

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Jembatan

Berdasarkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 07/SE/M/2015 tentang pedoman persyaratan umum perencanaan jembatan disebutkan bahwa jembatan adalah bangunan pelengkap jalan yang berfungsi sebagai penghubung dua ujung jalan yang terputus oleh sungai, saluran, lembah, selat, laut, atau jalan raya dan jalan kereta api.

Jembatan merupakan suatu sistem transportasi untuk tiga hal, yaitu (Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007):

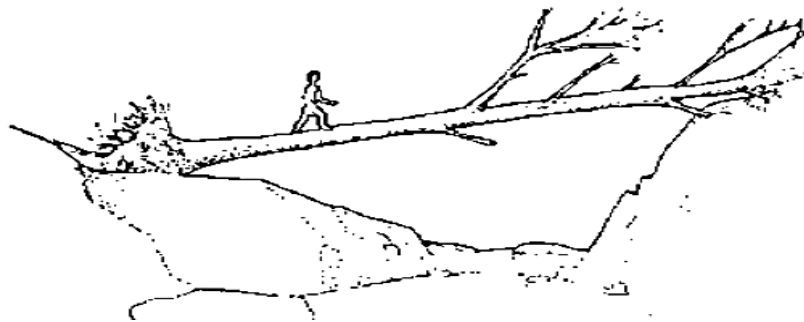
- a. Merupakan pengontrol kapasitas dari sistem,
- b. Mempunyai biaya tertinggi per mil dari sistem,
- c. Jika jembatan runtuh, sistem akan lumpuh.

Dalam perencanaan dan perancangan jembatan sebaiknya mempertimbangkan fungsi kebutuhan transportasi, persyaratan teknis dan estetika-arsitektural yang meliputi : Aspek lalulintas, Aspek teknis, Aspek estetika (Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007).

2.1.1 Perkembangan jembatan

Dapat dikatakan bahwa sejarah jembatan sejalan dengan waktu perkembangan peradaban manusia. Tetapi hal tersebut tidaklah mudah dan membutuhkan proses yang panjang dalam pencapaian struktur jembatan seperti yang ada sekarang ini. Jembatan sebagaimana bidang keteknikan lainnya khususnya teknik struktur diawali dengan proses *cut and try* atau banyak orang mengatakan proses *try and fail* (Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007).

Pada periode zaman purba, manusia menyebrangi sungai dengan memasang tiang-tiang batu dan slab batu, kayu gelondongan, atau pohon yang tumbang yang terbatas untuk bentang sungai yang pendek. Menurut Degrand, jembatan pertama sekali tercatat pernah dibangun di sungai Nil oleh Raja Manes dari Mesir pada tahun 2650 SM. Tipe jembatan terbaru pada periode 2000 SM ini adalah jembatan pelengkung dengan bentuk dan material konstruksi yang sederhana dan alami seperti yang dibangun pada Sungai Euphrat dan Sungai Tigris Babylonia.



Gambar 2.1 Ilustrasi Jembatan pada Zaman Purba
(Sumber : Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007)

Zaman Romawi kuno dimulai pada tahun 300 SM dan berlangsung kurang lebih 600 tahun. Pada zaman ini teknologi jembatan dibangun dari kayu, batu dan beton yang berbentuk lengkung. Namun pada periode ini berhasil memecahkan masalah rumit yang ada seperti membuat konstruksi diatas pilar yang berada di air dan melindunginya dari bahaya banjir. Beberapa hasil dari jembatan terbesar Bangsa Romawi merupakan *Aqueduct* yang dibangun bukan untuk lalulintas manusia tetapi untuk saluran air. *Aqueduct* yang saat ini masih ada dan termegah adalah *Pont Du Gard* di dekat daerah Nienes, Perancis selain itu dibangun pula *Aqueduct Segovia* di Spanyol yang dibangun dari batu pecah tanpa mortar.



Gambar 2.2 Jembatan Aqua Duct Pont Du Gard pada Periode Romawi Kuno
(Sumber : Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007)

Pada periode masa pertengahan di Eropa abad ke 16 sesudah runtuhnya Romawi secara fisik pembangunan jembatan tidak jauh berkembang. Bentuk jembatan lengkung dan pilar-pilar batu masih sering digunakan. Jembatan Rialto yang dibangun pada abad ke 16 di atas Grand Canal Venice adalah jembatan terbaik pada periode ini dari segi pengembangan teknik jembatan dan estetika. Pada jembatan ini, jalan raya menghubungkan dua ruas kawasan perdagangan yang mempunyai jalan masuk menuju jalur pejalan kaki (*footwalks*) yang dibangun dibagian tepi dalam satu kesatuan konstruksi. Dalam pelaksanaan pembangunan jembatan tersebut para pelaksana dihadapkan pada masalah tanah dasar yang digunakan sebagai pondasi berupa tanah lunak. Untuk mengatasi hal tersebut dipancang tiang kayu dibagian tepi kanal. Tiang-tiang tersebut dipancang dalam kelompok-kelompok jarak yang rapat membentuk satu kesatuan yang solid. Selanjutnya lapisan batu ditempatkan di atasnya sebagai pangkal jembatan dan kemudian dibuat bentuk lengkungnya.



Gambar 2.3 Jembatan Rialto dibangun pada Abad ke 16

(Sumber : Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007)

Era jembatan besi dan baja sejalan dengan adanya revolusi industri. Pada zaman ini jembatan besi dibangun dengan menggunakan prinsip-prinsip bentuk lengkung, terutama untuk jembatan jalan raya. Pada era ini jembatan menggunakan berbagai macam komponen dan sistem struktur baja seperti *deck*, *girder*, rangka batang, pelengkung, penahan dan penggantung kabel. Jembatan besi yang pertama kali dibangun adalah Jembatan Coalbrookdale yang melintasi Sungai Severn di Inggris tahun 1776 yang dibangun dengan bagian yang berbeda yang berbentuk setengah lingkaran. Jembatan gantung tertua dan terbesar pada abad ke-18 adalah jembatan *Menai Straits* di Inggris yang dibangun pada tahun 1825 dengan menara batu dan kabel dari rantai besi. Penggunaan kabel baja (*wire steel*) menggantikan kabel besi untuk pertama kali digunakan di dunia pada Jembatan Gantung *Brooklyn, New York* pada tahun 1867.

Jembatan beton hanya digunakan untuk bentuk pelengkung, karena tidak kuat menahan tegangan tarik. Dengan penemuan baja pada tahun 1825, maka masa pembangunan jembatan modern dimulai. Pada tahun 1964, dibangunlah suatu jembatan terpanjang di dunia pada saat itu, yaitu Jembatan Verazano di *New*

York Amerika Serikat dengan bentang total adalah 2038 meter, dengan bentang utama adalah 1928 meter bentuk serupa juga dibangun di Swedia tahun 1943 yaitu Jembatan Sando. Di banyak negara, jembatan umumnya dibuat dari beton bertulang, walaupun mulai digantikan dengan beton prategang.

2.1.2 Klasifikasi jembatan

Menurut Ir. H.J. Struyk dan Prof. Ir. K.H.C.W. Van der Veen, jembatan dapat dibagi dalam golongan-golongan seperti berikut :

a. Jembatan tetap

1) Jembatan kayu, digunakan untuk lalu lintas biasa pada bentangan kecil dan untuk jembatan pembantu.

2) Jembatan baja yang terbagi atas :

a) Jembatan yang sederhana dimana lantai kendaraannya langsung berada di atas gelagar-gelagar. Untuk gelagar-gelagar itu dipergunakan gelagar-gelagar yang dikonstruir atau gelagar-gelagar canai.

b) Jembatan-jembatan gelagar kembar, digunakan untuk lalu lintas kereta api, dengan batang rel diantara balok-balok.

c) Jembatan dengan pemikul lintang dan pemikul memanjang, gelagar induknya ialah gelagar dinding penuh yang dikonstruir atau gelagar pekerjaan vak.

d) Jembatan pelengkungan.

e) Jembatan gantung.

3) Jembatan-jembatan dari beton bertulang, dalam golongan ini termasuk juga jembatan-jembatan yang gelagar-gelagarnya di dalam beton.

4) Jembatan batu, hampir tidak ada kecuali dipergunakan untuk lalu lintas biasa.

b. Jembatan dapat digerakkan

- 1) Jembatan–jembatan yang dapat berputar di atas poros mendatar, yaitu:
 - a) Jembatan-jembatan angkat.
 - b) Jembatan-jembatan baskul.
 - c) Jembatan lipat straus.
- 2) Jembatan yang dapat berputar di atas poros mendatar juga termasuk poros-poros yang dapat berpindah sejajar dan mendatar, seperti apa yang dinamakan jembatan-jembatan baskul beroda.
- 3) Jembatan-jembatan yang dapat berputar di atas suatu poros tegak, atau jembatan-jembatan putar.
- 4) Jembatan yang dapat berkisar ke arah tegak lurus atau mendatar.
 - a) Jembatan angkat.
 - b) Jembatan beroda.
 - c) Jembatan gojah atau *ponts transbordeur*.

Menurut Bina Marga, jembatan diklasifikasi berdasarkan kelas muatannya, yaitu:

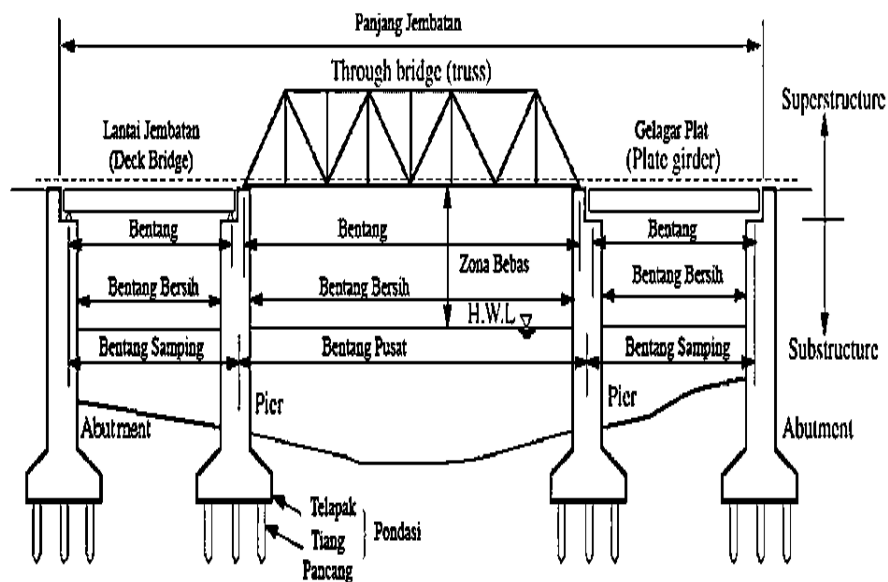
- a. Jembatan kelas standar (A/I), merupakan jembatan kelas standar dengan perencanaan 100% muatan “T” dan 100% muatan “D”. Dalam hal ini lebar jembatan adalah $(1,00 + 7,00 + 1,00)$ meter.
- b. Jembatan kelas sub standar (B/II), merupakan jembatan kelas standar dengan perencanaan 70% muatan “T” dan 70% muatan “D”. Dalam hal ini lebar jembatan adalah $(0,50 + 6,00 + 0,50)$ meter.
- c. Jembatan kelas *low* standar (C/III), merupakan jembatan kelas standar dengan perencanaan 50% muatan “T” dan 50% muatan “D”. Dalam hal ini lebar jembatan adalah $(0,50 + 3,50 + 0,50)$ meter.

Menurut Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, jembatan dapat diklasifikasikan beberapa bentuk struktur atas jembatan yang telah berkembang hingga saat ini, antara lain :

- a. Jembatan lengkung-batu (*stone arch bridge*)
- b. Jembatan rangka (*truss bridge*)
- c. Jembatan gantung (*suspension bridge*)
- d. Jembatan beton (*concrete bridge*)
- e. Jembatan haubans (*cable stayed*)

2.1.3 Bagian-bagian struktur jembatan

Komponen struktur jembatan sebenarnya dapat dibedakan menjadi bagian atas (*super structure*) dan bagian bawah (*sub-structure*). Bangunan bawah jembatan menyalurkan beban dari bangunan atas jembatan ke tapak atau pondasi.



Gambar 2.4 Tipikal Struktur Jembatan

(Sumber : Wai Fah Chen & Lian Duan, 2000)

Struktur jembatan bagian atas dipakai untuk melintasi aliran air, jalur rel, ataupun jalur jalan yang lain. Struktur jembatan tidak harus memotong aliran air

atau alur lainnya secara tegak lurus, tetapi juga boleh secara serong (*skew*), baik ke kanan, maupun ke kiri. Struktur jembatan terdiri atas :

a. Struktur bangunan atas jembatan (*super structure*)

Bangunan atas terletak pada bagian atas konstruksi yang menopang beban-beban akibat lalu lintas kendaraan, orang, barang ataupun berat sendiri dan konstruksi. Yang termasuk dalam bangunan atas adalah:

1) Sandaran

Berfungsi untuk membatasi lebar dari suatu jembatan agar membuat rasa aman bagi lalu lintas kendaraan maupun orang yang melewatinya. Tiang sandaran dengan trotoar terbuat dari beton bertulang dan untuk sandarannya dari pipa galvanis.

2) Trotoar

Merupakan tempat pejalan kaki yang terbuat dari beton, bentuknya lebih tinggi dari lantai jalan atau permukaan aspal. Lebar trotoar minimal cukup untuk dua orang berpapasan dan biasanya berkisar antara 1,0-1,5 meter dan dipasang pada bagian kanan serta kiri jembatan. Pada ujung tepi trotoar (*kerb*) dipasang lis dari baja siku untuk penguat trotoar dari pengaruh gesekan dengan roda kendaraan.

3) Lantai trotoar

Lantai trotoar adalah lantai tepi dari pelat jembatan yang berfungsi menahan beban-beban yang terjadi akibat tiang sandaran, pipa sandaran, beban trotoar, dan pejalan kaki.

4) Lantai kendaraan

Berfungsi untuk memikul beban lalu lintas yang melewati jembatan serta melimpahkan beban dan gaya-gaya tersebut ke gelagar memanjang melalui gelagar-gelagar melintang. Pelat lantai dari beton ini mempunyai ketebalan total 20 cm.

5) Balok diafragma

Balok diafragma adalah merupakan pengaku dari gelagar-gelagar memanjang dan tidak memikul beban pelat lantai dan diperhitungkan seperti balok biasa.

6) Gelagar

Gelagar merupakan balok utama yang memikul beban dari lantai kendaraan maupun kendaraan yang melewati jembatan tersebut, sedangkan besarnya balok memanjang tergantung dari panjang bentang dan kelas jembatan.

b. Struktur bangunan bawah jembatan (*sub structure*)

Bangunan bawah pada umumnya terletak disebelah bawah bangunan atas. Fungsinya menerima/memikul beban-beban yang diberikan bangunan atas dan kemudian menyalurkannya ke pondasi (Agus Iqbal Manu,1995). Yang termasuk dalam bangunan bawah jembatan yaitu seperti :

1) Kepala jembatan (*abutmentt*)

Bagian bangunan pada ujung-ujung jembatan, selain sebagai pendukung bagi bangunan atas juga berfungsi sebagai penahan tanah. Bentuk umum *abutmentt* yang sering dijumpai baik pada jembatan lama maupun jembatan baru pada prinsipnya semua sama yaitu sebagai pendukung bangunan atas, tetapi yang paling dominan ditinjau dari kondisi lapangan seperti daya dukung tanah dasar dan penurunan (*seatlement*) yang terjadi. Adapun jenis *abutmentt* ini dapat dibuat dari bahan seperti batu atau beton bertulang dengan konstruksi seperti dinding.

2) Pelat injak

Pelat injak adalah bagian dan bangunan jembatan bawah yang berfungsi untuk menyalurkan beban yang diterima diatasnya secara merata

ke tanah dibawahnya dan juga untuk mencegah terjadinya defleksi yang terjadi pada permukaan jalan.

3) Pondasi

Pondasi adalah bagian dan jembatan yang tertanam didalam tanah. Fungsi dari pondasi adalah untuk menahan beban bangunan yang berada di atasnya dan meneruskannya ke tanah dasar, baik kearah vertikal maupun kearah horizontal.

4) Dinding sayap (*wing wall*)

Dinding sayap adalah bagian dan bangunan bawah jembatan yang berfungsi untuk menahan tegangan tanah dan memberikan kestabilan pada posisi tanah terhadap jembatan.

5) Landasan atau perletakan

Landasan jembatan adalah bagian ujung bawah dari suatu bangunan atas yang berfungsi menyalurkan gaya-gaya reaksi dari bangunan atas kepada bangunan bawah. Menurut fungsinya dibedakan landasan sendi (*fixed bearing*) dan landasan gerak (*movable bearing*).

2.2 Beton Prategang

Beton prategang adalah material yang sangat banyak digunakan dalam konstruksi. Dengan kuat tarik beton bertulang yang terbatas, sedangkan kuat tekannya yang sangat tinggi. Dengan demikian, pemberian tegangan menjadi penting dalam penerapan agar dapat secara penuh memanfaatkan kuat tekan dan melalui desain yang benar dapat menghilangkan atau mengontrol retak dan defleksi (Edward G. Nawy, 2001).

Beton prategang adalah jenis beton dimana tulangan bajanya ditarik/ditegangkan terhadap betonnya. Penarikan ini menghasilkan sistem kesetimbangan pada tegangan dalam (tarik pada baja dan tekan pada beton) yang

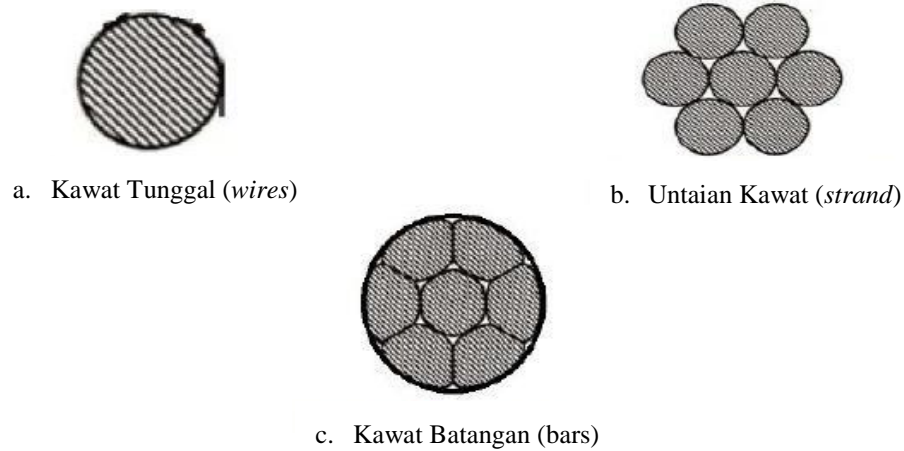
akan meningkatkan kemampuan beton menahan beban luar. Sedangkan menurut komisi ACI, beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan dalam dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban luar (Bambang Supriyadi dan Agus Muntohar, 2007)

Perbedaan antara beton bertulang dan beton prategang adalah beton bertulang mengkombinasikan beton dan tulangan baja dengan cara menyatukan dan membiarkan keduanya bekerja bersama-sama sesuai dengan keinginannya, sedangkan beton prategang mengkombinasikan beton berkekuatan tinggi dan baja mutu tinggi dengan cara aktif. Hal ini dicapai dengan cara menarik baja tersebut dan menahannya ke beton. Kombinasi aktif ini menghasilkan perilaku yang lebih baik dari kedua bahan tersebut (T.Y. Lin dan Ned H. Burns, 1982).

Untuk penggunaan pada beban layan yang tinggi, penggunaan baja tulangan (tendon) dan beton mutu tinggi akan lebih efisien. Hanya baja pada tegangan elastis tinggi yang cocok digunakan pada beton prategang. Penggunaan baja tulangan mutu tinggi bukan saja merupakan suatu keuntungan, tetapi merupakan suatu keharusan. Prategang akan menghasilkan elemen yang lebih ringan, bentang yang lebih besar dan lebih ekonomis jika ditinjau dari segi pemasangannya dibandingkan dari beton bertulang biasa.

Baja tendon yang dipakai untuk beton prategang dalam prateknya ada tiga macam, yaitu:

- a. Kawat tunggal (*wires*), biasanya digunakan untuk baja pra-tegang pada beton pra-tegang dengan sistem pra-tarik (*pra-tension*).
- b. Kawat untaian (*strand*), biasanya digunakan untuk baja pra-tegang pada beton pra-tegang dengan sistem pasca-tarik (*post-tension*).
- c. Kawat batangan (*bar*), biasanya digunakan untuk baja pra-tegang pada beton pra-tegang dengan sistem pra-tarik (*pra-tension*).



Gambar 2.5 Jenis-jenis Baja yang dipakai untuk Beton Prategang

(Sumber : *M.K. Hurst, 1989*)

Tabel 2.1 Jenis Tulangan Prategang

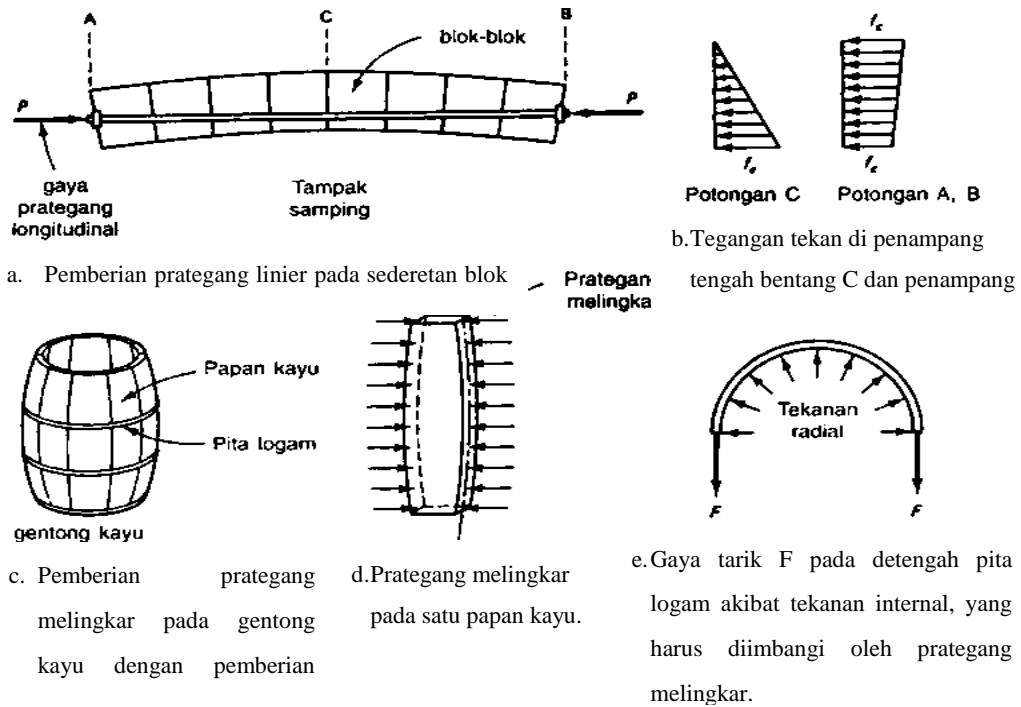
Jenis Material	Nominal Diameter	Luas	Gaya Putus Minimum	Tegangan Tarik Minimum, f_{pu}
	Mm	mm ²	Kn	MPa
Kawat (<i>wire</i>)	5	19,6	30,4	1550
	5	19,6	33,3	1700
	7	38,5	65,5	1700
7-wire strand <i>super grade</i>	9,3	54,7	102	1860
	12,7	100	184	1840
	15,2	143	250	1750
7-wire strand <i>Regular grade</i>	12,7	94,3	165	1750
<i>Bar</i>	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

(Sumber : Andri Budiadi, 2008)

2.2.1 Prinsip dasar beton prategang

Beton adalah material yang kuat dalam kondisi tekan tetapi lemah dalam kondisi tarik, kuat tarik bervariasi dari 8 sampai 14 persen dari kuat tekannya, karena rendahnya kapasitas tarik tersebut, maka retak lentur terjadi pada taraf pembebanan yang masih rendah. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya konsentris atau eksentris diberikan pada arah longitudinal elemen struktur. Gaya ini mencegah berkembangnya retak dengan cara mengeliminasi atau sangat mengurangi tegangan tarik dibagian tumpuan dan kondisi kritis pada kondisi beban kerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser dan torsional penampang tersebut. Gaya longitudinal yang diterapkan seperti di atas disebut gaya prategang, yaitu gaya tekan yang memberikan prategangan pada penampang disepanjang bentang disuatu elemen struktur sebelum bekerjanya beban mati dan beban hidup transversal atau beban hidup horizontal transien (Edward G. Nawy, 2001).

Beton prategang dalam arti seluas-luasnya dapat juga termasuk keadaan (kasus) dimana tegangan-tegangan yang diakibatkan oleh regangan-regangan internal diimbangi sampai batas tertentu, seperti pada konstruksi yang melengkung (busur). Tetapi bukti ini pada dasarnya hanya membahas konstruksi beton prategang seperti yang didefinisikan oleh Komisi ACI, dan membatasinya dengan beton prategang yang memakai tulangan baja yang ditarik dan dikenal sebagai tendon. Tendon dapat terdiri dari untaian kawat (*strand*) mutu tinggi, kabel, atau batang-batang baja (*bar*).



Gambar 2.6 Prinsip-prinsip Prategang Linier dan Melingkar

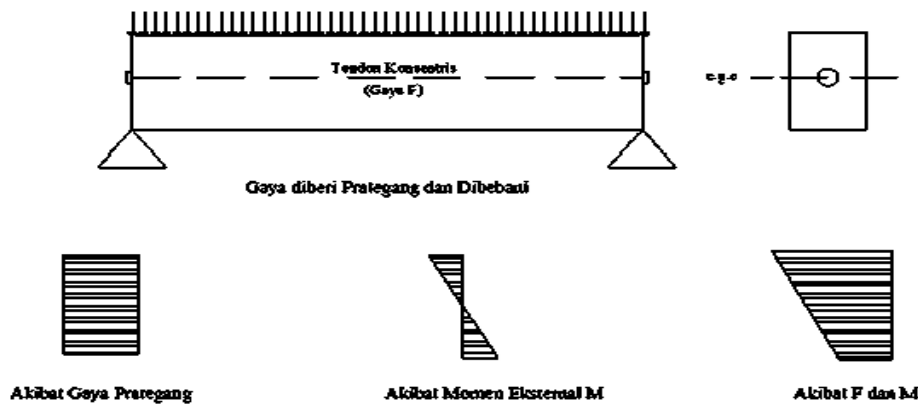
(Sumber : Edward G. Nawy, 2001)

Ada tiga konsep yang berbeda-beda yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang (T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982). Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut :

a. Sistem prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis

Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis dan mungkin merupakan pendapat yang paling umum dari para insinyur. Ini merupakan buah pemikiran Eugene Freyssinet yang memvisualisasikan beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan akan memberikan tekanan desakan) lebih dulu (pratekan) pada bahan tersebut. Beton yang tidak mampu menahan tarikan dan kuat memikul tekan (umumnya dengan baja mutu tinggi yang ditarik) sedemikian rupa sehingga bahan yang getas dapat memikul tegangan tarik.

Dari konsep ini lahirlah kriteria “tidak ada tegangan tarik” pada beton. Umumnya telah diketahui bahwa jika tidak ada tegangan Tarik pada beton, berarti tidak akan terjadi retak, dan beton tidak merupakan bahan yang getas lagi melainkan berubah menjadi bahan yang elastis.



Gambar 2.7 Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang Konsentris

(Sumber : T.Y. Lin dan Ned H. Burns,1982)

Gaya Prategang F pada tendon menghasilkan gaya tekan F yang sama pada beton yang juga bekerja pada titik berat tendon. Akibatnya gaya prategang tekan secara merata sebesar :

$$f = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

akan timbul pada penampang seluas A. Jika M adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, amak tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah :

$$f = \frac{M_y}{I} \dots\dots\dots (2.2)$$

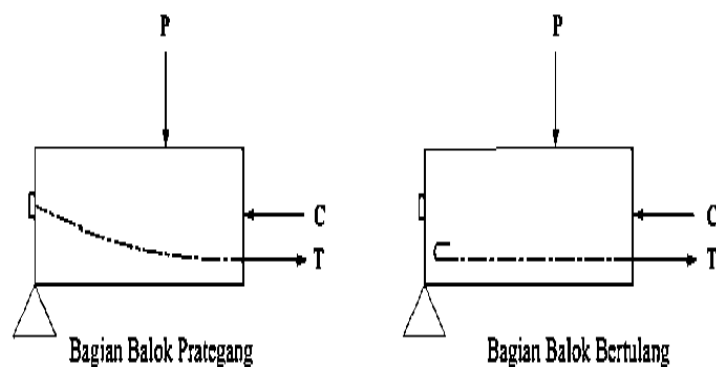
dimana y adalah jarak dari sumbu yang melalui titik berat dan I adalah momen inersia penampang. Jadi distribusi tegangan yang dihasilkan adalah :

$$f = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y}{I} \dots\dots\dots (2.3)$$

b. Sistem prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton

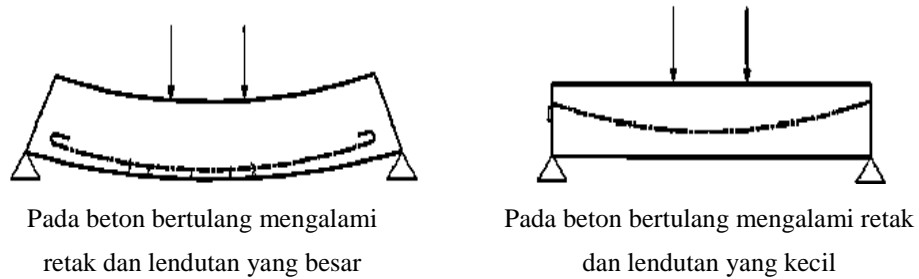
Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi (gabungan) dari baja dan beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan tekanan, dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal. Seringkali hal ini merupakan konsep yang mudah bagi insinyur yang terbiasa dengan beton bertulang dimana baja menahan gaya tarik dan beton menahan gaya tekan, dan kedua gaya membentuk momen kopel dengan lengan momen di antaranya. Akan tetapi, hanya sedikit insinyur yang menyadari persamaan sifat tersebut dengan yang ada pada beton prategang.

Pada beton prategang, baja mutu tinggi dipakai dengan jalan menariknya sebelum kekuatannya dimanfaatkan sepenuhnya. Jika baja mutu tinggi ditanamkan pada beton, seperti pada beton bertulang biasa, beton sekitarnya akan menjadi retak berat sebelum seluruh kekuatan baja digunakan. Oleh karena itu, baja perlu ditarik sebelumnya (pratarik) terhadap beton. Dengan menarik dan menjangkarkan baja ke beton, dihasilkan tegangan dan regangan yang diinginkan pada kedua bahan, tegangan dan regangan tekan pada beton tekan, dan tegangan regangan tarik pada baja.



Gambar 2.8 Momen Penahan Internal pada Balok Beton Prategang dan Beton Bertulang

(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

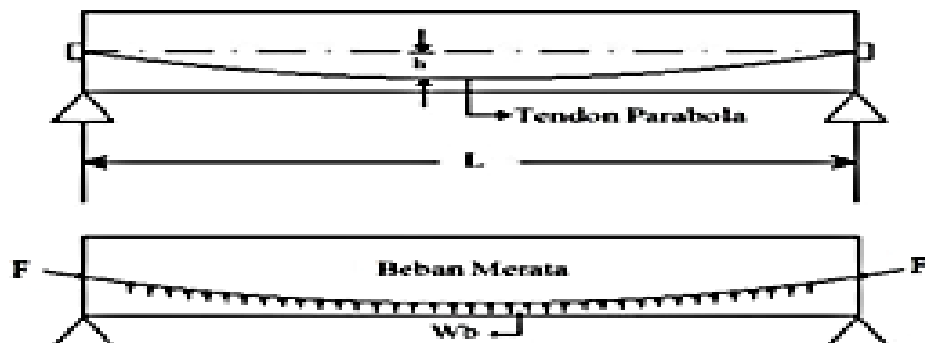


Gambar 2.9 Balok Beton Menggunakan Baja Mutu Tinggi

(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

c. Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban

Konsep ini terutama menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang. Pada keseluruhan desain struktur beton prategang, pengaruh dari prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri sehingga batang yang mengalami lenturan seperti pelat (slab), balok, dan gelagar (girder) tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi. Ini memungkinkan transformasi dari batang lentur menjadi batang yang mengalami tegangan langsung dan sangat menyederhanakan persoalan baik di dalam desain maupun analisis struktur yang rumit. penerapan dari konsep ini menganggap beton diambil sebagai benda bebas dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya yang bekerja pada beton sepanjang bentang.



Gambar 2.10 Balok Prategang dengan Tendon Parabola

(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

Penerapan dari konsep ini menganggap beton diambil sebagai benda bebas dan menggantikan tendon sebagai gaya-gaya yang bekerja pada beton sepanjang bentang. Jika, F adalah gaya prategang, L adalah panjang bentang, dan h adalah tinggi parabola maka beban yang terdistribusi secara merata ke arah atas dinyatakan dalam :

$$w_b = \frac{8Fh}{L^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Jadi, untuk beban w yang terdistribusi secara merata ke arah bawah yang diberikan, beban tegak lurus pada balok diimbangi, dan balok hanya dibebani oleh gaya aksial F , yang menghasilkan tegangan merata pada beton.

2.2.2 Klasifikasi dan jenis beton prategang

Struktur beton prategang diklasifikasikan dengan berbagai cara, tergantung dari bagaimana desain dan konstruksinya. Klasifikasi beton prategang (T.Y.Lin dan Ned H. Burns,1982), antara lain sebagai berikut :

a. Pemberian gaya prategang secara eksternal atau internal

Sebuah balok beton sederhana dapat juga diberi gaya prategang secara eksternal dengan menekan (*jacking*) pada tempat-tempat tertentu untuk menghasilkan tekanan pada serat-serat bawah dan tarikan pada serat-serat atas. Susunan yang sederhana itu tidak mudah dipraktekkan karena walaupun dinding penahan (*abutment*) memungkinkan untuk hal itu dikerjakan, susut dan rangkak pada beton mungkin akan mengurangi regangan buatan tersebut kecuali hal itu dapat disesuaikan lagi. Lagi pula, tempat sedemikian mungkin lebih cocok untuk jembatan busur.

Pada struktur statis tak tentu, seperti balok menerus, ketinggian perletakan balok dapat disesuaikan dengan menyisipkan dongkrak-dongkrak. Kadang-kadang ini cukup praktis meskipun harus diingat bahwa susut dan

rangkak pada beton akan mengubah pengaruh sistem prategang sehingga pengaruh itu haruslah dimasukkan ke dalam perhitungan atau prategang harus disesuaikan dari waktu ke waktu.

b. Prategang linear dan melingkar

Prategang melingkar adalah istilah yang dipakai untuk struktur prategang melingkar seperti tangga bundar, silo-silo, dan pipa-pipa, dimana tendon prategang dililitkan di sekeliling lingkaran. Berbeda dengan sistem prategang melingkar, sistem prategang linear mencakup segala macam struktur lainnya seperti balok-balok dan pelat-pelat. Tendon prategang pada struktur yang diprategangkan secara linear tidak perlu lurus, melainkan dapat dibengkokkan atau dilengkungkan tetapi tidak dapat berputar-putar seperti pada sistem prategang melingkar.

c. Sistem pratarik (*pretension*) dan pascatarik (*posttension*)

Istilah pratarik digunakan untuk menggambarkan metode sistem prategang dimana tendon-tendon ditarik sebelum beton dicor. Artinya tendon-tendon itu harus diangkurkan sementara pada *abutment* atau lantai penahan pada waktu ditarik dan gaya prategang dialihkan ke beton setelah beton tersebut mengeras. Cara ini diterapkan pada pabrik beton pracetak atau laboratorium dimana terdapat lantai penahan tarikan yang tetap, juga dipakai di lapangan dimana dinding penahan dapat dibuat secara ekonomis. Kebalikan dari sistem pratarik, sistem pascatarik adalah suatu sistem prategang dimana kabel ditarik setelah beton mengeras. Jadi sistem prategang hampir selalu dikerjakan terhadap beton yang mengeras, dan tendon-tendon diangkurkan pada beton tersebut segera setelah gaya prategang dilakukan. Cara ini dipakai pada elemen-elemen baik beton pracetak maupun beton yang dicetak di tempat.

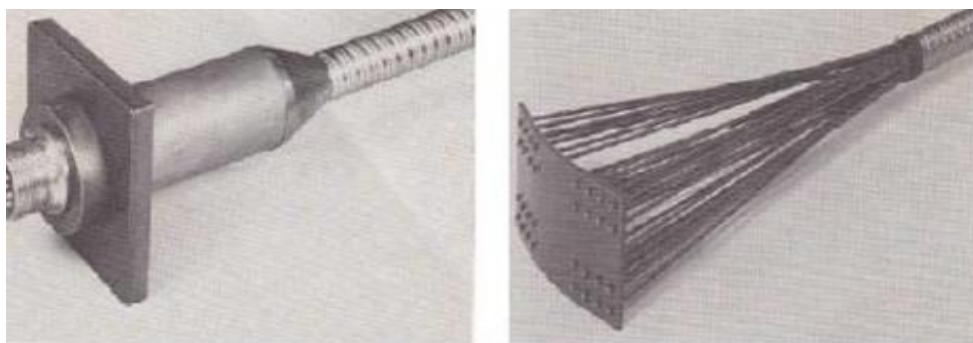
2.2.3 Sistem prategang dan pengakuran

Sehubungan dengan perbedaan sistem untuk penarikan dan pengakuran tendon, maka situasinya sedikit membingungkan dalam perancangan dan penerapan beton prategang. Seorang sarjana teknik sipil harus mempunyai pengetahuan umum mengenai metode-metode yang ada dan mengingatkannya pada saat menentukan dimensi komponen struktur, sehingga tendon-tendon dari beberapa sistem dapat ditempatkan dengan baik (T.Y.Lin dan Ned H. Burns,1982). Berbagai metode dengan nama pra-tekanan (*pre-compression*) diberikan pada beton dapat dilakukan sebagai berikut:

- a. Pembangkit gaya tekan antara elemen struktural dan tumpuan tumpunya dengan pemakaian dongkrak (*flat jack*).
- b. Pengembangan tekanan keliling (*hoop compression*) dalam struktur berbentuk silinder dengan mengulung kawat secara melingkar.
- c. Pemakaian baja yang ditarik secara longitudinal yang ditanam dalam beton atau ditempatkan dalam selongsong.
- d. Pemakaian prinsip distorsi suatu struktur statis tak tentu baik dengan perpindahan maupun dengan rotasi satu bagian relatif terhadap bagian lainnya.
- e. Pemakaian pemotong baja struktural yang dilendutkan dan ditanam dalam beton sampai beton tersebut mengeras.
- f. Pengembangan tarikan terbatas pada baja dan tekanan pada beton dengan memakai semen yang mengembang.

Metode yang biasa dipakai untuk memberikan prategang pada beton struktural adalah dengan menarik baja ke arah longitudinal dengan alat penarik yang berbeda-beda. Prategang dengan menggunakan gaya-gaya langsung diantara tumpuan-tumpuan umumnya dipakai pelengkung dan perkerasan, dan dongkrak datar selalu dipakai untuk memberikan gaya-gaya yang diinginkan.

Pengangkeran ada 2 macam yaitu angker mati dan angker hidup. Angker mati adalah angker yang tidak bisa dilakukan lagi penarikan setelah penegangan tendon dilakukan. Angker mati sering digunakan dalam prategang dengan sistem pratarik. Sedangkan angker hidup dapat dilakukan penarikan kembali jika hal itu diperlukan. Pengangkeran ini sering dijumpai dalam prategang dengan sistem pascatarik.



a. Angker hidup

b. Angker mati

Gambar 2.11 Jenis Pengangkeran

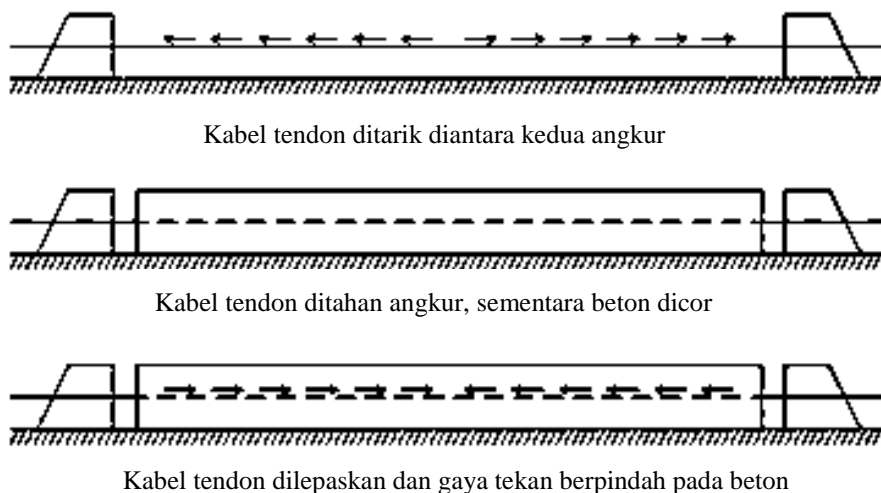
(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

a. Sistem pratarik (*pre-tensioning*)

Didalam sistem pratarik (*pre-tensioning*), tendon lebih dahulu ditarik antara blok-blok angker yang kaku (*rigid*) yang dicetak diatas lantai atau di dalam suatu kolom atau perangkat cetakan pratarik. dan selanjutnya dicor dan dipadatkan sesuai dengan bentuk serta ukuran yang diinginkan. Metode ini digunakan untuk beton-beton pracetak dan biasanya digunakan untuk konstruksi-konstruksi kecil. Beton-beton pracetak biasanya ditemukan pada konstruksi-konstruksi bangunan kolom-kolom gedung. Tiang pondasi atau balok dengan bentang yang panjang. Adapun tahap urutan pengerjaan beton pre-tension adalah sebagai berikut kabel tendon dipersiapkan terlebih dahulu pada sebuah angkur yang mati (*fixed anchorage*) dan sebuah angkur yang hidup (*live anchorage*). Kemudian *live anchorage* ditarik dengan dongkrak

(*jack*) sehingga kabel tendon bertambah panjang. *Jack* dilengkapi dengan manometer untuk mengetahui besarnya gaya yang ditimbulkan oleh *jack*. Setelah mencapai gaya yang diinginkan beton dicor.

Setelah beton mencapai umur yang cukup, kabel perlahan-lahan dilepaskan dan kedua angkur dan dipotong. Kabel tendon akan berusaha kembali ke bentuknya semula setelah pertambahan panjang yang diakibatkan oleh penarikan pada awal pelaksanaan. Hal inilah yang menyebabkan adanya gaya tekan internal pada beton. Oleh karena sistem pratarik bersandar pada rekatan yang timbul antara baja dan tendon sekelilingnya. Hal itu penting bahwa setiap tendon harus merekat sepanjang seluruh badan. Setelah beton mengeras, tendon dilepaskan dan alas pra-penarikan dan gaya prategang ditransfer ke beton, lihat gambar 2.12



Gambar 2.12 Konsep Pratarik

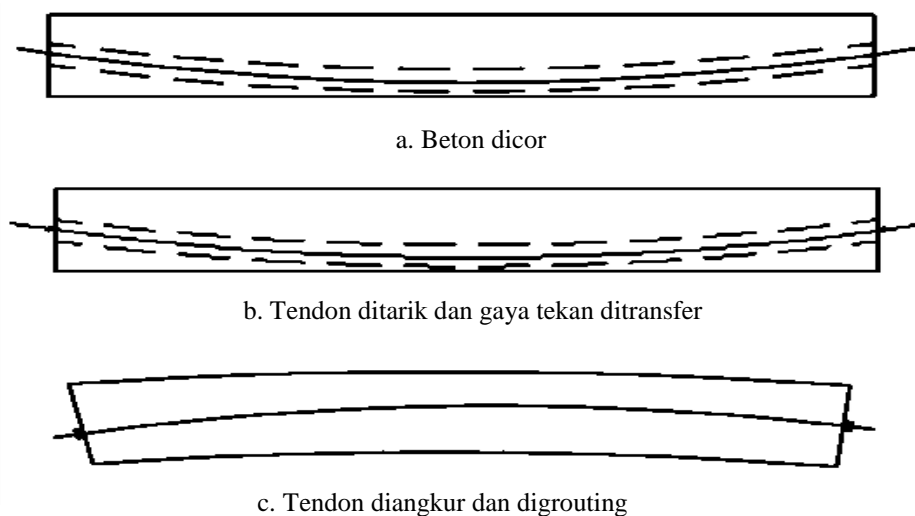
(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

b. Sistem pascatarik (*post-tensioning*)

Kebanyakan pelaksanaan prestress dilapangan dilaksanakan dengan metode *post-tensioning*. Pascatarik dipakai untuk memperkuat bendungan beton, prategang melingkar dan tangki-tangki beton yang besar, serta perisai-perisai biologis dan reaktor nuklir. Pascatarik (*post-tensionig*) juga banyak

digunakan konstruksi beton prategang segmental pada jembatan dengan bentang yang panjang.

Adapun metode dalam pelaksanaan pengerjaan beton pascatarik (*post-tensioning*) adalah sebagai berikut, selongsong kabel tendon dimasukkan dengan posisi yang benar pada cetakan beton beserta atau tanpa tendon dengan salah satu ujungnya diberi angkur hidup dan ujung lainnya angkur mati atau kedua ujungnya dipasang angkur hidup. Beton dicor dan dibiarkan mengeras hingga mencapai umur yang mencukupi. Selanjutnya dongkrak hidrolik dipasang pada angkur hidup dan kabel tendon ditarik hingga mencapai tegangan atau gaya yang direncanakan. Untuk mencegah kabel tendon kehilangan tegangan akibat slip pada ujung angkur terdapat baji. Gaya tarik akan berpindah pada beton sebagai gaya tekan internal akibat reaksi angkur, lihat gambar 2.13.



Gambar 2.13 Konsep Pascatarik
(Sumber : T.Y.Lin dan Ned H. Burns, 1982)

c. Prategang termo-listrik

Metode prategang dengan tendon yang dipanaskan, yang dicapai dengan melewati aliran listrik pada kawat yang bermutu tinggi, umumnya disebut sebagai Prategang Termo-Listrik. Prosesnya terdiri atas pemanasan batang dengan arus listrik sampai temperature 300-400 °C selama 3-5 menit. Batang

tersebut mengalami perpanjangan kira-kira 0,3-0,5 persen. Setelah pendinginan batang tersebut berusaha mempendek diri, perpendekan ini dicegah oleh jepitan angkur pada kedua ujungnya. Waktu pendinginan diperuntukan 12-15 menit. Dengan proses ini, mungkin timbul tegangan awal sebesar 500-600 N/mm³ pada tendon. Beton dicor pada cetakan hanya apabila temperatur kawat turun dibawah 90°C.

d. Prategang secara kimia

Reaksi kimia dalam semen ekspansif dapat menegangkan baja yang ditanam yang kemudian menekan beton. Hal ini sering disebut dengan penegangan sendiri (*self-stressing*) atau disebut juga prategang kimiawi. Bila semen ini digunakan untuk membuat beton dengan baja yang tertanam. Maka baja akan mengalami pertambahan panjang sejalan dengan pengembangan beton tersebut. Oleh karena pengembangan beton dikekang oleh kawat baja bermutu tinggi, maka timbul tegangan tekan pada beton dan kawat baja mengalami tegangan tarik. Karena pemuaiian terjadi pada tiga arah. sehingga akan lebih sulit untuk menggunakan sistem prategang secara kimia pada struktur-struktur yang dicor setempat seperti gedung. Akan tetapi. untuk pipa-pipa tekanan dan perkerasan jalan (*pavement*), dimana prategang sekurang-kurangnya pada dua arah. Sistem prategang kimiawi lebih ekonomis. Hal ini juga berlaku untuk pelat. dinding, dan cangkang.

2.2.4 Analisa prategang

Tegangan yang disebabkan oleh prategang umumnya merupakan tegangan oleh prategang umumnya merupakan tegangan kombinasi yang disebabkan oleh beban langsung dan lenturan yang dihasilkan oleh beban yang ditempatkan secara eksentris.

Analisa tegangan-tegangan yang timbul pada suatu elemen struktur beton prategang didasarkan atas asumsi-asumsi berikut :

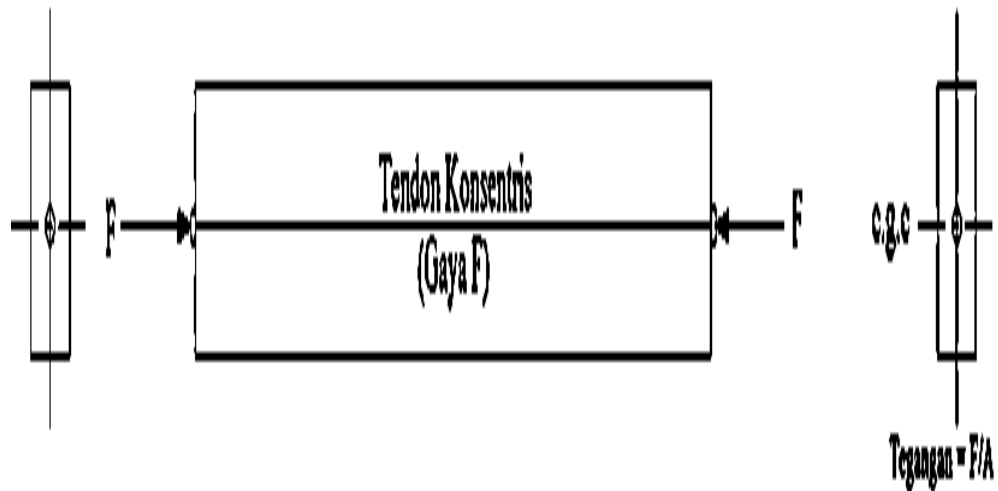
- a. Beton prategang adalah suatu material yang elastis serta homogen.
- b. Didalam batas-batas tegangan kerja, baik beton maupun baja berperilaku elastis, tidak dapat menahan rangkakan yang kecil yang terjadi pada kedua material tersebut pada pembebanan terus-menerus
- c. Suatu potongan datar sebelum melentur dianggap tetap datar meskipun sudah mengalami lenturan yang menyatakan suatu distribusi regangan linier pada keseluruhan tinggi batang.

Selama tegangan tarik tidak melampaui batas modulus keruntuhan beton (yang sesuai dengan tahap retakan yang terlihat pada beton), setiap perubahan dalam pembebanan batang menghasilkan perubahan tegangan pada beton saja, satu-satunya fungsi dari tendon prategang adalah untuk memberikan dan memelihara prategang pada beton.

Tegangan yang disebabkan oleh prategang umumnya merupakan tegangan kombinasi yang disebabkan oleh aksi beban langsung dan lenturan yang dihasilkan oleh beban yang ditempatkan secara eksentris maupun konsentris.

- a. Tendon konsentris

Sebuah beton prategang tanpa eksentrisitas, tendon berada pada garis berat beton (*central gravity of concrete, c.g.c*). Prategang seragam pada beton = F/A yang berupa tekan pada seluruh tinggi balok. Pada umumnya beban-beban yang dipakai dan beban mati balok menimbulkan tegangan tarik terhadap bidang bagian bawah dan ini diimbangi lebih efektif dengan memakai tendon eksentris

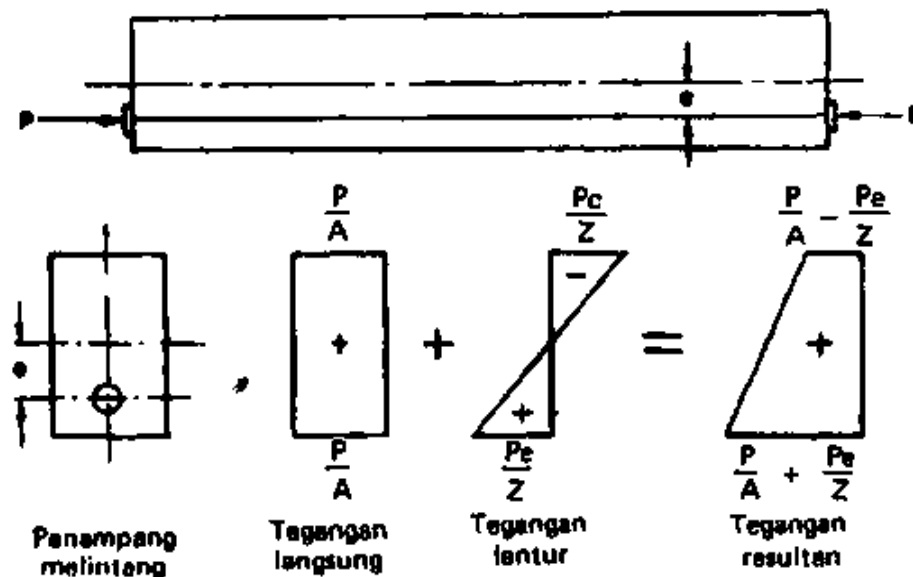


Gambar 2.14 Prategang Konsentris

(Sumber : N. Krishna Raju, 1981)

b. Tendon eksentris

Sebuah balok yang mengalami suatu gaya prategang eksentris sebesar P yang ditempatkan dengan eksentrisitas (e). Tendon ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton. Eksentrisitas tendon akan menambah kemampuan untuk memikul beban eksternal.



Gambar 2.15 Prategang Eksentris

(Sumber : N. Krishna Raju, 1981)

Tegangan-tegangan yang ditimbulkan pada serat-serat bagian atas dan bagian bawah balok diperoleh hubungan :

$$f_{\text{bawah}} = \left(\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z_b} \right) = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{e Y_b}{i^2} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$f_{\text{atas}} = \left(\frac{P}{A} + \frac{Pe}{Z_t} \right) = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{e Y_t}{i^2} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana :

f_{atas} = Tegangan pada beton yang ditimbulkan pada serat paling atas
(positif apabila tekan, negatif apabila tarik)

f_{bawah} = Tegangan pada beton yang ditimbulkan pada serat paling bawah
(positif apabila tekan, negatif apabila tarik)

P = Gaya prategang (positif apabila menghasilkan tekanan langsung)

e = Eksentrisitas gaya prategang

A = Luas potongan melintang batang beton

Z_b = Momen penampang serat atas

Z_t = Momen penampang serat bawah

y_b = Jarak antara serat paling atas terhadap titik berat penampang

y_t = Jarak antara serat paling bawah terhadap titik berat penampang

2.2.5 Kehilangan prategang

Kehilangan tegangan pada beton prategang adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada tendon dalam tahap-tahap pembebanan. Di dalam suatu sistem struktur beton prategang selalu terdapat kehilangan gaya prategang, baik akibat sistem penegangan maupun akibat pengaruh waktu. Gaya prategang akan mengalami reduksi/pengurangan saat transfer (jangka pendek) atau saat service (jangka panjang). Kehilangan gaya prategang saat transfer terjadi sesaat setelah penarikan tendon, sedangkan kehilangan saat service terjadi perlahan-lahan pada saat umur pelayanan beton dan karena pengaruh waktu.

Tabel 2.2 Jenis-jenis Kehilangan Prategang

Pratarik	Pascatarik
Deformasi elastis beton	Tidak ada kehilangan akibat deformasi elastis kalau semua kawat ditarik secara bersamaan. Kalau kawat-kawat ditarik secara berurutan, akan terdapat kehilangan prategang akibat deformasi elastis beton
Relaksasi tegangan pada baja	Relaksasi tegangan pada baja
Penyusutan beton	Penyusutan beton
Rangkak beton	Rangkak beton
	Gesekan
	Tergelincirnya angkur

(Sumber : N. Krishna Raju, 1981)

Kehilangan akibat friksi tendon pada beton pascatarik dihitung berdasarkan rumus :

$$P_s = P_x e^{(Kl_x + \mu\alpha)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Bila $(Kl_x + \mu\alpha)$ tidak lebih besar dari 0,3 maka kehilangan akibat friksi dihitung sebagai berikut :

$$P_s = P_x (1 + Kl_x + \mu\alpha) \dots\dots\dots (2.8)$$

Koefisien friksi akibat *wobble* K dan kelengkungan μ ditentukan secara eksperimental dan harus dibuktikan pada saat penarikan tendon dilakukan. Nilai koefisien friksi akibat *wobble* K dan kelengkungan μ dapat dilihat dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Koefisien *Wobble* dan Koefisien Friksi

			Koefisien <i>wobble</i> K (1/m)	Koefisien friksi μ
		Tendon kawat	0,0033-0,0049	0,15-0,25
		Batang berkekuatan tinggi	0,0003-0,0020	0,08-0,30
		<i>Strand</i> 7 kawat	0,0016-0,0066	0,15-0,25
Tendon tanpa tekanan	Mastic coated	Tendon kawat	0,0033-0,0066	0,05-0,15
		<i>Strand</i> 7 kawat	0,0033-0,0066	0,05-0,15
	Pre-greased	Tendon kawat	0,0010-0,0066	0,05-0,15
		<i>Strand</i> 7 kawat	0,0010-0,0066	0,05-0,15

(Sumber : Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung SNI-3-2847-2002)

2.2.6 Desain penampang berton prategang terhadap lentur

Pada waktu pendesainan penampang beton prategang pada dasarnya dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Ada kerangka struktur yang harus dipilih sebagai permulaan dan mungkin dimodifikasi pada waktu proses desain berlangsung.

Ada berat sendiri komponen struktur yang mempengaruhi desain, tetapi harus diasumsikan sebelum melakukan perhitungan momen. Ada bentuk perkiraan penampang beton yang ditentukan oleh pertimbangan-pertimbangan praktis dan teoritis yang harus diasumsikan untuk percobaan. Karena adanya variabel-variabel ini, disimpulkan bahwa prosedur yang terbaik adalah suatu cara

coba-coba yang berpedoman pada hubungan-hubungan yang diketahui sehingga memungkinkan diperolehnya hasil akhir yang lebih cepat.

a. Modulus penampang minimum

Untuk mendesain dan memilih penampang, penentuan modulus penampang minimum yang dibutuhkan, S_b dan S_t harus dilakukan terlebih dahulu, jika :

f_{ci} : Tegangan tekan izin maksimum di beton segera sesudah transfer dan sebelum terjadi kehilangan

$$: 0,60 f_{ci}'$$

f_{ti} : Tegangan tarik izin maksimum di beton segera setelah transfer dan sebelum terjadi kehilangan

$$: 3 \sqrt{f_{ci}'} \text{ (nilai ini dapat diperbesar menjadi } 6 \sqrt{f_{ci}'} \text{ di tumpuan. Komponen struktur yang ditumpu sederhana).}$$

f_c : Tegangan tekan izin maksimum di beton sesudah kehilangan pada taraf beban kerja

$$: 0,45 f_c' \text{ atau } 0,60 f_c' \text{ apabila diperkenankan oleh standar}$$

f_t : Tegangan tarik izin maksimum di beton sesudah semua kehilangan pada taraf beban kerja

$$: 6 \sqrt{f_{ci}'} \text{ (pada system satu arah nilai ini dapat diperbesar menjadi } 12 \sqrt{f_{ci}'} \text{ jika persyaratan defleksi jangka panjang dipenuhi)}$$

Maka tegangan serat-serat esktrim aktual di beton tidak dapat melebihi nilai-nilai yang dicantumkan di atas. Perhitungan tegangan dalam setiap tahapan pembebanan dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut :

1) Pada saat transfer

$$\text{Serat atas } f^t = - \frac{P_I}{A_c} \left(1 - \frac{e c_t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S^t} \leq f_{ti} \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\text{Serat bawah } f_b = - \frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{e c_b}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ti} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana P_i adalah gaya prategang awal. Meskipun nilai yang lebih akurat yang seharusnya digunakan adalah komponen horizontal dari P_i , namun untuk semua tujuan praktis hal tersebut tidak diperlukan.

2) Tegangan efektif sesudah kehilangan

$$\text{Serat atas } f^t = - \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e c_t}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S^t} \leq f_{ti} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\text{Serat bawah } = f_b - \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e c_b}{r^2} \right) - \frac{M_D}{S_b} \leq f_{ti} \dots\dots\dots (2.12)$$

3) Tegangan akhir pada kondisi beban kerja

$$\text{Serat atas } f^t = - \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e c_t}{r^2} \right) - \frac{M_t}{S^t} \leq f_{ti} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\text{Serat bawah } = f_b - \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{e c_b}{r^2} \right) - \frac{M_t}{S_b} \leq f_{ti} \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana :

M_T : momen total ($M_D + M_{SD} + M_L$)

M_D : momen akibat berat sendiri

M_{SD} : momen akibat beban mati tambahan seperti lantai

M_L : momen akibat beban hidup termasuk beban kejut dan gempa

P_i : prategang awal

P_e : prategang efektif sesudah kehilangan t menunjukkan serat atas dan b menunjukkan serat bawah

e : eksentrisitas tendon dari pusat berat penampang beton, c_{gc}

c_t dan c_b : jarak dari pusat berat penampang (garis c_{gc}) ke serat atas dan serat bawah

r^2 : kuadrat dari jari-jari girasi

S_t dan S_b : modulus penampang atas dan modulus penampang bawah

b. Balok dengan eksentrisitas tendon bervariasi

Balok diberi prategang dengan tendon *harped* dan *draped*. Eksentrisitas maksimum biasanya terjadi di penampang tengah bentang yang menentukan untuk kasus baik bertumpuan sederhana. Dengan mengasumsikan bahwa gaya prategang efektif adalah :

$$P_e = \gamma P_i \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana γ adalah rasio prategang residual, maka kehilangan prategang adalah

$$P_i - P_e = (1 - \gamma) P_i \dots \dots \dots (2.16)$$

Jika tegangan di serat beton aktual sama dengan tegangan izin maksimum, maka perubahan tegangan ini sesudah kehilangan, dari persamaan 2.11 dan 2.12 dapat dinyatakan dengan :

$$\Delta f'_t = (1 - \gamma) \left[f_{ti} + \frac{M_D}{S'_t} \right] \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\Delta f'_b = (1 - \gamma) \left[-f_{ci} + \frac{M_D}{S_b} \right] \dots \dots \dots (2.18)$$

Pada saat momen akibat beban mati tambahan M_{SD} dan momen akibat beban hidup M_{SD} telah bekerja, tegangan netto diserat atas adalah :

$$f'_{tn} = f_{ti} - \Delta f'_t - f_c \dots \dots \dots (2.19)$$

atau

$$f'_{tn} = \gamma f_{ti} - (1 - \gamma) \frac{M_D}{S'_t} - f_c \dots \dots \dots (2.20)$$

Tegangan netto di serat bawah adalah :

$$f'_{bn} = f_t - f_{ci} - \Delta f'_b \dots \dots \dots (2.21)$$

atau

$$f'_{bn} = \gamma f_{ci} - (1 - \gamma) \frac{M_D}{S_b} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dari persamaan 2.12, 2.20 dan 2.21, 2.22 penampang yang telah dipilih harus mempunyai modulus penampang

$$S'_t \geq \frac{(1 - \gamma) M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_{ti} - f_c} \dots \dots \dots (2.23)$$

dan

$$S_b \geq \frac{(1-\gamma)M_D + M_{SD} + M_L}{\gamma f_t - f_{ci}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Ekesentrisitas tendon prategang yang dibutuhkan di penampang kritis, seperti penampang tengah bentang adalah :

$$e_c = (f_{ti} - \bar{f}_{ci}) \frac{S^t}{P_i} + \frac{M_D}{P_i} \dots\dots\dots(2.25)$$

dan di tumpuan adalah :

$$e_c = (f_{ti} - \bar{f}_{ci}) \frac{S^t}{P_i} \dots\dots\dots(2.26)$$

dimana \bar{f}_{ci} adalah tegangan beton pada saat transfer pada level pusat berat (cgc) penampang beton dan

$$P_i = \bar{f}_{ci} A_C \dots\dots\dots(2.27)$$

jadi,

$$\bar{f}_{ci} = f_{ti} - \frac{c_t}{h} (f_{ti} - f_{ci}) \dots\dots\dots(2.28)$$

c. Selubung untuk meletakkan tendon

Tegangan tendon di serta beton ekstrim pada kondisi beban kerja tidak dapat melebihi nilai izin maksimumnya, berdasarkan standar-standar seperti ACI, PCI, AASHTO, atau CEB-FEB. Dengan demikian, zona yang membatasi di penampang beton perlu ditetapkan, yaitu selubung (*envelope*) yang didalamnya gaya prategang dapat bekerja tanpa menyebabkan terjadinya tarik di serat beton ekstrim. Dari persamaan di atas didapatkan :

$$f' = 0 = \frac{P_e}{A_c} \left(1 - \frac{ec_t}{r^2}\right) \dots\dots\dots(2.29)$$

Untuk bagian gaya prategang saja, sehingga

$$e = \frac{r^2}{ec_t} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dengan demikian, titik *kern* dibawah adalah :

$$K_b = \frac{r^2}{c_t} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dengan cara yang sama, dari persamaan 2.20 jika $f_b = 0$ didapat

$$-e = \frac{r^2}{c_b} \dots \dots \dots (2.32)$$

apabila tanda negatif berarti menunjukkan pengangkuran ke arah bawah dari sumbu netral, karena eksentrisitas positif adalah ke arah bawah. Dengan demikian titik *kern* atas adalah :

$$K_t = \frac{r^2}{c_b} \dots \dots \dots (2.33)$$

Dari penentuan titik-titik atas dan bawah, jelaslah bahwa jika gaya prategang bekerja di bawah titik kern bawah, maka tegangan tarik terjadi diserat ekstrim atas dari penampang beton. Sedangkan jika gaya prategang bekerja di atas titik *kern* atas, tegangan tarik terjadi diserat ekstrim bawah dari penampang beton.

d. Selubung eksentrisitas yang membatasi

Eksentrisitas tendon yang didesain di sepanjang bentang diharapkan sedemikian hingga tarik yang terjadi di serat ekstrim balok hanya terbatas atau tidak ada sama sekali di penampang yang menentukan dalam desain. Jika tarik tidak dikehendaki sama sekali di sepanjang bentang balok dengan tendon berbentuk *draped*, maka eksentrisitasnya harus ditentukan di penampang-penampang berikut sepanjang bentang. Jika M_D adalah momen akibat beban mati dan M_T adalah momen total akibat semua beban transversal, maka lengan dari kopel antara garis tekan pusat (garis C) dan pusat dari garis tendon prategang (garis cgs) akibat M_D dan M_T masing-masing adalah a_{min} dan a_{max} . Selubung cgs bawah, lengan minimum dari kopel tendon adalah :

$$a_{min} = \frac{M_D}{P_1} \dots \dots \dots (2.34)$$

Persamaan ini mendefinisikan jarak maksimum di bawah *kern* bawah dimana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di bawah

garis kern bawah, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim atas. Dengan demikian eksentrisitas bawah yang membatasi adalah :

$$e_b = (a_{\min} + K_b) \dots\dots\dots (2.35)$$

Selubung cgs atas, lengan maksimum dari kopel tendon adalah :

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} \dots\dots\dots (2.36)$$

Persamaan ini mendefinisikan jarak minimum di bawah *kern* atas dimana garis cgs ditentukan sedemikian hingga garis C tidak terletak di bawah garis kern atas, sehingga mencegah terjadinya tegangan tarik di serat ekstrim bawah. Dengan demikian eksentrisitas bawah yang membatasi adalah:

$$e_t = (a_{\max} - K_{tb}) \dots\dots\dots (2.37)$$

Didalam standar diperkenankan terjadi tegangan terbatas pada saat transfer dan pada kondisi beban kerja. Dalam hal ini, garis cgs diperkenankan terletak sedikit di luar dua batas selubung cgs yang didefinisikan dalam persamaan 2.21 dan 2.22.

Apabila eksentrisitas tambahan e_b' dan e_t' ditambahkan pada selubung garis cgs yang menghasilkan tegangan tarik terbatas di serat beton atas dan bawah, maka tegangan tambahan di atas f_t dan f_b adalah :

$$f^{(t)} = \frac{P_i e'_b c_t}{I_c} \dots\dots\dots (2.38)$$

dan

$$f_b = \frac{P_e e'_t c_b}{I_c} \dots\dots\dots (2.39)$$

dimana t dan b masing-masing menunjukkan serat atas dan bawah. Dari persamaan 2.50 eksentrisitas tambahan yang akan ditambahkan pada persamaan 2.55 dan 2.57 adalah :

$$e'_b = \frac{f^{(t)} A_c K_b}{P_i} \dots\dots\dots (2.40)$$

dan

$$e'_t = \frac{f_b A_c K_b}{P_e} \dots\dots\dots (2.41)$$

2.3 Pembebanan Jembatan

Pembebanan untuk merencanakan jembatan jalan raya merupakan dasar dalam menentukan beban-beban dan gaya-gaya untuk perhitungan tegangan-tegangan yang terjadi pada setiap bagian jembatan jalan raya. Pembebanan berdasarkan pada muatan dan aksi-aksi yang terjadi pada jembatan berdasarkan peraturan yang ada dalam SNI 1725-2016.

2.3.1 Faktor beban dan kombinasi pembebanan

Komponen dan sambungan pada jembatan harus memenuhi Persamaan 1 untuk kombinasi beban-beban ekstrem seperti yang ditentukan pada setiap keadaan batas sebagai berikut :

- a. Kuat I adalah kombinasi pembebanan yang memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada jembatan dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai
- b. Kuat II adalah kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan penggunaan jembatan untuk memikul beban kendaraan khusus yang ditentukan pemilik tanpa memperhitungkan beban angin
- c. Kuat III adalah kombinasi pembebanan dengan jembatan dikenai beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam
- d. Kuat IV adalah kombinasi pembebanan untuk memperhitungkan kemungkinan adanya rasio beban mati dengan beban hidup yang besar
- e. Kuat V adalah kombinasi pembebanan berkaitan dengan operasional normal jembatan dengan memperhitungkan beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam
- f. Ekstrem I adalah kombinasi pembebanan gempa. Faktor beban hidup EQ yang mempertimbangkan bekerjanya beban hidup pada saat gempa berlangsung harus ditentukan berdasarkan kepentingan jembatan

- g. Ekstrem II adalah kombinasi pembebanan yang meninjau kombinasi antara beban hidup berkurang dengan beban yang timbul akibat tumbukan kapal, tumbukan kendaraan, banjir atau beban hidrolika lainnya, kecuali untuk kasus pembebanan akibat tumbukan kendaraan (TC). Kasus pembebanan akibat banjir tidak boleh dikombinasikan dengan beban akibat tumbukan kendaraan dan tumbukan kapal
- h. Layan I adalah kombinasi pembebanan yang berkaitan dengan operasional jembatan dengan semua beban mempunyai nilai nominal serta memperhitungkan adanya beban angin berkecepatan 90 km/jam hingga 126 km/jam. Kombinasi ini juga digunakan untuk mengontrol lendutan pada gorong-gorong baja, pelat pelapis terowongan, pipa termoplastik serta untuk mengontrol lebar retak struktur beton bertulang; dan juga untuk analisis tegangan tarik pada penampang melintang jembatan beton segmental. Kombinasi pembebanan ini juga harus digunakan untuk investigasi stabilitas lereng
- i. Layan II adalah kombinasi pembebanan yang ditujukan untuk mencegah terjadinya pelelehan pada struktur baja dan selip pada sambungan akibat beban kendaraan
- j. Layan III adalah kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada arah memanjang jembatan beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak dan tegangan utama tarik pada bagian badan dari jembatan beton segmental
- k. Layan IV adalah kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan tarik pada kolom beton pratekan dengan tujuan untuk mengontrol besarnya retak.
- l. Fatik adalah kombinasi beban fatik dan fraktur sehubungan dengan umur fatik akibat induksi beban yang waktunya tak terbatas

Tabel 2.4 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW _s	EW _L	BF	EU _n	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	γ_p	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_p	1,4	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	-	-
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan : - γ_p dapat berupa γ_{MS} , γ_{MA} , γ_{TA} , γ_{PR} , γ_{PL} , γ_{SH} tergantung beban yang ditinjau
- γ_{EQ} adalah faktor beban hidup kondisi gempa

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Faktor beban γ_{EQ} untuk beban hidup pada keadaan batas ekstrem I harus ditentukan berdasarkan kondisi spesifik jembatan. Sebagai pedoman dapat digunakan faktor γ_{EQ} sebagai berikut $\gamma_{EQ} = 0,5$ (jembatan sangat penting), $\gamma_{EQ} = 0,3$ (jembatan penting), dan $\gamma_{EQ} = 0$ (jembatan standar).

2.3.2 Beban permanen

Massa setiap bagian bangunan harus dihitung berdasarkan dimensi yang tertera dalam gambar dan berat jenis bahan yang digunakan. Berat dari bagian-bagian bangunan tersebut adalah massa dikalikan dengan percepatan gravitasi (g). Percepatan gravitasi yang digunakan dalam standar ini adalah $9,81 \text{ m/detik}^2$. Besarnya kerapatan massa dan berat isi untuk berbagai macam bahan diberikan dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Berat Isi untuk Beban Mati

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 $f'_c < 35 \text{ MPa}$	22,0-25,0	2320
	$35 < f'_c < 105 \text{ MPa}$	$22 + 0,022 f'_c$	$2240 + 2,29 f'_c$
8	Baja (<i>steel</i>)	78,5	7850
9	Kayu (ringan)	7,8	800
10	Kayu keras (<i>hard wood</i>)	11,0	1125

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Beban mati jembatan merupakan kumpulan berat setiap komponen struktural dan non- struktural. Setiap komponen ini harus dianggap sebagai suatu kesatuan aksi yang tidak terpisahkan pada waktu menerapkan faktor beban normal dan faktor beban terkurangi.

a. Berat sendiri (MS)

Berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya, termasuk dalam hal ini adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Adapun faktor beban yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^U)	
	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 atau utilitas (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. Dalam hal tertentu, nilai faktor beban mati tambahan yang berbeda dengan ketentuan pada Tabel 2.7 boleh digunakan dengan persetujuan instansi yang berwenang. Hal ini bisa dilakukan apabila

instansi tersebut melakukan pengawasan terhadap beban mati tambahan pada jembatan, sehingga tidak dilampaui selama umur jembatan.

Tabel 2.7 Faktor Beban untuk Berat Mati Tambahan

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^S)	
	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)

Semua jembatan harus direncanakan untuk bisa memikul beban tambahan yang berupa aspal beton setebal 50 mm untuk pelapisan kembali di kemudian hari kecuali ditentukan lain oleh instansi yang berwenang. Lapisan ini harus ditambahkan pada lapisan permukaan yang tercantum dalam gambar rencana. Berat pipa untuk saluran air bersih, saluran air kotor dan lain- lainnya harus ditinjau pada keadaan kosong dan penuh sehingga keadaan yang paling membahayakan dapat diperhitungkan.

c. Beban akibat tekanan tanah (TA)

Koefisien tekanan tanah nominal harus dihitung berdasarkan sifat-sifat tanah. Sifat-sifat tanah (kepadatan, kadar kelembaban, kohesi sudut geser dalam dan lain sebagainya) harus diperoleh berdasarkan hasil pengukuran dan pengujian tanah baik di lapangan ataupun laboratorium. Bila tidak diperoleh data yang cukup maka karakteristik tanah dapat ditentukan sesuai dengan ketentuan ini. Tekanan tanah lateral mempunyai hubungan yang tidak linier dengan sifat-sifat bahan tanah. Tekanan tanah lateral pada keadaan batas daya layan dihitung berdasarkan nilai nominal dari γ_s , c dan ϕ_f .

Tekanan tanah lateral pada keadaan batas kekuatan dihitung dengan menggunakan nilai nominal dari γ_S dan nilai rencana dari c serta ϕ_f . Nilai-nilai rencana dari c serta ϕ_f diperoleh dari nilai nominal dengan menggunakan faktor reduksi kekuatan.

Tabel 2.8 Faktor Beban Akibat Tekanan Tanah

Tipe beban	Faktor beban (γ_{TA})			
	Kondisi Batas Layan (γ_{TA}^S)		Kondisi Batas Ultimit (γ_{TA}^U)	
	Tekanan tanah		Biasa	Terkurangi
Tetap	Tekanan tanah vertikal	1,00	1,25	0,80
	Tekanan tanah lateral			
	- Aktif	1,00	1,25	0,80
	- Pasif	1,00	1,40	0,70
	- Diam	1,00	(1)	
Catatan (1) : Tekanan tanah lateral dalam keadaan diam biasanya tidak diperhitungkan pada keadaan batas ultimit.				

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Tanah di belakang dinding penahan biasanya mendapatkan beban tambahan yang bekerja apabila beban lalu lintas bekerja pada bagian daerah keruntuhan aktif teoritis. Besarnya beban tambahan ini adalah setara dengan tanah setebal 0,7 m yang bekerja secara merata pada bagian tanah yang dilewati oleh beban lalu lintas tersebut. Beban tambahan ini hanya diterapkan untuk menghitung tekanan tanah dalam arah lateral saja, dan faktor beban yang digunakan harus sama seperti yang telah ditentukan dalam menghitung tekanan tanah arah lateral. Faktor pengaruh pengurangan dari beban tambahan ini tidak perlu diperhitungkan.

Tekanan tanah lateral dalam keadaan diam umumnya tidak diperhitungkan pada keadaan batas kekuatan. Apabila keadaan demikian timbul, maka faktor beban untuk keadaan batas kekuatan yang digunakan

untuk menghitung nilai rencana dari tekanan tanah dalam keadaan diam harus sama seperti untuk tekanan tanah dalam keadaan aktif. Faktor beban pada keadaan batas daya layan untuk tekanan tanah dalam keadaan diam adalah 1,0, tetapi harus hati-hati dalam pemilihan nilai nominal yang memadai pada waktu menghitung tekanan tanah.

d. Pengaruh tetap pelaksanaan

Pengaruh tetap pelaksanaan adalah beban yang disebabkan oleh metode dan urutan pelaksanaan pekerjaan jembatan. Beban ini biasanya mempunyai kaitan dengan aksi-aksi lainnya, seperti pra-penegangan dan berat sendiri. Dalam hal ini, pengaruh faktor ini tetap harus dikombinasikan dengan aksi-aksi tersebut dengan faktor beban yang sesuai. Bila pengaruh tetap yang terjadi tidak begitu terkait dengan aksi rencana lainnya, maka pengaruh tersebut harus dimaksudkan dalam batas daya layan dan batas ultimit menggunakan faktor beban sesuai dengan Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Faktor Beban Akibat Pengaruh Pelaksanaan

Tipe beban	Faktor Beban (γ_{PL})		
	Keadaan Batas Layan (γ_{PL}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{PL}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Tetap	1,00	1,00	1,00

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2.3.3 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 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap gandar terdiri atas dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk "T" diterapkan per lajur lalu lintas rencana. Secara umum, beban "D" akan menjadi beban penentu dalam perhitungan jembatan yang mempunyai bentang sedang sampai panjang, sedangkan beban "T" digunakan untuk bentang pendek dan rantai kendaraan.

a. Lajur lalu lintas rencana

Secara umum, Jumlah lajur lalu lintas rencana ditentukan dengan mengambil bagian integer dari hasil pembagian lebar bersih jembatan (w) dalam mm dengan lebar lajur rencana sebesar 2750 mm.

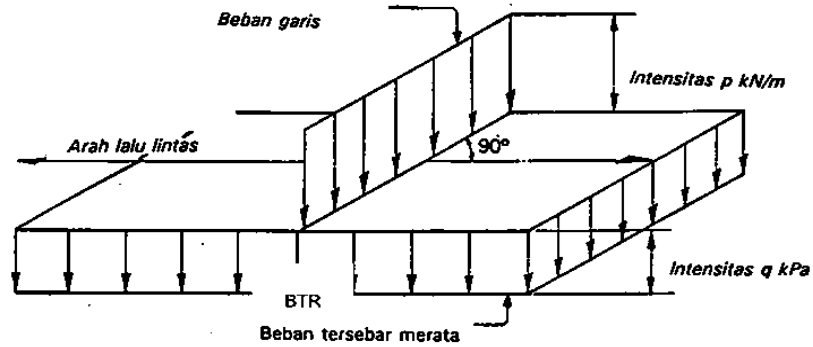
Tabel 2.10 Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana

Type Jembatan (1)	Lebar Bersih Jembatan (2) (mm)	Jumlah Lajur Lalu Lintas Rencana (n)
Satu Lajur	$3000 \leq w < 5250$	1
Dua Arah, tanpa Median	$5250 \leq w < 7500$	2
	$7500 \leq w < 10,000$	3
	$10,000 \leq w < 12,500$	4
	$12,500 \leq w < 15,250$	5
	$w \geq 15,250$	6
Dua Arah, dengan Median	$5500 \leq w \leq 8000$	2
	$8250 \leq w \leq 10,750$	3
	$11,000 \leq w \leq 13,500$	4
	$13,750 \leq w \leq 16,250$	5
	$w \geq 16,500$	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)

b. Beban lajur “D” (TD)

Beban lajur "D" terdiri atas beban terbagi rata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT).



Gambar 2.16 Beban Lajur “D”

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas q kPa dengan besaran q tergantung pada panjang total yang dibebani L yaitu jika $L \leq 30$ m, maka $q = 9,0$ kPa, apabila $L > 30$ m, maka digunakan persamaan:

$$q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \dots\dots\dots (2.42)$$

keterangan :

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

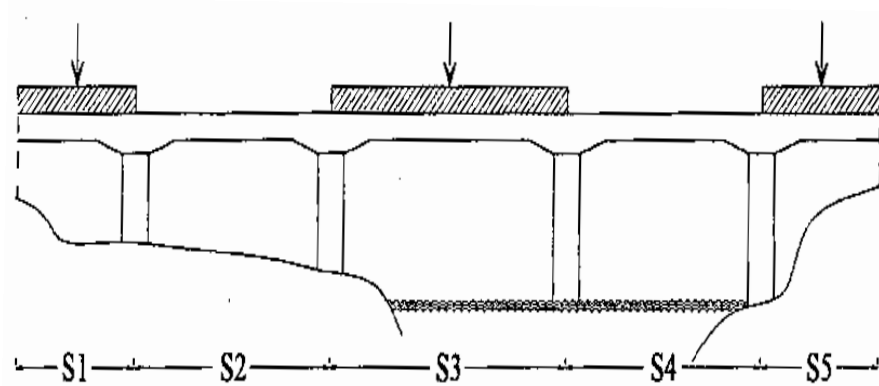
L adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter)

Tabel 2.11 Faktor Beban untuk 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

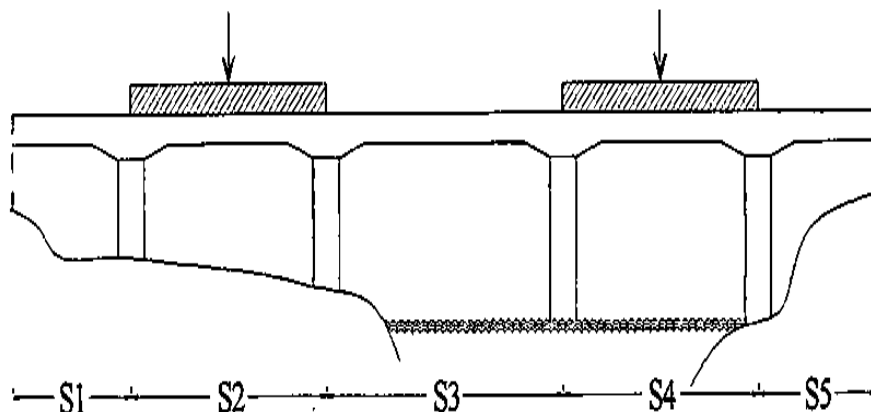
(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Beban 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. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.



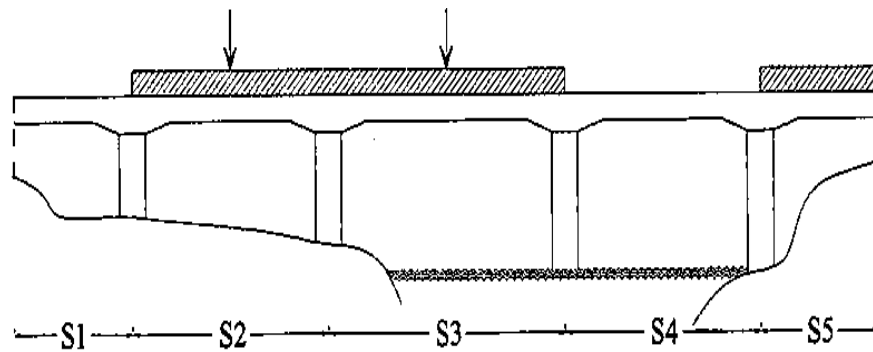
Untuk momen lentur maksimum di bentang 1: Tempatkan BGT di bentang 1 (bentang 5 serupa) ambil L = pengaruh terburuk dari $S1$; $S1 + S3$; atau $S1 + S3 + S5$. Untuk momen lentur di bentang 3: Tempatkan BGT di bentang 3 ambil L = pengaruh terburuk dari $S3$; $S1 + S3$; atau $S3 + S5$

a. Momen Lentur Positif-Bentang 1,3,5



Untuk momen lentur maksimum di bentang 2: Tempatkan BGT di bentang 2 ambil L = pengaruh terburuk dari $S2$, atau $S2 + S4$. Untuk momen lentur di bentang 4: Tempatkan BGT di bentang 4 ambil L = pengaruh terburuk dari $S4$; atau $S2 + S4$

b. Momen Lentur Positif-Bentang 2,4



Untuk momen lentur maksimum di pilar 2: Tempatkan BGT di bentang 2 dan 3, ambil $L =$ pengaruh terburuk dari $S2 + S3$; atau $S2 + S3 + S5$

c. Momen Lentur Negatif Pada Pilar



Gambar 2.17 Susunan Pembebanan "D"

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen-komponen BTR dan BGT dari beban "D" secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.16. Kemudian untuk alternatif penempatan dalam arah memanjang dapat dilihat pada Gambar 2.17. Distribusi beban hidup dalam arah melintang digunakan untuk memperoleh momen dan geser dalam arah longitudinal pada gelagar jembatan. Hal itu dilakukan dengan mempertimbangkan beban lajur "D" tersebar pada seluruh lebar balok (tidak termasuk parapet, kerb dan trotoar) dengan intensitas 100% untuk panjang terbebani yang sesuai.

c. Beban truk "T" (TT)

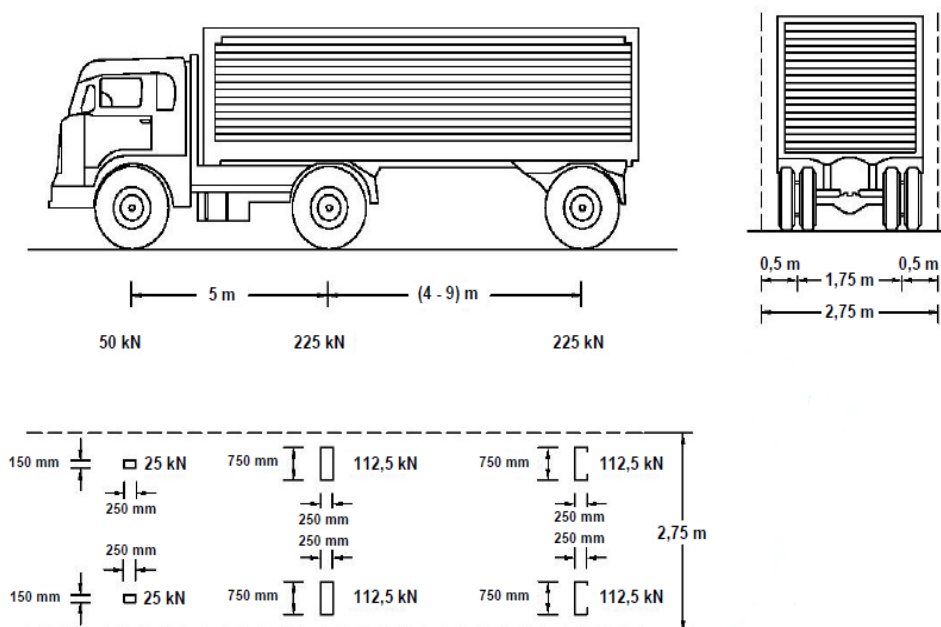
Selain beban "D", terdapat beban lalu lintas lainnya yaitu beban truk "T". Beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban "D". Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai.

Tabel 2.12 Faktor Beban untuk Beban "T"

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban (γ_{TT})	
		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)

Pembebanan truk "T" terdiri atas kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat gandar seperti terlihat dalam Gambar 2.18. Berat dari tiap-tiap gandar disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 2.18 Pembebanan Truk "T" (500 kN)

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Bidang kontak roda kendaraan yang terdiri atas satu atau dua roda diasumsikan mempunyai bentuk persegi panjang dengan panjang 750 mm dan lebar 250 mm. Tekanan ban harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan bidang kontak.

d. Faktor beban dinamis

Faktor Beban Dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dan jembatan. Besarnya FBD tergantung pada frekuensi dasar dari suspensi kendaraan, biasanya antara 2 Hz sampai 5 Hz untuk kendaraan berat, dan frekuensi dari getaran lentur jembatan. Untuk perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen.

Untuk pembebanan "D" FBD merupakan fungsi panjang bentang ekuivalen seperti tercantum dalam Gambar 2.19 . Untuk bentang tunggal panjang bentang ekuivalen diambil sama dengan panjang bentang sebenarnya. Untuk bentang menerus panjang bentang ekuivalen L_E diberikan dengan rumus:

$$L_E = \sqrt{L_{av} L_{max}} \dots\dots\dots (2.43)$$

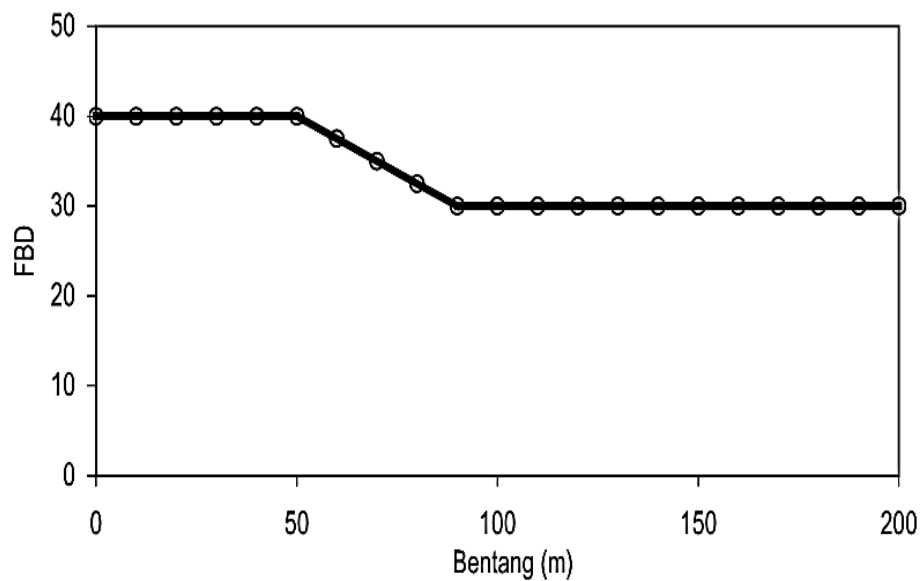
keterangan :

L_{av} adalah panjang bentang rata-rata dari kelompok bentang yang disambungkan secara menerus

L_{max} adalah panjang bentang maksimum dalam kelompok bentang yang disambungkan secara menerus

Untuk pembebanan truk "T", FBD diambil 30%. Nilai FBD yang dihitung digunakan pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah. Untuk bagian bangunan bawah dan fondasi yang berada di bawah garis permukaan, nilai FBD harus diambil sebagai peralihan linier dari nilai pada garis permukaan tanah sampai nol pada kedalaman 2 m. Untuk

bangunan yang terkubur, seperti halnya gorong-gorong dan struktur baja-tanah, nilai FBD jangan diambil kurang dari 40% untuk kedalaman nol dan jangan kurang dari 10% untuk kedalaman 2 m. Untuk kedalaman antara bisa diinterpolasi linier. Nilai FBD yang digunakan untuk kedalaman yang dipilih harus diterapkan untuk bangunan seutuhnya.



Gambar 2.19 Faktor Beban Dinamis untuk beban “T” untuk Pembebanan lajur “D”

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

e. Gaya rem (TB)

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari 25% dari berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR. Gaya rem tersebut harus ditempatkan di semua lajur rencana. Gaya ini harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm diatas permukaan jalan pada masing- masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Untuk jembatan yang dimasa depan akan dirubah menjadi satu arah, maka semua lajur rencana harus dibebani secara simultan pada saat menghitung besarnya gaya rem. Faktor kepadatan lajur berlaku untuk menghitung gaya rem.

Tabel 2.13 Faktor Kepadatan Lajur (m)

Jumlah Lajur Yang Dibebeani	Faktor Kepadatan Lajur
1	1,2
≥ 2	1

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

f. Gaya sentrifugal (TR)

Untuk tujuan menghitung gaya radial atau efek guling dari beban roda, pengaruh gaya sentrifugal pada beban hidup harus diambil sebagai hasil kali dari berat gandar truk rencana dengan faktor C sebagai berikut :

$$C = f \frac{v^2}{gR_l} \dots\dots\dots (2.44)$$

keterangan :

v adalah kecepatan rencana jalan raya (m/detik)

f adalah faktor dengan nilai 4/3 untuk kombinasi beban selain keadaan batas fatik dan 1,0 untuk keadaan batas fatik

g adalah percepatan gravitasi: 9.8 (m/detik²)

R_l adalah jari-jari kelengkungan lajur lalu lintas (m)

Faktor kepadatan lajur berlaku pada waktu menghitung gaya sentrifugal. Gaya sentrifugal harus diberlakukan secara horizontal pada jarak ketinggian 1800 mm diatas permukaan jalan. Pengaruh superelevasi yang mengurangi momen guling akibat gaya sentrifugal akibat beban roda dapat dipertimbangkan dalam perencanaan.

g. Pembebanan untuk pejalan kaki (TP)

Semua komponen trotoar yang lebih lebar dari 600 mm 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 trotoar dapat dinaiki maka beban pejalan kaki tidak perlu dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan. Jika ada kemungkinan trotoar berubah fungsi di masa depan menjadi lajur kendaraan, maka beban hidup kendaraan harus diterapkan pada jarak 250 mm dari tepi dalam parapet untuk perencanaan komponen jembatan lainnya. Dalam hal ini, faktor beban dinamis tidak perlu dipertimbangkan.

h. Beban akibat tumbukan kendaraan (TC)

Hal ini tidak perlu ditinjau jika struktur jembatan sudah dilindungi dengan salah satu pelindung seperti tanggul, palang independen setinggi 1370 mm yang tahan tumbukan dipasang pada permukaan tanah dalam jarak 3000 mm dari bagian jembatan yang ingin dilindungi, atau parapet dengan tinggi 1070 mm dipasang minimal 3000 mm dari bagian jembatan yang ingin dilindungi.

Untuk tumbukan kendaraan dengan parapet, *railing* kendaraan harus memiliki muka rel yang menerus di sisi-sisi lalu lintas. Rambu dengan elemen rel harus berada di sisi luar *railing*. Kontinuitas struktur pada elemen *railing* dan angkur ujung harus diperhitungkan. Sistem *railing* dan sambungannya terhadap lantai dapat digunakan setelah melalui pengujian tumbukan yang sesuai dengan kriteria kinerja yang diharapkan.

Salah satu dari kinerja berikut harus ditentukan untuk perencanaan pengaman lalu lintas yaitu sebagai berikut :

- 1) Kinerja 1 : Digunakan pada jalan dengan kecepatan rencana rendah dan volume kendaraan yang sangat rendah, jalan lokal dengan kecepatan rencana rendah;
- 2) Kinerja 2 : Digunakan pada jalan lokal dan kolektor dengan kondisi baik seperti jumlah kendaraan berat yang sedikit dan rambu kecepatan sedikit;

- 3) Kinerja 3 : Digunakan pada jalan arteri dengan kecepatan rencana tinggi dengan campuran kendaraan berat yang sangat rendah dan kondisi jalan yang baik;
- 4) Kinerja 4 : Digunakan pada jalan arteri dengan kecepatan rencana tinggi, jalan bebas hambatan, jalan ekspres, dan jalan antar kota dengan campuran truk dan kendaraan berat;
- 5) Kinerja 5 : Digunakan sesuai dengan kriteria kinerja 4 dan jika kendaraan berat memiliki porsi besar terhadap lalu lintas harian atau saat kondisi jalan mengharuskan kriteria kinerja railing yang tinggi;
- 6) Kinerja 6 : Digunakan pada jalan yang dapat dilalui truk tipe tanker atau kendaraan dengan beban gravitasi yang cukup besar.

Kriteria kinerja yang dipilih harus sesuai dengan berat kendaraan dan kecepatan serta sudut tumbuk sesuai Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Kriteria Kinerja *Railing* dan Kinerja Terhadap Tumbukan

Karakteristik kendaraan	Mobil		Truk pickup	Satu unit truk van	Truk trailer tipe van		Truk trailer tipe traktor-tanker
	7000	8000			220000	355000	
W (N)	7000	8000	20000	80000	220000	355000	355000
B(mm)	1700	1700	2000	2300	2450	2450	2450
G (mm)	550	550	700	1250	1630	1850	2050
Sudut tumbuk (θ)	20°	20°	25°	15°	15°	15°	15°
Kriteria kinerja	Kecepatan (km/jam)						
KK-1	50	50	50	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-2	70	70	70	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-3	100	100	100	N/A	N/A	N/A	N/A
KK-4	100	100	100	80	N/A	N/A	N/A
KK-5	100	100	100	N/A	N/A	80	N/A
KK-6	100	100	100	N/A	N/A	N/A	80

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

i. Beban fatik

Beban fatik merupakan satu beban truk dengan tiga gandar, dimana jarak gandar tengah dan gandar belakang merupakan jarak yang konstan sebesar 5000 mm. Faktor beban dinamis seperti yang ditentukan harus digunakan dalam menghitung beban fatik. Frekuensi beban fatik harus diambil sebesar Lalu Lintas Harian (LHR) untuk satu lajur lalu lintas rencana. Frekuensi ini harus digunakan untuk semua komponen jembatan, juga untuk komponen jembatan yang memikul jumlah truk yang lebih sedikit. Jika tidak ada informasi yang lebih lengkap dan akurat, maka perencana dapat menentukan jumlah truk harian rata-rata untuk satu jalur sebesar :

$$LHR_{SL} = p_t \times LHR \dots\dots\dots (2.45)$$

keterangan :

LHR adalah jumlah truk rata-rata per hari dalam satu arah selama umur rencana

LHR_{SL} adalah jumlah truk rata-rata per hari dalam satu lajur selama umur rencana

p_t adalah fraksi truk dalam satu lajur sesuai Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Fraksi Lalu Lintas Truk dalam Satu Lajur (p)

Jumlah lajur truk	p_t
1	1,00
2	0,85
3 atau lebih	0,80

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Bila tidak terdapat informasi yang akurat mengenai lalu lintas harian rata-rata, maka dapat digunakan LHR berdasarkan klasifikasi jalan sesuai dengan Tabel 2.16.

Tabel 2.16 LHR Berdasarkan Klasifikasi Jalan

Kelas Fungsional		Kelas Rencana		
		Tipe I : Kelas	Tipe II	
			LHR	Kelas
Primer	Arteri	I	Semua lalu lintas	I
	Kolektor	II	≥ 10.000	I
< 10.000			II	
Sekunder	Arteri	II	≥ 20.000	I
			< 20.000	II
	Kolektor	NA	≥ 6.000	II
			< 6.000	III
	Lokal	NA	≥ 500	III
			< 500	IV

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2.3.4 Aksi lingkungan

Aksi lingkungan memasukkan pengaruh temperatur, angin, banjir, gempa dan penyebab- penyebab alamiah lainnya. Perencana mempunyai tanggung jawab untuk mengidentifikasi kejadian-kejadian khusus setempat dan harus memperhitungkannya dalam perencanaan.

a. Penurunan (ES)

Jembatan harus direncanakan untuk bisa menahan terjadinya penurunan yang diperkirakan, termasuk perbedaan penurunan, sebagai aksi daya layan. Pengaruh penurunan dapat dikurangi dengan adanya rangkai dan interaksi pada struktur tanah. Faktor beban untuk penurunan dapat digunakan sesuai dengan Tabel 2.17.

Penurunan dapat diperkirakan dari pengujian yang dilakukan terhadap lapisan tanah. Apabila perencana memutuskan untuk tidak melakukan pengujian, tetapi besarnya penurunan diambil sebagai suatu anggapan, maka nilai anggapan tersebut merupakan batas atas dari penurunan yang bakal

terjadi. Apabila nilai penurunan ini besar, perencanaan bangunan bawah dan bangunan atas jembatan harus memuat ketentuan khusus untuk mengatasi penurunan tersebut.

Tabel 2.17 Faktor Beban Akibat Penurunan

Tipe beban	Faktor beban (γ_{ES})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{ES}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{ES}^U)
Permanen	1,0	N/A

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

b. Gaya akibat deformasi

Gaya dalam yang terjadi karena deformasi akibat rangkai dan susut harus diperhitungkan dalam perencanaan. Selain itu pengaruh temperatur gradien harus dihitung jika diperlukan.

1) Temperatur merata (EU_n)

Hal ini dapat digunakan untuk perencanaan jembatan yang menggunakan gelagar terbuat dari beton atau baja. Rentang temperatur harus seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.18. Perbedaan antara temperatur minimum atau temperatur maksimum dengan temperatur nominal yang diasumsikan dalam perencanaan harus digunakan untuk menghitung pengaruh akibat deformasi yang terjadi akibat perbedaan suhu tersebut. Temperatur minimum dan maksimum yang ditentukan dalam Tabel 2.18 harus digunakan sebagai $T_{\text{mindesign}}$ dan $T_{\text{maxdesign}}$ pada Persamaan 2.46.

$$\Delta_T = \alpha L (T_{\text{maxdesign}} - T_{\text{mindesign}}) \dots \dots \dots (2.46)$$

Keterangan :

L adalah panjang komponen jembatan (mm)

α adalah koefisien muai temperatur (mm/mm/°C)

Tabel 2.18 Temperatur Jembatan Rata-rata Nominal

Tipe bangunan atas	Temperatur jembatan rata-rata minimum (1)	Temperatur jembatan rata-rata maksimum
Lantai beton di atas gelagar atau boks beton.	15 °C	40 °C
Lantai beton di atas gelagar, boks atau rangka baja.	15 °C	40 °C
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks atau rangka baja.	15 °C	45 °C
CATATAN (1) : Temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5°C untuk lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m diatas permukaan laut.		

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Tabel 2.19 Sifat Bahan Rata-rata Akibat Pengaruh Temperatur

Bahan	Koefisien perpanjangan akibat suhu (α)	Modulus Elastisitas (MPa)
Baja	12×10^{-6} per °C	200.000
Beton: Kuat tekan <30 MPa Kuat tekan >30 MPa	10×10^{-6} per °C 11×10^{-6} per °C	$4700\sqrt{f_c}$ $4700\sqrt{f_c}$

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

2) Pengaruh susut dan rangkak (SH)

Pengaruh rangkak dan penyusutan harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan beton. Pengaruh ini dihitung menggunakan beban mati jembatan. Apabila rangkak dan penyusutan bisa mengurangi pengaruh

muatan lainnya, maka nilai dari rangkai dan penyusutan tersebut harus diambil minimum (misalnya pada waktu transfer dari beton prategang).

Tabel 2.20 Faktor Beban Akibat Susut dan Rangkai

Tipe beban	Faktor beban (γ_{SH})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{SH}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{SH}^U)
Tetap	1,0	0,5
Catatan : Walaupun susut dan rangkai bertambah lambat menurut waktu, tetapi pada akhirnya akan mencapai nilai yang konstan		

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

3) Pengaruh prategang (PR)

Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen-komponen yang terkekang pada bangunan statis tidak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan ataupun batas ultimit. Prategang harus diperhitungkan sebelum (selama pelaksanaan) dan sesudah kehilangan tegangan dalam kombinasinya dengan beban-beban lainnya.

Tabel 2.21 Faktor Beban Akibat Pengaruh Prategang

Tipe beban	Faktor beban (γ_{PR})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{PR}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{PR}^U)
Tetap	1,0	1,0

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Pengaruh utama prategang adalah sebagai berikut:

- a) Pada keadaan batas daya layan, gaya prategang dapat dianggap bekerja sebagai suatu sistem beban pada unsur. Nilai rencana dari beban prategang tersebut harus dihitung menggunakan faktor beban daya layan sebesar 1,0.

b) Pada keadaan batas ultimit, pengaruh sekunder akibat gaya prategang harus dianggap sebagai beban yang bekerja.

4) Aliran air, benda hanyutan, dan tumbukan dengan batang kayu

Gaya seret nominal ultimit dan daya layan pada pilar akibat aliran air tergantung pada kecepatan air rata-rata sesuai dengan Persamaan 2.47. Faktor beban untuk perhitungan gaya akibat aliran air dapat digunakan sesuai dengan Tabel 2.22.

$$T_{EF} = 0,5 C_D V_S^2 A_d \dots\dots\dots (2.47)$$

keterangan :

T_{EF} adalah gaya seret (kN)

V_S adalah kecepatan air rata-rata berdasarkan pengukuran di lapangan (m/s)

C_D adalah koefisien seret (lihat Tabel 2.23)

A_d adalah luas proyeksi pilar tegak lurus arah aliran dengan tinggi sama dengan kedalaman aliran (lihat Gambar 2.20) (m²)

Bila pilar tipe dinding membuat sudut dengan arah aliran, gaya angkat melintang akan semakin meningkat. Nilai nominal dari gaya angkat dalam arah tegak lurus gaya seret, adalah :

$$T_{EF} = 0,5 C_L V_S^2 A_L \dots\dots\dots (2.48)$$

keterangan:

V_S adalah kecepatan air (m/s)

C_L adalah koefisien angkat (lihat Tabel 2.23)

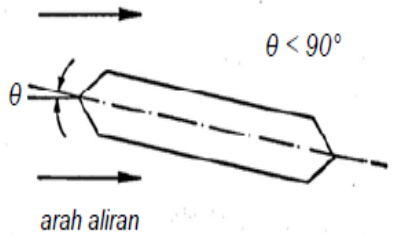
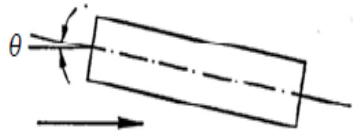
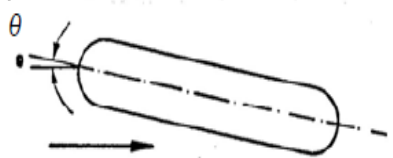
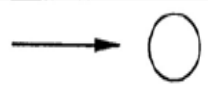
A_L adalah luas proyeksi pilar sejajar arah aliran dengan tinggi sama dengan kedalaman aliran (lihat Gambar 2.20) (m²)

Tabel 2.22 Faktor Beban Akibat Aliran Air, Benda Hanyutan, dan Tumbukan Batang Kayu

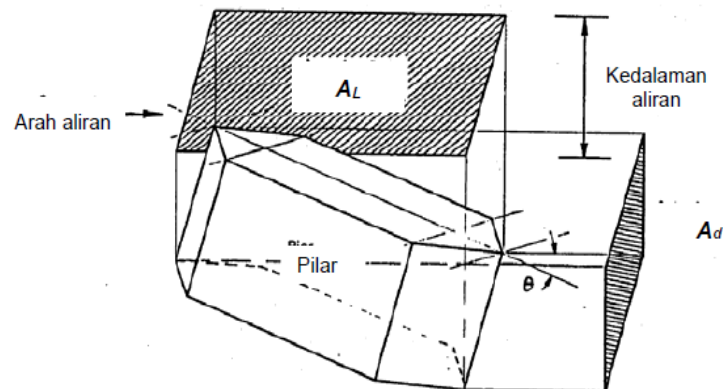
Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{EF})	
	Keadaan Batas Layan (γ_{EF}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{EF}^U)
Transien	1,0	Lihat Tabel 2.24

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Tabel 2.23 Koefisien Seret (C_D) dan Angkat (C_L) untuk Berbagai Bentuk Pilar

Bentuk pilar	Koefisien seret (C_D)	Koefisien angkat (C_L)
 <p>$\theta < 90^\circ$</p>	0,8	θ C_L 0° 0 5° 0.5 10° 0.9 20° 0.9 $\geq 30^\circ$ 1.0
	1,4	
	0,7 0,7	Tidak dapat digunakan
	0,7	Tidak bisa dipakai

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)



Gambar 2.20 Luas Proyeksi Pilar untuk Gaya Akibat Aliran Air

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

Gaya akibat benda hanyutan dihitung menggunakan Persamaan 2.47 dengan $C_D = 1,04$. Jika tidak ada data yang lebih tepat, luas proyeksi benda hanyutan bisa dihitung seperti berikut:

- a) Untuk jembatan yang permukaan airnya terletak di bawah bangunan atas, luas benda hanyutan yang bekerja pada pilar dihitung dengan menganggap bahwa kedalaman minimum dari benda hanyutan adalah 1,2 m dibawah muka air banjir. Panjang hamparan dari benda hanyutan diambil setengahnya dari jumlah bentang yang berdekatan atau 20 m, diambil yang terkecil dari kedua nilai ini.
- b) Untuk jembatan dimana bangunan atas terendam, kedalaman benda hanyutan diambil sama dengan kedalaman bangunan atas termasuk sandaran atau penghalang lalu lintas ditambah minimal 1,2 m. Kedalaman maksimum benda hanyutan boleh diambil 3 m kecuali apabila menurut pengalaman setempat menunjukkan bahwa hamparan dari benda hanyutan dapat terakumulasi. Panjang hamparan benda hanyutan yang bekerja pada pilar diambil setengah dari jumlah bentang yang berdekatan.

Gaya akibat tumbukan dengan batang kayu dihitung dengan menganggap bahwa batang dengan massa minimum sebesar 2 ton hanyut pada kecepatan aliran rencana harus bisa ditahan dengan gaya maksimum berdasarkan lendutan elastis ekuivalen dari pilar dengan rumus sebagai berikut :

$$T_{EF} = \frac{M(V_a)^2}{d} \dots\dots\dots (2.49)$$

keterangan:

M adalah massa batang kayu sebesar ± 2 ton

V_a adalah kecepatan air permukaan (m/dt) pada keadaan batas yang ditinjau. Dalam hal tidak adanya penyelidikan yang terperinci mengenai bentuk diagram kecepatan di lokasi jembatan, V_a bisa diambil 1,4 kali kecepatan rata-rata V_s

d_{ev} adalah lendutan elastis ekuivalen (m) (lihat Tabel 2.24)

Tabel 2.24 Lendutan Ekuivalen untuk Tumbukan Batang Kayu

Tipe pilar	d_{ev} (m)
Pilar beton massif	0,075
Tiang beton perancah	0,150
Tiang kayu perancah	0,300

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

5) Tekanan hidrostatik dan gaya apung (EU)

Permukaan air rendah dan tinggi harus ditentukan selama umur bangunan dan digunakan untuk menghitung tekanan hidrostatik dan gaya apung. Dalam menghitung pengaruh tekanan hidrostatik, kemungkinan adanya gradien hidrolis yang melintang bangunan harus diperhitungkan.

Pengaruh daya apung harus ditinjau terhadap bangunan atas yang mempunyai rongga atau lobang yang memungkinkan udara terjebak, kecuali

apabila ventilasi udara dipasang. Daya apung harus ditinjau bersamaan dengan gaya akibat aliran. Dalam memperkirakan pengaruh daya apung, harus ditinjau beberapa ketentuan sebagai berikut:

- a) Pengaruh daya apung pada bangunan bawah (termasuk tiang) dan beban mati bangunan atas
- b) Syarat-syarat sistem ikatan dari bangunan atas;
- c) Syarat-syarat drainase dengan adanya rongga-rongga pada bagian dalam supaya air bisa keluar pada waktu surut.

Tabel 2.25 Faktor Beban Akibat Tekanan Hidrostatik dan Gaya Apung

Tipe Beban	Faktor beban (γ_{EU})		
	Keadaan Batas Layan (γ_{EU}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{EU}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Transien	1,00	1,0 (1,1) ⁽¹⁾	1,0 (0,9) ⁽¹⁾
CATATAN ⁽¹⁾ : Angka yang ditunjukkan dalam tanda kurung digunakan untuk bangunan penahan air atau bangunan lainnya dengan gaya apung dan hidrostatik sangat dominan			

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

6) Beban angin

a) Tekanan angin horizontal

Tekanan angin yang ditentukan pada pasal ini 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:

$$V_{DZ} = 2,5 V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \dots\dots\dots (2.50)$$

keterangan :

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

V_{10} adalah kecepatan angin pada elevasi 10000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana (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 2.26, 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 2.26 (mm)

Tabel 2.26 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

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

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

(1) Beban angin pada struktur (EW_S)

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

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \dots\dots\dots (2.51)$$

keterangan :

P_B adalah tekanan angin dasar seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.27 (MPa)

Tabel 2.27 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)

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 balok atau gelagar.

Jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka tekanan angin dasar P_B untuk berbagai sudut serang dapat diambil seperti yang ditentukan dalam Tabel 2.28 dan harus dikerjakan pada titik berat dari

area yang terkena beban angin. Arah sudut serang ditentukan tegak lurus terhadap arah longitudinal. Arah angin untuk perencanaan harus yang menghasilkan pengaruh yang terburuk pada komponen jembatan yang ditinjau. Tekanan angin melintang dan memanjang harus diterapkan secara bersamaan dalam perencanaan.

Gaya melintang dan longitudinal yang harus dikerjakan secara langsung pada bangunan bawah harus dihitung berdasarkan tekanan tekanan angin dasar sebesar 0,0019 MPa. Untuk angin dengan sudut serang tidak tegak lurus terhadap bangunan bawah, gaya ini harus diuraikan menjadi komponen yang bekerja tegak lurus terhadap bidang tepi dan bidang muka dari bangunan bawah. Komponen-komponen ini bekerja tegak lurus terhadap pada masing-masing permukaan yang mengalami tekanan dan perencana harus menerapkan gaya-gaya tersenut bersamaan dengan beban angin yang bekerja pada struktur atas.

Tabel 2.28 Tekanan Angin Dasar untuk Berbagai Sudut Serang

Sudut serang	Rangka, kolom, dan pelengkung		Gelagar	
	Beban lateral	Beban longitudinal	Beban lateral	Beban longitudinal
Derajat	MPa	MPa	MPa	MPa
0	0,0036	0,0000	0,0024	0,0000
15	0,0034	0,0006	0,0021	0,0003
30	0,0031	0,0013	0,0020	0,0006
45	0,0023	0,0020	0,0016	0,0008
60	0,0011	0,0024	0,0008	0,0009

(Sumber : SNI 1725-2016 Tentang Pembebanan untuk Jembatan)

(2) Gaya angin pada kendaraan (EW_L)

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.

Tabel 2.29 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)

b) Tekanan angin vertikal

Jembatan harus mampu memikul beban garis memanjang jembatan yang merepresentasikan gaya angin vertikal ke atas sebesar $9,6 \times 10^{-4}$ MPa dikalikan lebar jembatan, termasuk parapet dan trotoar. Gaya ini harus ditinjau hanya untuk Keadaan Batas Kuat III dan Layan IV yang tidak melibatkan angin pada kendaraan, dan hanya ditinjau untuk kasus pembebanan dimana arah angin dianggap bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang jembatan. Gaya memanjang tersebut mempunyai titik tangkap pada seperempat lebar jembatan dan bekerja secara bersamaan dengan beban angin horizontal.

7) Pengaruh gempa (E_Q)

Perhitungan pengaruh gempa terhadap jembatan mengacu pada SNI 2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa. Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa. 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_d) dengan persamaan :

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \dots\dots\dots (2.52)$$

keterangan:

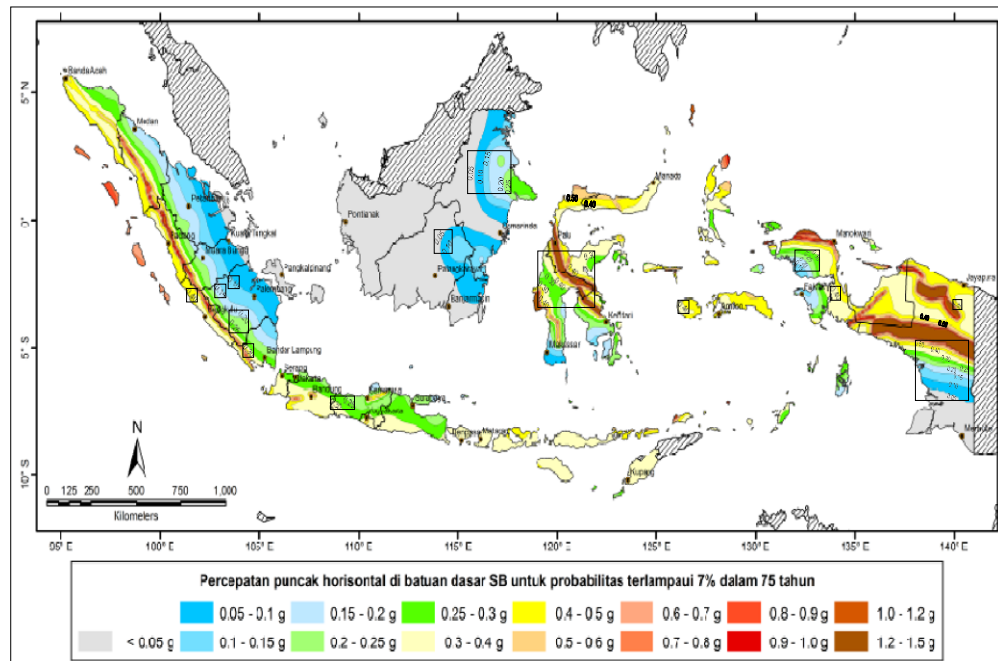
E_Q adalah gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} adalah koefisien respons gempa elastis

R adalah faktor modifikasi respons

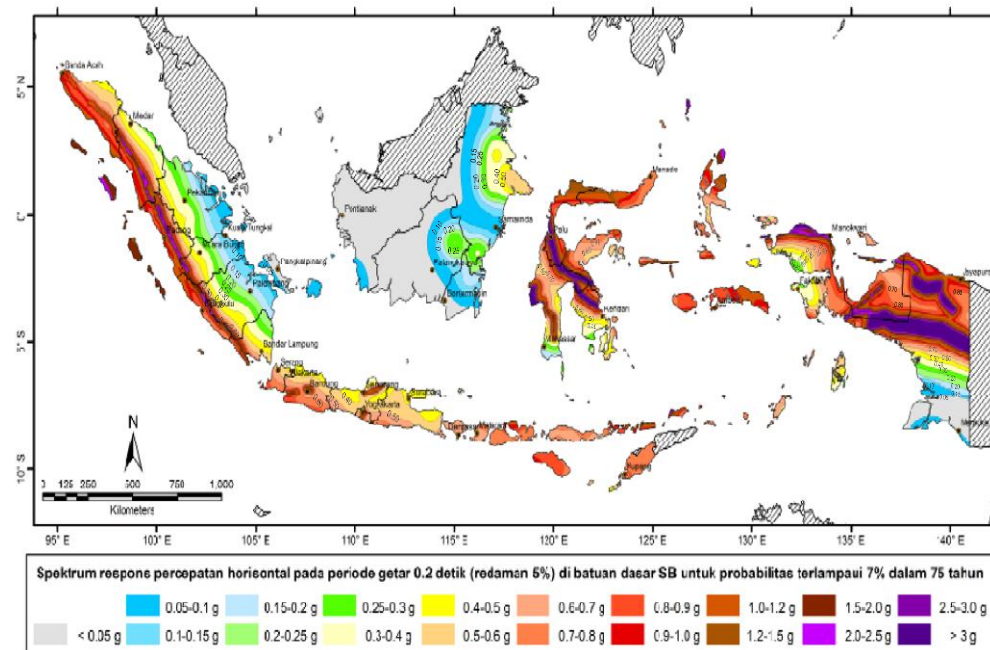
W_t adalah berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai (kN)

Koefisien respons elastik C_{sm} diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan (Gambar 2.21 hingga Gambar 2.23) sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana. Koefisien percepatan yang diperoleh berdasarkan peta gempa dikalikan dengan suatu faktor amplifikasi sesuai dengan keadaan tanah sampai kedalaman 30 m di bawah struktur jembatan.



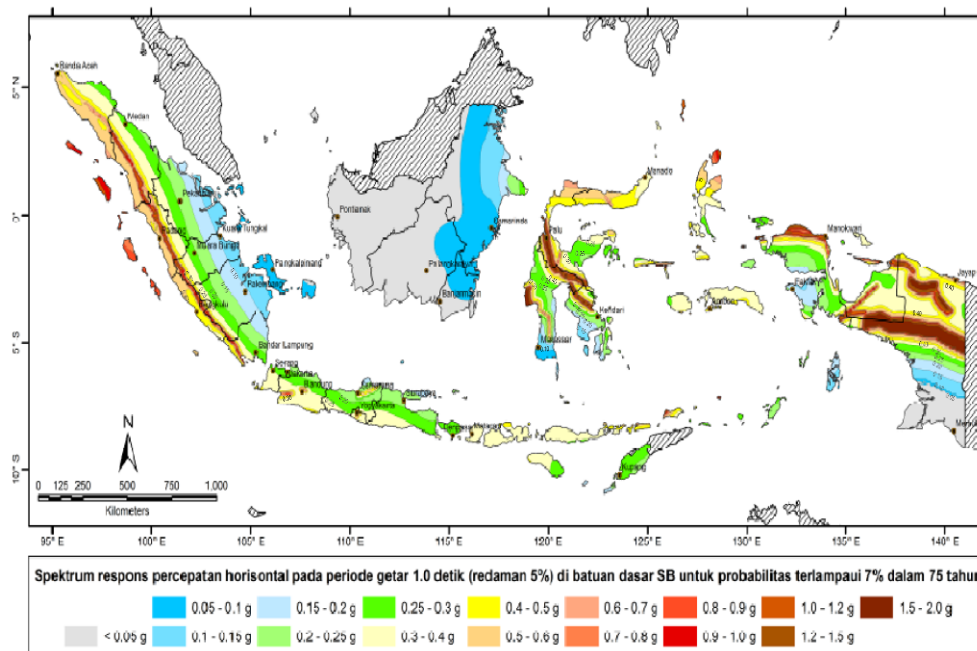
Gambar 2.21 Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (PGA) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)



Gambar 2.22 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 Detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)



Gambar 2.23 Peta Respon Spektra Percepatan 1 Detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Gaya gempa rencana pada bangunan bawah dan hubungan antara elemen struktur ditentukan dengan cara membagi gaya gempa elastis dengan faktor modifikasi respon (R) sesuai dengan Tabel 2.30 dan Tabel 2.31. Sebagai alternatif penggunaan faktor R pada Tabel 2.31 untuk hubungan struktur, sambungan monolit antara elemen struktur atau struktur, seperti hubungan kolom ke fondasi telapak dapat direncanakan untuk menerima gaya maksimum akibat plastifikasi kolom atau kolom majemuk yang berhubungan.

Apabila digunakan analisis dinamik riwayat waktu, maka faktor modifikasi respon (R) diambil sebesar 1 untuk seluruh jenis bangunan bawah dan hubungan antar elemen struktur.

Tabel 2.30 Faktor Modifikasi Respon (R) untuk Bangunan Bawah

Bangunan bawah	Kategori kepentingan		
	Sangat penting	Penting	Lainnya
Pilar tipe dinding	1,5	1,5	2,0
Tiang/kolom beton bertulang	1,5	2,0	3,0
Tiang vertikal			
Tiang miring	1,5	1,5	2,0
Kolom tunggal	1,5	2,0	3,0
Tiang baja dan komposit	1,5	3,5	5,0
Tiang vertikal			
Tiang miring	1,5	2,0	3,0
Kolom majemuk	1,5	3,5	5,0

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Tabel 2.31 Faktor Modifikasi Respon (R) untuk Hubungan Antar Elemen Struktur

Hubungan elemen struktur	Semua kategori kepentingan
Bangunan atas dengan kepala jembatan	0,8
Sambungan muai (dilatasi) pada bangunan atas	0,8
Kolom, pilar, atau tiang dengan bangunan atas	1,0
Kolom atau pilar dengan fondasi	1,0

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Untuk penentuan respon spektra di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi untuk PGA, periode pendek ($T=0,2$ detik) dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada batuan dasar (F_{PGA}), faktor amplifikasi periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1

detik (F_v). Tabel 2.32 dan Tabel 2.33 memberikan nilai-nilai F_{PGA} , F_a , dan F_v untuk berbagai klasifikasi jenis tanah.

Tabel 2.32 Faktor Amplifikasi untuk PGA dan 0,2 Detik (F_{PGA}/F_a)

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA > 0,5$
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
Batuan Keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah Keras (SC)	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
Tanah Sedang (SD)	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
Tanah Lunak (SE)	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS
Catatan : Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier					

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Keterangan:

PGA adalah percepatan puncak batuan dasar sesuai peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (Gambar 2.21).

S_s adalah parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode pendek ($T=0,2$ detik) dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun sesuai dengan Gambar 2.22.

SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik.

Tabel 2.33 Besarnya Nilai Faktor Amplifikasi untuk Periode 1 Detik (F_v)

Kelas situs	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
Batuan Keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah Keras (SC)	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
Tanah Sedang (SD)	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
Tanah Lunak (SE)	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS
Catatan : Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier					

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Keterangan:

S_1 adalah parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode 1 detik dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun sesuai dengan Gambar 2.23.

SS adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons dinamik spesifik

Respon spektra adalah nilai yang menggambarkan respon maksimum sistem berderajat kebebasan tunggal pada berbagai frekuensi alami (periode alami) teredam akibat suatu goyangan tanah. Untuk kebutuhan praktis, maka respon spektra dibuat dalam bentuk respon spektra yang sudah disederhanakan (Gambar 2.24).

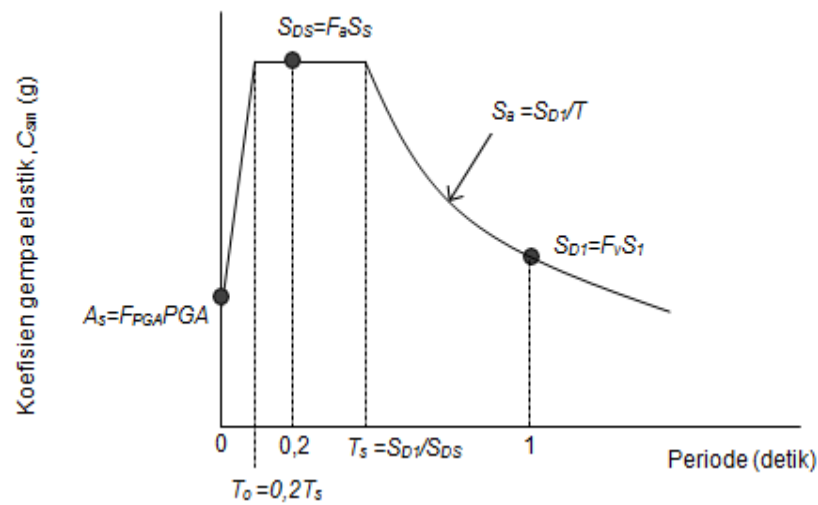
Respon spektra di permukaan tanah ditentukan dari 3 (tiga) nilai percepatan puncak yang mengacu pada peta gempa Indonesia dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (PGA, SS dan S_1), serta nilai

faktor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v . Perumusan respon spektra adalah sebagai berikut :

$$A_S = F_{PGA} \times PGA \dots\dots\dots (2.53)$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s \dots\dots\dots (2.54)$$

$$S_{D1} = F_v \times S_1 \dots\dots\dots (2.55)$$



Gambar 2.24 Bentuk Tipikal Respon Spektra di Permukaan Tanah
(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Untuk periode lebih kecil dari T_0 , koefisien respons gempa elastik (C_{sm}) didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{sm} = (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s \dots\dots\dots (2.56)$$

Untuk periode lebih besar atau sama dengan T_0 dan lebih kecil atau sama dengan T_s , respons spektra percepatan, C_{sm} adalah sama dengan S_{DS} . Untuk periode lebih besar dari T_s , koefisien respons gempa elastik (C_{sm}) didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T} \dots\dots\dots (2.57)$$

Keterangan:

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

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

$$T_0 = 0.2 T_s$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

Penggunaan masing-masing persamaan dapat membentuk respons spektra di permukaan seperti diperlihatkan pada Gambar 2.24.

Setiap jembatan harus ditetapkan dalam salah satu empat zona gempa berdasarkan spektra percepatan periode 1 detik (S_{D1}) sesuai Tabel 2.34. Kategori tersebut menggambarkan variasi risiko seismik dan digunakan untuk penentuan metode analisis, panjang tumpuan minimum, detail perencanaan kolom, serta prosedur desain fondasi dan kepala jembatan.

Tabel 2.34 Zona Gempa

Koefisien percepatan (S_{D1})	Zona gempa
$S_{D1} \leq 0,15$	1
$0,15 < S_{D1} \leq 0,30$	2
$0,30 < S_{D1} \leq 0,50$	3
$S_{D1} > 0,50$	4

(Sumber : SNI 2833-2016 Tentang Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa)

Catatan : $S_{D1} = F_v \times S_1$

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

F_v adalah nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)

S_1 adalah parameter respons spektra percepatan gempa untuk periode 1,0 detik mengacu pada Peta Gempa Indonesia dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (Gambar 2.23).

2.3.5 Aksi-aksi lainnya

a. Gesekan pada perletakkan (BF)

Gesekan pada perletakan termasuk pengaruh kekakuan geser dari perletakan elastomer. Gaya akibat gesekan pada perletakan dihitung menggunakan hanya beban tetap, dan nilai rata-rata dari koefisien gesekan (atau kekakuan geser apabila menggunakan perletakan elastomer).

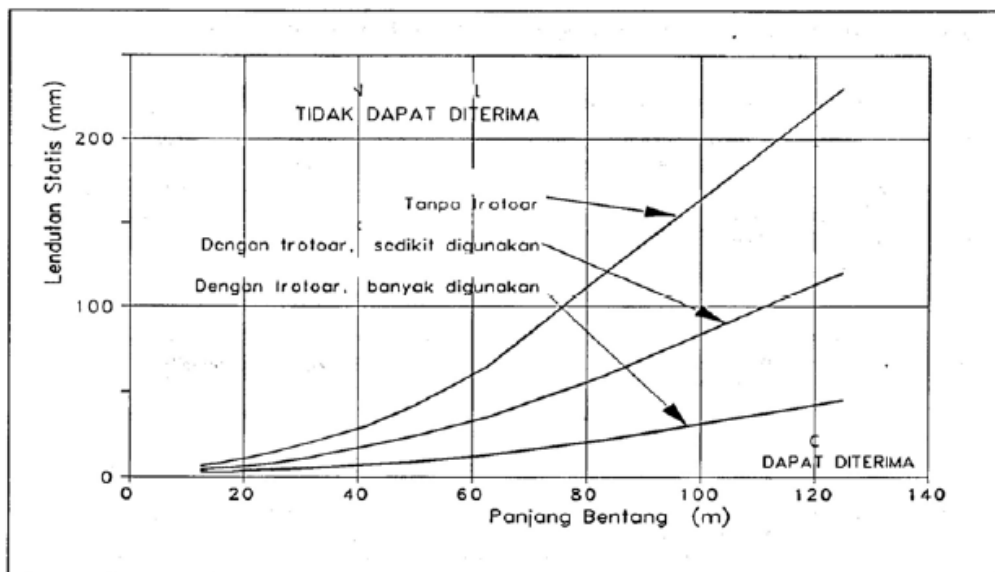
Tabel 2.35 Faktor Beban Akibat Gesekan Pada Perletakan

Tipe Beban	Faktor beban (γ_{BF})		
	Keadaan Batas Layan (γ_{BF}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{BF}^U)	
		Biasa	Terkurangi
Transien	1,00	1,3	0,8
CATATAN ⁽¹⁾ : Gaya akibat gesekan pada perletakan terjadi selama adanya pergerakan pada bangunan atas, tetapi gaya sisa mungkin terjadi setelah pergerakan berhenti. Dalam hal ini gesekan pada perletakan harus memperhitungkan adanya pengaruh tetap yang cukup besar.			

(Sumber : SNI 2833-2008 Tentang Standar Perencanaan Tahan Gempa untuk Jembatan)

b. Pengaruh getaran

Getaran yang diakibatkan oleh adanya kendaraan yang lewat di atas jembatan dan akibat pejalan kaki pada jembatan penyeberangan merupakan keadaan batas daya layan apabila tingkat getaran menimbulkan bahaya dan ketidaknyamanan seperti halnya keamanan bangunan.



Gambar 2.25 Lendutan Akibat Getaran Jembatan

(Sumber : SNI 2833-2008 Tentang Standar Perencanaan Tahan Gempa untuk Jembatan)

Getaran pada bangunan atas untuk jembatan penyeberangan harus diselidiki pada keadaan batas daya layan. Perilaku dinamis dari jembatan penyeberangan harus diselidiki secara khusus. Penyelidikan yang khusus ini tidak diperlukan untuk jembatan penyeberangan apabila memenuhi batasan-batasan sebagai berikut :

- 1) Perbandingan antara bentang dengan ketebalan dari bangunan atas kurang dari 30. Untuk jembatan menerus, bentang harus diukur sebagai jarak antara titik-titik lawan lendut untuk beban mati
- 2) Frekuensi dasar yang dihitung untuk getaran pada bangunan atas jembatan yang terlentur harus lebih besar dari 3 Hz. Apabila frekuensi yang lebih rendah tidak bisa dihindari, ketentuan dari butir c berikut bisa digunakan
- 3) Apabila getaran jembatan terlentur mempunyai frekuensi dasar yang dihitung kurang dari 3 Hz, lendutan statis maksimum jembatan dengan beban 1,0 kN harus kurang dari 2 mm.

c. **Beban pelaksanaan**

Beban pelaksanaan terdiri antara beban yang disebabkan oleh aktivitas pelaksanaan itu sendiri dan aksi lingkungan yang mungkin timbul selama waktu pelaksanaan.

2.4 Pondasi

Pondasi adalah bagian dan jembatan yang tertanam didalam tanah. Fungsi dari pondasi adalah untuk menahan beban bangunan yang berada di atasnya dan meneruskannya ke tanah dasar, baik kearah vertikal maupun kearah horizontal. Dalam perencanaan suatu konstruksi atau bangunan yang kuat, stabil dan ekonomis, perlu diperhitungkan hal-hal sebagai berikut:

- a. Daya dukung tanah serta sifat-sifat tanah
- b. Jenis serta besar kecilnya bangunan yang dibuat
- c. Keadaan lingkungan lokasi pelaksanaan
- d. Peralatan yang tersedia
- e. Waktu pelaksanaan yang tersedia

2.4.1 Jenis-jenis pondasi

Pondasi terbagi menjadi 2 bagian yaitu:

a. **Pondasi dangkal (pondasi langsung)**

Pondasi dangkal adalah pondasi yang mendukung bagian bawah secara langsung pada tanah. Pondasi ini dapat dibagi menjadi:

- 1) Pondasi menerus (*continous footing*)
- 2) Pondasi telapak (*footing*)
- 3) Pondasi setempat (*individual footing*)

b. **Pondasi dalam (pondasi tak langsung)**

Pondasi dalam adalah beban pondasi yang dipikul akan diteruskan kelapisan tanah yang mampu memikulnya. Untuk menyalurkan beban

bangunan tersebut kelapisan tanah keras maka dibuat suatu konstruksi penerus yang disebut pondasi tiang atau pondasi sumuran. Pondasi dalam terdiri dari:

1) Pondasi Tiang Pancang

Pondasi tiang pancang digunakan bila tanah pendukung berada pada kedalaman > 8 meter, yang berdasarkan tes penyelidikan dilapangan. Pondasi tiang adalah suatu konstruksi yang mampu menahan gaya orthogonal ke sumbu tiang dengan jalan menyerap lenturan. Pondasi tiang dibuat menjadi satu kesatuan yang monolit dengan menyatukan pangkal tiang pancang yang terdapat di bawah konstruksi dengan tumpuan pondasi. Pondasi tiang berfungsi untuk menyalurkan beban-beban yang diterimanya dari konstruksi ke lapisan tanah yang dalam.

2) Pondasi Sumuran

Pondasi sumuran digunakan bila tanah pendukung berada pada kedalaman 2-8 meter. Bentuk penampang pondasi ini adalah bundar, segi empat dan oval.

2.4.2 Syarat-syarat pondasi

Struktur pondasi dari suatu bangunan harus direncanakan sedemikian rupa sehingga proses pemindahan beban bangunan ke tanah dasar dapat berlangsung dengan baik dan aman. Untuk keperluan tersebut, pada perencanaan pondasi harus mempertimbangkan beberapa persyaratan berikut:

- a. Pondasi harus cukup kuat untuk mencegah penurunan (settlement) dan perputaran (rotasi) yang berlebihan
- b. Tidak terjadi penurunan setempat yang terlalu besar bila dibandingkan dengan penurunann pondasi di dekatnya
- c. Aman terhadap bahaya longsor
- d. Aman terhadap bahaya guling

2.4.3 Daya dukung tanah

Jenis dan besar kecilnya ukuran pondasi sangat ditentukan oleh kekuatan atau daya dukung tanah di bawah pondasi tersebut sebagai contoh untuk jenis pondasi telapak tunggal, semakin kuat daya dukung tanah, semakin kecil ukuran pondasi yang akan direncanakan. Sebaliknya, semakin lemah daya dukung tanah, semakin besar ukuran pondasi yang akan direncanakan. Untuk tanah dengan daya dukung yang lemah ini, sebaiknya digunakan jenis pondasi lain, misalnya pondasi sumuran bahkan digunakan tiang pancang.

Kekuatan atau daya dukung tanah pada umumnya dapat diketahui melalui berbagai usaha berikut peraturan bangunan setempat yang dikeluarkan oleh lembaga terkait, pengalaman tentang pembuatan pondasi yang sudah ada, atau keterangan yang berkaitan dengan pondasi di sekitarnya ataupun hasil pemeriksaan atau pengujian tanah baik pengujian di laboratorium maupun pengujian di lapangan.

a. Daya dukung pondasi berdasarkan kekuatan material

Daya dukung tiang pancang berdasarkan kekuatan materialnya merupakan bagian sangat penting dalam perencanaan tiang pancang. Perhitungan daya dukung berdasarkan kekuatan materialnya bisa terlihat dalam rumus di bawah ini :

Kuat tekan beton : (f_c')

Tegangan ijin beton : $(f_c') = 0,3 \times f_c \times 1000 \dots \dots \dots (2.55)$

Luas tampang tiang pancang : $(A) = \frac{\pi}{4} \times D^2 \dots \dots \dots (2.56)$

Panjang tiang pancang : (L)

Berat tiang pancang : $(W) = A \times L \times W_c \dots \dots \dots (2.58)$

Daya dukung ijin tiang pancang : $(P_{ijin}) = A \times f_c - W \dots \dots \dots (2.59)$

b. Daya dukung pondasi berdasarkan nilai SPT

SPT (*Standard Penetration Test*) sering kali digunakan untuk mendapatkan daya dukung tanah secara langsung di lokasi SPT merupakan tes dinamis yang dilakukan dalam suatu lubang bor dengan memasukkan tabung sampel berdiameter dalam 35 mm sedalam 305 mm dengan menggunakan massa pendorong (palu) seberat 63,5 kg yang jatuh bebas dari ketinggian 760 mm, banyaknya pukulan palu tersebut untuk memasukkan tabung sampel sedalam 305 mm dinyatakan sebagai nilai N.

Daya dukung ijin tiang pancang :

$$1) \text{ Pasir halus} \quad : (Q_{ult}) = 40 \times N \times \frac{L}{8} \dots\dots\dots(2.60)$$

$$(Q_{ult}) = 400 \times N^c \dots\dots\dots(2.61)$$

$$2) \text{ Pasir kasar} \quad : (Q_{ult}) = 40 \times N \times \frac{L}{8} \dots\dots\dots(2.62)$$

$$(Q_{ult}) = 300 \times N^c \dots\dots\dots(2.63)$$

Daya dukung ijin tiang bor

$$1) \text{ Pasir halus} \quad : (Q_{ult}) = 12 \times N \times \frac{L}{8} \dots\dots\dots (2.64)$$

$$(Q_{ult}) = 130 \times N^c \dots\dots\dots(2.65)$$

$$\text{Luas penampang tiang pancang} : (A) = \frac{\pi}{4} \times D^2 \dots\dots\dots(2.66)$$

$$\text{Angka aman} \quad : (S_f) = 3$$

$$\text{Daya dukung ijin tiang pancang} : (P_{ijin}) = \frac{(A \times Q_{ult})}{S_f} \dots\dots\dots(2.67)$$

2.5 Manajemen Proyek

Manajemen adalah kemampuan untuk memperoleh hasil dalam rangka pencapaian tujuan melalui kegiatan sekelompok orang. Untuk itu, tujuan perlu ditetapkan terlebih dahulu, sebelum melibatkan sekelompok orang yang mempunyai kemampuan atau keahlian dalam rangka pencapaian tujuan yang dengan batas-batas tertentu (Sukanto Reksohadiprodjo, 1983).

Manajemen proyek adalah usaha merencanakan, mengorganisasi, mengarahkan, mengkoordinasi serta mengawasi kegiatan dalam proyek sedemikian rupa sehingga sesuai dengan jadwal waktu serta anggaran yang telah ditetapkan (Sukanto Reksohadiprodjo, 1983).

Manajemen konstruksi mengacu pada bagaimana sumber daya tersedia sehingga dapat diaplikasikan dengan baik. Lima sumber daya yang digunakan untuk konstruksi, yaitu :

- a. *Manpower* (tenaga kerja)
- b. *Machines* (alat dan peralatan)
- c. *Material* (bahan bangunan)
- d. *Money* (uang)
- e. *Method* (metode)

Manajemen melibatkan waktu dan pengaplikasian kelima sumber daya di atas untuk membangun suatu proyek konstruksi. Banyak hal yang harus dipertimbangkan pada saat mengatur suatu proyek dan secara sukses mengaplikasikan kelima sumber daya tersebut.

Fungsi-fungsi manajemen menurut George R. Terry adalah sebagai berikut :

- a. *Planning* (perencanaan)

Planning/pengorganisasian merupakan suatu tindakan pengambilan keputusan data, informasi, asumsi, atau fakta kegiatan yang dipilih dan akan dilakukan pada masa mendatang. Bentuk tindakan tersebut antara lain:

- 1) Menetapkan tujuan dan sasaran usaha.
- 2) Menyusun rencana induk jangka panjang dan pendek.
- 3) Menyumbang strategi dan prosedur operasi.
- 4) Menyiapkan pendanaan serta standar kualitas yang diharapkan.

Manfaat dari fungsi perencanaan ini adalah sebagai alat pengawas maupun pengendalian kegiatan, atau pedoman pelaksanaan kegiatan, atau

pedoman pelaksanaan kegiatan, serta sarana untuk memilih dan menetapkan kegiatan yang diperlukan.

b. *Organizing* (pengorganisasian)

Pengorganisasian adalah suatu tindakan mempersatukan kumpulan kegiatan manusia yang mempunyai pekerjaan masing-masing saling berhubungan satu sama lain dengan tata cara tertentu. Tindakan tersebut antara lain berupa:

- 1) Membagi pekerjaan ke dalam tugas operasional.
- 2) Menggabungkan jabatan ke dalam unit terkait.
- 3) Memilih dan menempatkan orang-orang pada pekerjaan yang sesuai.
- 4) Menyesuaikan wewenang dan tanggung jawab masing-masing personel.

Manfaat dari fungsi organisasi merupakan pedoman pelaksanaan fungsi, pembagian tugas serta hubungan tanggung jawab serta delegasi kewenangannya terlihat jelas.

c. *Actuating* (pelaksanaan)

Fungsi pelaksanaan adalah yang terpenting di antara fungsi lainnya, karena fungsi ini ditekankan pada hubungan dan kegiatan langsung para anggota organisasi, sementara perencanaan dan peengorganisasian lebih bersifat abstrak atau tidak langsung. George R. Terry menguraikan bahwa pelaksanaan adalah upaya untuk menggerakkan anggota organisasi sesuai dengan keinginan dan usaha mereka untuk mencapai tujuan perusahaan serta anggota di organisasi karena setiap anggota pasti juga memiliki tujuan pribadi.

Tindakan yang dilakukan dalam fungsi *actuating* antara lain:

- 1) Mengkoordinasikan pelaksanaan kegiatan.
- 2) Berkomunikasi secara efektif.
- 3) Mendistribusikan tugas, wewenang, dan tanggung jawab.

- 4) Memberikan pengarahan, penugasan, dan motivasi.
- 5) Berusaha memperbaiki pengarahan sesuai petunjuk pengawasan.

Manfaat dari fungsi pelaksanaan ini adalah terciptanya keseimbangan tugas, hak, dan kewajiban masing-masing bagian dalam organisasi, dan mendorong tercapainya efisiensi serta kebersamaan dalam bekerja sama untuk tujuan bersama.

d. *Controlling* (pengendalian)

Pengendalian manajemen merupakan usaha yang tersistematis dari perusahaan untuk mencapai tujuannya dengan cara membandingkan prestasi kerja dengan rencana dan membuat tindakan yang tepat untuk mengoreksi perbedaan yang penting.

Pengendalian merupakan tindakan pengukuran kualitas dan evaluasi kinerja. Tindakan ini juga diikuti dengan perbaikan yang harus diambil terhadap penyimpangan yang terjadi, khususnya di luar batas-batas toleransi. Tindakan tersebut meliputi, antara lain:

- 1) Mengukur kualitas hasil.
- 2) Membandingkan hasil terhadap standar kualitas.
- 3) Mengevaluasi penyimpangan yang terjadi.
- 4) Memberikan saran-saran perbaikan.
- 5) Menyusun laporan kegiatan.

Manfaat dari fungsi pengendalian adalah memperkecil kemungkinan kesalahan yang terjadi dari segi kualitas, kuantitas, biaya maupun waktu.

2.5.1 Rencana anggaran biaya

Rencana anggaran biaya adalah seni memperkirakan kemungkinan jumlah biaya yang diperlukan untuk suatu kegiatan yang didasarkan pada informasi yang dimiliki pada saat itu.

Yang dimaksud dengan rencana dan anggaran dalam hal ini adalah merencanakan suatu bangunan dalam bentuk dan faedah dalam penggunaannya, beserta besar biaya yang diperlukan dalam susunan pelaksanaan dalam bidang administrasi maupun pelaksanaan dalam bidang teknik (Ir. J.A.Mukomuko, 1985).

Tujuan dari rencana anggaran biaya adalah untuk memberikan perkiraan yang paling baik mengenai biaya akhir dari suatu proyek. Rencana anggaran biaya disusun mencakup semua biaya konstruksi dan hal lainnya mengenai biaya proyek tetapi tidak termasuk pengembalian modal pengembang dan hal-hal khusus misalnya imbalan jasa perantara.

Rencana anggaran biaya dibuat oleh berbagai pihak dengan berbagai maksud dan sesuai kepentingan masing-masing. Bagi pemilik proyek rencana anggaran biaya berguna sebagai alat bantu untuk menyelesaikan biaya investasi modal yang dibutuhkan, mengatur perputaran pembiayaan, dan kelayakan ekonomi proyek. Bagi konsultan, rencana anggaran biaya berguna sebagai alat bantu untuk menilai kelayakan harga penawaran dari kontraktor dan untuk menghitung kemajuan pekerjaan. Sedangkan bagi kontraktor, rencana anggaran biaya berguna untuk estimasi harga demi kepentingan penawaran pada pelelangan serta pengendalian proyek khususnya pengendalian biaya.

Perhitungan kuantitas pekerjaan merupakan hal yang sangat penting dalam suatu pembangunan konstruksi, guna untuk mengetahui berapa banyak bahan, tenaga kerja, dan alat berat atau kendaraan yang dibutuhkan. Biasanya perhitungan kuantitas pekerjaan dibuat dalam sebuah daftar.

a. Menganalisa biaya pekerjaan

Analisa biaya suatu pekerjaan dilakukan per komponen pekerjaan yang dihitung secara teliti pada kuantitas pekerjaan yang dapat dilihat pada daftar kuantitas pekerjaan. Hasil dari penjumlahan konstruksi tersebut dengan rekapitulasi.

b. Membuat daftar harga bahan dan upah

Harga bahan dan upah yang standar dikeluarkan oleh instansi pemerintah, dalam suatu provinsi untuk daerah yang satu dengan daerah yang lainnya harga satu bahan dan upah berbeda-beda sesuai dengan sulit mudahnya daerah tersebut dijangkau.

c. Rekapitulasi biaya pekerjaan

Untuk mengetahui besarnya rencana anggaran biaya suatu pekerjaan yang dihitung, maka harus dibuat rekapitulasi dari masing-masing pekerjaan agar lebih mudah dibaca dan dipahami.

d. Analisa alat berat

Pemakaian alat berat dalam pekerjaan teknik sipil, pertambangan dan pekerjaan tanah dalam skala besar hampir tidak dapat dihindari. Bahkan alat-alat tersebut merupakan faktor dominan yang menentukan keberhasilan suatu pekerjaan, agar tepat waktu dan sesuai dengan yang diisyaratkan.

Ada dua hal yang menjadi pertimbangan dalam membuat keputusan penggunaan alat berat, yaitu :

a. Prinsip dasar perhitungan alat berat

Perhitungan produksi alat berat adalah kemampuan kerja alat tersebut sesuai fungsi dalam satu jam kerja. Perhitungan produksi kerja alat bertumpu pada tiga hal yaitu tenaga yang dibutuhkan, tenaga yang tersedia, dan tenaga yang digunakan.

b. Prinsip dasar perhitungan biaya pemilikan dan operasi alat berat

Biaya pemilikan dan operasi adalah jumlah biaya yang diperlukan untuk mengoperasikan alat berat dalam satu jam kerja, baik biaya-biaya tetap maupun biaya variable. Biaya pemilikan terdiri dari biaya penyusutan,

biaya bunga, biaya pajak, biaya pelumas, filter, ban/roda rantai, reperi serta upah operator.

2.5.2 *Network planning* (NWP)

Network planning adalah hubungan ketergantungan antar bagian-bagian pekerjaan (*variables*) yang digambarkan atau divisualisasikan dalam diagram *network*. Dengan demikian diketahui bagian-bagian pekerjaan mana yang harus didahulukan, bila perlu dilembur (tambah biaya) pekerjaan mana yang tidak perlu tergesa-gesa sehingga alat dan orang dapat digeser ke tempat lain demi efisiensi (Drs. Sofwan Badri, 1983).

Analisa-analisa *network planning* akan membantu :

- a. *Time scheduling* urutan pekerjaan yang efisien.
- b. Pembagian merata waktu, tenaga dan biaya.
- c. *Rescheduling* bila ada kelambatan-kelambatan penyelesaian.
- d. Menentukan *Trade-Off* /pertukaran waktu dengan biaya yang efisien.
- e. Membuka probabilitas/kemungkinan-kemungkinan yang lain dalam menyelesaikan proyek.
- f. Merencanakan proyek yang kompleks.

Keuntungan penggunaan *network planning* ini adalah :

- a. Merencanakan, menjadwalkan dan mengawasi proyek secara logis.
- b. Memikirkan secara menyeluruh, tetapi juga mendetail dari proyek.
- c. Mendokumentasikan dan mengkomunikasikan rencana jadwal, dan alternatif-alternatif lain penyelesaian proyek dengan tambahan biaya.
- d. Mengawasi proyek dengan lebih efisien, sebab hanya jalur-jalur kritis saja yang perlu konsentrasi pengawasan ketat.

Sebelum menggambar diagram *network planning* perlu diingat bahwa:

- a. Panjang, pendek maupun kemiringan anak panah sama sekali tidak mempunyai arti, dalam pengertian letak pekerjaan, banyaknya durasi maupun sumber daya yang dibutuhkan.
- b. Aktivitas-aktivitas apa yang meendahului dan aktivitas-aktivitas apa yang mengikuti.
- c. Aktivitas-aktivitas apa yang dapat bersama-sama.
- d. Aktivitas-aktivitas itu dibatasi saat mulai dan saat selesai.
- e. Waktu, biaya dan sumber daya yang dibutuhkan dari aktivitas-aktivitas itu.
- f. Kepala anak panah menjadi pedoman arah dari tiap kegiatan.
- g. Besar kecilnya lingkaran juga tidak memiliki arti, dalam pengertian penting tidaknya suatu peristiwa.

2.5.3 Diagram batang (*Barchart*)

Rencana kerja yang paling sering dan banyak digunakan adalah diagram batang (*barchart*) atau *Gantt Chart*. *Barchart* digunakan secara luas dalam proyek konstruksi karena sederhana, mudah dalam pembuatannya dan mudah dimengerti oleh pemakainya.

Barchart adalah sekumpulan daftar kegiatan yang disusun dalam kolom arah vertical. Kolom arah horizontal menunjukkan skala waktu. Saat mulai dan akhir dari sebuah kegiatan dapat terlihat dengan jelas sedangkan durasi kegiatan digambarkan oleh panjangnya diagram batang.

Barchart memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

- a. Mudah dalam pembuatan dan persiapannya
- b. Memiliki bentuk yang mudah dimengerti
- c. Bila digabungkan dengan metode lain seperti kurva S dapat dipakai lebih jauh sebagai pengendalian biaya.

Meskipun memiliki segi-segi keuntungan tersebut, penggunaan metode *barchart* terbatas karena kendala-kendala berikut: (Callahan,1992)

- a. Tidak menunjukkan secara spesifik hubungan ketergantungan antara satu kegiatan dengan yang lain, sehingga sulit untuk mengetahui dampak yang diakibatkan oleh keterlambatan satu kegiatan terhadap jadwal keseluruhan proyek.
- b. Sukar mengadakan perbaikan atau pembaruan, karena umumnya harus dilakukan dengan membuat bagan balok baru, padahal tanpa adanya pembaruan segera menjadi kuno dan menurut daya gunanya.
- c. Untuk proyek berukuran sedang dan besar, lebih-lebih yang bersifat kompleks, penggunaan bagan balok akan menghadapi kesulitan. Aturan umum penggunaan penjadwalan dengan *barchart* menyatakan bahwa metode ini hanya digunakan untuk proyek yang kurang dari 100 kegiatan, karena jika lebih dari 100, maka akan menjadi sulit untuk dibaca dan digunakan.

2.5.4 Kurva S

Kurva S adalah hasil plot dari *barchart*, bertujuan untuk mempermudah melihat kegiatan-kegiatan yang masuk dalam suatu jangka waktu pengamatan proses pelaksanaan proyek (Callahan,1992).

Kurva S dapat pula diartikan sebagai grafik yang dibuat dengan sumbu vertikal sebagai nilai kumulatif biaya atau penyelesaian (*progress*) kegiatan dan sumbu horizontal sebagai waktu (Soeharto, 1997).

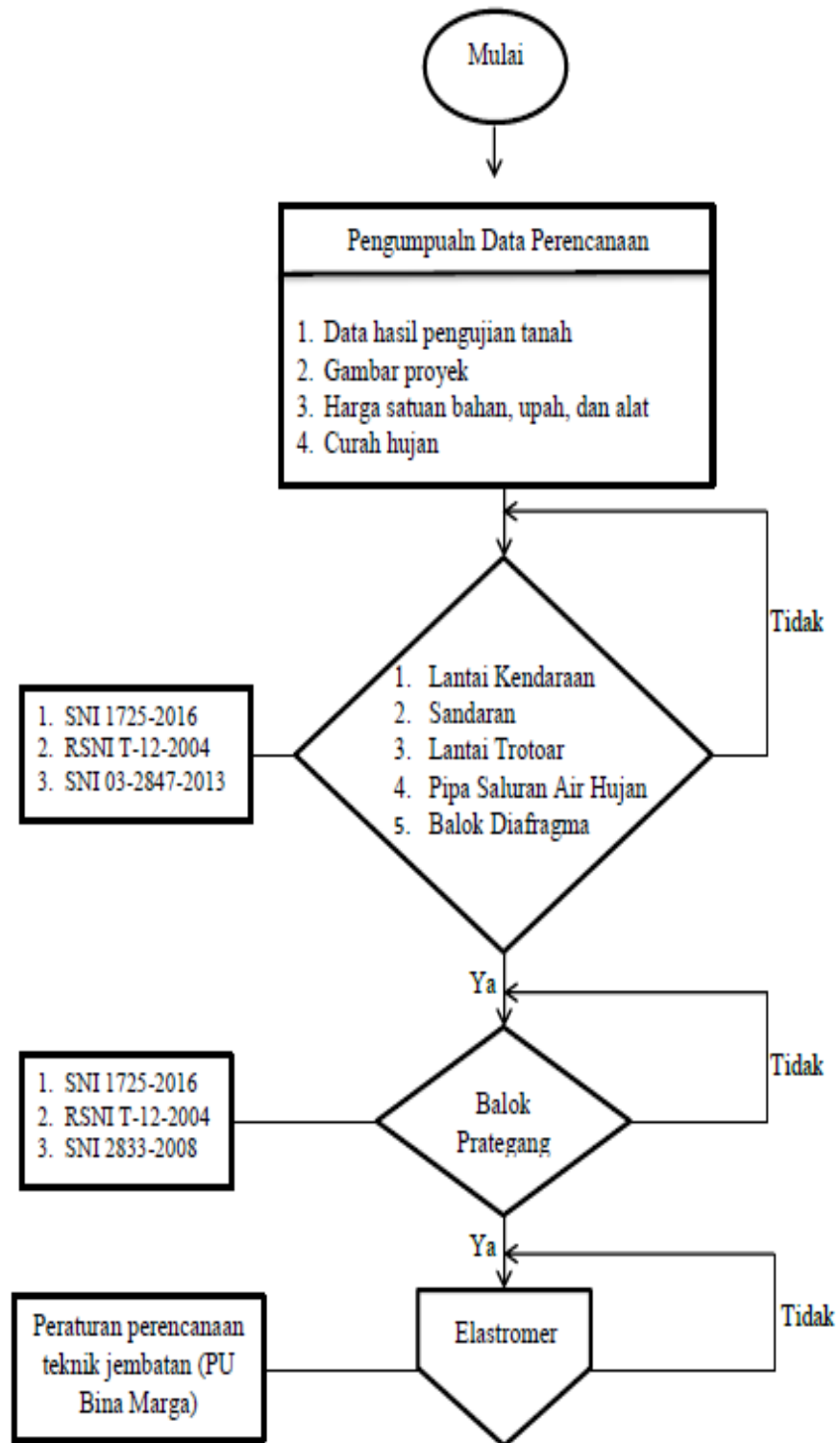
Kurva S dapat menunjukkan kemampuan proyek berdasarkan kegiatan, waktu dan bobot pekerjaan yang dipresentasikan sebagai persentase kumulatif dari seluruh kegiatan proyek. Visualisasi kurva S memberikan informasi mengenai kemajuan proyek dengan membandingkan terhadap jadwal rencana (Husen, 2011).

Dari beberapa definisi di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa kegunaan dari kurva S adalah sebagai berikut :

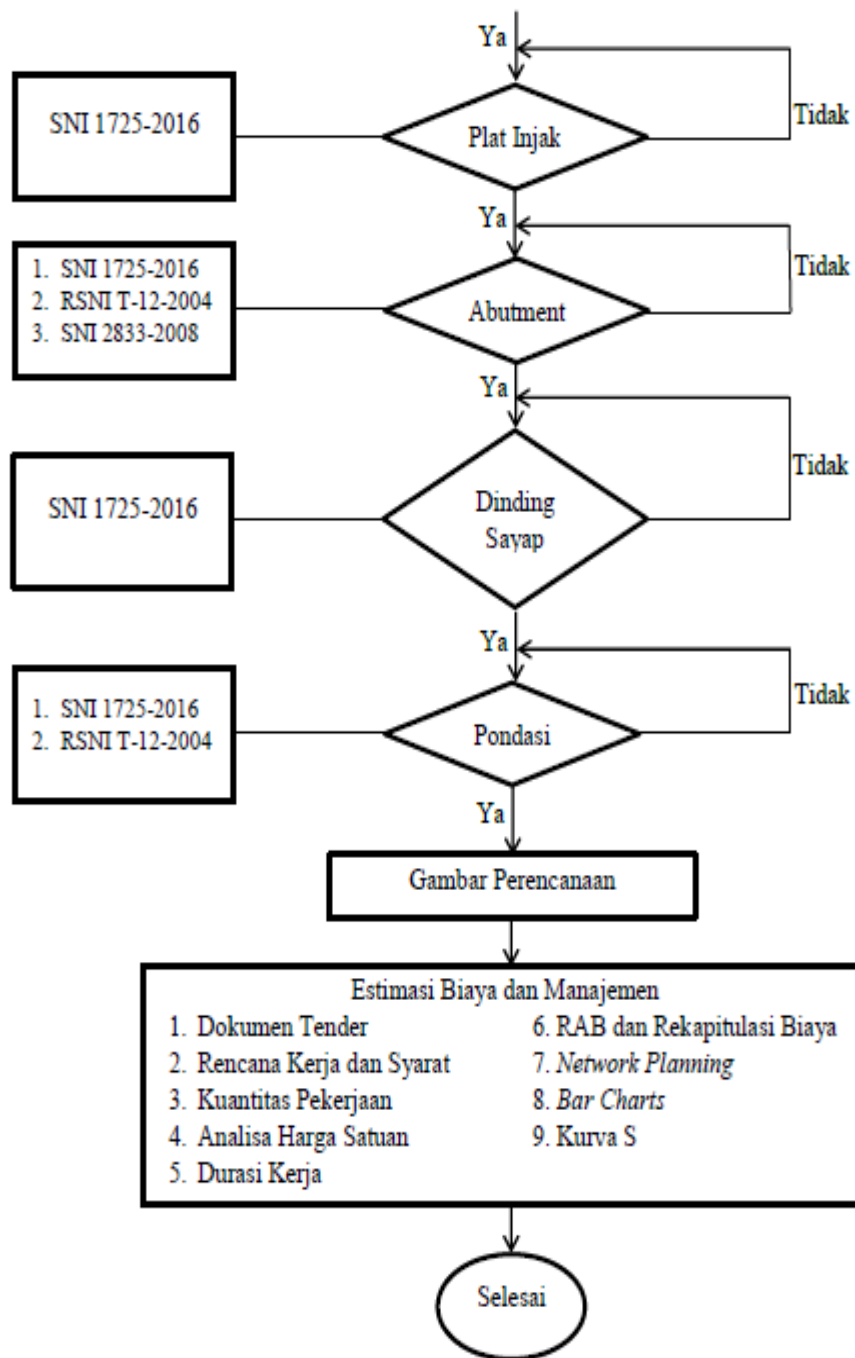
- a. Untuk menganalisis kemajuan/*progress* suatu proyek secara keseluruhan.
- b. Untuk mengetahui pengeluaran dan kebutuhan biaya pelaksanaan proyek.
- c. Untuk mengontrol penyimpangan yang terjadi pada proyek dengan membandingkan kurva S rencana dengan kurva S aktual (Imam Soeharto, 1998).

2.6 Analisis Data dan Diagram Alir

Pada proses analisa data, data yang telah didapatkan diolah dan diterjemahkan ke dalam bentuk yang lebih mudah dipahami sehingga akan menghasilkan perencanaan dan kesimpulan yang diinginkan. Data-data yang didapatkan dianalisis dengan baik dan benar sesuai standar yang akan dipakai. Berikut gambaran mengenai langkah awal sampai akhir penyusunan tugas akhir yang dapat dilihat dalam bentuk diagram alir.



Gambar 2.26 Diagram Alir Perencanaan



Gambar 2.26 (Lanjutan) Diagram Alir Perencanaan