

# STRUKTURAL FUNICULAR: KABEL DAN PELENGKUNG

## 1.1 PENGANTAR STRUKTUR FUNICULAR

Ada jenis-jenis struktur yang telah banyak digunakan oleh perencana gedung yaitu struktur *pelengkung* dan struktur *kabel menggantung*. Kedua jenis struktur yang berbeda ini mempunyai karakteristik dasar struktural yang sama. Khususnya dalam hal perilaku strukturnya.

Kabel yang mengalami beban eksternal tentu akan mengalami deformasi yang bergantung pada besar dan lokasi beban eksternal. Bentuk yang dapat khusus untuk beban itu ialah bentuk *funicular* (sebutan funicular berasal dari bahasa latin yang berarti “tali”). Hanya gaya tarik yang dapat timbul pada kabel. Dengan membalik bentuk struktur yang diperoleh tadi, kita akan mendapat struktur baru yang benar-benar analog dengan struktur kabel hanya gaya yang dialami adalah gaya tekan, bukan tarik. Secara teoritis bentuk yang terakhir ini dapat diperoleh dengan menumpuk elemen-elemen yang dihubungkan secara tidak kaku (rantai tekan) dan struktur yang diperoleh akan stabil. Akan tetapi, sedikit variasi pada beban akan berarti bahwa strukturnya tidak lagi merupakan bentuk *funicular* sehingga akan timbul momen lentur dan gaya geser akibat beban yang baru ini. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya keruntuhan pada struktur tersebut sebagai akibat dari hubungan antara elemen-elemen yang tidak kaku dan tidak dapat memikul momen lentur. Karena bentuk struktur tarik dan tekan yang disebutkan di atas mempunyai hubungan dengan tali tergantung yang dibebani, maka kedua jenis struktur disebut sebagai struktur *funicular*.

## 1.2 PRINSIP-PRINSIP UMUM BENTUK FUNICULAR

Hal penting yang mendasar dalam mempelajari pelengkung dan kabel ialah pengetahuan mengenai kurva atau kumpulan segmen elemen-elemen garis lurus yang membentuk *funicular* untuk pembebanan yang diberikan. Secara alami bentuk *funicular* akan diperoleh apabila kabel yang bebas berubah bentuk, kita bebani. Kabel yang berpenampang melintang dan hanya memikul berat, dengan sendirinya akan mempunyai bentuk *catenary*. Kabel yang memikul beban vertikal yang terdistribusi secara horizontal di sepanjang kabel. Kabel yang memikul beban-beban terpusat (dengan mengabaikan berat sendirinya) akan mempunyai segmen-segmen garis lurus.

Hanya ada satu bentuk struktur yang funicular untuk satu pembebanan yang diberikan. Akan tetapi, ada banyak kelompok struktur yang mempunyai bentuk umum sama untuk sembarang kondisi pembebanan. Sebagai contoh semua struktur dalam satu kelompok mempunyai bentuk sama, tetapi dimensi fisiknya berbeda. Di dalam satu kelompok, proporsi relatif dari semua bentuk identik. Contoh seperti ini dapat diperoleh secara mudah dengan menggunakan sederetan kabel fleksibel yang berbeda panjangnya. Semuanya akan berdeformasi dengan cara serupa dengan aksi bebannya, tetapi besar aktual deformasi tersebut akan berbeda-beda.

Besar gaya yang timbul pada pelengkung ataupun kabel tergantung pada tinggi relatif bentuk funicular dibandingkan dengan panjangnya. Selain itu, besarnya juga tergantung pada lokasi dan besar beban yang bekerja. Semakin tinggi pelengkung atau kabel, berarti semakin kecil gaya yang akan timbul pada struktur, begitu pula sebaliknya. Gaya reaksi yang timbul ujung-ujung pelengkung atau kabel juga tergantung pada parameter-parameter tersebut. Reaksi ujung mempunyai komponen vertikal dan

horizontal yang harus ditahan oleh fondasi atau oleh elemen struktural lainnya, misalnya batang tarik.

Pada struktur funicular, bentuk strukturnya selalu berubah tergantung pada beban eksternal. Apabila dibebani maka struktur tersebut akan tetap lurus. Bentuk funicular yang cocok untuk beban kontinu juga harus berubah secara kontinu. Dengan cara yang sama, apabila bentuk struktur berubah tanpa adanya perubahan beban, maka lentur akan terjadi. Dicatat bahwa apabila bentuk struktur funicular di gambar bersama dengan bentuk struktur aktual yang sedang ditinjau, maka besar deviasi struktur aktual dari bentuk funicular umumnya menunjukkan besar momen lentur pada struktur aktual.

### **1.3 ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR KABEL**

#### **1.3.1 Pendahuluan**

Struktur kabel banyak digunakan pada gedung, misalnya struktur kabel yang menggunakan tali. Sekalipun kabel telah lama digunakan, pengertian teoritisnya masih belum lama dikembangkan. Teori mengenai struktur ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1595, yaitu sejak Fausto Veranzio menerbitkan gambar jembatan gantung. Selanjutnya pada tahun 1741 dibangun jembatan rantai di Durham County Inggris. Jembatan ini mungkin merupakan jembatan gantung pertama di Eropa.

Titik balik penting dalam evolusi jembatan gantung terjadi pada awal abad ke-19 di Amerika, yaitu pada saat James Findley membangun jembatannya untuk pertama kali pada tahun 1810 di Jacobs Creek.

Banyak jembatan gantung terkenal, misalnya jembatan Clinton di Inggris (oleh Isambard Brunel) dan jembatan Brooklyn (oleh John Roebling). Banyak pula jembatan modern yang dibangun setelah itu. Penggunaan kabel pada gedung tidak begitu cepat karena pada saat itu belum ada kebutuhan akan bentang yang sangat besar. Shookhov pada tahun 1896 dianggap sebagai awal mulainya aplikasi kabel pada gedung modern. Struktur-struktur yang dibangun berikutnya adalah paviliun lokomotif pada Chicago World's Fair pada tahun 1933 dan Livestock Judging yang dibangun di Raleigh, North Carolina pada sekitar tahun 1950. Sejak itu sangat banyak dibangun gedung yang menggunakan struktural kabel.

#### **1.3.2 Struktur Kabel Gantung Beban-beban Terpusat**

Reaksi-reaksi akan timbul pada tumpuan kabel agar keseluruhan kabel berada dalam keseimbangan. Kabel itu sendiri biasanya memberikan gaya pada tumpuan yang berarah ke dalam dan ke bawah. Gaya reaksi yang terjadi sama besar dan berlawanan arah dengan gaya tersebut. Biasanya tidak mungkin untuk menghitung reaksi ini secara langsung hanya dengan meninjau keseimbangan seluruh kabel. Gaya reaksi biasanya dinyatakan dalam komponen horizontal dan vertikal. Karena setiap reaksi mempunyai dua komponen, maka total ada empat, sementara hanya ada dua persamaan keseimbangan independen untuk mencarinya.

Hal yang juga perlu ditentukan adalah geometri kabel secara akurat. Bentuk akurat dari kabel yang dibebani tergantung pada kondisi pembebanan yang ada dan tidak boleh ditentukan sembarang oleh perencana. Saat maksimum dapat saja ditentukan terlebih dahulu, bukan bentuk kabel itu sendiri. Mencari bentuk akurat dari kabel merupakan tujuan utama dalam prosedur analisis.

Gaya dalam elemen kabel selalu berupa tarik murni. Fungsi suatu struktur antara lain adalah pemikul momen dan gaya geser yang ditimbulkan oleh beban eksternal. Pada kabel maupun pelengkung *funicular* gaya geser eksternal pada setiap potongan diimbangi oleh gaya geser tahanan internal yang diberikan oleh komponen vertikal dari gaya aksial kabel atau pelengkung. Begitu pula halnya dengan momen lentur eksternal. Momen ini diimbangi oleh momen lentur tahanan internal yang merupakan kopel dari komponen horizontal gaya aksial pada elemen struktur funicular dan reaksi horizontal. Gaya horizontal yang disebut terakhir ini dapat merupakan gaya pada fondasi atau gaya internal pada batang tarik atau tekan (apabila batang ini ada) pada struktur pelengkung atau kabel, berturut-turut.

### 1.3.3 Kabel Tergantung Beban-beban Terdistribusi Merata

Kabel atau pelengkung yang memikul beban terbagi rata dapat dianalisis dengan menggunakan cara-cara yang telah disebutkan untuk beban terpusat. Akan tetapi karena bebannya berbeda, maka perlu ada modifikasi sedikit pada metode potongan dalam analisis akibat beban terbagi rata.

### 1.3.4 Persamaan Funicular Umum

Dalam analisis kabel kita dapat menggunakan cara yang lebih umum daripada yang telah dijelaskan sebelum ini. Cara umum ini dapat diterapkan pada struktur yang lebih kompleks misalnya yang tidak dibebani secara sistematis atau tumpuan kabel tidak terletak pada level yang sama.

### 1.3.5 Panjang Kabel

Panjang kabel dapat dihitung dengan meninjau ekspresi dasar bentuk kabel terdeformasi. Untuk kabel yang dibebani terbagi rata dan mempunyai titik tumpuan selevel, misalkan  $L_{total}$  adalah panjang total kabel  $L_h$  adalah bentang dan  $h$  adalah sag maksimum. Panjang total kabel dapat dibuktikan mendekati nilai:

$$L_{total} = L_h \left( 1 + \frac{8}{3} h^2 / L_h^2 - \frac{32}{5} h^4 / L_h^4 \right)$$

### 1.3.6 Efek Angin

Masalah kritis dalam desain setiap struktur atap yang menggunakan kabel adalah efek dinamis yang diakibatkan oleh angin, yang tidak begitu berpengaruh kepada struktur pelengkung. Apabila angin bertiup di atas atap, akan timbul gaya isap. Apabila besar isapan akibat angin ini melampaui beban mati struktur atap itu sendiri, maka permukaan atap akan mulai naik. Pada saat atap mulai naik dan bentuknya menjadi sangat berubah, gaya di atas atap akan berubah karena besar dan distribusi gaya angin pada suatu benda tergantung pada bentuk benda tersebut. Karena gaya angin berubah, maka struktur fleksibel tersebut akan berubah bentuk lagi sebagai respons terhadap beban yang baru ini. Proses ini akan terus berulang terus. Atap tersebut tidak mempunyai bentuk yang tetap, tetapi akan bergerak, atau bergetar, selama angin ada.

Cara yang lebih teliti untuk memahami efek angin adalah dengan mempelajari fenomena getaran pada kabel.

Semua struktur gantungan (dan juga struktur-struktur lain) mempunyai frekuensi alami getaran apabila mengalami gaya eksternal. Apabila gaya dinamis eksternal yang bekerja pada struktur memiliki frekuensi dalam jangkauan frekuensi alamiah struktur tersebut, maka akan timbul getaran dimana pada keadaan tersebut frekuensi gaya pemaksa dan frekuensi alami struktur sama, kondisi yang disebut resonansi. Pada keadaan resonansi, struktur mengalami getaran yang sangat besar dan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur.

Frekuensi alami kabel gantung diberikan oleh  $f_n = \frac{N\pi}{L} \sqrt{\frac{T}{w/g}}$ , dengan L adalah panjang kabel, N adalah bilangan bulat,  $w$  adalah beban per satuan panjang, T adalah gaya tarik kabel, dan g adalah percepatan gravitasi bumi.

- a. Tiupan angin di atas permukaan atap yang melendut menyebabkan terjadinya gaya isapan. Gaya isapan ini menyebabkan atap fleksibel cembung ke atas.
- b. Pada saat atap berubah bentuk sebagai akibat gaya isapan, efek angin terhadap bentuk baru menjadi gaya tekan (bukan isap). Hal ini menyebabkan atap bergerak ke bawah lagi.
- c. Pada saat atap bergerak ke atas dan ke bawah, efek angin adalah tekan dan isap secara bergantian. Sebagai akibatnya terjadi getaran konstan pada atap.

Resonansi pada kabel akan terjadi apabila gaya pemaksa eksternal mempunyai frekuensi yang benar-benar sama dengan frekuensi alami kabel. Pada struktur kabel, frekuensi gaya angin sering kali dekat dengan frekuensi struktur kabel. Ada beberapa cara untuk mengatasi masalah getaran akibat gaya angin. Salah satunya adalah memperbesar beban mati pada atap, sehingga memperbesar gaya tarik kabel dan mengubah frekuensi alamiahnya. Cara lain dengan memberikan kabel *guy* sebagai anket pada titik-titik tertentu untuk mengikat struktur ke dalam tubuh tanah. Ada pula yang menggunakan kabel menyilang atau sistem kabel ganda.

## 1.4 DESAIN STRUKTUR KABEL

Struktur kabel lebih tepat dikategorikan sebagai struktur gantungan (suspension structure) atau *cable-stayed structure*. Struktur gantungan umumnya dapat dibagi atas beberapa kelompok, yaitu (1) struktur berkelengkungan tunggal, yaitu yang dibuat dengan meletakkan kabel-kabel sejajar, menggunakan permukaan yang dibentuk oleh balok-balok atau plat yang membentang di antara kabel-kabel; (2) struktur kelengkungan ganda, yaitu menggunakan kabel-kabel menyilang dan berkelengkungan saling berlawanan serta membentuk permukaan atap utama; dan (3) struktur kabel ganda, yaitu kabel ganda yang berkelengkungan saling berlawanan digunakan pada satu bidang vertikal. *Cable-stayed structure* pada umumnya menggunakan elemen struktur vertikal atau miring dengan kabel lurus membentang ke titik-titik kritis, atau ke elemen struktur yang membentang secara horizontal.

### 1.4.1 Kabel Gantung Sederhana

Prinsip-Prinsip Umum. Sistem kabel gantung dapat mempunyai bentang sangat besar. Untuk kondisi pembebanan dan bentang yang diberikan, masalah desain paling utama adalah penentuan proporsi geometri kabel yang dinyatakan dalam rasio (perbandingan) sag banding bentang. Gaya-gaya kabel, panjang, dan diameter tergantung pada rasio ini. Gaya-gaya pada struktur penutupan kabel, juga ukurannya, dipengaruhi rasio tersebut. Sistem kabel gantung sederhana

peka terhadap getaran akibat angin, yang di masa silam telah menyebabkan gagalnya beberapa struktur kabel. SAG KABEL. Gaya-gaya kabel pada struktur, juga ukurannya, sangat tergantung pada besar sag (simpangan) atau tinggi relatif terhadap bentang struktur.

Penentuan sag pada kabel atau tinggi pada pelengkung merupakan masalah optimisasi. Apabila  $h_{maks}$  bertambah, gaya pada kabel berkurang sehingga luas penampang yang diperlukan juga berkurang.

Sekalipun demikian, sag atau peninggian selalu tergantung pada kandungan menyeluruh seperti kabel itu ketika digunakan (meliputi juga desain struktur penumpunya). Kebanyakan struktur tabel yang digunakan dalam gedung mempunyai perbandingan sag/bentang antara 1:8 dan 1 : 10.

ELEMEN-ELEMEN PENUMPU. Selain kabel atap aktual, elemen struktural lain (misalnya masts, dan kabel guy) diperlukan untuk membuat struktur gedung.

Pada desain elemen penumpu, kita dapat menggunakan fondasi yang langsung menyerap reaksi horizontal atau dengan menggunakan batang tekan tambahan yang memikul gaya tersebut. Meskipun desain fondasi yang dapat menyerap gaya vertikal dan horizontal merupakan masalah yang tidak mudah, hal ini dapat dilakukan, tergantung pada kondisi tanah dan kondisi-kondisi fondasi lainnya. Penggunaan batang horizontal tidak banyak dilakukan karena panjangnya tak menumpu (*unbraced*) batang tersebut yang lebih memungkinkan terjadinya tekuk. Sebagai akibatnya ukuran batang tekan menjadi sangat besar sehingga penggunaannya menjadi tidak efisien.

#### 1.4.2 Sistem Kabel Ganda

Sistem kabel ganda adalah desain yang menarik dan merupakan jawaban atas kesulitan yang ada dalam mengontrol getaran akibat angin pada sistem kabel gantung sederhana. Suatu struktur kabel ganda umumnya terdiri atas dua pasang kabel struktur dan elemen tekan atau tarik yang berperan bersama dalam memikul gaya eksternal. Pada sistem cekung ganda, pemberian pratarik dilakukan dengan melalui kabel tie-back. Pada sistem cembung, kabel atas dan bawah diberi pratarik secara internal.

Frekuensi alami sistem kabel itu berkaitan dengan kombinasi setiap frekuensi kabel, dan nilainya lebih besar dari nilai setiap frekuensi. Apabila frekuensi kombinasi ini dapat dijadikan sedemikian besar dengan desain yang benar, maka akan timbul efek peredam yang dapat meredam getaran akibat angin tanpa terjadi bahaya sedikit pun pada sistem struktur.

#### 1.4.3 Struktur Cable-Stayed

Struktur cable-stayed adalah struktur yang mempunyai sederetan kabel linier dan memikul elemen horizontal kaku (misalnya balok atau rangka batang).

Pada struktur cable-stayed, beban eksternal dipikul bersama oleh sistem kabel dan elemen primer yang membentang dan berfungsi sebagai balok atau rangka batang. Jumlah kabel yang digunakan tergantung pada ukuran dan kekakuan batang yang terbentang. Kabel dapat berjarak dekat, sehingga balok atau rangka batang yang digunakan dapat berukuran relatif kecil. Atau, jarak antara kabel tersebut lebih jauh sehingga balok atau rangka batang yang lebih besar dan lebih kaku harus digunakan. Umumnya, struktur cable-stayed

digunakan apabila bentang yang ada melebihi yang mungkin untuk pemakaian balok atau rangka batang dalam memikul berat sendiri.

Pendekatan awal yang berguna untuk mendesain kabel dan sistem penyangga adalah dengan mengabaikan kekakuan balok atau rangka batang dan menganggap sistem kabel yang memikul seluruh beban. Sudut yang dibentuk antara kabel dan arah beban memegang peranan penting. Sudut yang dangkal perlu dihindari karena kabel tidak memberikan kekakuan yang cukup dalam memikul balok, dan gaya yang timbul dalam kabel akan menjadi sangat besar.

## **1.5 ANALISIS DAN DESAIN PELENGKUNG**

### **1.5.1 Pelengkung Bata**

Pelengkung mempunyai riwayat perkembangan sendiri. Pelengkung bata mendasarkan kemampuan pikul bebannya pada bentuk geometri yang lengkung, yang hanya menyebabkan terjadinya gaya tekan pada balok-balok yang berdekatan. Bata secara alami tidak mampu menahan tegangan tarik, yang pada akhirnya dapat menyebabkan retak mendadak dan ketidakstabilan pada seluruh struktur. Untuk mencapai keruntuhan pelengkung bata, perlu ada mekanisme runtuh yang terdiri atas lebih dari satu retak. Perubahan bentuk secara nyata akan menyertai mekanisme runtuh tersebut. Banyak keruntuhan yang disebabkan oleh gerakan lateral pada dasar pelengkung yang dipengaruhi oleh gaya horizontal pada pelengkung.

Analogi umum pelengkung adalah kabel terbalik yang berarti struktur pelengkung tersebut adalah kabel terbaik. Akan tetapi bentuk pelengkung bata jarang yang benar-benar mengikuti bentuk funicularnya. Tentu saja, pelengkung bata setengah lingkaran bukan parabolik. Hal ini akan menyebabkan terjadinya lentur beserta perubahan bentuk pada struktur dan pada gilirannya menimbulkan tegangan tarik, dan akhirnya retak.

Beban utama pada pelengkung bata umumnya berupa berat bata itu sendiri. Beban tak biasa pada pelengkung, dapat menyebabkan lentur yang membahayakan. Pembebanan seperti ini harus dihindari, kecuali apabila pelengkung tersebut memang didesain secara khusus untuk memikulnya.

### **1.5.2 Pelengkung Kaku Parabolik: Beban Terdistribusi Merata**

Dengan adanya bahan baja dan beton bertulang, kekakuan elemen bahan tersebut memungkinkan adanya pelengkung dengan bentuk yang beraneka ragam dan dapat memikul beban tak terduga tanpa runtuh. Pelengkung kaku modern sering dibentuk berdasarkan responsnya terhadap kondisi pembebanan dan memikul beban secara tekan apabila beban tersebut benar-benar bekerja. Pelengkung kaku sangat berbeda dengan kabel fleksibel.

Untuk kondisi beban terdistribusi merata, bentuk pelengkung kaku idealnya adalah parabolik. Jenis kondisi tumpuan yang ada (sendi atau jepit) juga sangat mempengaruhi besar lentur yang terjadi. Pelengkung jepit menimbulkan momen lentur di tumpuan yang relatif sulit dihitung besarnya.

### **1.5.3 Pelengkung Funicular: Beban Terpusat**

Bentuk eksak struktur funicular yang dapat memikul semua beban secara aksial tekan dapat ditentukan untuk kondisi pembebanan lain. Untuk sederetan beban terpusat, bentuk strukturnya dapat ditentukan dengan metode yang telah dibahas untuk mencari bentuk kabel. Tinggi maksimum ditentukan, dan tinggi

– tinggi lain sehubungan dengan beban – beban lainnya dihitung berdasarkan efek rotasional pada potongan benda bebas terhadap sembarang titik pada lengkung sama dengan nol (karena tidak ada momen).

#### 1.5.4 Pelengkung Tiga Sendi

Cara mempelajari perilaku struktur pelengkung, sangat berguna untuk meninjau terlebih dahulu bentuk khusus jenis struktur tersebut, yaitu pelengkung tiga sendi. Struktur ini bisa dapat dan tidak bisa dapat berupa struktur funicular, tergantung pada bentuknya. Pelengkung dan kabel yang kita periksa sebelum semua diasumsikan berbentuk funicular. Karena tidak ada momen lentur internal, jumlah momen – momen rotasional oleh gaya eksternal yang bekerja dan reaksi – reaksi pada sembarang bagian batang (elemen) pada struktur berbentuk funicular harus total nol. Jika tidak berbentuk funicular, kondisi keseimbangan momen di bawah aksi gaya eksternal yang bekerja dan reaksi-reaksi hanya ada pada sendi-sendi di mana rotasi bebas dibolehkan terjadi. Contohnya adalah kasus dengan pelengkung tiga sendi.

Pelengkung tiga sendi dapat berupa struktur yang terdiri atas dua bagian kaku yang saling dihubungkan oleh sendi dan mempunyai tumpuan sendi. Apabila kedua segmen tidak membentuk funicular untuk satu kondisi beban, dan ini juga memang umum terjadi. Sebutan “pelengkung” tentunya agak keliru. Meskipun demikian, sebutan “pelengkung” pada struktur tiga sendi ini masih secara umum digunakan, baik untuk yang bentuknya funicular maupun yang tidak.

#### 1.5.5 Desain Struktur Pelengkung

**MASALAH BENTUK UMUM.** Sebagaimana telah disebutkan ada hubungan yang erat antara bentuk struktur dan kondisi beban dan tumpuan apabila strukturnya berperilaku secara funicular (maksudnya memikul gaya internal tarik atau tekan saja). Apabila bentuk struktur berkaitan dengan bentuk funicular untuk pembebanan yang ada, tidak ada lentur signifikan yang tidak diinginkan pada batang. Suatu pelengkung yang memikul beban terdistribusi merata harus berbentuk parabolik apabila diinginkan untuk berperilaku secara funicular. Bentuk-bentuk lain untuk beban-beban lain juga dapat saja dicari. Hal ini tidak berarti bahwa “bentuk nonfunicular” tidak dapat digunakan. Bentuk nonfunicular boleh saja digunakan dengan konsekuensi bahwa lentur terjadi dan ukuran serta bentuk elemen struktur harus diperbesar.

**MASALAH TIGA SENDI.** Prinsip-prinsip yang disebutkan di atas berlaku untuk pelengkung tiga sendi juga. Sekalipun demikian, adalah berguna apabila kita memandang struktur ini dari sudut pandang yang sedikit berbeda dalam rangka mempelajari hal-hal yang ada di dalamnya.

Bergantung pada beban yang bekerja, struktur itu dapat didesain untuk memikul momen lentur yang timbul. Meskipun demikian, dari tinjauan desain kita lebih menginginkan desain yang meminimumkan atau bahkan mengeliminasi momen lentur.

**DESAIN TERHADAP VARIASI BEBAN.** Salah satu dari aspek penting pada pelengkung modern adalah bahwa struktur dapat di desain untuk menahan sejumlah tertentu variasi beban tanpa terjadi perubahan bentuk yang mencolok maupun kerusakan. Hanya pelengkung yang di desain dengan material kaku, seperti bahan atau beton bertulang, yang mempunyai kemampuan demikian.

Bentuk pelengkung biasanya ditentukan terlebih dahulu berdasarkan kondisi beban utama (misalnya parabolik untuk beban terdistribusi merata). Apabila ada beban lain yang bekerja pada pelengkung, akan timbul momen lentur sebagai tambahan pada gaya aksial.

Aspek penting yang perlu diketahui ialah bahwa merancang elemen struktur kaku untuk memikul momen lentur biasanya akan menghasilkan ukuran elemen struktur yang sangat sensitive terhadap momen lentur yang timbul. Semakin besar momen lentur, maka desain tersebut tidak layak lagi. Dengan demikian, tinjauan desain yang perlu dilakukan adalah menentukan kembali bentuk pelengkung yang dapat memberikan momen lentur minimum untuk segala kondisi pembebanan yang mungkin. Bagaimana pun, momen lentur selalu ada karena satu bentuk hanya merupakan funicular untuk satu kondisi beban, juga bahwa besar momen lentur yang timbul pada suatu titik struktur semula berbanding langsung dengan deviasi titik tersebut ke bentuk funicular. Hal ini sangat penting diperhatikan dalam desain.

**ELEMEN-ELEMEN PENUNJUK.** Seperti pada kabel, masalah dasar dalam desain pelengkung ialah apakah sistem yang memikul gaya horizontal pada ujung-ujungnya itu batang horizontal atau pondasi. Apabila mungkin, penggunaan batang horizontal sering dilakukan. Karena batang horizontal pada struktur ini merupakan batang tarik, maka batang ini sangat efisien dalam memikul gaya horizontal ke luar yang tadi pada ujung pelengkung yang dibebani. Dengan demikian, pondasi hanya diperlukan untuk memikul reaksi vertikal dan dapat di desain dengan cara yang relatif lebih sederhana dibandingkan dengan yang harus memikul juga gaya horizontal.

Elemen vertikal sebagai sistem penunjang pada pelengkung sangat jarang dilakukan, tidak seperti pada kabel. Apabila mungkin, pelengkung langsung diletakkan di atas tanah tanpa harus ada elemen vertikal dulu. Batang yang ditanam di dalam tanah dapat digunakan yang memudahkan desain pondasi. Apabila pelengkung harus digunakan di atas elemen vertikal, maka elemen vertikal ini harus mampu memikul momen akibat gaya horizontal dari pelengkung.

**PEMILIHAN KONDISI UJUNG.** Pada desain struktur pelengkung kaku, penentuan bagaimana kondisi pada ujung adalah hal yang cukup penting. Ada tiga jenis utama pelengkung berdasarkan kondisi ujungnya, yaitu pelengkung tiga sendi, pelengkung dua sendi, dan pelengkung jepit (lihat Gambar 5-22). Pembahasan kita lebih banyak terpusat pada pelengkung tiga sendi karena jenis pelengkung inilah yang statis tertentu. Reaksi, gaya-gaya pada titik hubung, momen serta gaya internal pada pelengkung tiga sendi dapat diperoleh dengan menerapkan secara langsung persamaan keseimbangan. Sedangkan analisis pelengkung dua sendi serta pelengkung jepit hanya didasarkan atas keseimbangan statis. Analisisnya di luar jangkauan buku ini.

Apabila di desain sebagai bentuk yang funicular untuk suatu jenis beban, perilaku ketiga jenis struktur pelengkung kaku sama saja terhadap beban tersebut. Perbedaan yang ada hanyalah pada kondisi ujung (tumpuan) yang dipakai. Gaya tekan internal yang timbul sama saja. Sekalipun demikian, apabila faktor-faktor lain ditinjau, akan muncul perbedaan nyata. Faktor-faktor yang penting meliputi efek *settlement* (penurunan) tumpuan, efek perpanjangan atau pemendekan elemen struktur akibat perubahan temperatur, dan besar relatif defleksi akibat beban..



Perbedaan kondisi ujung dikehendaki untuk menghadapi fenomena yang berbeda. Adanya sendi pada struktur sangat berguna apabila settlement tumpuan dan efek termal diperhitungkan karena ujung sendi itu memungkinkan struktur tersebut berotasi terhadap titik sendi tersebut secara bebas. Apabila pada tumpuan yang digunakan adalah jepit, fenomena itu akan menyebabkan terjadinya momen lentur. Sekalipun demikian, pelengkung jepit dapat melendut lebih kecil dibandingkan dengan jenis pelengkung lainnya apabila dibebani.

Penentuan kondisi tumpuan yang akan digunakan harus dilakukan berdasarkan kondisi desain yang ada dan dengan memperhitungkan mana kondisi yang dominan. Yang sering digunakan adalah pelengkung dua sendi karena jenis struktur ini menggabungkan keuntungan yang ada pada kedua jenis pelengkung lainnya tanpa menggabungkan kerugian kedua-duanya.

**PERILAKU LATERAL PADA PELENGKUNG.** Tinjauan desain utama adalah bagaimana mengatasi perilaku pelengkung pada arah lateral. Jelas bahwa pada umumnya pelengkung yang terletak pada satu bidang vertikal harus dicegah dari goyangan lateral. Ada dua mekanisme yang umum dipakai untuk mencegah hal ini. Salah satunya adalah dengan menggunakan tumpuan jepit.

Penggunaan tumpuan jepit untuk mencegah ketidakstabilan lateral juga memerlukan fondasi pasif agar guling tidak terjadi. Cara lain memperoleh kestabilan lateral ialah dengan menggunakan elemen struktur lain yang dipasang secara transversal terhadap pelengkung tersebut. Sepasang pelengkung di tepi-tepi struktur lengkap dapat distabilkan dengan menggunakan elemen-elemen diagonal. Pelengkung interior dapat distabilkan dengan cara menghubungkannya dengan pelengkung lainnya dengan menggunakan elemen struktur transversal.

Masalah kedua yang penting ialah masalah tekuk lateral karena gaya lengkung biasanya tidak terlalu besar, desain pelengkung dengan menggunakan material bermutu tinggi (misalnya baja) akan menghasilkan elemen yang relatif langsing.

## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	i
1.1. PENGANTAR STRUKTUR FUNICULAR.....	1
1.2. PRINSIP- PRINSIP UMUM BENTUK FUNICULAR.....	2
1.3. ANALISIS DAN DESAIN STRUKTUR KABEL.....	2
1.3.1    Pendahuluan.....	2
1.3.2    Struktur Kabel Gantung Beban- beban Terpusat.....	2
1.3.3    Kabel Tergantung Beban- beban Terdistribusi Merata...	5
1.3.4    Persamaan Funicular Umum.....	5
1.3.5    Panjang Kabel.....	5
1.3.6    Efek Angin.....	5
1.4. DESAIN STRUKTUR KABEL	
1.4.1    Kabel Gantung Sederhana.....	6
1.4.2    Sistem Kabel Ganda.....	7
1.4.3    Struktur Cable- Stayed.....	7
1.5. ANALISIS DAN DESAIN PELENGKUNG	
1.5.1    Pelengkung Bata.....	8
1.5.2    Pelengkung Kaku Parabolik.....	8
1.5.3    Pelengkung Funicular.....	8
1.5.4    Pelengkung Tiga Sendi.....	9
1.5.5    Desain Struktur Pelengkung.....	9
DAFTAR PUSTAKA.....	10

## DAFTAR PUSTAKA

- L Schodek, Daniel, *Struktur*, Gramedia Pustaka Jakarta, 1991  
Sutrisno, *Arsitektur Modern*, Gramedia, 1984