja untuk pemasangan di lapangan.

Gambar 2. 17 Metode kesetimbangan kantilever dengan *launching gantry*

b) Metode *kesetimbangan kantilever* dengan rangka pengangkat (*lifting crane*)

Metode ini hampir sama dengan metode *launching gantry*. Perbedaannya hanya pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen-segmen jembatannya.

Gambar 2. 18 Metode kesetimbangan kantilever dengan *lifting frame*

c) Metode kesetimbangan kantilever dengan *crane*

Pada metode ini digunakan *crane* untuk mengangkat tiap segmen.

Gambar 2. 19 Metode kesetimbangan kantilever dengan *crane*

d) Metode kesetimbangan kantilever dengan sistem *fullspan* (bentang penuh)

Pada metode ini segmen yang diangkat adalah satu segmen penuh untuk satu bentang. Metode ini hanya dapat dipakai untuk jembatan bentang pendek.

e) Metode kesetimbangan kantilever dengan *form traveler method*

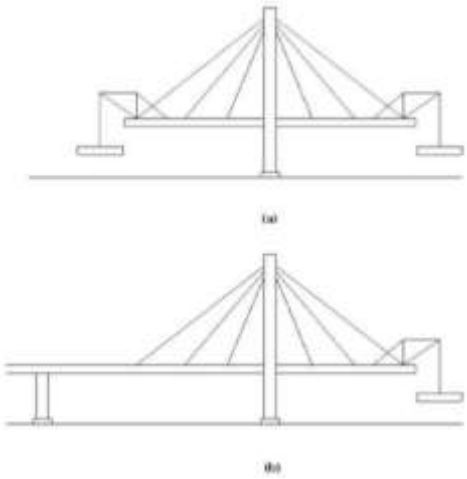
Metode ini digunakan untuk pengecoran beton di tempat. Alat yang digunakan adalah *form traveler* untuk membentuk segmensegmen jembatan sesuai kebutuhan.

Adapun tahapan konstruksi kentilever dengan *form traveler* adaka sebagai berikut :

1. *Install* dan atur *gantry*
2. *Install* dan letakkan *form traveler* dan bekisting menurut elevasi yang tepat
3. Tempatkan penulangan dan saluran *duck* dari tendon
4. Pengecoran segmen
5. *Install* tendon penarikan dan lakukan *stressing*
6. Lepaskan bekisting

2.8. Tahapan Konstruksi Jembatan *Cable Stayed*

Pada tahapan konstruksi jembatan *cable stayed* dapat dipasang dengan menggunakan metode kantilever bebas dari pilon, yang mana secara simetrik dalam dua arah (**Gambar 2.20 a**) atau hanya ke dalam bentang utama (**Gambar 2.20 b**). Dengan kantilever ganda, pada tahapan konstruksi bergantung pada kekakuan lentur dan penjepitan pilon untuk sementara. Setelah pemasangan dan penarikan kabel selesai, jepit sementara di pilon dapat dibongkar. Dengan membuat kantilever ke dalam bentang utama dan bentang luar kabel dipasang pada pilon dan gelagar sehingga susunan kipas atau harpa dari bentang samping ditentukan secara bersamaan dengan yang berasal dari bentang utama.



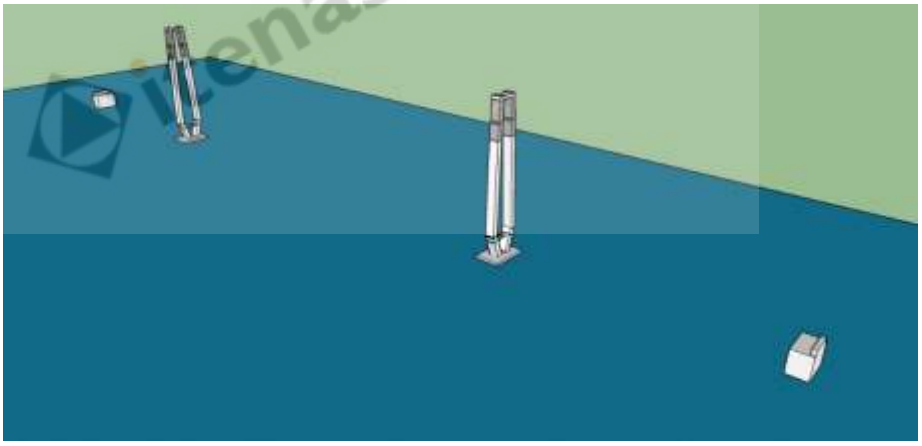
Gambar 2. 20 Metode kesetimbangan kantilever dengan rangka pengangkat

Sumber **:** Perencanaan Teknis Jembatan Cable Stayed, 2011)

Tahapan pelaksanaan diuraikan sebagai berikut :

1) Tahap Pertama

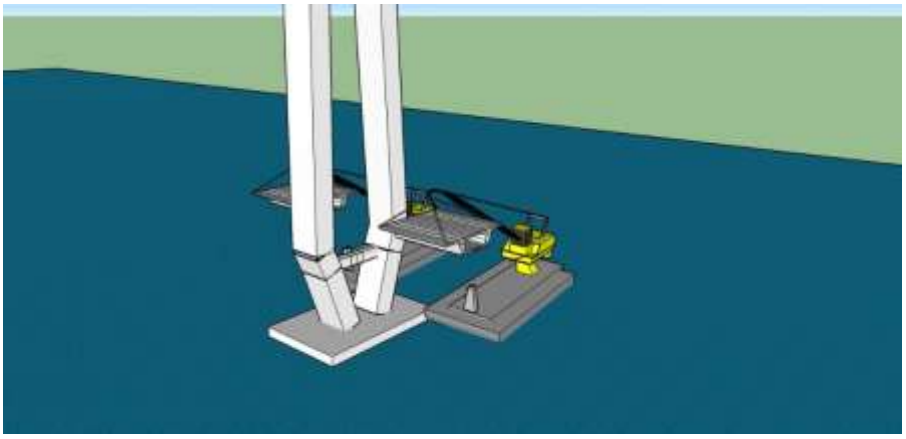
   Didirikan bangunan bawah yaitu pondasi dan pilon kemudian menara terlihat pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2. 21 Sketsa bangunan pilon dan abutmen jembatan

2) Tahap Kedua

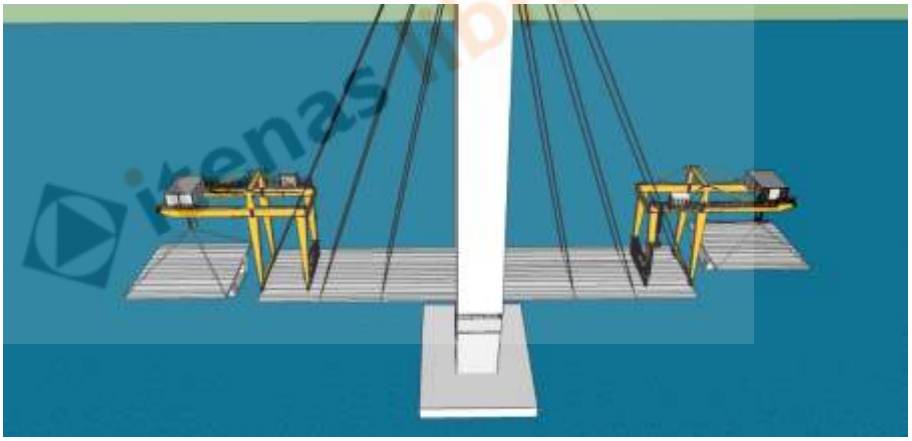
   Pemasangan segmen dek pertama menggunakan *floating crane*, sebagaimana terlihat pada **Gambar 2.22**.



Gambar 2. 22 Sketsa pemasangan dek 1

3) Tahap Ketiga

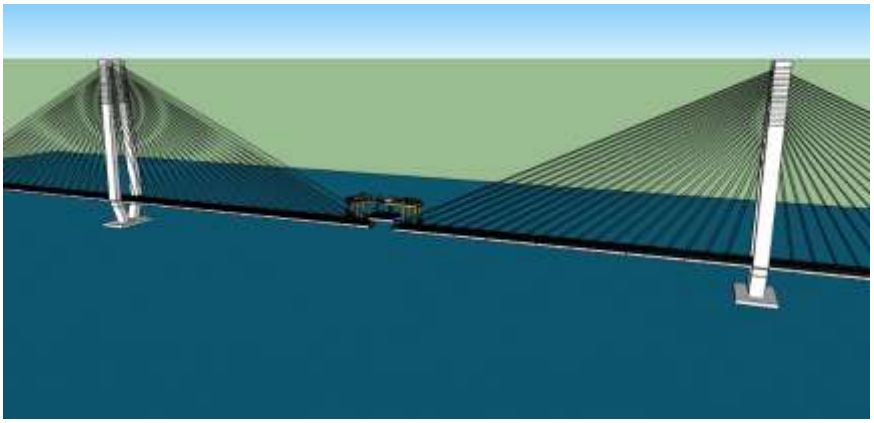
Pemasangan segmen dek selanjutnya menggunakan *traveling crane*. Kemudian pemasangan kabel dan dilakukan *jacking* pada pilon, sebagaimana terlihat pada **Gambar 2.23**.



Gambar 2. 23 Sketsa pemasangan dek menggunakan *lifting frame*

4) Tahap Keempat

Pada tahap ini, segmen-segmen dek lainnya terus dipasang sesuai dengan metode pada tahap ketiga sampai segmen dek mencapai jarak yang sudah direncanakan. Kemudian pada segmen dengan jarak yang sudah dekat dengan abutment pemasangan segmen dek dilakukan masih menggunakan *travelling crane*. Ilustrasi dapat dilihat pada **Gambar 2.24**.



Gambat 2. 24 Sketsa tahap konstruksi keempat

2.9. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini yaitu dengan pencarian beberapa sumber penelitian tertulis seperti jurnal dan tugas akhir terdahulu yang relevasi terhadap penelitian ini. Berikut uraian beberapa studi literatur mengenai analisis tahapan konstruksi jembatan dengan metode kesetimbangan kantilever dan penelitian mengenai desain Jembatan *Cable Stayed* sistem dua bidang.

1. Konstruksi Jembatan Bentang Panjang Studi Kasus : Tatara *Bridge* disusun oleh Bernardinus Herbudiman S.T., M.T, dosen jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Bandung. Literatur ini berisi tentang tahapan-tahapan konstruksi jembatan *cable stayed* dengan studi kasus Tatara *Bridge* yang dapat dijadikan refrensi oleh penulis dalam menganalisis jembatan *cable stayed* dengan menggunakan metode yang serupa.
2. Studi literatur yang ditulis oleh Saudara Rizal Purnawan mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh November dengan judul penelitian "Desain Jembatan *Cable Stayed* Sembayat Baru dengan *Simple Plane System* Menggunakan Metode Pelaksanaan *Balanced Cantilever*". Penelitian ini berisi tentang proses analisis pada jembatan *cable stayed* yang dapat dijadikan refrensi oleh penulis dalam menganalisis tahapan konstruksi jembatan *cable stayed* dengan menggunakan metode yang serupa. Berikut hasil penelitian pada studi literatur ini :

a. Pemasangan dek jembatan menggunakan metode *balanced cantilever* dengan alat bantu *lifting frame*, *crane*, dan perancah.
b. Pada daerah endapan yaitu sekitar pilon, dek dipasang menggunakan bantuan *crane* dan perancah.
c. Pada bagian daerah aliran sungai digunakan lifting frame untuk merangkai segmen-segmen dek.
d. Pengaruh gaya akibat pelaksanaan dihitung dengan program bantu MIDAS Civil menggunakan fitur *construction stage analysis* dengan metode *backward process*.

3. Studi literatur mengenai analisis tahapan konstruksi Jembatan *Cable Stayed* berikutnya ditulis oleh Yessie Julinanda mahasiswa Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Pertanian Bogor dengan judul penelitian "Analisis Perilaku Struktur Jembatan *Cable Stayed* Dr. Ir. Soekarno di Manado Pada Tahap Konstruksi". Penelitian ini berisi tentang proses analisis pada Jembatan *Cable Stayed* yang dapat dijadikan refrensi oleh penulisan dalam menganalisis tahapan konstruksi Jembatan *Cable Stayed* dengan menggunakan metode yang serupa. Berikut hasil penelitian pada studi literatur ini :
   a. Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis perilaku struktur pada tahapan konstruksi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai kekakuan struktur mengalami penurunan saat peningkatan tahapan konstruksi.
   b. Nilai kekakuan struktur dipengaruhi oleh massa struktur dan periode struktur.
   c. Semakin besar nilai periode struktur, maka nilai kekauan struktur akan semakin rendah.
4. Selain literatur tentang analisis tahapan konstruksi jembatan *cable stayed*, terdapat juga perencanaan jembatan *cable stayed* yang ditulis oleh Saudara Miftahul Jannah mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Bandung dengan judul penelitian "Komparasi Perancangan Struktur Jembatan *Cable Stayed* Sistem Satu Bidang

Dengan Dua Bidang". Tugas Akhir ini berisi tentang data-data yang dapat dijadikan refrensi oleh penulis dalam mendesain jembatan yang serupa. Berikut data-data tersebut :

a. Tipe jembatan : *Box girder* dengan *cable stayed*
b. Gelagar jembatan : *Box girder*
c. Struktur pilon : Beton bertulang dengan $f_c' = 50$ MPa
d. Mutu kabel : ASTM A 416-74 *grade* 27

itenas library